

Modélisation et Simulation du Procédé de Bobinage des Rotors de Moteurs Électriques

G. Crippa^{1,2}, D. Durville¹, S. Lemesle², J-B. Lavault²

¹ LMPS (Laboratoire de Mécanique de Paris Saclay), CentraleSupélec, Gif-Sur-Yvette, giacomo.crippa@centralesupelec.fr, damien.durville@centralesupelec.fr

² Ampere, Renault Group, Technocentre Renault, Guyancourt, Usine Renault de Cleon, Cleon, giacomo.crippa@ampere.cars, stephanie.lemesle@ampere.cars, jean-baptiste.lavault@ampere.cars

Résumé — Cette étude présente le développement et la validation d'un modèle numérique pour la simulation du procédé de bobinage du rotor du Moteur Synchrone à Excitation Électrique (EESM). En s'appuyant sur le logiciel Multifil, l'objectif est de reproduire de manière réaliste les interactions de contact avec frottement, afin de suivre les déformations plastiques subies par le fil de cuivre et de déterminer précisément la géométrie des spires. Les résultats démontrent la capacité du modèle à capturer des phénomènes observés expérimentalement ouvrant la voie à une meilleure compréhension du procédé et à l'optimisation des paramètres de bobinage.

Mots clés — Finite Element Analysis (FEA), Winding, Copper Wire Deposition, Electrically Excited Synchronous Motor (EESM), Beam Model, Frictional Contact Interactions

1 Introduction

La transition européenne vers les véhicules zéro émission, régie par la législation CO₂ [3], imposant l'arrêt progressif des moteurs à combustion (ICE) d'ici 2035, crée un impératif industriel urgent pour l'innovation et le développement de nouvelles technologies électriques, malgré la persistance des débats sur des solutions alternatives comme les E-Carburants. Ce changement écologique majeur est aggravé par un environnement géopolitique complexe, illustré par la forte dépendance de l'Europe vis-à-vis de la Chine pour les terres rares. Les menaces de Pékin concernant les restrictions sur ces matériaux critiques ont mis en lumière la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement.

De tels événements ont conduit certains constructeurs européens à développer des technologies leur permettant également d'obtenir une certaine indépendance vis-à-vis de facteurs géopolitiques similaires. C'est dans ce contexte que Renault a développé le Moteur Synchrone à Excitation Électrique (EESM), un moteur électrique où la partie rotorique traditionnelle à aimants permanents (produits avec les terres rares) est remplacée par un système innovant d'enroulement d'un fil de cuivre autour d'un noyau en matériau ferromagnétique.



FIGURE 1 – Procédé de bobinage pour un moteur synchrone à excitation électrique (EESM)

Cette approche non seulement atténue la dépendance aux matériaux coûteux et géopolitiquement sensibles, mais réduit également l'empreinte environnementale globale du véhicule. Cependant, le procédé de bobinage du rotor (Fig. 1), qui implique le dépôt de multiples couches de fil de cuivre autour du

noyau, composé d'un paquet de tôles ferromagnétiques, à l'aide d'une tête d'aiguille, est intrinsèquement complexe. La nécessité d'opérer avec des rayons de courbure minimes soumet le fil à des déformations élevées en flexion et en traction, introduisant des défauts critiques tels que des désalignements du fil, des espaces entre les couches et des déformations plastiques permanentes. Ces défauts compromettent directement les performances électriques du moteur, réduisant l'efficacité et augmentant le risque de courts-circuits.

2 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est de reproduire fidèlement l'historique des déformations plastiques subies par le fil de cuivre du fait de ses interactions avec les différentes parties de l'outillage du procédé, afin d'obtenir une bonne approximation de la géométrie des spires déposées, cette géométrie dépendant en grande partie des contraintes résiduelles résultant des déformations plastiques successives. En obtenant une représentation fidèle de cette géométrie des spires, qui reproduise en particulier différents défauts observés, l'outil de simulation vise à aider à optimiser les paramètres de pilotage du procédé de bobinage.

À ce jour, il n'existe pas d'outil logiciel spécialisé capable d'approcher fidèlement et en détail la dépose, la complexité de l'interaction de contact avec frottement et les sollicitations mécaniques non linéaires (y compris les déformations plastiques) qui se produisent pendant le procédé de bobinage. Les travaux antérieurs, tels que ceux de Bönig et Al. ([4] [5]) et de Zerbe et Al. ([6]), ont utilisé des modèles par éléments finis avec les logiciels ANSYS et LS-Dyna, mais ils manquaient d'analyses détaillées des grandeurs mécaniques et reposaient généralement sur des modèles 2D simplifiés ou sur des simulations 3D rudimentaires. En outre, les travaux passés ont eu du mal à prendre en compte des facteurs essentiels tels que les déformations plastiques, le contact frottant et la complexité du dépôt multicouche. Cette lacune contraint l'industrie à une méthode d'optimisation par essais et erreurs, coûteuse en temps et en ressources.

La présente étude vise à combler cette lacune, en élargissant et en étendant les capacités de MultiFil, un logiciel interne de modélisation et simulation numérique reposant sur un solveur implicite pour l'étude du comportement des milieux enchevêtrés et des câbles métalliques [2].

L'objectif est de fournir une base numérique robuste pour l'analyse détaillée du comportement du fil de cuivre, permettant la quantification précise de l'état de contrainte et de déformation, la modélisation et le mouvement de toutes les diverses composantes impliquées dans le bobinage, ainsi que la reproduction correcte des différents mécanismes de contact frottant entre le fil et les outillages, et entre les différentes spires du même fil (auto-contact).

3 Modélisation

La machine (Fig. 2) qui effectue l'enroulement est alimentée par une bobine de fil de cuivre qui est déroulée pendant le processus. Un frein permet d'imposer la bonne tension afin que le processus se déroule correctement. Le fil passe à travers un système de poulies pour ensuite entrer dans la tête d'aiguille, d'où il ressort plié à 90° et est déposé autour du noyau du pôle rotorique. Pour effectuer la dépose de fil, la tête d'aiguille se déplace sur le plan vertical (le long des axes x et z , mais pas dans la direction y). Pendant ce temps, une broche gère la rotation du rotor. Ce rotor à 8 pôles est tourné de 45 degrés lors de l'enroulement de chaque pôle. Cela crée un mouvement relatif, pour lequel la tête à aiguille tourne autour du noyau de chaque pôle du rotor. Ainsi, le mouvement est une combinaison du déplacement horizontal et vertical de la tête à aiguille (axes x et z) et de la rotation du rotor (θ). En disposant des données de position de l'aiguille et de la rotation du rotor à chaque instant en temps réel, il est possible d'extraire les trajectoires relatives de la tête d'aiguille autour de chaque pôle.

Le noyau ferromagnétique est constitué de tôles de matériau ferromagnétique superposées et empilées. Deux inserts en plastique avec des rainures sont ensuite placés aux deux extrémités pour garantir un bon positionnement du fil pendant le processus d'enroulement.

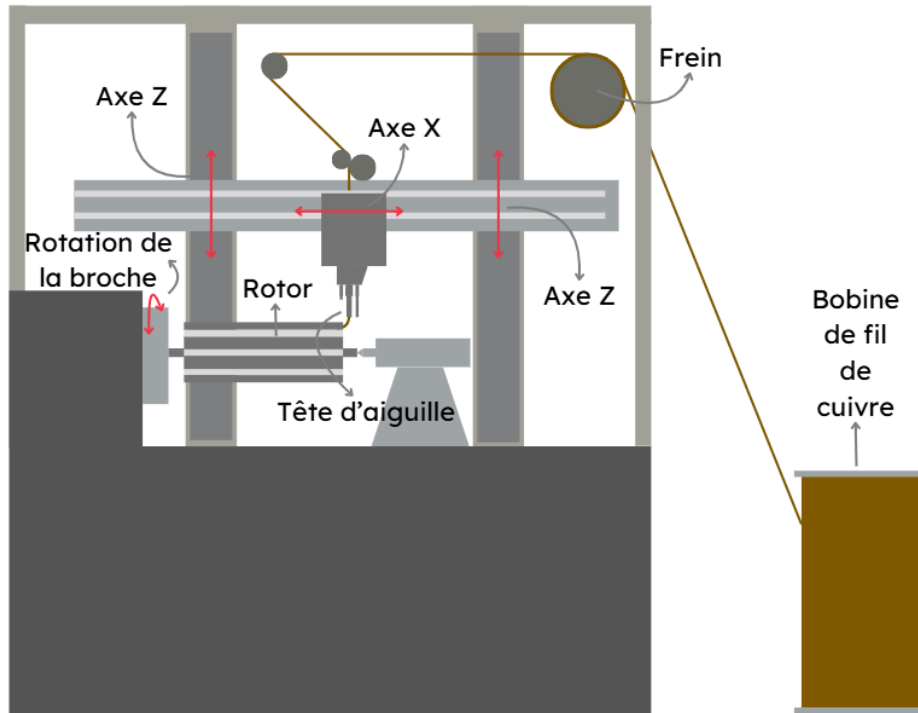


FIGURE 2 – Schéma illustrant la machine pour le bobinage

3.1 Obstacles Rigides

Pour la simulation du bobinage, une modélisation géométrique simplifiée d'un pôle du noyau a été développée. Les différents composants du procédé du bobinage, du noyau à la tête d'aiguille, sont modélisés comme des obstacles rigides définis par des surfaces analytiques simples (cylindre, poulie, plan) combinées pour créer l'outillage (Fig. 3). Ceci permet d'éliminer le recours à un préprocesseur pour mailler les outils, réduisant ainsi le coût de l'approche. Le noyau du pôle du rotor est représenté par un ensemble de plans et de poulies qui permettent de représenter l'ensemble des tôles et les inserts en plastique avec les rainures (les poulies permettent en effet le bon positionnement du fil).

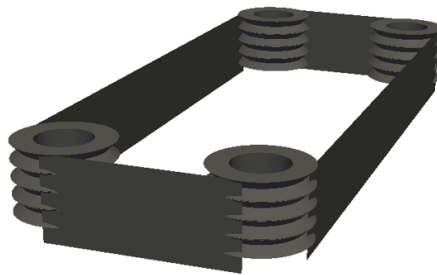


FIGURE 3 – Noyau d'un pôle du rotor en Multifil composé de surfaces analytiques telles que des plans et des poulies

La géométrie de la tête de l'aiguille joue un rôle très important dans le procédé puisqu'elle est le lieu de déformations plastiques importantes sur un faible rayon de courbure. Pour reproduire la géométrie de cette tête d'aiguille, il a été choisi d'introduire une nouvelle surface analytique (Fig. 4), correspondant à un ellipsoïde torique, défini par quatre paramètres selon l'équation (eq. 1) :

$$\begin{cases} a(\phi) = a_0 + d_1(1 - \cos(\phi)) \\ b(\phi) = b_0 + d_2(1 - \sin(\phi)) \\ x(\phi, \theta) = a(\phi) \cos(\theta) \hat{i} + b(\phi) \sin(\theta) \hat{j} + d \sin(\phi) \hat{k} \end{cases} \quad (1)$$

Cette géométrie permet de représenter le bord de sortie réel de la tête d'aiguille et, par conséquent, de permettre la reproduction correcte du rayon de sortie du fil depuis la tête d'aiguille. Ce paramètre est très important car il détermine la hauteur à laquelle la tête doit être placée par rapport au noyau pour garantir le positionnement correct du fil et est également l'une des régions où se produit une forte plastification du fil, causée par la flexion à 90° que subit le fil à la sortie de la tête d'aiguille.

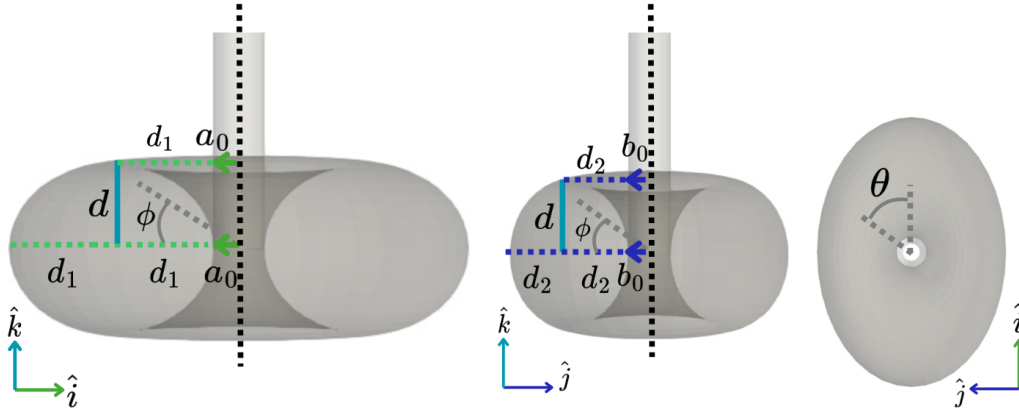


FIGURE 4 – Définition de la géométrie de la tête d'aiguille

3.2 Fil de Cuivre

Pour modéliser le fil, un modèle de poutre monodimensionnel à section déformable est utilisé. Le comportement simulé est caractérisé par des paramètres élastoplastiques, identifiés par un processus d'ajustement d'une courbe de caractérisation expérimentale en traction. Pour la partie plastique, la loi de Chaboche a été utilisée pour décrire l'évolution de l'écrouissage.

Le modèle de poutre au comportement élastoplastique a été validé sur des tests en traction. Son utilisation pour des sollicitations de fortes flexions soulève différentes questions et reste à valider. Un soin particulier doit être apporté à l'identification des paramètres d'écrouissage cinématique et isotrope afin d'être en mesure de rendre compte des cumuls de charges et décharges plastiques en flexion.

3.3 Modélisation des interactions contact frottant

Pour modéliser les interactions de contact frottant, deux cas doivent être distingués : le cas du contact du fil avec l'outillage et le contact entre le fil et lui-même. Dans le premier cas, la surface du fil est discrétisée en un nombre de points prédéfini et, puisque les obstacles sont décrits comme des surfaces analytiques $2D \phi(u, v)$ avec des tangentes $\partial_u \phi(u, v)$ et $\partial_v \phi(u, v)$, il est possible de définir des algorithmes de projection pour chaque point afin d'identifier la direction normale à la surface de l'objet qui pourrait entrer en contact avec le fil. Pour les poulies et la tête d'aiguille, un système non linéaire (eq. 2) doit être résolu via un algorithme de Newton pour déterminer les coordonnées (u_p, v_p) du projeté du point P sur la surface ϕ .

$$\begin{cases} (P - \phi(u_p, v_p), \partial_u \phi(u_p, v_p)) = 0, \\ (P - \phi(u_p, v_p), \partial_v \phi(u_p, v_p)) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Ensuite, le long de la direction identifiée, une fonction d'écart entre l'obstacle et le fil est définie. L'interaction de contact est modélisée au moyen d'une méthode de pénalisation qui pénalise la violation du contact (soit l'interpénétration entre la poutre et l'obstacle) en appliquant une force proportionnelle à la distance (Fig. 5), tandis que la force tangentielle est calculée à l'aide d'une loi de Coulomb régularisée. La force d'interaction peut être écrite comme suit (eq. 3) :

$$R_{cf}^{IJ}(\zeta_k) = R_N^{IJ}(\zeta_k) n_c^{IJ}(\zeta_k) + R_T^{IJ}(\zeta_k) \quad (3)$$

où $R_N^{IJ}(\zeta_k)$ est la composante normale due à la violation de contact et $R_T^{IJ}(\zeta_k)$ est la partie tangentielle due au frottement.

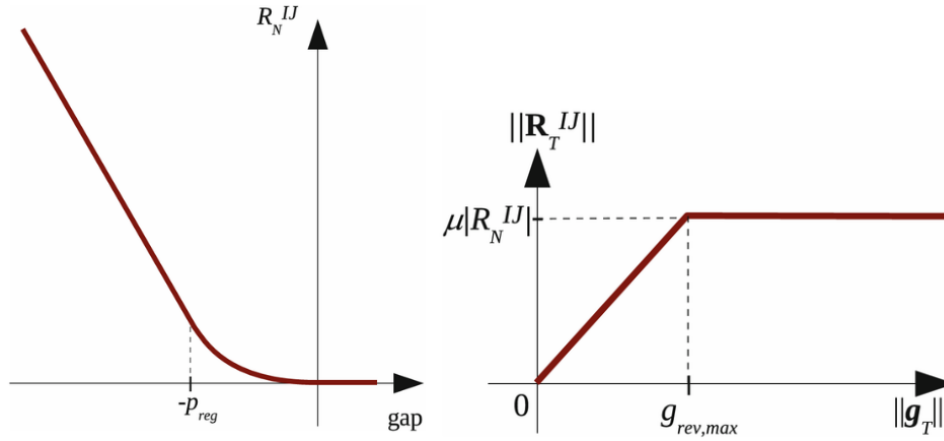


FIGURE 5 – À gauche Méthode de pénalisation et régularisation quadratique de la pénalité, à droite le modèle de frottement régularisé [2]

Une approche similaire a également été utilisée pour modéliser le contact entre différentes régions du fil. Dans ce cas, toutefois, le contact est traité de manière symétrique entre les deux segments de fil, en utilisant un algorithme de recherche de zones de proximité qui, après avoir identifié les zones susceptibles d’entrer en contact, crée des entités intermédiaires, représentées par la moyenne des deux fibres moyennes des fils, permettant ainsi de modéliser le problème de façon symétrique. La géométrie intermédiaire est ensuite discrétisée de manière à ce que le nombre de points soit dans un rapport de 2 : 1. Pour chaque point, un plan perpendiculaire au vecteur décrivant la géométrie intermédiaire est créé. Ce plan intersecte la fibre moyenne de chacun des deux fils en un point qui est indépendant de la discrétisation. Pour trouver les points de contact sur la section du fil, le segment représentant la distance entre les centres de deux fils est projeté sur les sections des deux fils, et son intersection avec la section du fil détermine les points de contact sélectionnés (Fig : 3.3). De manière similaire à ce qui a été montré précédemment, une fonction d’écart est créée et la force de contact est obtenue au moyen d’un algorithme de pénalisation et d’une loi de Coulomb régularisée décrivant respectivement la force normale et la force tangentielle.

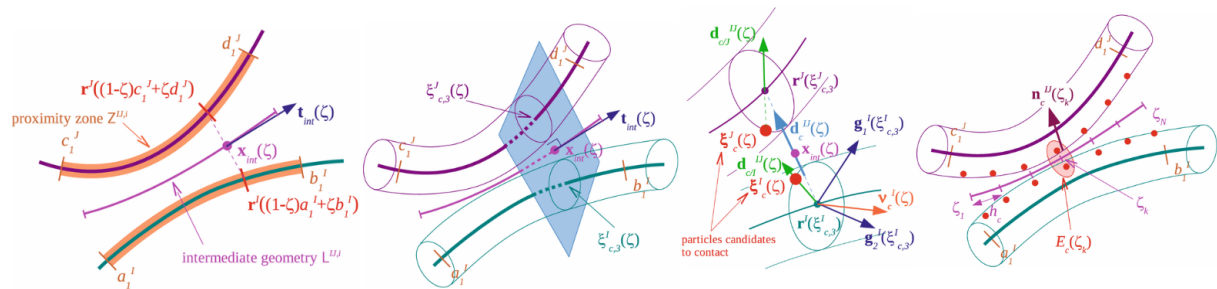


FIGURE 6 – Schéma illustrant la modélisation du contact symétrique entre deux segments de fil. Les entités intermédiaires (moyenne des centroïdes) sont générées après la détection des zones de proximité, la géométrie intermédiaire est discrétisée, et les plans perpendiculaires permettent de déterminer les points de contact sur les sections des fils [2]

3.4 Définition de la trajectoire

La trajectoire de la tête d’aiguille qui guide le fil pendant le dépôt a également été au centre de l’étude. Le mouvement de la tête d’aiguille est reproduit en alimentant le logiciel avec les coordonnées d’un ensemble de points qui sont ensuite interpolés à l’aide d’une interpolation par des splines cubiques qui définissent la trajectoire de la tête d’aiguille. Ces points ont été paramétrés afin de permettre une étude future de l’influence des différents paramètres sur le dépôt.

4 Resultats

4.1 Test de sortie d'aiguille

Premièrement, un test simple, appelé test de distance Fil-à-Tête d'aiguille, a été créé en MultiFil (Fig. 8) pour mesurer la distance entre le bord de sortie de la tête d'aiguille et le centre du fil fléchi à 90° à la sortie de la tête d'aiguille et la comparer aux données obtenues expérimentalement (Fig. 7). Cette distance est d'un intérêt particulier car elle permet de positionner correctement la tête par rapport au point de dépose du fil. Le but du test est de valider le comportement en forte flexion plastique du fil puisque le fil en sortie de tête d'aiguille est plié de 90° avec un petit rayon de courbure.

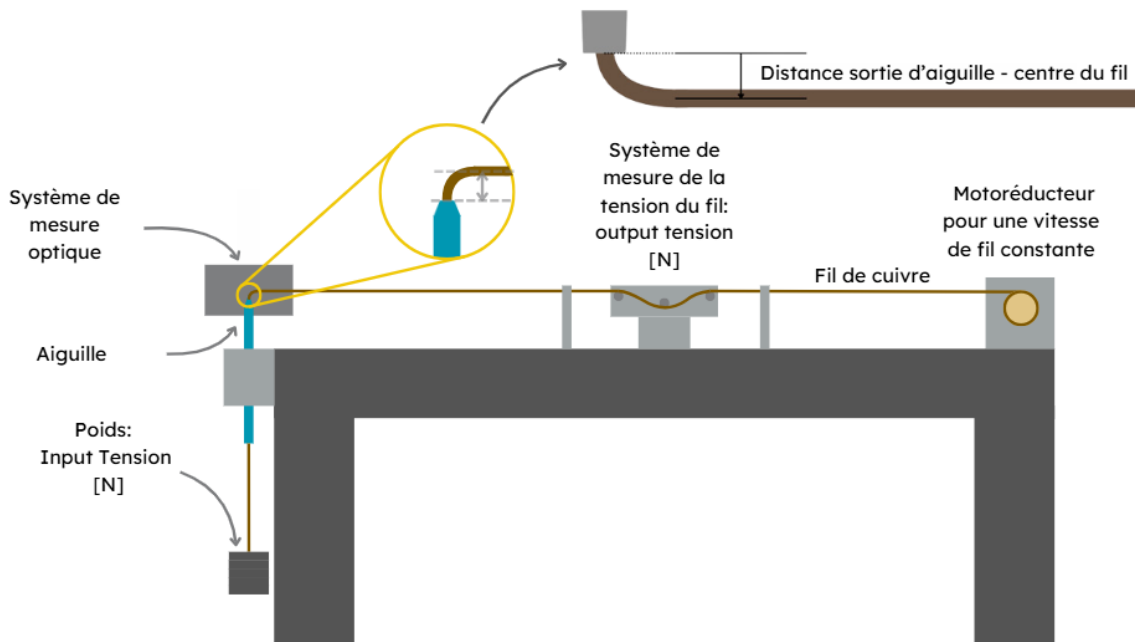


FIGURE 7 – Représentation schématique du banc d'essai expérimental du test de distance Fil-à-Tête d'aiguille

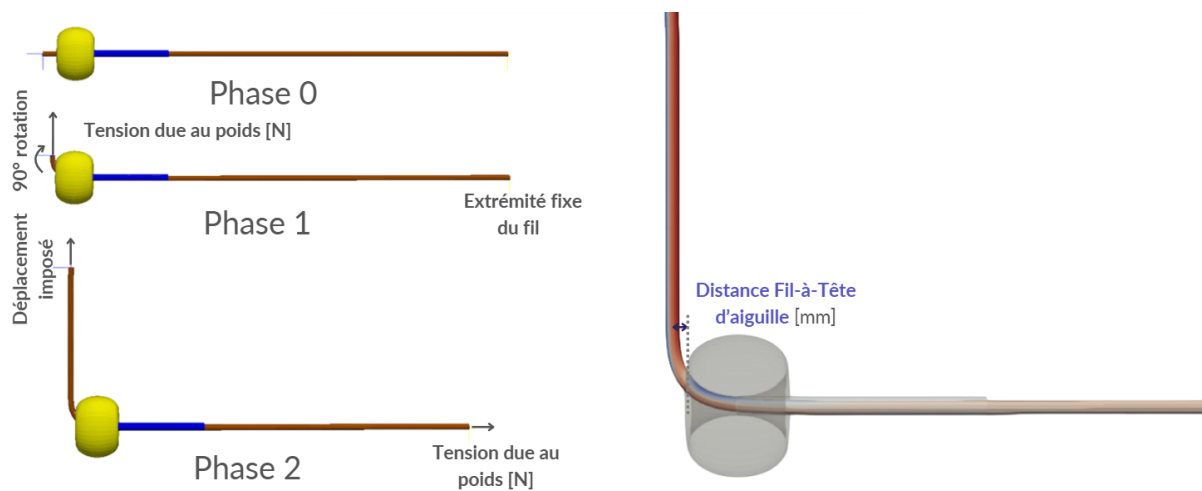


FIGURE 8 – Différentes phases du test reproduites dans MultiFil et conditions aux limites appliquées au fil pendant la simulation

Le test simule différentes tensions de fil allant de 20 à 70 N afin d'observer comment la distance entre le fil et la tête d'aiguille varie sous l'effet de la tension et en utilisant différentes géométries de tête d'aiguille. Les simulations reproduisent l'effet de décroissance en fonction de la tension appliquée. L'origine des écarts en valeur absolue entre les courbes expérimentales et celles obtenues par simulation

reste à explorer.

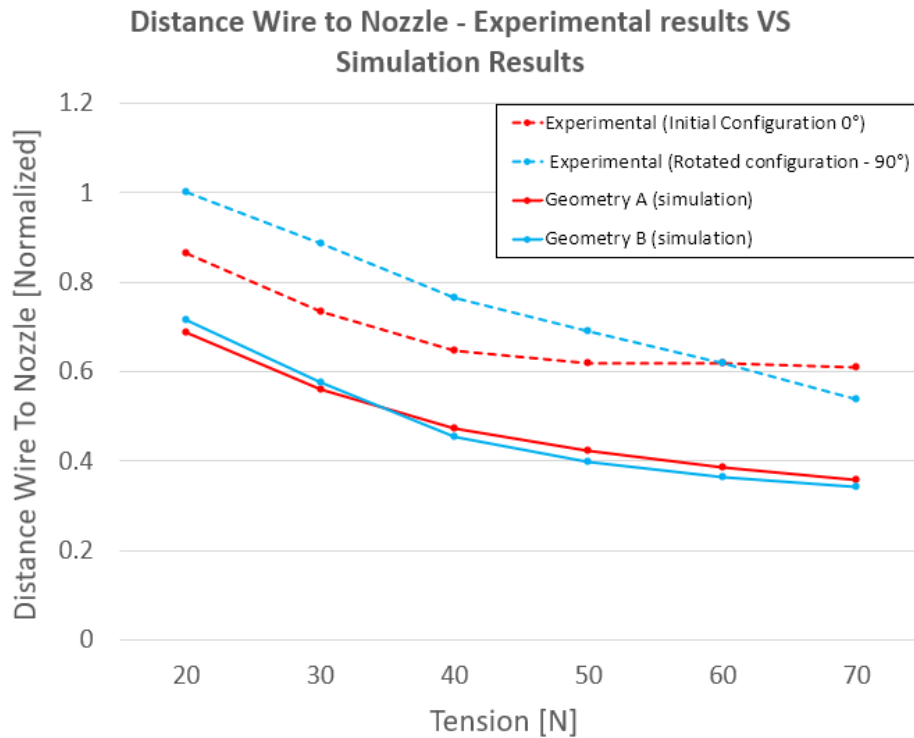


FIGURE 9 – Comparaison entre les résultats des tests expérimentaux (lignes en pointillés) fournis par le fournisseur et les résultats de simulation (lignes continues) obtenus avec Multifil pour les deux configurations géométriques testées (en rouge : géométrie A et en bleu : géométrie B)

4.2 Simulation de la dépose de plusieurs spires

Le logiciel a ensuite été utilisé pour simuler des scénarios de bobinage à simple couche et à chevauchement, démontrant sa capacité à modéliser et à quantifier les déformations plastiques, les interactions de contact et la distribution des contraintes (Fig. 10). Bien que des simulations de dépôt complètes n'aient pas été réalisées en raison de contraintes de calcul, les résultats valident la faisabilité d'une étude à grande échelle.

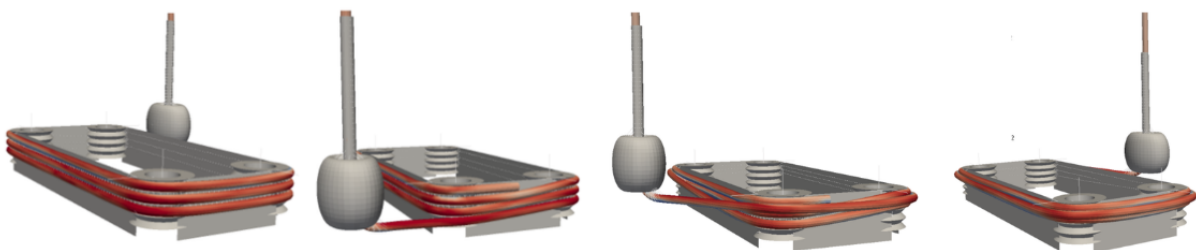


FIGURE 10 – Répartition des contraintes dans deux simulations simplifiées de dépôt

Il est également intéressant de noter que la simulation a été capable de capturer certains effets du processus d'enroulement sur la forme de la bobine. En effet, comme on peut le constater sur les photos suivantes, à l'entrée et à la sortie du côté long du noyau ferromagnétique, le fil ne parvient pas à suivre exactement la forme du pôle rotorique, mais au contraire s'en détache en créant une bosse de dépôt (Fig. 11). Ce type de phénomène se produit également dans le processus réel d'enroulement, et pouvoir en quantifier l'ampleur, en plus de l'observer, présente un intérêt majeur pour Renault. En effet, réduire ce

phénomène signifierait pouvoir agir sur le rapport cuivre/fer du noyau, améliorant ainsi les performances du moteur et augmentant son rendement. Cela ouvre la possibilité d'étudier le phénomène et de mettre en œuvre des stratégies pour en réduire l'importance.

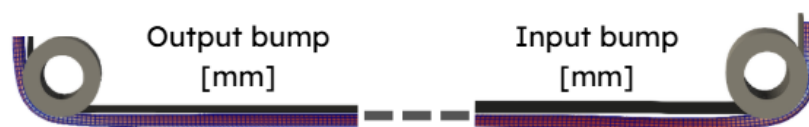


FIGURE 11 – Exemples de défauts d'enroulement capturés par Multifil : bosses de dépôt (bumps)

5 Conclusion

L'étude a permis de démontrer la validité et le potentiel du modèle développé dans Multifil pour simuler de manière détaillée le processus de bobinage du fil de cuivre autour du noyau ferromagnétique du rotor. Les simulations ont montré une bonne capacité à reproduire les comportements observés expérimentalement, en particulier la formation de bosses de dépôt, phénomène critique influençant directement le rapport cuivre/fer et donc les performances globales du moteur. La modélisation du contact et du frottement, couplée à une description élastoplastique du fil, a permis de quantifier les contraintes et les déformations locales. Bien que certaines limites persistent, notamment liées au coût de calcul et aux hypothèses simplificatrices du modèle de poutre, les résultats obtenus valident la faisabilité d'une approche numérique complète du processus. Ces résultats constituent une base solide sur laquelle poursuivre le développement du modèle. En particulier, il sera intéressant de travailler à une meilleure représentation de la loi d'écrouissage afin de mieux représenter la réponse réelle du cuivre aux cycles de charge-décharge, ainsi qu'à une amélioration progressive du modèle de fil pour en renforcer la précision sur les rayons de courbure très faibles. Ces évolutions permettront d'augmenter encore la fidélité des simulations tout en conservant une approche numérique efficace et exploitable industriellement. Ces travaux ouvrent aussi la voie à une optimisation paramétrique du bobinage, à une réduction des essais expérimentaux et à la mise en place de stratégies industrielles visant à améliorer le rendement et la durabilité des moteurs électriques Renault.

Références

- [1] CLEPA – European Association of Automotive Suppliers. *Statement on export restrictions by China on rare earths*, CLEPA Press Release, Brussels, June 2025. https://www.clepa.eu/wp-content/uploads/2025/06/Statement_export-restrictions-by-China-rare-earths_PR_June-2025-CLEPA.pdf
- [2] D. Durville. *Contact-friction modeling within elastic beam assemblies : an application to knot tightening*, Computational Mechanics, 49(6) :687–707, 2012. DOI :10.1007/s00466-012-0683-0.
- [3] European Union. *Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council on CO2 emissions from new passenger cars and light commercial vehicles*, Official Journal of the European Union, L 101/1-L 101/56, 2023.
- [4] J. Bönig, B. Bickel, M. Ebenhöch, M. Spahr, C. Fischer, and J. Franke, “Structural mechanics process simulation of linear coil winding,” *Advanced Materials Research*, vol. 1018, pp. 47–54, 2014.
- [5] J. Bönig, B. Bickel, M. Spahr, C. Fischer, and J. Franke, “Explicit dynamics process simulation of linear coil winding for electric drives production,” in *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, pp. 1–7, 2014.
- [6] J. Zerbe, *Innovative Wickeltechnologien für Statorspulen zur Erhöhung des Füllfaktors und Reduzierung der Beanspruchungen im Wickelprozess*, PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2019.