



DIAGNOSTIC DE MACHINES ÉLECTRIQUES EN UTILISANT DES ALGORITHMES DE MACHINE LEARNING

RAPPORT DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET DE STAGE

Rédigé par

EBWALA EBWALETTE Priscille

Coordinateurs

**Professeur Éric Lefèvre
Professeur Gildas Morvan
Professeur Mathieu Rossi**

Année : 2025

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 3 |
| 1.1. Contexte | 3 |
| 1.2. Objectif | 3 |
| 2. Méthodologie de Généralisation Des Machines | 3 |
| 2.1 Approche générale | 3 |
| 2.2 Outils et technologies utilisés | 3 |
| 2.3 Stratégie de génération des défauts | 4 |
| 2.4. Variantes de bobinage | 4 |
| 2.5 Structure de nommage | 5 |
| 3. Études des variantes générées | 5 |
| 3.1 Méthodologie de variation | 5 |
| 3.2 Paramètres modifiés | 6 |
| 4. Avantage de cette Approche | 6 |
| 4.1 Contrôle des paramètres | 6 |
| 4.2 Flexibilité | 6 |
| 4.3 Traçabilité | 7 |
| 5. Extraction et exploitation des résultats | 7 |
| 5.1 Analyse de la machine saine | 8 |
| 5.1.1 Toyota_Prius_healthy_3_Ntcoil_10 | 8 |
| 5.1.2 Toyota_Prius_healthy_12_Ntcoil_10 | 11 |
| 5.1.3 Toyota_Prius_healthy_35_Ntcoil_12 | 14 |
| 5.1.4 Toyota_Prius_healthy_49_Ntcoil_7 | 16 |
| 5.2 Analyse des machines défectueuses | 19 |
| 5.2.1 Toyota_Prius_defect_5_Ntcoil_7 | 19 |
| 5.2.2 Toyota_Prius_defect_48_Ntcoil_10 | 22 |
| 5.2.3 Toyota_Prius_defect_22_Ntcoil_12 | 24 |
| Conclusion | 27 |
| Références | 28 |

1. Introduction

Ce rapport présente l'état d'avancement de notre projet de stage portant sur le diagnostic de machines électriques via des approches de machine learning. À l'aide de l'outil open-source Pyleecan, nous générons automatiquement une base de données de machines électriques, incluant des cas sains et défectueux, à partir de modèles paramétriques. Cette base servira à l'entraînement de modèles de diagnostic. Le rapport expose les étapes méthodologiques suivies et les premiers résultats obtenus.

1.1. Contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude et de la détection de défauts dans les machines électriques synchrones à aimants permanents (IPMSM - Interior Permanent Magnet Synchronous Machine). L'objectif est de développer une méthodologie pour identifier et caractériser les défauts géométriques dans ces machines.

1.2. Objectif spécifiques

- Générer un ensemble de machines électriques avec et sans défauts
- Simuler le comportement électromagnétique de chaque machine
- Analyser les signatures de défauts dans les signaux électriques
- Développer des outils d'analyse et d'export des résultats

2. Méthodologie de Généralisation Des Machines

2.1 Approche générale

Nous avons développé une approche systématique pour générer un ensemble de 300 machines électriques (100 configurations géométriques \times 3 variantes de bobinage) à partir du modèle de référence **Toyota Prius**, en utilisant la bibliothèque open-source **Pyleecan**.

La structure paramétrique des modèles permet une génération rapide et flexible des variantes. Cette automatisation repose sur l'utilisation des classes Python de Pyleecan, qui permettent de contrôler dynamiquement les paramètres de géométrie, de bobinage et de matériaux.

2.2 Outils et technologies utilisés

- **Pyleecan** : bibliothèque Python dédiée à la modélisation électromagnétique des machines électriques ;
- **Toyota Prius Generator** : module personnalisé développé pour automatiser la génération de variantes paramétriques de la machine ;

-
- **Jupyter Notebook** : environnement interactif de développement, d'analyse et de traçabilité des simulations.

Les scripts sont implémentés en **Python** au sein de notebooks **Jupyter**, afin de garantir la reproductibilité des traitements. L'automatisation des simulations repose notamment sur les méthodes `build_geometry()` — pour la génération des géométries — et `comp_output()` — pour le calcul des grandeurs électromagnétiques.

2.3 Stratégie de génération des défauts

La stratégie adoptée repose sur la distinction explicite entre machines saines et défectueuses. Chaque type est représenté par un sous-ensemble de 50 configurations géométriques issues d'un même modèle de base, modifiées de façon contrôlée.

1. **Machines saines** : les 50 premières configurations conservent des plages de paramètres géométriques dans les tolérances normales de fabrication. Elles servent de référence pour la détection des écarts.

```
# Paramètres dans des plages normales
H0s = np.random.uniform(0.0013, 0.0017) # Hauteur d'encoche stator
W0s = np.random.uniform(0.0018, 0.0022) # Largeur d'encoche stator
H0r = np.random.uniform(0.010, 0.012)   # Hauteur de trou rotor
W0r = np.random.uniform(0.040, 0.045)   # Largeur de trou rotor
```

Figura 1: Densité de flux dans l'entrefer

2. **Machines défectueuses** : les 50 configurations suivantes introduisent des défauts géométriques localisés (dents stator, aimants, entrefer) en dehors des plages nominales. Ces défauts simulent des cas réalistes comme l'usure, le désalignement ou les défauts d'usage.

```
# Paramètres dans des plages normales
H0s = np.random.uniform(0.0013, 0.0017) # Hauteur d'encoche stator
W0s = np.random.uniform(0.0018, 0.0022) # Largeur d'encoche stator
H0r = np.random.uniform(0.010, 0.012)   # Hauteur de trou rotor
W0r = np.random.uniform(0.040, 0.045)   # Largeur de trou rotor
```

Figura 2: Densité de flux dans l'entrefer

2.4. Variantes de bobinage

Pour chaque configuration géométrique, nous avons généré 3 variantes qui sont appliquées via la modification du paramètre `Ntcoil` dans les objets `Winding`. Ces différences permettent de simuler diverses topologies de machine utilisées dans l'industrie.

- `Ntcoil = 7` : Bobinage avec 7 spires par encoche
- `Ntcoil = 10` : Bobinage avec 10 spires par encoche
- `Ntcoil = 12` : Bobinage avec 12 spires par encoche

2.5 Structure de nommage

Le schéma de nommage adopté encode de manière explicite les informations essentielles liées à chaque simulation: état de santé (sain ou défectueux), nombre de spires, et identifiant de configuration. Cette structuration permet:

- un traitement automatique des fichiers en batch;
- une traçabilité immédiate des paramètres associés à chaque fichier;
- une organisation claire et exploitable pour l'analyse des résultats.

3. Études des variantes générées

3.1 Méthodologie de variation

Les variantes sont instanciées par script en utilisant des boucles sur les paramètres géométriques, combinées à des appels à `Machine.save()` pour exporter au format JSON lisible par Pyleecan.

- **Total de machines générées** : 300
- **Machines saines** : 150 (50 configurations \times 3 bobinages)
- **Machines défectueuses** : 150 (50 configurations \times 3 bobinages)
- **Répertoire de sauvegarde** : `machinescustomatch100ntcoil/`

3.2 Paramètres modifiés

Les plages de variations des paramètres géométriques ont été définies en fonction :

- des tolérances mécaniques usuelles observées dans l'industrie;
- des défauts critiques fréquemment rencontrés sur le terrain (par exemple: usure des dents, erreurs d'usinage, mauvais assemblage).

Le tableau ci-dessous présente les plages normales utilisées pour les machines saines ainsi que les plages modifiées pour introduire des défauts géométriques simulés.

| Paramètre | Plage normale (m) | Plage défectueuse (m) |
|-----------|-------------------|-----------------------------------|
| H0 stator | 0.0013 – 0.0017 | 0.0010 – 0.0012 / 0.0020 – 0.0022 |
| W0 stator | 0.0018 – 0.0022 | 0.0015 – 0.0017 / 0.0022 – 0.0024 |
| H0 rotor | 0.0100 – 0.0120 | 0.0080 – 0.0090 / 0.0115 – 0.0120 |
| W0 rotor | 0.0400 – 0.0450 | 0.0300 – 0.0330 / 0.0440 – 0.0460 |

Tabla 1: Plages de variation utilisées pour simuler les défauts géométriques sur les entités rotor et stator.

4. Avantage de cette Approche

4.1 Contrôle des paramètres

L'utilisation d'un modèle paramétrique garantit un contrôle précis et systématique des dimensions géométriques, permettant une évaluation rigoureuse de la sensibilité des performances aux variations. Cette approche offre notamment:

- une génération systématique et reproductible;
- une variation contrôlée des paramètres géométriques;
- une séparation explicite entre machines saines et défectueuses.

4.2 Flexibilité

L'architecture modulaire de Pyleecan permet l'ajout de défauts complexes (par exemple: court-circuit inter-spires, désalignement), soit par extension de la classe `Machine`, soit par modification directe de la topologie via les objets `LamSlot`. Cette souplesse se manifeste à plusieurs niveaux:

- possibilité d'ajouter de nouveaux types de défauts;
- adaptation aisée des plages de variation;
- génération automatique de variantes de bobinage.

4.3 Traçabilité

Les simulations sont automatiquement archivées avec leur configuration complète, ce qui facilite la reproductibilité des résultats ainsi que leur validation croisée. Cette traçabilité repose sur:

- un nommage explicite des fichiers;
- une organisation claire des dossiers et sous-ensembles;
- une identification rapide des configurations simulées.

5. Extraction et exploitation des résultats

Afin d'illustrer les différences de comportement entre les machines saines et les machines défectueuses, cette section présente une série de résultats issus des simulations électromagnétiques réalisées à l'aide de la bibliothèque open-source **Pyleecan**.

Au total, **300 machines** ont été générées de manière paramétrique :

- **150 machines saines** : réparties en 50 configurations géométriques, chacune déclinée selon 3 variantes de bobinage ;
- **150 machines défectueuses** : dérivées des mêmes configurations mais intégrant des défauts géométriques simulés (par exemple, variations sur H0 ou W0).

Cependant, **84 machines défectueuses n'ont pas pu être simulées avec succès**. Ces échecs sont majoritairement dus à des erreurs de maillage ou à des incohérences topologiques causées par des paramètres de défaut trop extrêmes. Ces cas seront examinés ultérieurement afin d'adapter les bornes de variation ou d'améliorer la robustesse des modèles géométriques.

Dans le cadre de l'analyse détaillée, **7 machines** ont été sélectionnées aléatoirement :

- **4 machines saines**, présentant des paramètres géométriques dans les tolérances normales de fabrication ;
- **3 machines défectueuses**, intégrant des défauts localisés réalistes.

Chaque machine est comparée à la machine de référence **Toyota_Prius_Ref** à travers plusieurs indicateurs électromagnétiques représentatifs :

- la densité de flux magnétique dans l'entrefer (en fonction de l'angle et du temps) ;
- la force électromotrice (FEM) induite par le mouvement ;
- le couple électromagnétique généré.

Les résultats de simulation sont présentés sous forme de figures et accompagnés d'analyses commentées, permettant de mettre en évidence les effets des défauts géométriques sur le comportement de la machine.

5.1 Analyse des machine saine

Nous présentons ci-dessous l'analyse des machine saine issue de notre base de données simulée.

5.1.1 Toyota_Prius_healthy_3_Ntcoil_10

Les résultats de simulation de la machine saine avec comme (ID = 003) comportatnt un bobinage de 10 spires par encoche (Ntcoil = 10). Ces résultats sont comparés à ceux de la machine de référence Toyota_Prius_Ref afin de valider le comportement électromagnétique attendu.

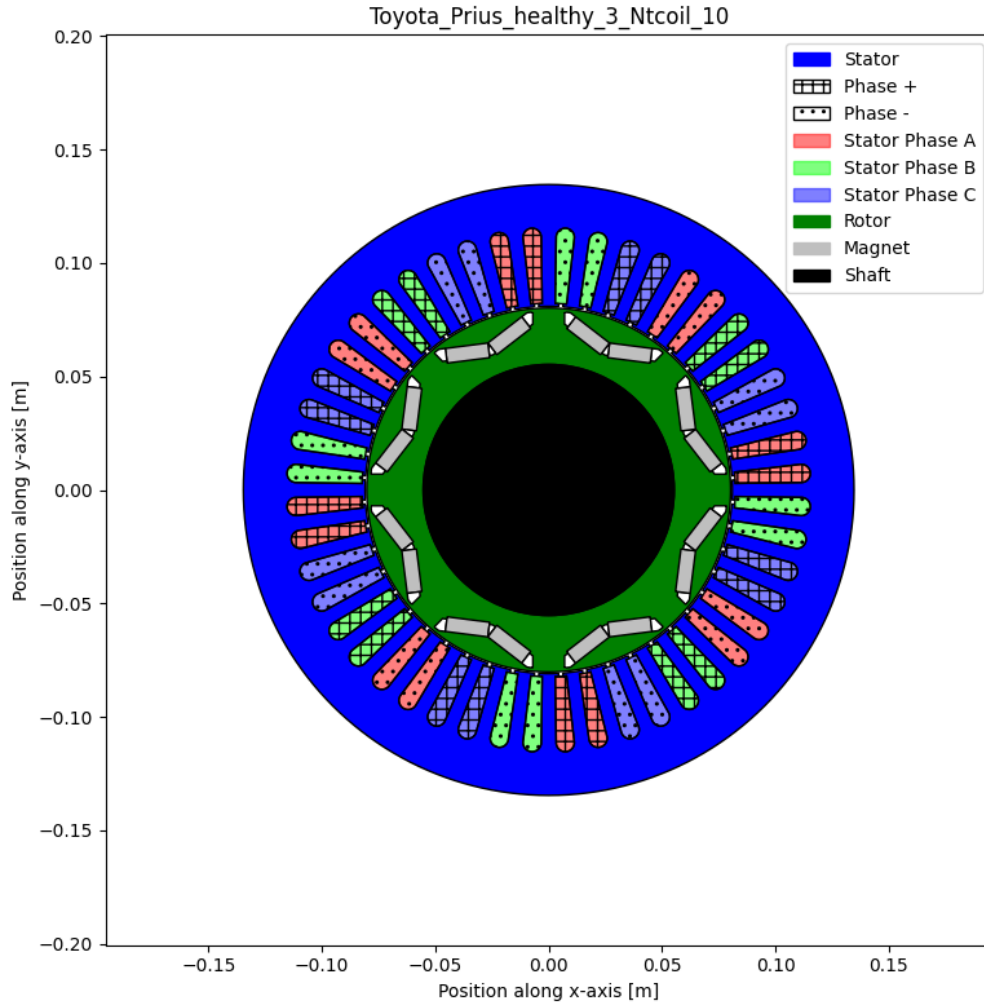


Figura 3: Vue géométrique de la machine saine Toyota_Prius_healthy_3_Ntcoil_10

Distribution angulaire du flux magnétique: On observe une excellente superposition des courbes entre la machine saine (en vert) et la machine de référence (en rouge), ce qui témoigne de la stabilité du champ magnétique malgré les petites variations paramétriques.

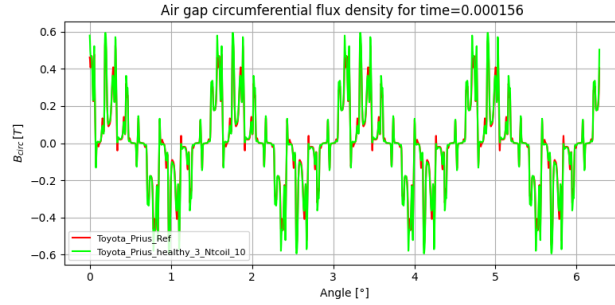


Figura 4: Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle – comparaison avec la machine de référence

Analyse fréquentielle de la densité de flux: Le spectre des harmoniques est similaire dans les deux cas. L'amplitude du pic fondamental est légèrement plus importante sur la machine saine, suggérant un effet du paramètre N_{tcoil} .

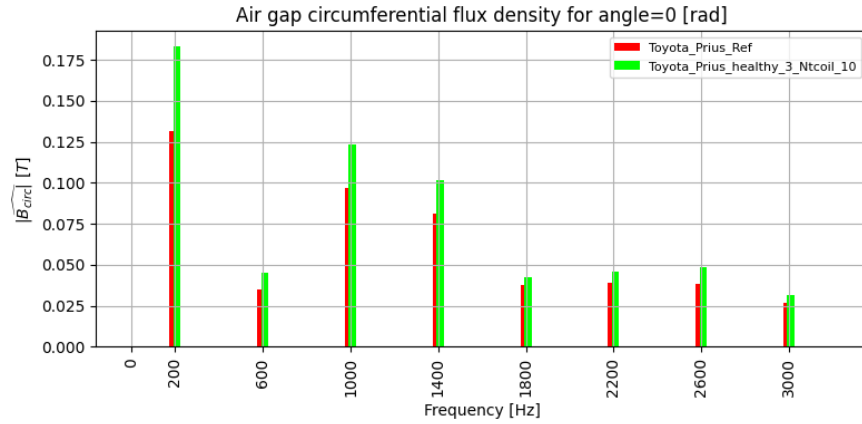


Figura 5: Spectre fréquentiel de la densité de flux dans l'entrefer – angle = 0 rad

Couple électromagnétique: Bien que les formes globales soient similaires, on constate une légère diminution de la moyenne du couple sur la machine saine, potentiellement due à une saturation magnétique locale ou à des effets de variation du bobinage.

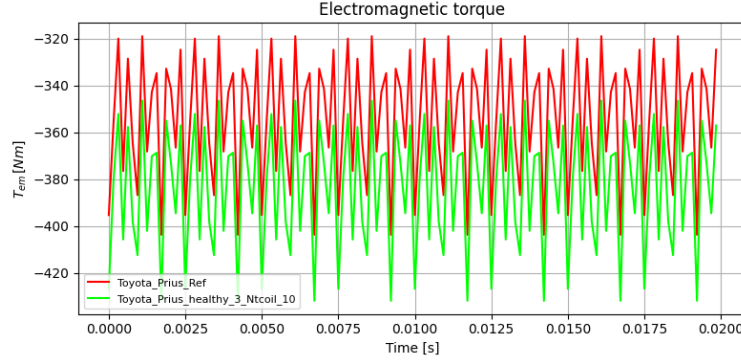
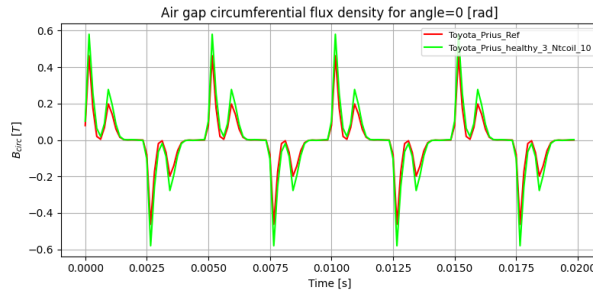
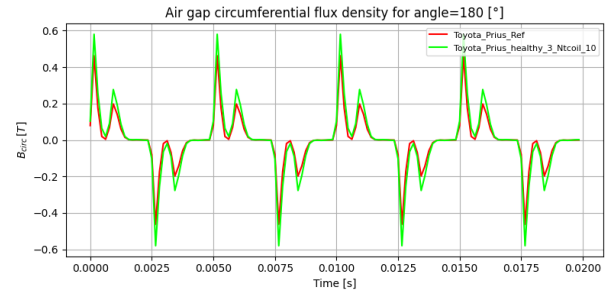


Figure 6: Évolution du couple électromagnétique en fonction du temps

Flux dans l'entrefer en fonction du temps: Les deux courbes montrent une parfaite symétrie entre les deux points opposés, ainsi qu'une correspondance étroite avec le comportement de la machine de référence. Cela confirme l'absence de défaut géométrique.



(a) Flux pour $\theta = 0^\circ$



(b) Flux pour $\theta = 180^\circ$

Figure 7: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps pour deux positions angulaires opposées

| Aspect analysé | Résultat |
|------------------------------|---------------------------------|
| Structure géométrique | Conforme |
| Densité de flux angulaire | Régulière et stable |
| Analyse harmonique | Proche du modèle de référence |
| Couple électromagnétique | Légère variation, reste nominal |
| Stabilité temporelle du flux | Excellente symétrie |

Tabla 2: Résumé des résultats pour la machine saine ID = 003

Résumé Ces observations valident le bon comportement de la machine saine simulée, et confirment son adéquation comme référence pour l'apprentissage supervisé dans le cadre du diagnostic automatique.

5.1.2 Toyota_Prius_healthy_12_Ntcoil_10

Cette machine correspond à une configuration saine avec une géométrie légèrement différente de la précédente (ID003), mais le même bobinage de $N_{tcoil} = 10$. Elle permet de vérifier la robustesse du comportement électromagnétique dans la plage nominale.

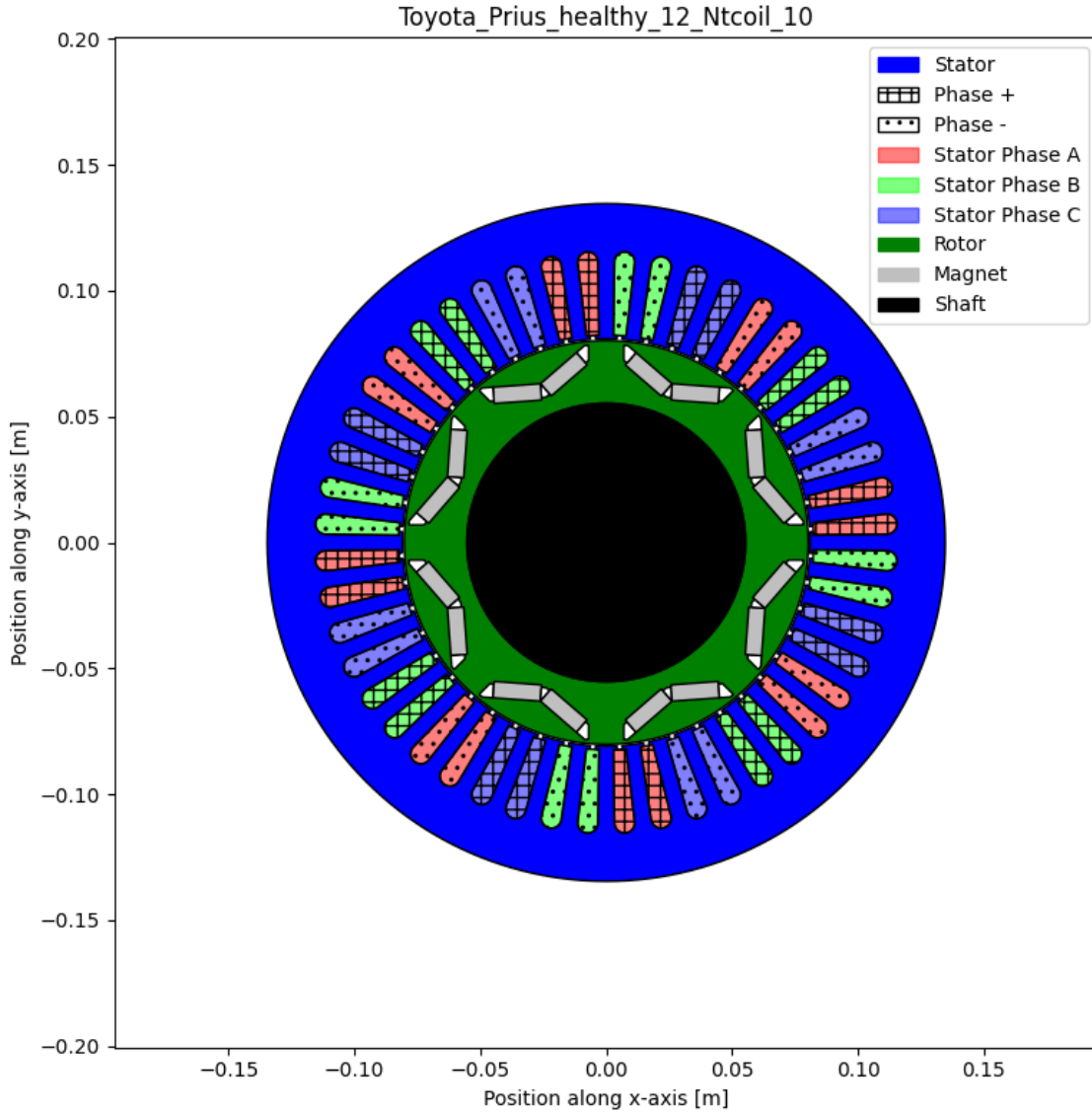


Figura 8: Géométrie de la machine saine Toyota_Prius_healthy_12_Ntcoil_10

Analyse : La structure montre un agencement classique avec un rotor à aimants intérieurs (IPMSM). Les encoches statoriques sont uniformes, et les bobinages triphasés sont répartis de manière équilibrée. Aucun défaut structurel n'est visible.

Distribution angulaire du flux magnétique : Le profil du flux dans l'entrefer reste périodique et équilibré, avec une légère augmentation locale de l'amplitude par rapport à la machine de référence. Cette forme sinusoïdale confirme un fonctionnement sain et une bonne répartition du flux magnétique.

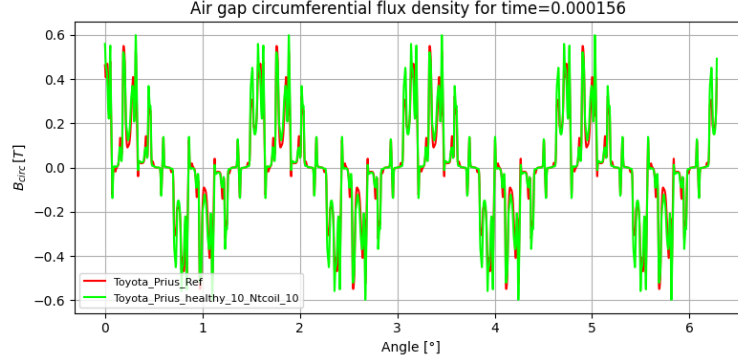


Figure 9: Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle

Analyse fréquentielle : Le spectre révèle une composante fondamentale dominante à 200 Hz, suivie d'harmoniques multiples bien contrôlées. L'absence de composantes parasites supplémentaires confirme l'équilibre électromagnétique de la machine.

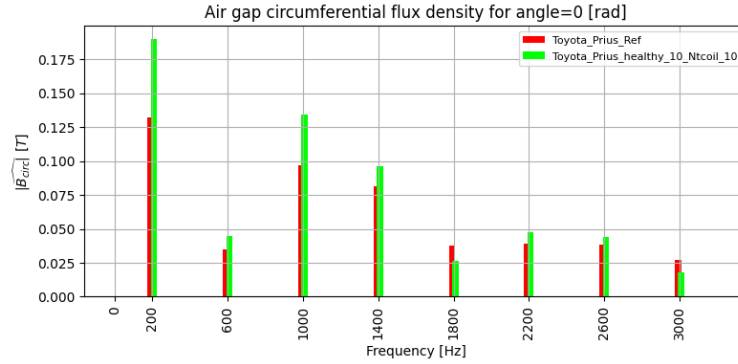


Figure 10: Spectre fréquentiel de la densité de flux – angle = 0 rad

Couple électromagnétique : Le couple varie de manière périodique autour d'une valeur moyenne stable. Une oscillation plus prononcée est observée par rapport à la machine ID003, probablement en raison d'un désalignement mineur du flux ou d'un effet d'inductance différent lié à la géométrie.

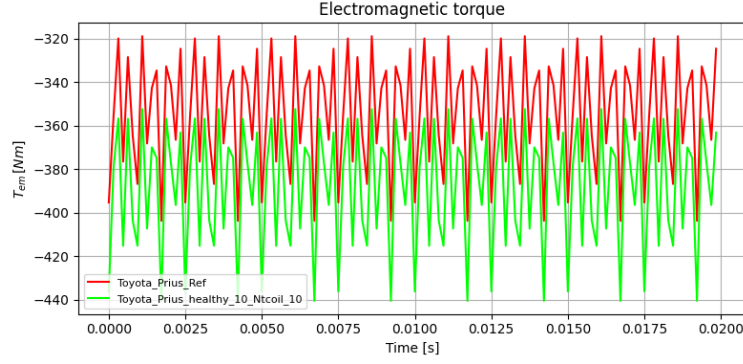


Figure 11: Évolution du couple électromagnétique

Flux dans l'entrefer en fonction du temps : Les deux signaux sont pratiquement symétriques, avec une amplitude maximale atteinte au même instant dans le cycle électrique. Cela traduit une distribution magnétique homogène autour du rotor et confirme l'absence de déséquilibre magnétique.

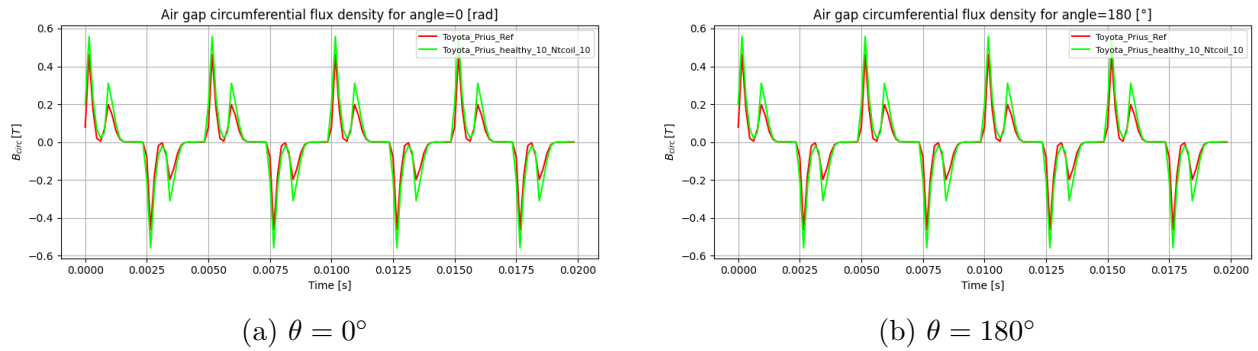


Figure 12: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps

Commentaires Les résultats montrent une très bonne correspondance avec la machine de référence. La densité de flux présente une structure symétrique et harmonique, confirmée par le spectre fréquentiel.

Le couple électromagnétique est stable, avec une légère différence d'amplitude par rapport à la machine saine ID003, probablement liée à la variation géométrique de la configuration ID012. Le flux temporel est également symétrique entre $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$, sans perturbation notable.

Cette machine valide le bon comportement attendu pour une configuration saine dans les tolérances industrielles.

5.1.3 Toyota_Prius_healthy_35_Ntcoil_12

Cette configuration correspond à une machine saine avec un bobinage légèrement plus dense : $N_{tcoil} = 12$. Elle permet d'évaluer l'impact de ce paramètre sur les performances électromagnétiques.

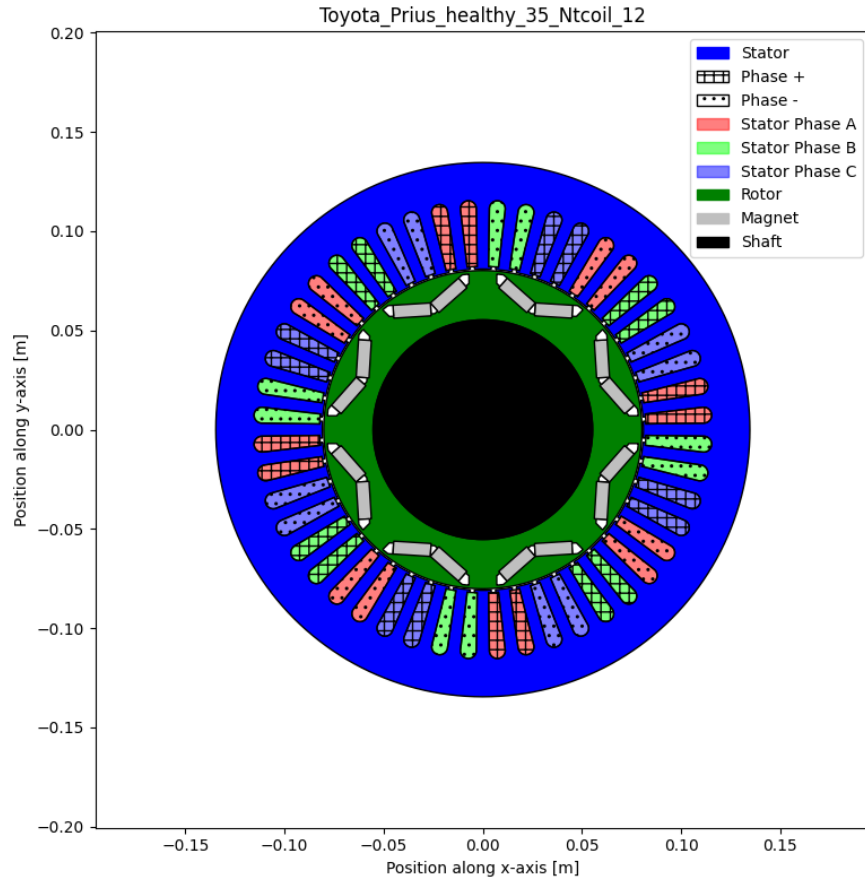


Figure 13: Vue géométrique de la machine Toyota_Prius_healthy_35_Ntcoil_12

Analyse: Le rotor à aimants intérieurs est bien centré. Le stator est régulier et équilibré. Le bobinage triphasé est correctement réparti, avec 12 spires par encoche, ce qui augmente la densité de conducteurs.

Distribution angulaire du flux magnétique : La courbe verte (machine saine) montre une légère augmentation d'amplitude par rapport à la machine de référence. La forme sinusoïdale est globalement bien conservée, avec quelques pics plus marqués indiquant un renforcement local du flux dû au bobinage plus dense.

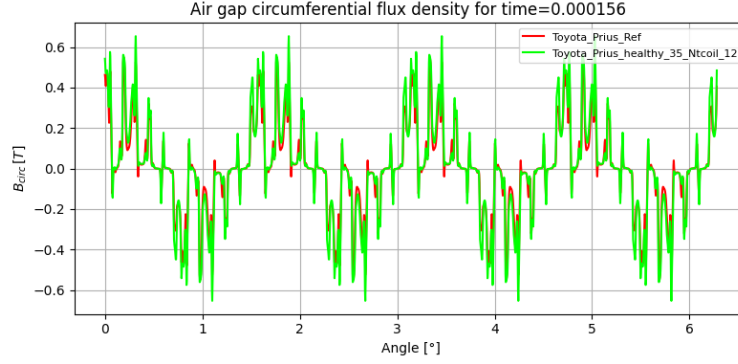


Figure 14: Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle

Analyse fréquentielle : L'amplitude de la fondamentale (200 Hz) est significativement plus élevée que celle de la référence, ce qui est cohérent avec l'augmentation de Ntcoil. Les harmoniques restent faibles, sans apparition d'harmoniques indésirables.

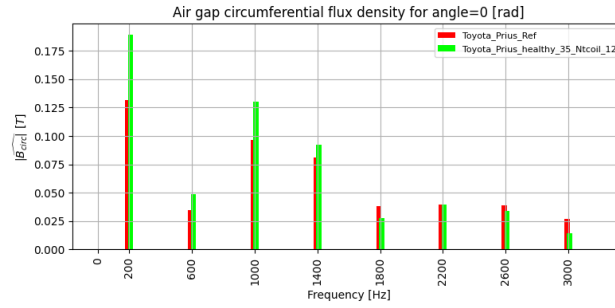


Figure 15: Spectre fréquentiel du flux ($\theta = 0$ rad)

Couple électromagnétique : Le couple moyen est nettement plus élevé (autour de -430 Nm) que celui de la machine de référence (autour de -350 Nm). Cette augmentation est attendue avec un nombre de spires supérieur, mais s'accompagne d'ondulations plus fortes (ripple).

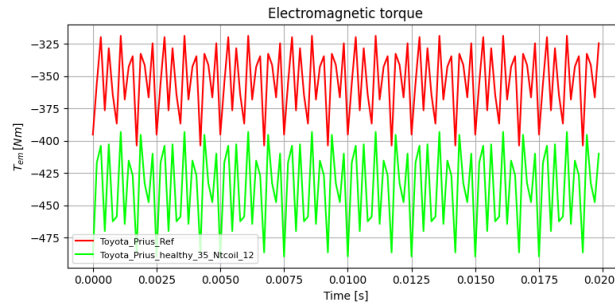


Figure 16: Couple électromagnétique en fonction du temps

Flux dans l'entrefer en fonction du temps : Les deux signaux temporels montrent une excellente symétrie. La forme est très proche de la machine saine précédente, bien que l'amplitude soit légèrement augmentée. Aucune perturbation ou déséquilibre n'est observé.

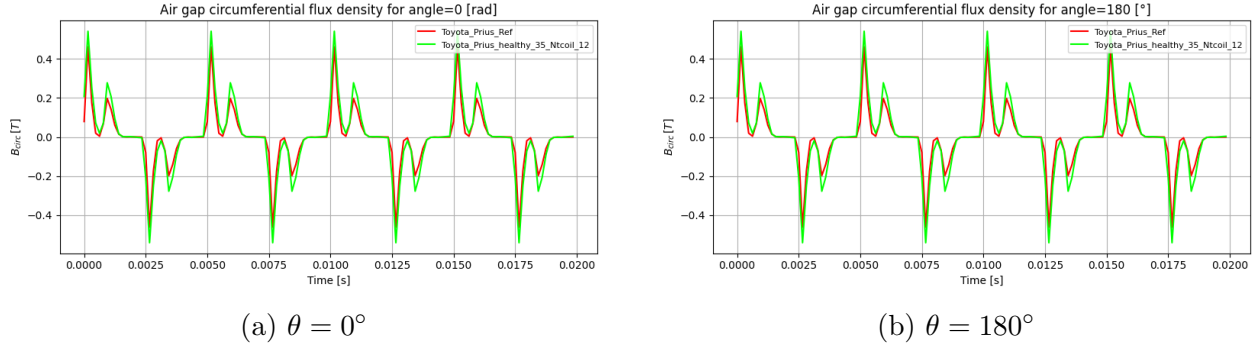


Figura 17: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps à deux positions opposées

Remarque : La machine saine ID035 présente une performance supérieure en termes de couple et de flux, grâce à l'augmentation du nombre de spires. Les indicateurs restent tous dans la plage normale, sans signe de défaut ou d'instabilité.

5.1.4 Toyota_Prius_healthy_49_Ntcoil_7

Cette machine est saine et équipée d'un bobinage avec un nombre réduit de spires par encoche ($N_{tcoil} = 7$). Elle représente une topologie avec une inductance plus faible, ce qui permet de tester la stabilité du comportement électromagnétique dans des cas à faible enroulement.

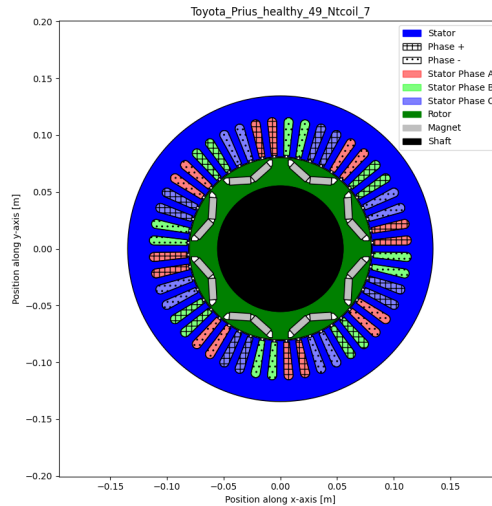


Figura 18: Vue géométrique de la machine Toyota_Prius_healthy_49_Ntcoil_7

Analyse : La géométrie statorique et rotorique est conforme à celle des autres variantes saines. Le nombre réduit de spires rend cette configuration intéressante pour observer les effets sur le flux et le couple.

Distribution angulaire du flux magnétique : Le profil angulaire du flux reste globalement similaire à celui de la machine de référence, avec une amplitude légèrement plus élevée. Cela peut s'expliquer par la répartition plus concentrée du flux à travers un bobinage moins réparti.

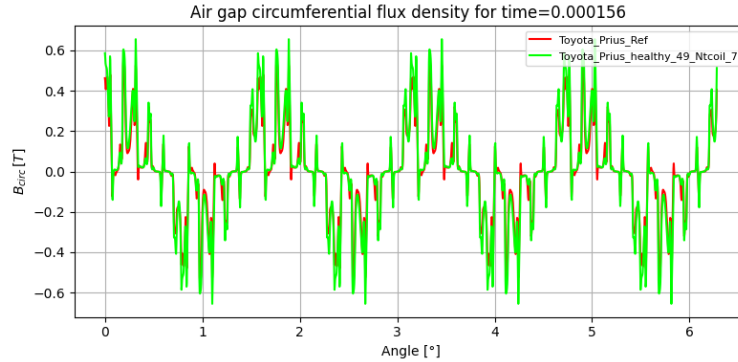


Figure 19: Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle

Analyse fréquentielle : Le pic fondamental (200 Hz) est plus marqué que dans les configurations précédentes, ce qui reflète l'impact direct du nombre de spires sur l'amplitude du flux. Les harmoniques restent bien maîtrisées, indiquant un comportement sain.

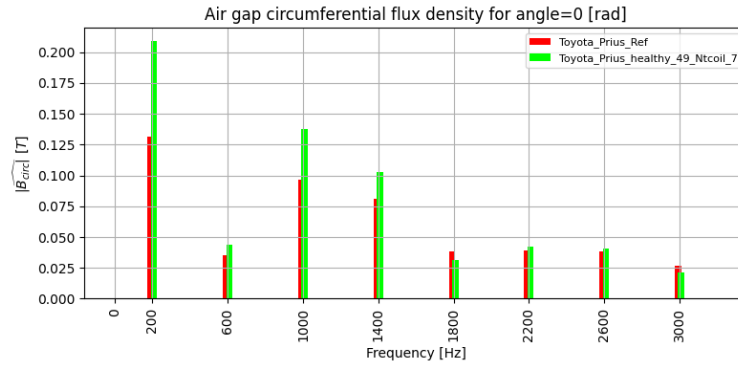


Figure 20: Spectre fréquentiel de la densité de flux ($\theta = 0$ rad)

Couple électromagnétique : Le couple est plus élevé que dans les autres cas (approchant les -460 Nm). Cependant, des fluctuations plus importantes sont visibles (fort ripple), ce qui est typique des enroulements avec peu de spires. La moyenne reste stable et exploitable.

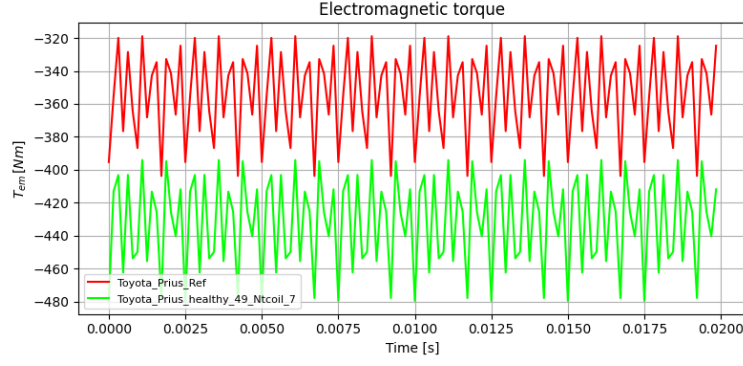
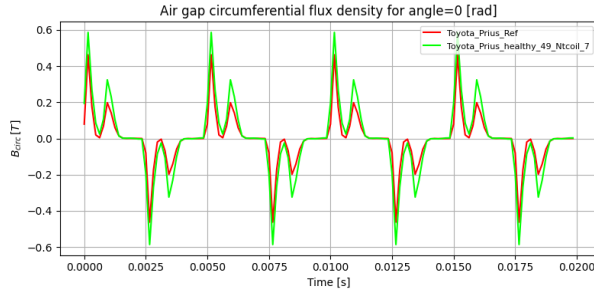
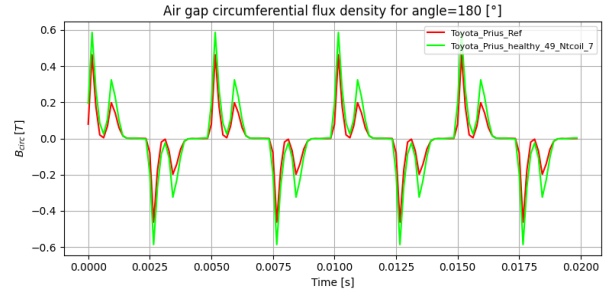


Figure 21: Couple électromagnétique en fonction du temps

Flux dans l'entrefer en fonction du temps : Les signaux temporels montrent une bonne symétrie. L'intensité est légèrement plus forte que dans les cas précédents. Aucune irrégularité n'est constatée, ce qui confirme l'état sain de cette machine.



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 180^\circ$

Figure 22: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps à deux positions opposées

Remarque : Cette configuration montre que, malgré un nombre de spires plus faible, le fonctionnement électromagnétique reste stable et performant. Le couple est élevé, mais les fluctuations plus prononcées devront être prises en compte pour des applications sensibles au ripple.

5.2 Analyse des machines défectueuses

Dans cette section, nous analysons le comportement électromagnétique de **3 machines défectueuses** issues de notre base de simulation. Ces machines intègrent des défauts géométriques simulés, tels que :

Pour chaque machine défectueuse analysée, nous présentons :

- sa géométrie
- la densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle et du temps,
- le spectre fréquentiel du flux radial (analyse harmonique),
- le couple électromagnétique en fonction du temps.

Ces résultats permettent de mieux comprendre l'impact de chaque type de défaut sur :

- la symétrie magnétique,
- la production du couple,
- la qualité du signal (présence d'harmoniques parasites),
- la stabilité temporelle de la machine.

5.2.1 Toyota_Prius_defect_5_Ntcoil_7

géométrie de la machine : Ce schéma représente la géométrie de la machine défectueuse. Bien que visuellement la structure semble correcte, elle incorpore un défaut paramétrique (comme une variation excessive de H0 ou W0) introduit artificiellement dans le modèle. Ce type de défaut peut affecter l'équilibre du champ magnétique ou la génération du couple.

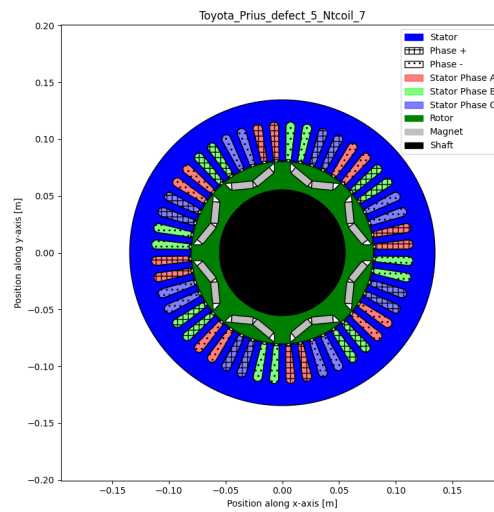


Figure 23: Vue géométrique de la machine Toyota_Prius_defect_5_Ntcoil_7. Le défaut est invisible à l'œil nu, mais modifie localement le comportement électromagnétique.

Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle : Ce graphique représente la densité de flux magnétique circonférentiel B_{circ} en fonction de l'angle, à un instant donné. La courbe correspondant à la machine défectueuse (en vert) présente des distorsions par rapport à celle de la machine de référence (en rouge), notamment des pics irréguliers et une perte de symétrie. Ces irrégularités indiquent une perturbation du champ magnétique dans l'entrefer, directement liée au défaut géométrique introduit.

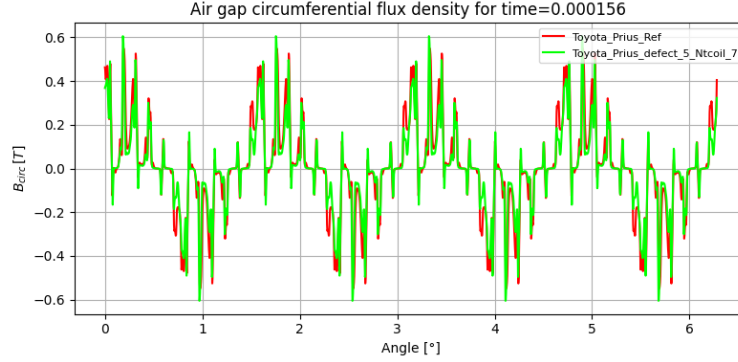


Figure 24: Densité de flux magnétique circonférentiel dans l'entrefer en fonction de l'angle à l'instant $t = 0.000156$ s. On note des irrégularités dans le profil vert (défectueux), indiquant une perte de symétrie.

Analyse fréquentielle (FFT) du flux à $\theta = 0$ rad : Cette analyse spectrale met en évidence les composantes harmoniques de la densité de flux magnétique circonférentiel B_{circ} . On observe une augmentation notable des harmoniques d'ordre supérieur pour la machine défectueuse (courbe verte), en particulier à 200 Hz et 1000 Hz. Cela indique un champ magnétique moins sinusoïdal, ce qui peut entraîner une augmentation des pertes par hystérésis, du bruit acoustique, et des vibrations mécaniques.

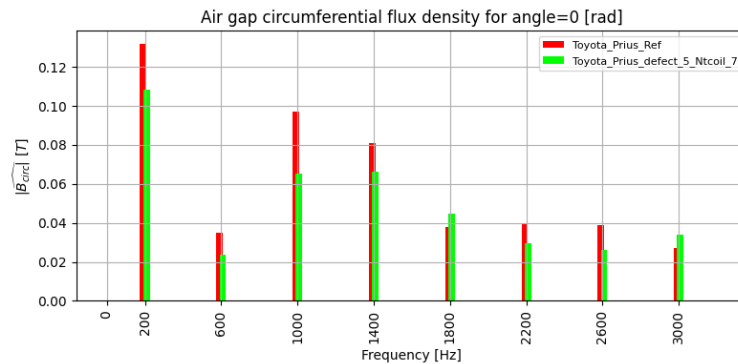


Figure 25: Analyse fréquentielle du flux à l'angle $\theta = 0$.

Couple électromagnétique en fonction du temps : Le couple électromagnétique de la machine défectueuse (vert) est plus élevé que celui de la référence, mais avec des fluctuations

plus importantes. Ce comportement traduit un fonctionnement instable, où le défaut introduit une oscillation supplémentaire du couple, potentiellement néfaste pour la mécanique.

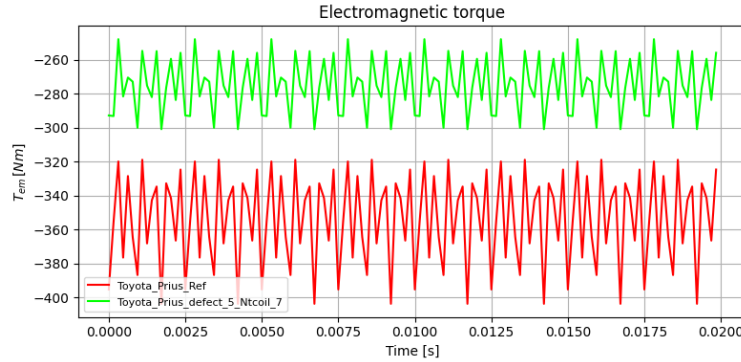
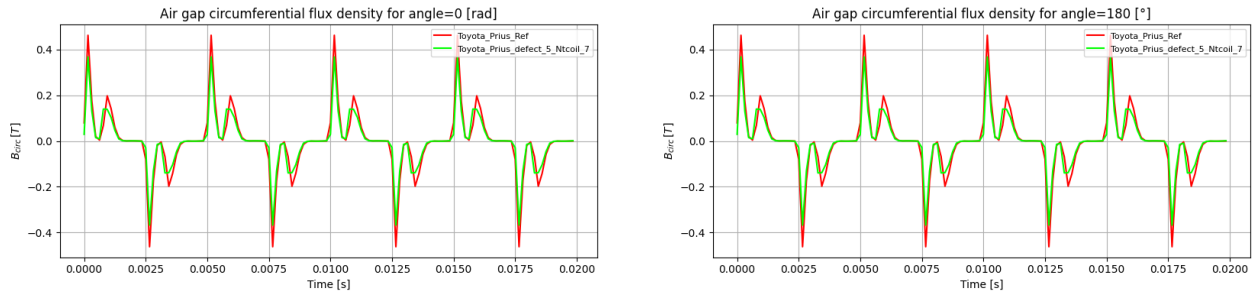


Figure 26: Évolution du couple électromagnétique au cours du temps.

Flux dans l'entrefer en fonction du temps : À l'angle $\theta = 0^\circ$, la densité de flux magnétique de la machine défectueuse présente une forme d'onde globalement similaire à celle de la machine de référence, mais avec des irrégularités visibles dans les pics et les creux. Cela traduit une perturbation du circuit magnétique.

À $\theta = 180^\circ$, des variations similaires sont observées, mais l'asymétrie entre les deux positions opposées est plus marquée que pour une machine saine. Cela reflète un déséquilibre du champ magnétique causé par le défaut géométrique.



(a) Angle = 0 rad

(b) Angle = 180°

Figure 27: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps pour deux positions opposées.

Remarque: La machine `Toyota_Prius_defect_5_Ntcoil_7` présente des perturbations notables du comportement électromagnétique par rapport à la référence. L'analyse met en évidence un déséquilibre du flux dans l'entrefer, une distorsion harmonique accrue et un couple électromagnétique sensiblement plus élevé, mais potentiellement moins stable. Ces effets sont caractéristiques d'un défaut géométrique impactant la symétrie du champ magnétique.

5.2.2 Toyota_Prius_defect_48_Ntcoil_10

Cette section présente une analyse détaillée de la machine défectueuse identifiée par le cas `Toyota_Prius_defect_48_Ntcoil_10`. L'objectif est d'observer les impacts d'un défaut géométrique sur les grandeurs électromagnétiques clés : distribution du flux dans l'entrefer, spectre fréquentiel, comportement du couple électromagnétique et évolution temporelle du flux magnétique.

Structure géométrique : La géométrie semble visuellement correcte comme on peut le remarquer. Aucun défaut manifeste n'est visible sur le schéma, mais l'analyse électromagnétique révèle des irrégularités causées par des défauts internes simulés.

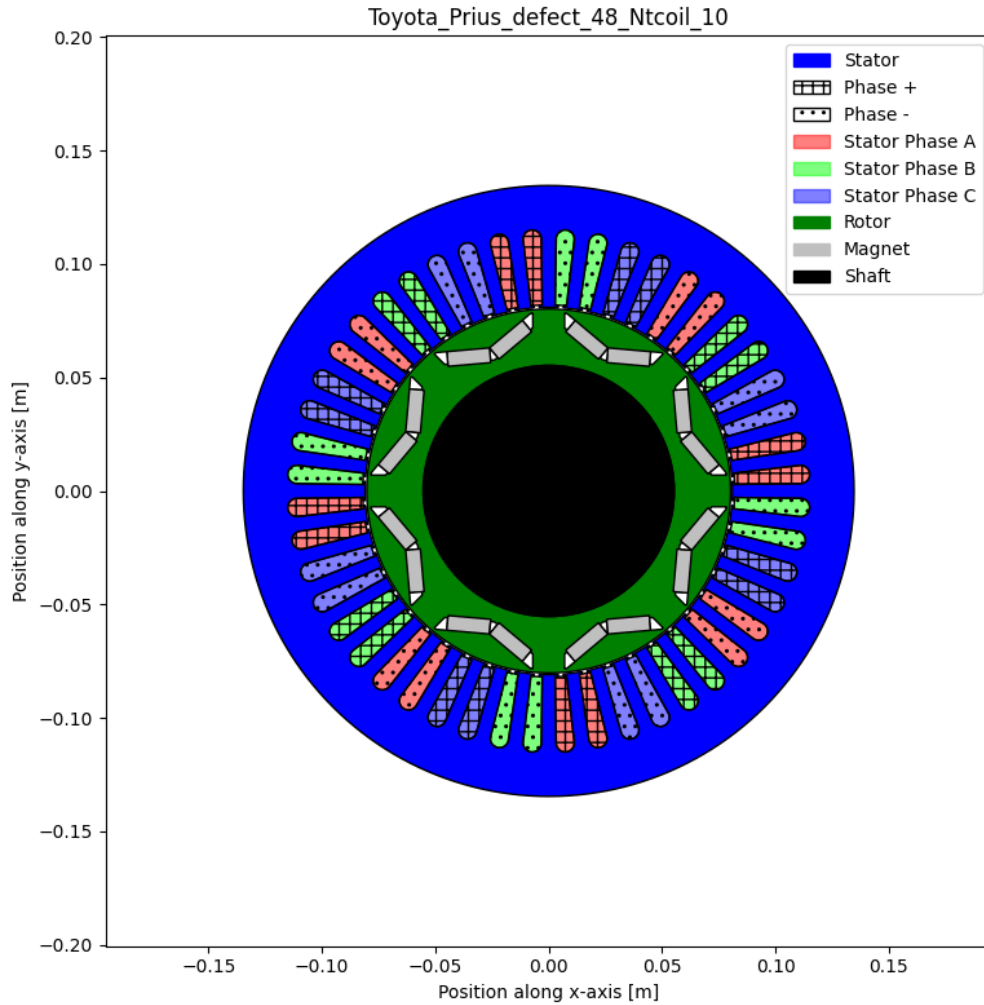


Figura 28: Géométrie de la machine `Toyota_Prius_defect_48_Ntcoil_10`

Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle : Le profil de flux de la machine défectueuse (vert) montre des déformations par rapport à la référence (rouge), notamment

au niveau des pics. Cela traduit une perturbation du champ magnétique due à la déformation géométrique.

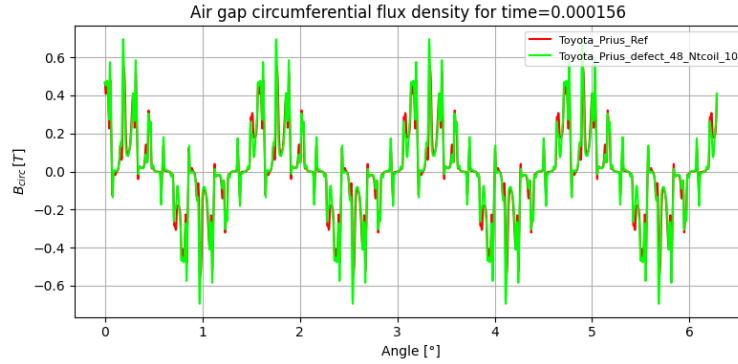


Figura 29: Densité de flux magnétique circonférentiel en fonction de l'angle

Analyse fréquentielle (FFT) du flux à $\theta = 0$ rad : Le spectre montre une amplification des harmoniques (notamment à 200 Hz, 1000 Hz et 1400 Hz) pour la machine défectueuse. Ces composantes traduisent une distorsion du champ magnétique, potentiellement responsable de pertes supplémentaires et de vibrations acoustiques.

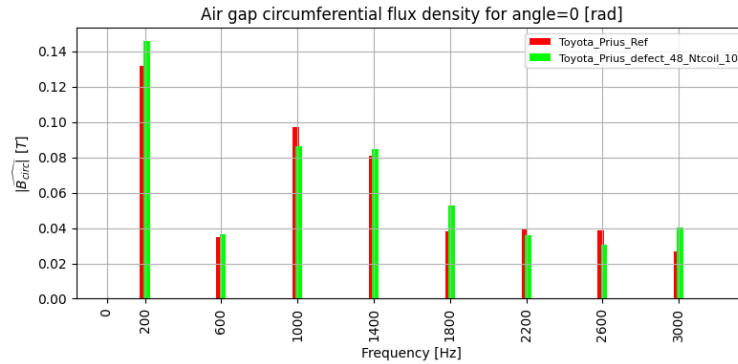


Figura 30: Spectre fréquentiel de la densité de flux à $\theta = 0$ rad

Couple électromagnétique : Le couple moyen de la machine défectueuse est légèrement inférieur à celui de la référence, avec une ondulation plus importante. Cette instabilité reflète les perturbations magnétiques introduites par le défaut géométrique.

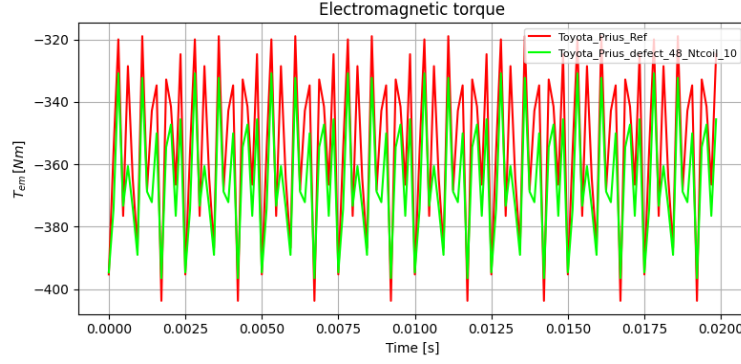


Figure 31: Évolution temporelle du couple électromagnétique

Flux magnétique en fonction du temps : Les deux signaux sont proches de la référence, mais présentent une légère asymétrie entre les positions opposées ($\theta = 0^\circ$ et 180°), ce qui suggère un déséquilibre magnétique induit par le défaut.

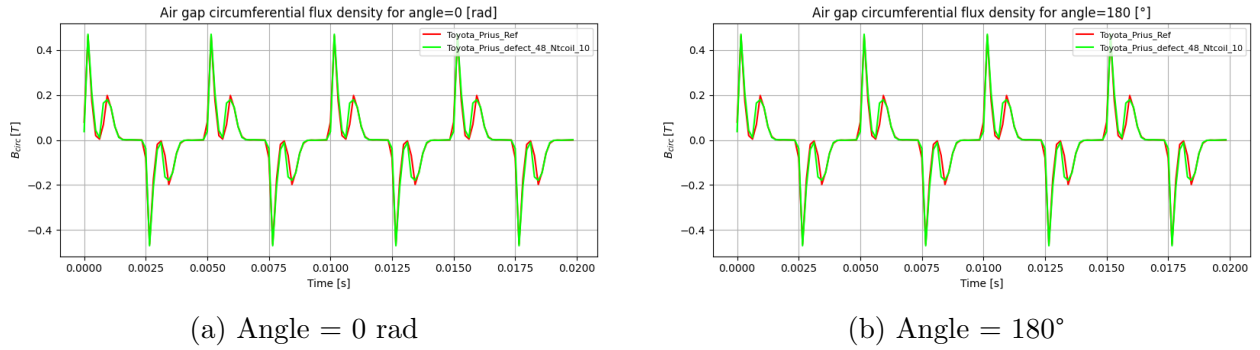


Figure 32: Densité de flux dans l'entrefer en fonction du temps à deux positions opposées

Remarque: Cette machine défectueuse présente des distorsions mesurables du champ magnétique, une augmentation des harmoniques et des irrégularités dans le couple. Ces anomalies confirment l'impact du défaut sur le comportement électromagnétique global de la machine.

5.2.3 Toyota_Prius_defect_22_Ntcoil_12

Cette machine est affectée par un défaut géométrique particulier avec un nombre de spires par bobine fixé à 12. L'objectif ici est de comparer son comportement magnétique et mécanique à celui de la machine saine afin de mettre en évidence les conséquences du défaut.

Densité de flux dans l'entrefer en fonction de l'angle : La courbe verte représentant la machine défectueuse présente des pics plus marqués et irréguliers par rapport à la machine saine (en rouge). Cela traduit une forte distorsion du champ magnétique dans l'entrefer, causée par le déséquilibre du circuit magnétique.

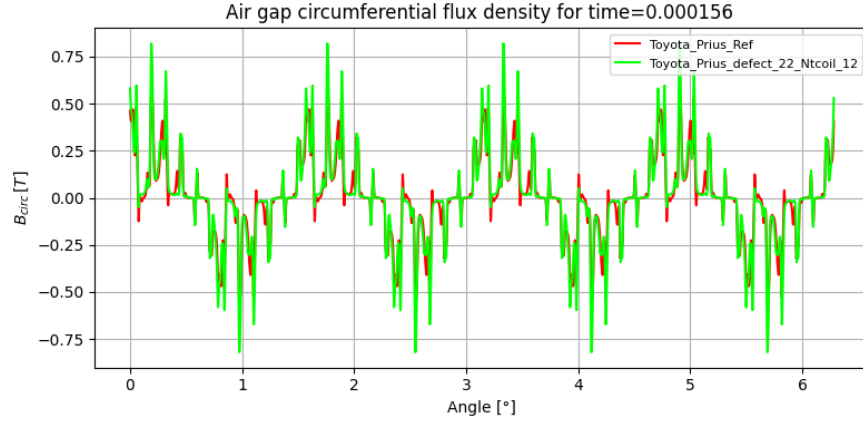


Figure 33: Densité de flux magnétique circonférentiel dans l'entrefer en fonction de l'angle.

Analyse fréquentielle (FFT) à $\theta = 0$: Le spectre de la machine défectueuse (barres vertes) révèle une nette amplification des harmoniques, notamment à 200 Hz, 1000 Hz, 1400 Hz et 3000 Hz. Cette perturbation harmonique est un indicateur direct de l'effet du défaut, générant un champ magnétique fortement non sinusoïdal susceptible d'induire davantage de pertes, de vibrations et de bruit.

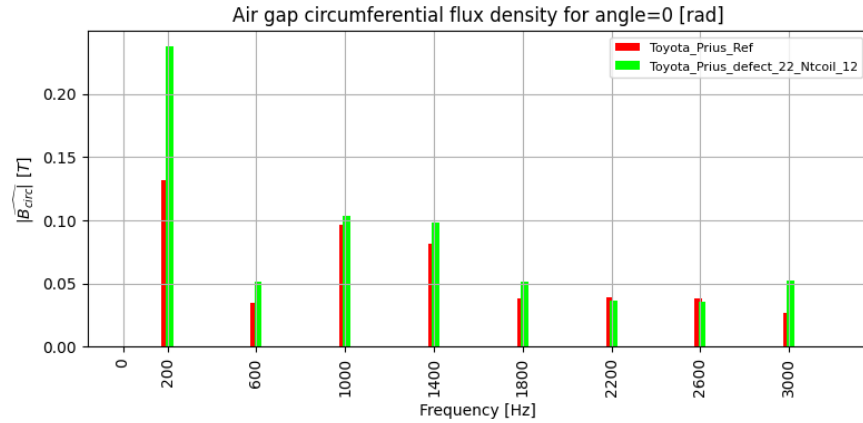


Figure 34: Spectre de la densité de flux magnétique à $\theta = 0$ rad.

Couple électromagnétique : Le couple généré par la machine défectueuse est globalement plus faible que celui de la référence, avec des valeurs oscillant entre -370 Nm et -430 Nm. On note également des ondulations de plus grande amplitude. Ces irrégularités sont typiques d'un fonctionnement instable, conséquence directe du défaut structurel.

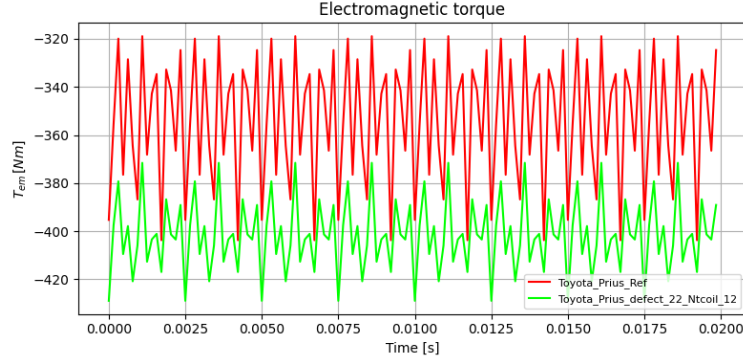


Figure 35: Évolution du couple électromagnétique en fonction du temps.

Densité de flux en fonction du temps à $\theta = 0$: La courbe verte montre des pics de flux plus élevés que la machine saine, traduisant des saturations locales. On observe également des irrégularités dans la forme d'onde, suggérant un comportement magnétique instable à cette position.

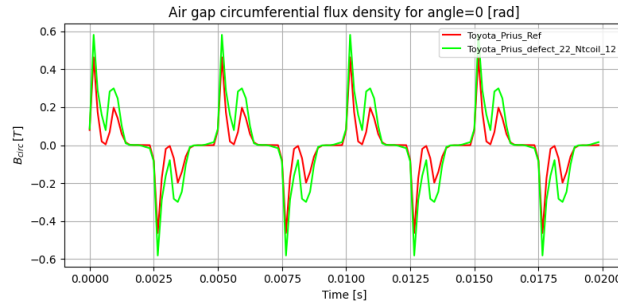


Figure 36: Densité de flux magnétique circonférentiel à $\theta = 0$ rad en fonction du temps.

Densité de flux en fonction du temps à $\theta = 180^\circ$: La dissymétrie est encore plus visible ici : les pics sont décalés en amplitude par rapport à ceux obtenus à $\theta = 0$, ce qui met en évidence une forte asymétrie du champ magnétique. Cette dissymétrie est un indicateur clair du déséquilibre engendré par le défaut.

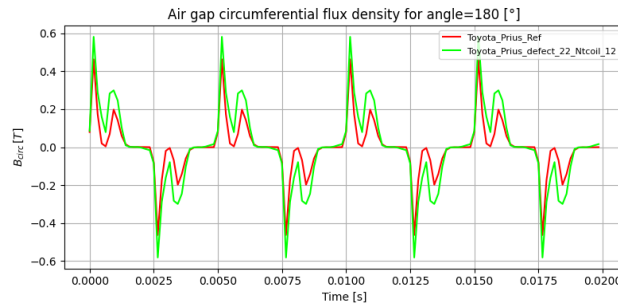


Figure 37: Densité de flux magnétique circonférentiel à $\theta = 180^\circ$ en fonction du temps.

Remarque La machine `defect_22_Ntcoil_12` montre un comportement fortement perturbé. Le défaut introduit de fortes distorsions du flux, une augmentation significative des harmoniques et un couple électromagnétique plus faible et plus instable.

Conclusion

Ce travail a permis de mettre en place une démarche complète de génération, simulation et analyse de machines électriques à l'aide de la bibliothèque open-source **Pyleecan**. Un total de 300 machines, incluant des configurations saines et défectueuses, ont été générées paramétriquement afin d'évaluer l'impact de défauts géométriques sur le comportement électromagnétique.

L'analyse comparative entre machines saines et défectueuses a révélé des effets notables :

- Des distorsions du flux magnétique dans l'entrefer, perceptibles par des asymétries et des pics irréguliers ;
- Une amplification significative des composantes harmoniques, notamment à 200 Hz et 1000 Hz, entraînant une perte du caractère sinusoïdal du champ magnétique ;
- Une baisse du couple électromagnétique moyen accompagnée d'une augmentation des ondulations (torque ripple), traduisant une instabilité magnétique liée au défaut.

Ces observations confirment que des défauts géométriques, même mineurs, peuvent perturber significativement le comportement d'une machine électrique. Ce type d'analyse ouvre la voie à des approches de diagnostic automatisé basées sur la surveillance du flux et du couple.

Enfin, ce projet met en valeur la puissance et la flexibilité de **Pyleecan** pour la simulation massive et la compréhension fine des phénomènes électromagnétiques dans les machines tournantes.

Referencias

- [1] Pyleecan Project. *Python Library for Electrical Engineering Computational Analysis*, <https://www.pyleecan.org>.
- [2] T. Meynard, J. Lefevre, and A. Glavatskikh. *Pyleecan: An Open-Source Python-Based Software for Electrical Machine Simulation*, IEEE ECCE 2023.