

Modèle éléments finis 2D de la machine asynchrone de la Tesla Model S

Robin THOMAS¹, Lauric GARBUIO¹, Laurent GERBAUD¹, Hervé CHAZAL¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2ELab, F-38000 Grenoble, France

RESUME – Tesla Motors Inc. a su s'imposer en quelques années comme l'un des principaux constructeurs de véhicules électriques au monde. La Tesla Model S, son premier véhicule phare, suscite toujours aujourd'hui l'intérêt et la curiosité des ingénieurs de par l'approche innovante mais aussi les secrets technologiques du constructeur, notamment autour de l'utilisation d'un moteur asynchrone dans une voiture électrique de grande série. L'objectif de cet article est donc d'étudier les caractéristiques de la machine asynchrone de la Tesla Model S afin d'en proposer une modélisation par éléments finis 2D. Pour cela, les différentes données nécessaires sont rassemblées, complétées et présentées selon leur niveau d'incertitude. Ensuite, un modèle de la machine est réalisé sous le logiciel *Altair Flux2DTM*. Il est alors validé en s'appuyant sur les performances mesurées ou calculées disponibles dans la littérature.

Mots-clés—*machine asynchrone à cage d'écureuil, modélisation éléments finis 2D, Tesla Model S*

1. INTRODUCTION

TESLA, Inc. est devenu en l'espace de quelques années l'un des constructeurs phare du marché de l'automobile dans le secteur électrique. Ce succès s'explique notamment par les multiples innovations technologiques réalisées par l'entreprise, que ce soit au niveau des batteries ou de la motorisation. Dans ce contexte, le constructeur américain a fait le choix peu commun pour sa Model S, voiture électrique la plus vendue au monde en 2015 et 2016 [1], d'utiliser une machine asynchrone. En effet, bien que la machine asynchrone présente de nombreux avantages, tels que sa robustesse, sa facilité d'entretien ou encore son plus faible prix, elle a également un moins bon rendement ainsi qu'une puissance massique moins bonne que celle de la machine synchrone à aimants permanents, plus largement utilisée dans l'automobile [2], [3]. Pourtant, la Tesla Model S présente des performances impressionnantes en matière d'accélération ou d'autonomie, attisant la curiosité autour de sa conception [4], [5]. Bien que ces performances soient dues à l'ensemble du système d'entraînement électrique, nous ne nous intéresserons ici qu'à la machine asynchrone utilisée.

L'objectif de cet article est alors de rassembler et compléter les informations disponibles sur le fonctionnement et la géométrie de la machine asynchrone de la Tesla Model S60 afin de réaliser une modélisation par éléments finis 2D sous le logiciel *Altair Flux2DTM* qui soit représentative du comportement et des performances de la machine réelle. Le modèle proposé est ensuite simulé et les résultats obtenus pour les différents points de fonctionnement testés sont comparés aux

performances annoncées dans les différentes sources pour valider la modélisation.

2. METHODOLOGIE

2.1. Revue des informations disponibles

La plupart des informations permettant la réalisation du modèle de la machine sont trouvées dans la littérature. Les brevets de Tesla [6], [7], [8], [9] sont l'une des principales sources concernant la géométrie du stator et du rotor, avec divers ordres de grandeur sur les dimensions, ainsi que sur les différents bobinages possibles. Ces données ont également été étudiées et testées par différents auteurs afin d'obtenir des valeurs plus précises de ces différentes dimensions mais aussi afin de compléter certaines des informations manquantes [10], [11], [12]. D'autre part, les informations sur les performances générales fournies par Tesla ainsi que les résultats de tests sur bancs de rouleaux réalisés par certains propriétaires de Model S [13] et disponibles en ligne permettent d'obtenir des valeurs de performances en sortie de la machine qui sont alors utilisées en tant que références pour comparer les résultats des différentes simulations et valider le modèle.

2.2. Incertitudes sur les données

Toutes les données nécessaires à la réalisation du modèle n'étant pas disponibles, les éléments manquants ont été complétés en s'appuyant sur d'autres références bibliographiques ou sur différentes hypothèses et méthodes de calcul analytique. Nous avons alors présenté ces informations dans la suite de cet article en indiquant le niveau d'incertitude associé : éléments connus avec certitude (++), éléments non connus mais raisonnablement remplacés en s'appuyant sur la littérature (+) et éléments non connus mais remplacés avec plusieurs hypothèses et une plus forte incertitude (-). Afin de valider les données les moins certaines, nous les avons testées au cours des différentes simulations et nous avons validé leurs valeurs en comparant les résultats obtenus à ceux présentés dans la littérature.

3. DONNEES DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DE LA TESLA MODEL S

3.1. Données générales

Ainsi, la machine utilisée par Tesla pour son modèle « standard » initial, la Model S 60, est une machine asynchrone à cage d'écureuil triphasée à 4 pôles [10]. La version étudiée de la Model S peut fournir jusqu'à 225 kW, avec un couple

maximum de 430 Nm et peut fonctionner jusqu'à une vitesse de rotation de 15 000 tr/min. La machine possède 60 encoches statoriques et 74 barres rotoriques, comme cela est représenté sur la figure 1.

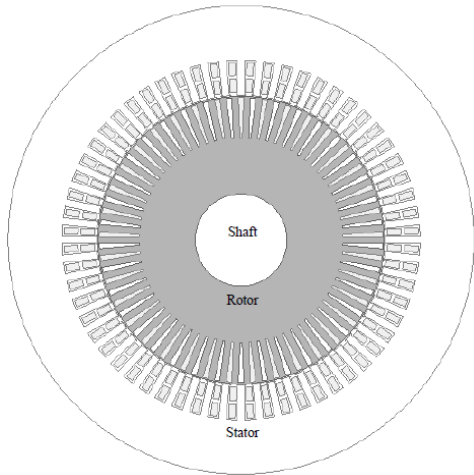


Fig. 1. Vue axiale de la machine asynchrone de la Tesla Model S [12]

3.2. Données géométriques

Comme cela a été présenté précédemment, les brevets de Tesla constituent la principale source d'informations, notamment sur la géométrie de la machine, car ils présentent plusieurs ratios et gammes de valeurs [6], [7]. Ainsi, certaines valeurs sont données et permettent de déduire les autres grandeurs associées. Ce travail a également été réalisé par d'autres auteurs dans la littérature [11], [12]. Nous utilisons ces dernières valeurs comme point de départ puis, en nous appuyant sur les résultats de simulations et en les comparant aux valeurs de référence, nous ajustons certaines dimensions afin d'obtenir des résultats et performances les plus proches possibles des valeurs réelles. En effet, bien que les valeurs obtenues par cette méthode puissent différer légèrement des valeurs exactes du moteur réel, l'objectif de cet article est de présenter un modèle qui permette d'obtenir des résultats suffisamment proches de la réalité pour qu'il puisse être utilisé à d'autres fins, tels que de la pédagogie, de la rétro-ingénierie ou bien des projets de conception par optimisation.

Les valeurs géométriques utilisées pour ce modèle sont présentées dans le tableau 1 avec leur niveau d'incertitude, ainsi que sur la figure 2. Les dimensions principales sont connues avec une certaine confiance, tandis que les dimensions liées à la forme des encoches statoriques ou des barres rotoriques sont plus incertaines et ont été trouvées à l'aide de plusieurs essais de simulations et en utilisant les ratios fournis par Tesla.

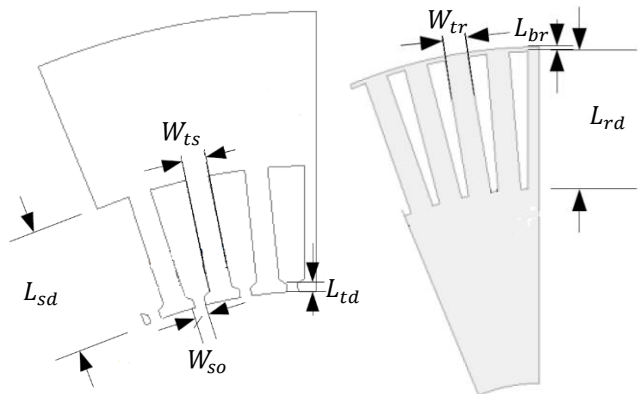


Fig. 2. Vue axiale des encoches statoriques et des barres de la cage rotorique avec leurs dimensions [12]

Tableau 1. Différentes dimensions de la machine asynchrone de la Tesla Model S avec le niveau d'incertitude associé (++ : plus haute certitude, + : certitude moyenne, - : faible certitude) [11], [12]

Nom du paramètre	Symbole utilisé	Valeur utilisée dans le modèle proposé	Niveau de certitude sur la valeur
Longueur de l'empilement de tôles	L	152 mm	++
Entrefer	e	0,5 mm	++
Stator			
Diamètre extérieur	D _{OS}	254 mm	++
Diamètre intérieur	D _{IS}	156,8 mm	++
Profondeur d'encoche	L _{sd}	19 mm	+
Largeur de l'ouverture d'encoche	W _{so}	2,9 mm	+
Profondeur de la pointe des dents	L _{td}	1 mm	+
Largeur des dents	W _{ts}	4,5 mm	+
Rotor			
Diamètre extérieur	D _{OR}	155,8 mm	++
Diamètre intérieur	D _{IR}	50 mm	++
Profondeur des barres	L _{rd}	19,6 mm	-
Largeur du pont d'encoche	L _{br}	0,55 mm	-
Largeur des dents	W _{tr}	4,5 mm	-

3.3. Données électriques

Le moteur est directement alimenté par un onduleur triphasé. La tension efficace du bus continu en amont de cet onduleur est de 366 V_{DC}, d'où une tension efficace maximale phase-neutre d'environ 150 V au stator de la machine. Le courant maximum d'alimentation est de 1273 A_{DC}, d'où une valeur efficace maximale de 900 A [11], [12].

Pour le bobinage, les brevets de Tesla décrivent plusieurs possibilités [8] qui ont été testées par certains auteurs [12] en simulation afin d'essayer de déterminer quelle est la configuration permettant d'atteindre les performances désirées, c'est-à-dire la meilleure force magnétomotrice possible sans obtenir pour autant une ondulation de couple trop importante. Tous les bobinages présentés sont à 5 encoches par pôle et par phase. De plus, afin d'obtenir un couple important, il faut que le facteur de bobinage soit très élevé. C'est pour cela que le bobinage sélectionné dans la littérature [8], [12], parmi ceux proposés par Tesla, est de type réparti, à 1 tour par bobine avec double couche et à pas raccourci d'une encoche seulement. De plus, les têtes de bobines sont montées concentriques. En effet, un bobinage concentrique permet d'obtenir une plus forte force électromotrice induite mais entraîne également l'apparition d'harmoniques et de bruits, d'où des formes d'ondes moins sinusoïdales. Cependant, l'utilisation d'un pas raccourci permet de réduire, voire supprimer, certains harmoniques [14], en l'occurrence ici l'harmonique de rang 15. Ainsi, ces différents atouts permettent de faire de ce bobinage le seul, parmi ceux présentés dans le brevet [12], permettant d'atteindre les performances désirées en limitant les ondulations de couple. Les coefficients de distribution, de raccourcissement et finalement de bobinage sont calculés et les valeurs sont indiquées dans le tableau 2. La disposition du bobinage est présentée sur la figure 3. Les conducteurs utilisés sont des torons composés de 26 brins de 1,08 mm de diamètre avec une isolation individuelle de 0,074 mm [10].

2 nd Layer (in bold & italics)														Slot															
Upper	A1	A1	C3	C3	C4	C4	C4	B4	B4	B1	B1	B1	A1	A1	A2	A2	C4	C4	C1	C1	C1	B1	B1	B2	B2	B2	A2	A2	A2
Lower	A1	A1	C3	C3	C4	C4	B4	B4	B4	B1	B1	B1	A1	A1	A2	A2	C4	C4	C1	C1	C1	B1	B1	B2	B2	B2	A2	A2	A2

		Slot																													
Upper	A3	A3	A3	C1	C1	C2	C2	B2	B2	B2	B3	B3	A3	A3	A4	A4	C2	C2	C3	C3	C3	B3	B3	B4	B4	A4	A4	A4	A4		
Lower	A3	A3	C1	C1	C2	C2	B2	B2	B2	B3	B3	B3	A3	A3	A4	A4	C2	C2	C3	C3	C3	B3	B3	B4	B4	A4	A4	A4	A4		

Fig. 3. Disposition du bobinage statorique de la machine étudiée [8]

Chaque phase peut être séparée en 4 pôles et les deux paires de pôles sont réalisées avec deux conducteurs différents qui peuvent ensuite être connectés en parallèle afin de former une configuration triphasée ou bien qui peuvent rester séparés afin de former une configuration à 6 phases, comme présenté sur la figure 4. Ceci permet d'augmenter la tension résultante sur chaque bobinage et également de changer de configuration selon le système de commande désiré [11] mais aussi potentiellement pour des raisons de sécurité. En effet, en cas de destruction de l'un des enroulements en cours d'utilisation du véhicule, la machine pourrait tout de même continuer à fonctionner en mode dégradé afin d'assurer la sécurité des passagers.

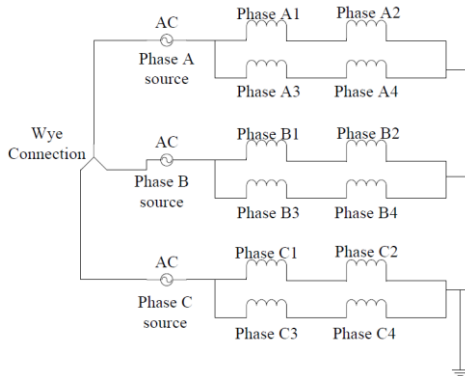


Fig. 4. Schéma électrique équivalent de la machine étudiée [8], [12]

Pour la modélisation de la machine, le schéma électrique équivalent doit être implémenté. Pour cela, nous créons un modèle équivalent basé sur celui présenté dans les brevets de Tesla [8] et visible sur la figure 4. La résistance statorique est calculée en utilisant la géométrie de la machine et des conducteurs et en considérant que le moteur fonctionne à une température de 150°C [11]. Les résistances et inductances de fuite des têtes de bobines statoriques et des anneaux de court-circuit de la cage d'écureuil n'étant pas connues, nous les estimons en prenant plusieurs hypothèses simplificatrices sur leur géométrie et en utilisant des méthodes de calcul analytique [14]. En effet, nous avons considéré que les barres de la cage dépassaient suffisamment de l'empilement de tôles rotoriques pour que les anneaux de court-circuit soient considérés comme des bobines à air. D'autre part, les fuites des têtes de bobines sont calculées à l'aide de la formule d'Arnold sur la perméance des fuites des têtes de bobines d'une encoche [14]. Finalement, ces différents composants sont connectés à une source de tension ou de courant triphasée selon le type de simulations désiré. Les valeurs obtenues pour ces composants dans la configuration à 6 phases, identique à celle indiquée en figure 4, sont présentées dans le tableau 2. Enfin, ces 6 phases sont connectées en parallèle de sorte à former 3 phases comme attendu. Le couplage de la machine est en étoile [8].

Tableau 2. Paramètres du bobinage utilisé et valeurs des composants du schéma électrique équivalent avec le niveau d'incertitude associé (++ : plus haute certitude, + : certitude moyenne, - : faible certitude) [12], [14]

Nom du paramètre	Symbole utilisé	Valeur utilisée dans le modèle proposé	Niveau de certitude sur la valeur
Bobinage			
Nombre de spires	N	5	+
Nombre d'encoches par pôle et par phase	/	5	+
Angle électrique de raccourcissement	γ	12 °	+
Coefficient de distribution	K_d	0,9567	+
Coefficient de raccourcissement	K_r	0,995	+
Coefficient de bobinage	K_b	0,9519	+
Nombre de brins par conducteur	/	26	+
Diamètre des brins	/	1,08 mm	+
Composants du schéma électrique (configuration à 6 phases)			
Résistance statorique	R_s	3,32 mΩ	+
Résistance des têtes de bobines	$R_{s_{end}}$	3,83 mΩ	-
Inductance de fuite des têtes de bobines	$L_{\sigma_{end}}$	0,71 μH	-
Résistance des anneaux de court-circuit de la cage (entre deux barres)	R_{cage}	0,27 μΩ	-
Inductance de fuite des anneaux de court-circuit de la cage (entre deux barres)	$L_{\sigma_{cage}}$	5 nH	-

3.4. Données sur les matériaux utilisés

Concernant les matériaux utilisés, le rotor de la machine est fait de cuivre. Celui-ci est plus cher et plus complexe à fabriquer que ceux en aluminium, usuellement utilisés dans des applications industrielles, car le processus nécessite de travailler à des températures et des pressions plus élevées puisque le cuivre fond à 1 083°C contre 670°C pour l'aluminium [15], [16]. En revanche, la moindre résistivité du cuivre permet de réduire comparativement les pertes Joules rotoriques et de produire des courants induits plus élevés, conduisant à un couple en sortie de machine plus important et une température du rotor plus faible.

Au stator, le matériau magnétique doux utilisé n'est pas directement connu. Ainsi, il est remplacé pour la modélisation par des tôles magnétiques à grains non-orientés M250-35A [11]. En effet, grâce à leurs hautes performances magnétiques et leur faible épaisseur, nous pouvons raisonnablement considérer que le matériau réellement utilisé présente des performances du même ordre de grandeur. La saturation ainsi que les pertes Fer dans les tôles magnétiques sont considérées dans ce modèle. Ces dernières sont calculées à l'aide d'un modèle de Bertotti déjà implémenté dans *Altair FluxTM*. La densité volumique de pertes s'exprime alors par :

$$dP_{tot} = k_h B^2 f + \sigma \frac{\pi^2 e^2}{6} B^2 f^2 + k_e \cdot 8,76 \cdot B^{1,5} f^{1,5} \quad (1)$$

Les propriétés principales de ces différents matériaux et les paramètres du modèle de Bertotti utilisé sont indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques principales des matériaux utilisés dans le modèle et coefficients du modèle de calcul des pertes Fer avec le niveau d'incertitude associé (++ : plus haute certitude, + : certitude moyenne, - : faible certitude) [17]

Nom du paramètre	Symbole utilisé	Valeur utilisée dans le modèle proposé	Niveau de certitude sur la valeur
Résistivité du cuivre (150°C)	$\rho_{Cu150^{\circ}C}$	$2,6.10^{-8} \Omega.m$	++
Epaisseur des tôles magnétiques	e	0,35 mm	+
Perméabilité relative initiale	μ_{rinit}	16 642	+
Perméabilité moyenne évaluée	μ_{rmoy}	5 114	+
Aimantation à saturation	J_{sat}	2 T	+
Masse volumique des tôles magnétiques	d	$7\,600\,kg.m^{-3}$	+
Conductivité électrique	σ	$1,82.10^6 \Omega^{-1}.m^{-1}$	+
Coefficient de pertes par hystérésis	k_h	$114,8\,W.s.T^{-2}.m^{-3}$	+
Coefficient de pertes par excès	k_e	$0,355\,W.s^{1,5}.T^{-1,5}.m^{-3}$	+

3.5. Données sur le système de refroidissement

Le système de refroidissement est composé de deux parties distinctes. Le stator est refroidi en utilisant un système classique de type enveloppe réfrigérante [11]. Pour le rotor, l'extraction de la chaleur est une problématique importante puisqu'elle est essentielle afin de limiter la résistivité de la cage rotorique, réduire les pertes et ainsi repousser les limites de fonctionnement afin d'atteindre les performances désirées. Pourtant, elle n'est pas aisée à mettre en place puisqu'elle concerne des pièces en rotation. Ainsi, Tesla a mis au point un système innovant de refroidissement [9], [11] permettant de faire circuler et guider un fluide réfrigérant au travers d'un réseau de canaux situés au sein de l'arbre mécanique. Ces canaux permettent de faire circuler le fluide le long de la paroi intérieure du rotor et venir ainsi extraire la chaleur produite. La figure 5 représente ces deux systèmes de refroidissement.

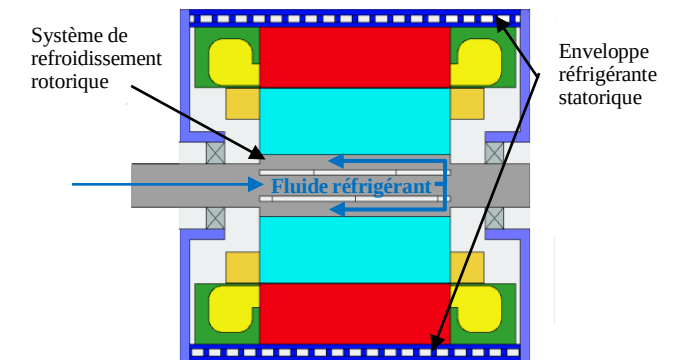


Fig. 5. Coupe transversale de la machine avec représentation du système de refroidissement [10]

4. MODELISATION ELEMENTS FINIS (EF) 2D

4.1. Hypothèses

L'ensemble des données collectées est alors utilisé dans un deuxième temps afin de réaliser une modélisation de la machine sous le logiciel *Altair Flux2D™* avec les hypothèses suivantes :

- Simulations paramétrées dans le but d'analyser l'évolution des différentes grandeurs en sortie de la machine (tension ou courant statoriques efficaces, puissance absorbée et utile, couple, rendement, facteur de puissance...) en fonction du glissement ;
- Etudes en conditions magnéto-harmoniques : régime permanent sinusoïdal à une fréquence imposée. La machine est alimentée par une source triphasée équilibrée ;
- Selon le point de fonctionnement étudié, la machine est alimentée par trois sources de courant ou de tension à fréquence donnée. En effet, à faible vitesse de rotation le courant est fixé à sa valeur maximale pour étudier cette limite de fonctionnement. A plus haute vitesse de rotation, c'est la tension qui est imposée. Les différents points de fonctionnement étudiés sont atteints en modifiant la valeur des couples (courant, fréquence) ou (tension, fréquence) ;
- Les pertes Joules statoriques et rotoriques sont considérées ainsi que les pertes fer qui sont estimées à l'aide d'un modèle de Bertotti dont les paramètres ont été présentés précédemment.

Cependant, ces hypothèses pourront être aisément modifiées ou adaptées par l'utilisateur selon ses besoins.

4.2. Modèle EF 2D

Le modèle de la machine asynchrone obtenu est représenté sur la figure 6. Les niveaux d'induction et les lignes de champ au point de fonctionnement à puissance maximale sont également visibles.

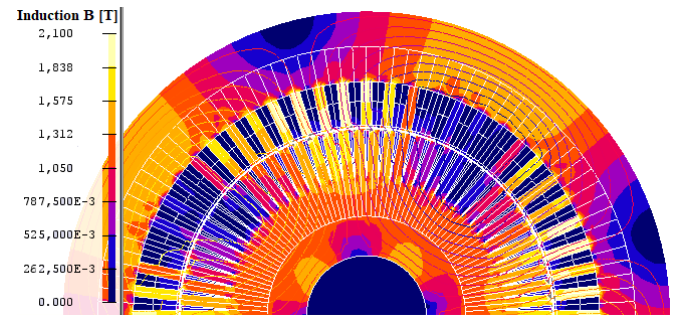


Fig. 6. Modèle EF 2D de la machine étudiée avec indication des niveaux d'induction et des lignes de champ au point de puissance maximale (l'échelle d'induction est limitée à 2,1T et les zones saturées apparaissent en gris)

Le modèle EF 2D est couplé avec le schéma électrique équivalent de la machine, comme montré sur la figure 7. Les bobinages statoriques et la cage d'écureuil, qui sont également modélisés en éléments finis, sont représentés en utilisant des éléments de couplage champ-circuit tels que des conducteurs bobinés (2) ou un composant « cage d'écureuil » (4). Ce schéma électrique permet de définir tous les éléments électriques « extérieurs » qui doivent être considérés, comme les sources de puissance ou les impédances des têtes de bobines.

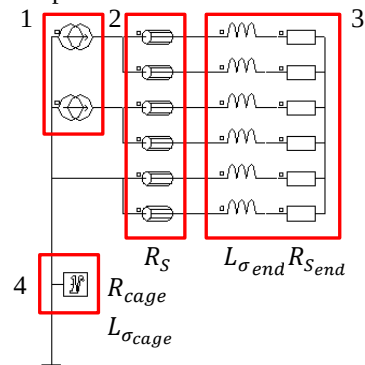


Fig. 7. Schéma électrique du modèle EF 2D de la machine étudiée avec (1) les sources de courant, (2) les éléments de couplage champ-circuit, (3) les impédances des têtes de bobines et (4) la cage d'écureuil

Le logiciel de simulation, *Altair Flux2D™*, va alors résoudre les équations de Maxwell en faisant appel à la méthode de Newton-Raphson pour résoudre le système d'équations non-linéaires à chaque itération sur la valeur du glissement. Pour chaque simulation menée, les différentes pertes, la puissance de sortie, le rendement ou encore le facteur de puissance sont calculés et comparés aux valeurs trouvées dans les références [11] et [12].

Les caractéristiques numériques du modèle EF réalisé sont présentées dans le tableau 4. A l'aide des symétries de la machine, le modèle est réduit à une demi machine.

Tableau 4. Caractéristiques numériques principales du modèle EF

Caractéristiques		Valeurs
Maillage	Nœuds	99 992
	Eléments linéaires	13 573
	Eléments surfaciques	49 927
Temps de simulation (pour 36 valeurs de glissement différentes)		45 min
PC, 8,00 Go RAM, Intel Core i7, 3,40 GHz, Windows 10		

4.3. Points de fonctionnement étudiés

Nous avons mené des simulations pour plusieurs couples (courant, fréquence) ou (tension, fréquence) afin d'étudier les principaux points de fonctionnement de la machine décrits dans la littérature, tel que le point de puissance maximale [12]. L'objectif est de trouver la stratégie de pilotage (cartographie moteur), à savoir les différentes valeurs de fréquence et de courant ou tension, qui permettent d'atteindre les performances désirées en sortie de machine (puissances, couple, rendement...) pour chaque point de fonctionnement étudié, puis de comparer ces valeurs aux valeurs théoriques. Pour chaque simulation, la caractéristique couple-vitesse $\Gamma(\Omega)$ est tracée. De plus, la courbe $\Gamma(\Omega)$ décrivant les limites de fonctionnement de la machine est calculée en considérant les limites en courant, puissance et tension [18]. Ensuite, ces limites de fonctionnement sont utilisées comme références pour notre modèle afin de vérifier s'il peut les atteindre avec les performances annoncées. Enfin, des cartographies du rendement et des pertes Joules de la machine sont tracées et comparées à celles trouvées dans la littérature [11], [12]. L'étude du point de puissance maximale, des limites de fonctionnement et de ces cartographies nous permettra finalement de valider cette modélisation de la machine asynchrone de la Tesla Model S.

5. RESULTATS ET VALIDATION DU MODELE

5.1. Résultats au point de puissance maximale

Le point de fonctionnement qui est le plus décrit dans la littérature, par exemple dans les références [11] et [12], est le point de fonctionnement à puissance de sortie maximale. Ainsi, c'est le premier que nous avons simulé afin de comparer les résultats obtenus avec les valeurs théoriques. La caractéristique $\Gamma(\Omega)$ est tracée sur le figure 8 et les principaux résultats obtenus sont détaillés dans le tableau 5 et comparés aux valeurs présentées dans le document [12].

Comme nous pouvons le voir, les résultats de simulation sont très proches des valeurs attendues. La principale différence se situe au niveau de la valeur du courant efficace statorique qui est plus élevée qu'en théorie. En effet, pour atteindre une puissance de sortie de 225 kW, nous avons dû imposer un courant

statorique efficace de 950 A et non pas 900 A. Cette différence peut s'expliquer par les différentes limites du modèle présenté qui seront détaillées dans la suite. Une simulation de ce point de fonctionnement a également été réalisée en conditions magnétiques transitoires en imposant, cette fois-ci, la tension statorique et les résultats obtenus sont légèrement différents. En effet, avec une tension efficace imposée de 97,45 V au stator, une fréquence de 166,7 Hz et une vitesse de rotation de 4 880 tr/min qui correspond à un glissement de 2,45%, la valeur efficace du courant résultant est de 880 A avec un couple moyen en sortie de 435 Nm.

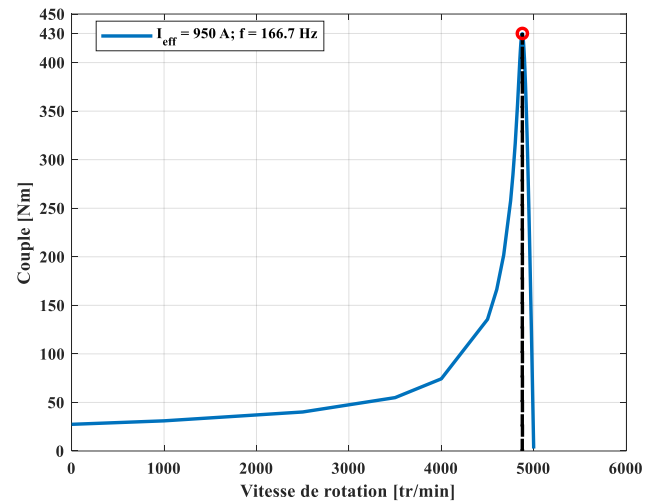


Fig. 8. Caractéristique Couple = f(Vitesse) au point de puissance maximale, avec les valeurs du courant statorique efficace I_{eff} et de la fréquence f

Tableau 5. Principaux résultats de simulation au point de puissance maximale et comparaison avec les principaux résultats de la littérature [11], [12]

Nom du paramètre	Résultat de simulation	Résultat présenté dans la littérature
Entrée de la machine		
Fréquence	166,7 Hz	/
Courant efficace statorique	950 A	900 A
Tension efficace statorique	97,45 V	/
Sortie de la machine		
Puissance utile	225 kW	225 kW
Couple	430 Nm	430 Nm
Glissement	2,45 %	/
Pertes Joules rotoriques	5,5 kW	/
Pertes Joules statoriques	9,7 kW	/
Pertes fer	365 W	/
Pertes totales	15,6 kW	> 12 kW
Rendement	93,4 %	93 – 94 %
Facteur de puissance	0,85	/

D'autre part, comme cela est montré sur la figure 6, la valeur de l'induction magnétique est comprise entre 0,2T et plus de 2T, correspondant au niveau de saturation des tôles magnétiques utilisées. A ce point de fonctionnement, les ingénieurs de Tesla annoncent dans leur brevet [7] les niveaux moyens et maximums d'induction au milieu de l'entrefer et au milieu des ponts d'encoques rotoriques. Ces valeurs sont comparées à celles obtenues en simulation dans le tableau 6.

Ainsi, les résultats obtenus au point de fonctionnement à puissance de sortie maximale sont similaires à ceux présentés dans les brevets de Tesla ou obtenus par différents auteurs [7], [11], [12].

Tableau 6. Comparaison des niveaux d'induction moyens et maximums au milieu de l'entrefer et au milieu des ponts d'encoches entre le modèle simulé et le brevet de Tesla [7] au point de fonctionnement à puissance maximale

Zones		Résultats de simulation	Résultats présentés dans le brevet de Tesla
Milieu de l'entrefer	Moyenne	0,74 T	0,8 T
	Max	1,78 T	1,6 T
Milieu des ponts d'encoches	Moyenne	1,5 T	1,8 T
	Max	2,55 T	2,4 T

5.2. Etude des limites de fonctionnement

Afin de savoir si le modèle présenté permet d'atteindre chacune des différentes limites décrites dans la littérature [18], plusieurs points de fonctionnement sont testés et présentés sur la figure 9 (points 1 à 4) avec la valeur du couple (courant, fréquence) ou (tension, fréquence) correspondante. En effet, il y a différentes façons d'atteindre un même point de fonctionnement avec une machine asynchrone, selon la fréquence, la tension ou le courant et le glissement. Ainsi, puisque nous ne connaissons pas la tension nécessaire pour atteindre un couple de 430 Nm dans la zone de fonctionnement à faible fréquence, les simulations sont faites en imposant le courant efficace statorique. Cependant, les points de fonctionnement 1 et 2 pourraient, par exemple, être atteints d'une autre manière, en imposant la valeur efficace de la tension, de sorte que les caractéristiques $\Gamma(\Omega)$ résultantes seraient différentes mais que les résultats obtenus en ces points précis seraient identiques, comme c'est le cas pour le quatrième point testé. Cependant, pour des hautes vitesses de rotation, les simulations sont réalisées en imposant la valeur de la tension car, ici, c'est la valeur du courant nécessaire pour atteindre les limites qui n'est pas connue. Les différentes limites en courant, puissance sont également tracées sur la figure 9.

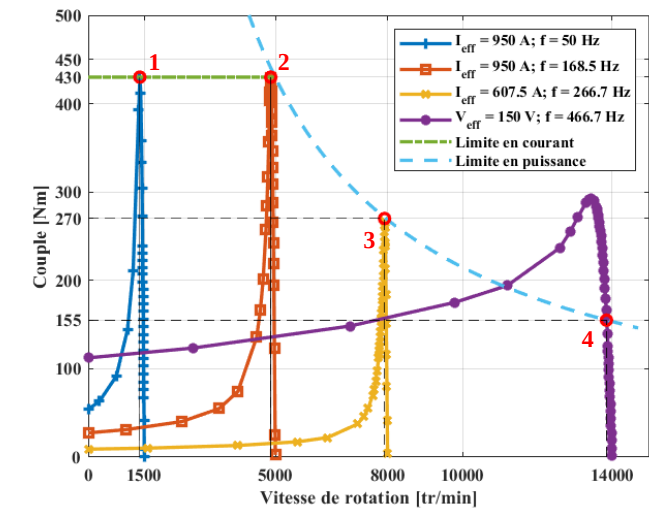


Fig. 9. Points de fonctionnement simulés et limites de fonctionnement de la machine avec indication des valeurs efficaces du courant I_{eff} ou de la tension V_{eff} ainsi que de la fréquence f

Ainsi, les limitations testées sont bien atteintes par le modèle avec des performances similaires à celles décrites dans l'article [18].

5.3. Cartographies de rendement et de pertes Joule

Enfin, des cartographies de rendement et des pertes Joules sont réalisées afin de pouvoir pleinement étudier et valider le modèle. Pour cela, nous avons simulé près de 180 couples (courant, fréquence) ou (tension, fréquence), pour 35 valeurs de glissement à chaque fois. Les points de fonctionnement

résultants sont placés dans le repère (vitesse de rotation, couple), puis nous les parcourons en comparant leur valeur de rendement avec celles des points avoisinants. Puisqu'il existe plusieurs manières d'atteindre un même point de fonctionnement, selon la tension ou le courant, la fréquence ou le glissement, le but est d'éliminer les points entraînant les moins bonnes valeurs de rendement pour des conditions de fonctionnement similaires afin de ne conserver que les points optimaux pour tracer la carte de rendement. En effet, nous supposons qu'en régime permanent, l'objectif de la commande de la machine réelle est de maximiser le rendement.

La précision de ces cartes peut paraître limitée, puisqu'il faut mener un grand nombre de simulations éléments finis pour couvrir précisément l'ensemble de la zone de fonctionnement. Cependant, nous utilisons tout de même cette méthode car elle permet de tracer des cartes de rendement approximatives que l'on peut comparer à celles présentées dans la littérature [11], [12] afin de valider le modèle présenté, avec un temps de simulation raisonnable au vu de la durée d'une simulation EF du modèle. La carte de rendement obtenue est présentée sur la figure 10. Les figures 11 et 12 représentent les cartes de « commande » correspondantes qui décrivent la valeur de la tension efficace statorique phase-neutre appliquée ainsi que du glissement afin d'atteindre les différents points « optimums » conservés.

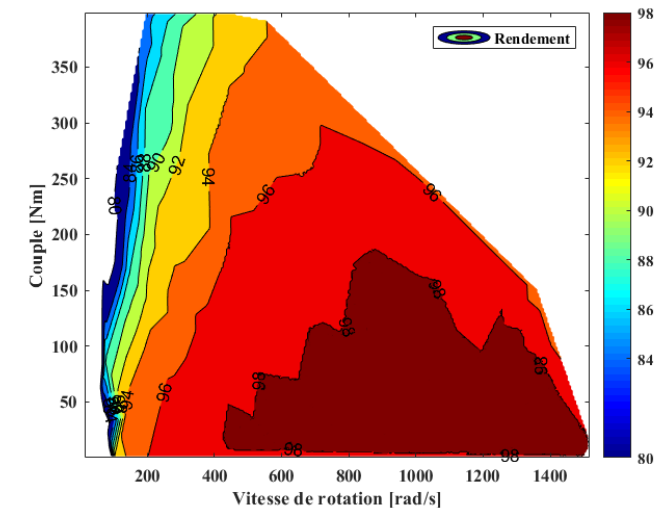


Fig. 10. Carte de rendement du modèle EF de la machine étudiée

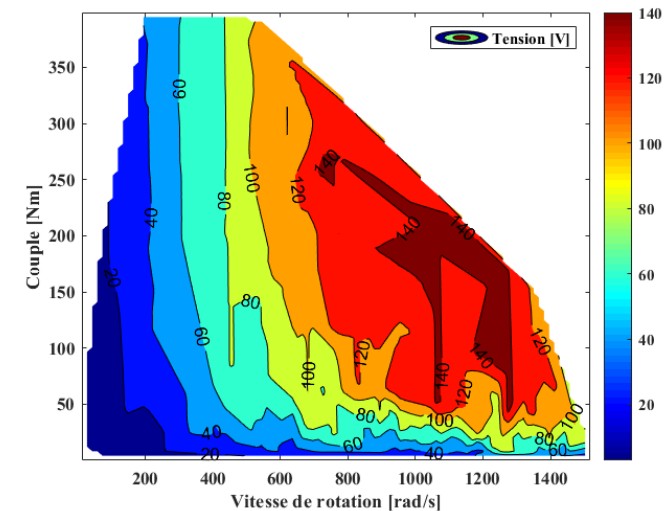


Fig. 11. Carte de commande décrivant la tension efficace phase-neutre appliquée au stator du modèle de la machine pour les points conservés

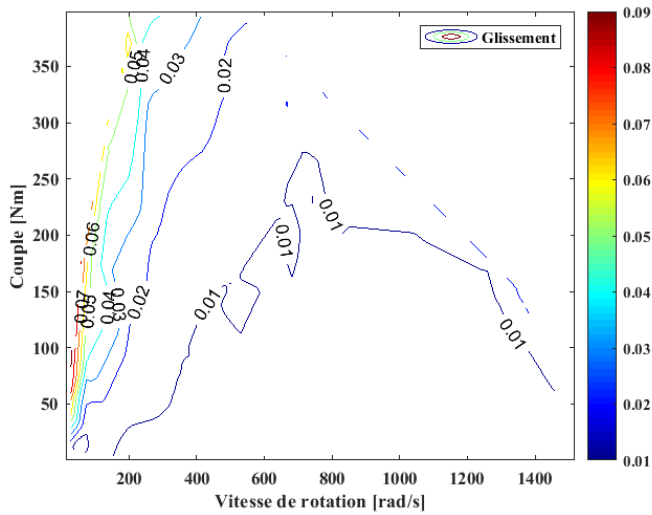


Fig. 12. Carte de commande décrivant la valeur du glissement pour les points de fonctionnement conservés

La comparaison entre la figure 10 et les cartes présentées dans les références [11] et [12] montre que la forme de la carte ainsi que les niveaux principaux de rendement correspondent. D'autre part, des cartes de la répartition des pertes totales entre le stator et le rotor sont également obtenues et présentées respectivement sur les figures 13 et 14.

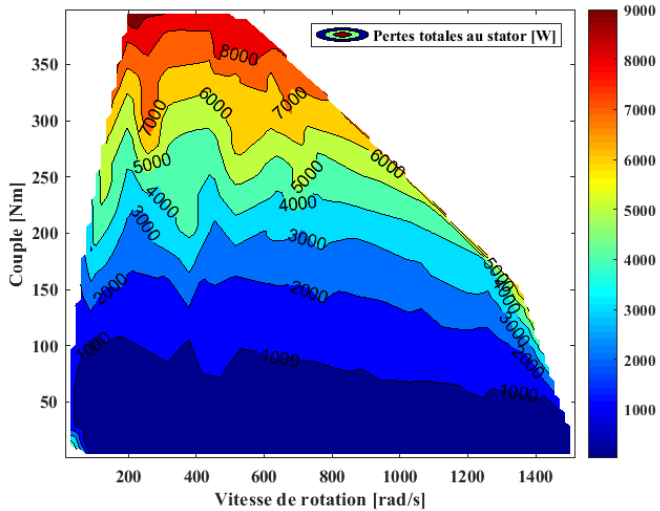


Fig. 13. Carte des pertes totales statoriques du modèle EF de la machine

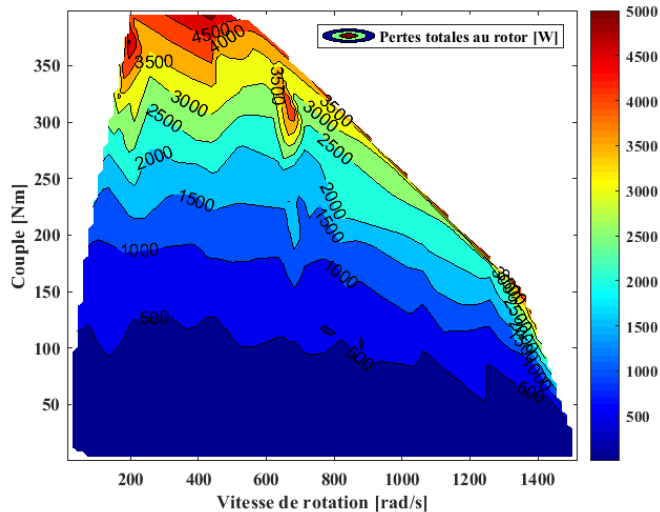


Fig. 14. Carte des pertes totales rotoriques du modèle EF de la machine

Ainsi, ces cartes peuvent être utilisées pour étudier un cycle de fonctionnement complet de la machine, bien qu'il soit nécessaire de réaliser des simulations supplémentaires pour combler et lisser les différentes zones où il manque des points, conduisant à un manque de précision sur les résultats. D'autre part, les cartes sur les pertes peuvent également être utilisées afin de procéder à l'analyse de la thermique de la machine, par exemple en les couplant à un modèle thermique. Grâce à ce modèle, il est également possible d'obtenir les cartographies d'autres grandeurs, telles que le facteur de puissance ou encore les pertes Joules et fer de manière isolées.

5.4. Limites du modèle

Comme nous venons de le voir, ce modèle semble correspondre de manière acceptable au véritable moteur de la Tesla Model S, tel qu'il est décrit dans la littérature. Cependant, plusieurs différences apparaissent, notamment au niveau de la valeur efficace du courant statorique nécessaire pour atteindre les valeurs de couple annoncées, ou encore sur les différents niveaux d'induction au sein de la machine. Ces erreurs sont calculées et présentées dans le tableau 7. Une première explication de ces différences vient de l'incertitude sur certaines données. En effet, comme cela a été expliqué précédemment, plusieurs données de la machine étant inconnues, nous avons dû les remplacer en utilisant d'autres ressources bibliographiques ou en les calculant à l'aide de différentes méthodes analytiques, par exemple, avant de valider leur utilisation par différentes simulations. Ainsi, ces valeurs pourraient ne pas tout à fait correspondre aux véritables valeurs. C'est particulièrement le cas pour les dimensions des barres rotoriques ou pour les impédances de fuite des têtes de bobines ou des anneaux de court-circuit. D'autre part, les caractéristiques du matériau magnétique réellement utilisé n'étant pas connues, il est possible que celles du matériau utilisé en remplacement soient également différentes, ce qui peut avoir un impact non négligeable sur les niveaux d'induction par exemple. D'autre part, une deuxième explication pourrait être liée aux conditions de simulations magnéto-harmoniques et des différentes hypothèses qui en découlent, notamment sur la forme d'onde des signaux, d'autant plus que des résultats légèrement différents et correspondant plus aux valeurs théoriques sont obtenus avec une simulation en magnétique transitoire.

Cependant, comme cela a également été présenté précédemment, cet article a pour objectif de présenter un modèle suffisamment proche de la véritable machine conçue par Tesla, avec des performances similaires, pour qu'il puisse être utilisé à d'autres fins, notamment en rétro-ingénierie, en tant qu'exemple pédagogique ou encore pour étudier d'autres solutions technologiques.

Tableau 7. Erreurs principales entre les résultats de simulation et les valeurs trouvées dans la littérature [7], [11]

Erreurs calculées	Valeurs
Erreur sur le courant efficace statorique maximum	5,6 %
Erreur moyenne sur l'induction maximale au milieu de l'entrefer et des ponts d'encoche	8,8 %
Erreur moyenne sur l'induction moyenne au milieu de l'entrefer et des ponts d'encoche	12 %

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ainsi, nous avons présenté les principales données liées au fonctionnement, à la géométrie, ou au schéma électrique équivalent de la machine asynchrone utilisée au sein de la Tesla Model S60, avec les différents niveaux d'incertitude associés, afin d'en proposer une modélisation éléments finis 2D sous le logiciel *Altair Flux2D™*. Ce modèle est avant tout représentatif

du comportement et des performances de la machine réelle, comme nous avons pu le montrer en comparant les différents résultats obtenus en simulation à ceux disponibles dans la littérature. Toutes ces simulations ont permis de valider la modélisation réalisée, bien que les différentes incertitudes sur les données puissent entraîner quelques écarts par rapport à la machine réelle.

De futurs travaux pourraient permettre de compléter et préciser ce modèle, notamment par la mesure ou le test d'un moteur de Tesla Model S. De plus, il pourrait être intéressant de développer un modèle analytique de cette machine, à partir des simulations à vide et à rotor bloqué, pour pouvoir étudier plus en avant ce modèle à l'aide de simulations simplifiées et plus rapides, par exemple pour du dimensionnement par optimisation. Cependant, le modèle présenté peut, d'ores et déjà être utilisé, par exemple à des fins pédagogiques ou pour réaliser une étude de rétro-ingénierie qui permettrait de justifier certains des choix technologiques faits par les ingénieurs de Tesla.

Le modèle de la machine asynchrone de la Tesla Model S 60 présenté dans cet article est disponible en téléchargement à l'adresse suivante :

<https://g2elab.grenoble-inp.fr/fr/le-laboratoire/download-the-new-2d-finite-element-model-of-the-tesla-model-s-60-induction-motor>

7. REFERENCES

- [1] J. Cobb, "Tesla Model S is world's best-selling plug-in car for second year in a row", Hybrid cars, 26 Janvier 2017. [En ligne]. Disponible: <https://www.hybridcars.com/tesla-model-s-is-worlds-best-selling-plug-in-car-for-second-year-in-a-row/>
- [2] N. Hashemnia et B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 6-9 Sept. 2008, pp. 1-5.
- [3] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown et M. Krishnamurthy, "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications," dans *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015.
- [4] Equipe TIME, "Best inventions of the year 2012", TIME Tech Magazine, 01 Nov. 2012 [En ligne]. Disponible: <https://web.archive.org/web/20121103135534/http://techland.time.com/2012/11/01/best-inventions-of-the-year-2012/slide/the-tesla-model-s/>
- [5] Equipe Tesla, "The longest-range electric vehicle now goes even farther", Tesla, 23 Avril 2019 [En ligne]. Disponible: https://www.tesla.com/fr_FR/blog/longest-range-electric-vehicle-now-goes-even-farther?redirect=no
- [6] Y.Tang, "Induction Motor with Improved Torque Density", U.S. Patent 7,741,750 B1, 22 Juin 2010.
- [7] Y.Tang, "Induction Motor Lamination Design", U.S. Patent 8,154,167 B2, 10 Avril 2012.
- [8] Y.Tang, S-P P.Luan, "Dual layer winding pattern", U.S. Patent 8,154,166 B2, 10 Avril 2012.
- [9] P. Zhou, N. R. Kalayjian, G. D. Cutler et P. K. Augenbergs, "Liquid cooled rotor assembly", U.S. Patent 7,489,057 B2, 10 Fév. 2009.
- [10] D. A. Staton et J. Goss, "Open source electric motor models for commercial EV & Hybrid traction motors.", présenté à *Coil Winding, Insulation & Electrical Manufacturing Exhibition (CWIEME) 2017*, Berlin, Allemagne, 20-22 Juin 2017.
- [11] M. Popescu, J. Goss, D. A. Staton, D. Hawkins, Y. C. Chong et A. Boglietti, "Electrical Vehicles—Practical Solutions for Power Traction Motor Systems," dans *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2751-2762, Mai-Juin 2018.
- [12] H. Koke, "Comparative study of stranded and bar windings in an induction motor for automotive propulsion applications.", M.A.Sc thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, Août. 2017.
- [13] DragTimes, "2014 Tesla Model S P85 Dyno Dynamometer Results Graph", 2014. [En ligne]. Disponible: <https://www.dragtimes.com/2014-Tesla-Model-S-Dyno-Results-Graphs-27027.html>
- [14] S. Loutzky, "Calcul pratique des alternateurs et des moteurs asynchrones.", Eyrolles, 1969.
- [15] L. Szabó, "A Survey on the Efficiency Improve of Electrical Machines," *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-6.
- [16] D. T. Peters, E. F. Brush and J. L. Kirtley, "Die-cast copper rotors as strategy for improving induction motor efficiency," *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Nashville, TN, Etats-Unis, 2007, pp. 322-327.
- [17] Cogent Power Ltd., « Electrical steel non-oriented fully processed product information », 2002
- [18] G. Sieklucki, "An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle," *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Andrychów, Poland, 2018, pp. 1-6.