convertisseur d'énergie Intégré Intelligent

29 janvier 2020 – comité de suivi

TÂCHE 3 :

Conception d'une machine à reluctance variable à flux axial à tôles à grains orientés

Contexte et verrous scientifiques

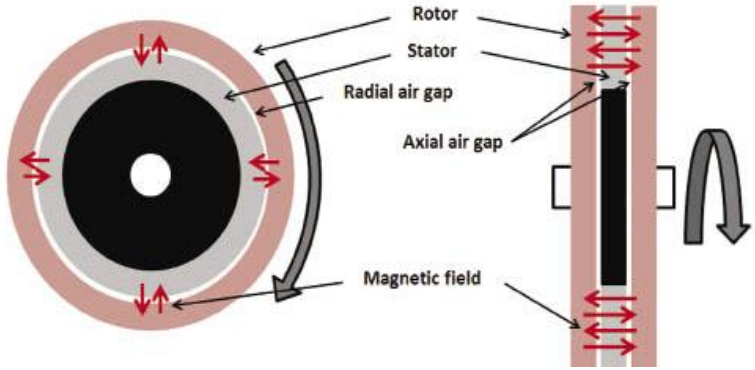
- **Sujet**

  « Conception d'une machine à reluctance variable à flux axial et à tôles à grains orientés »

  Thèse cofinancée par la région et l'université d'Artois + codirection

- **Contexte**

  - **Intérêt** pour la MRV : facilité de fabrication, coût, absence d'aimants et de bobinage au rotor, robustesse, …
  - **Double originalité** du sujet :
    1) Machine à flux **axial** (*peu conventionnelle*)
    2) Utilisation des **tôles GO** (*haute perméabilité et faibles pertes*)



- **Verrous scientifiques**

1) Evaluer la **viabilité** des circuits magnétiques à tôles GO pour des machines tournantes
2) Modéliser des structures **anisotropes** et au comportement **non-linéaire** (*défi numérique*)
3) Améliorer la **puissance massique** pour une application automobile

⇒ **Concevoir une machine compacte et légère avec un rendement élevé pour des applications embarquées**

Déroulement des travaux

1) Etat de l'art

- Classification des MRV à flux axial
- Tôles GO et applications aux MRV

2) Comparaison des performances MRV radiale et axiale NO

- Prise en main du logiciel numérique
- Comparaison des performances (inductance et couple statique)
- Confirmation des résultats de la littérature

3) Intégration de l'acier GO

- Problématique
- Topologie retenue

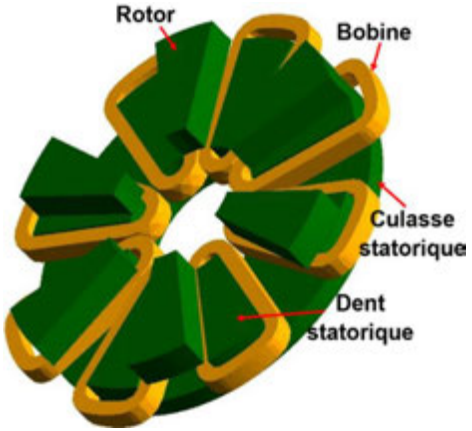
4) Modélisation de la MRV axiale

- Modèle 2D simplifié
- Intégration de l'acier GO dans le modèle numérique 3D
- Conception du prototype de la MRV axiale (CDC donné)
- Validation des résultats numériques en NO et GO

5) Validation expérimentale et rédaction du manuscrit

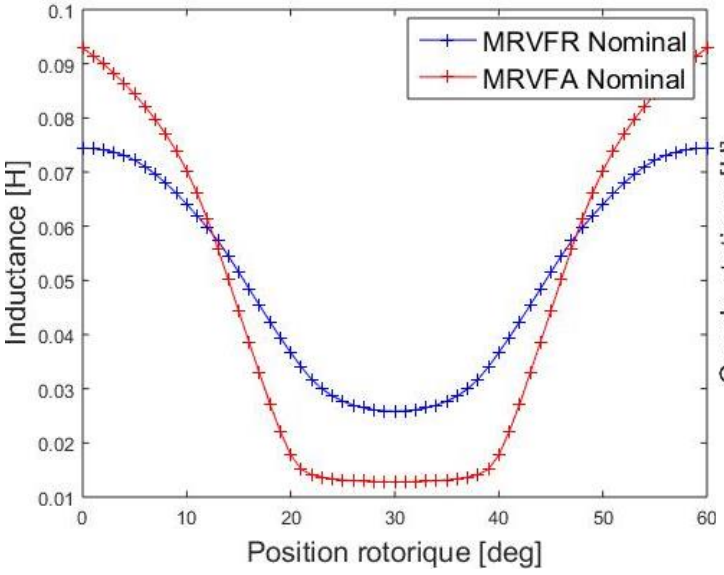
- Fabrication du prototype (2 stators : un en NO et un en GO)
- **Réalisation des tests expérimentaux**
- Rédaction des 3 chapitres du manuscrit

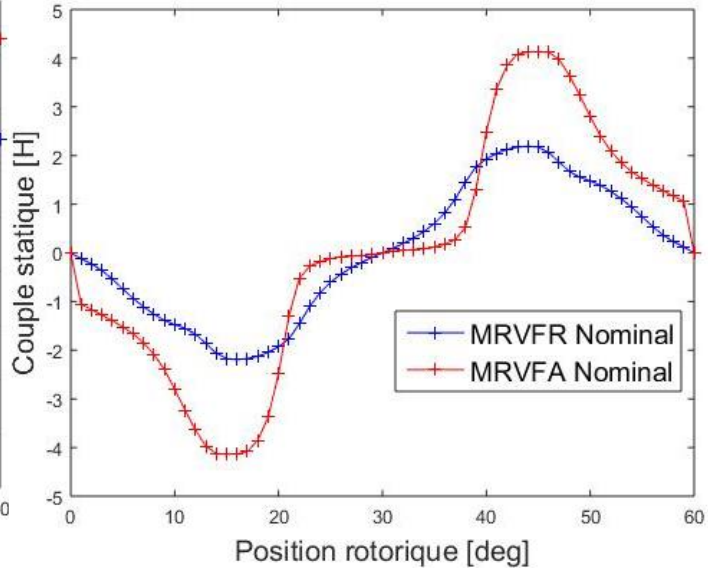
- **Comparaison** des performances de la MRVF radiale et axiale à **surfaces actives équivalentes**
- Allure d'inductance **favorable** à la production de couple et amélioration de la **valeur maximale** du couple statique de la MRV axiale.



Machine axiale plus COMPACTE

Applications avec un couple massique élevé (ratio couple/masse)





- Diminution de **6%** du rayon externe
- Diminution de **47%** de la longueur axiale
- Réduction de **50%** du volume externe
- Augmentation du couple maximum (valeur **doublée**)

UNIVERSITÉ D'ARTOIS

UNION EUROPÉENNE

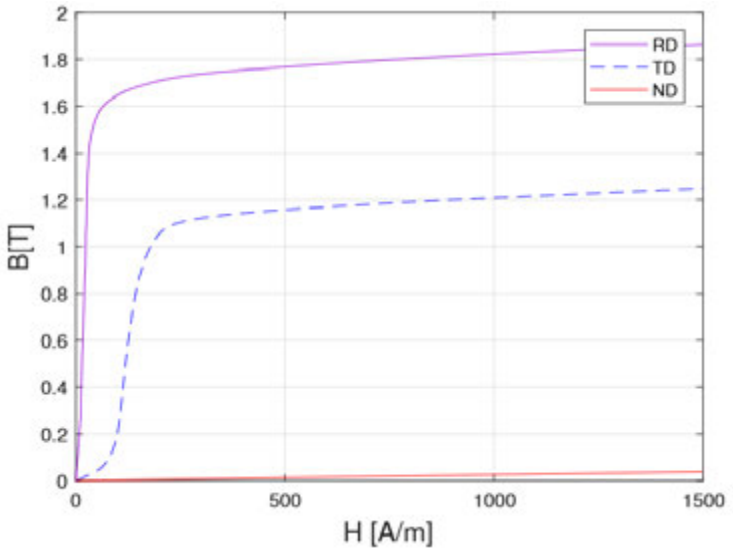
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Région Hauts-de-France

LSEE
Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement

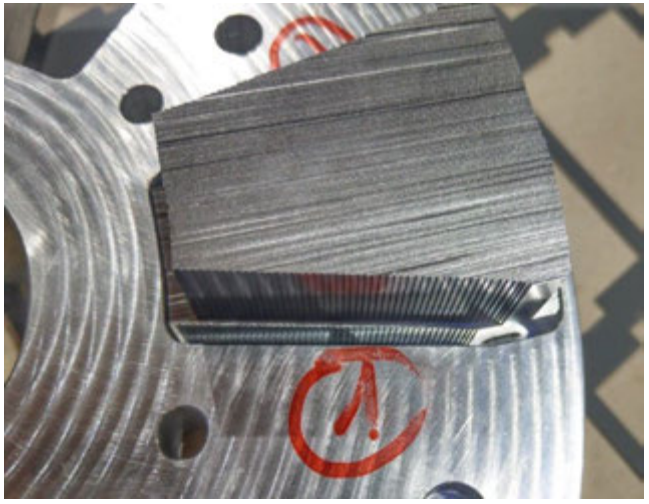
Intégration de l'acier GO

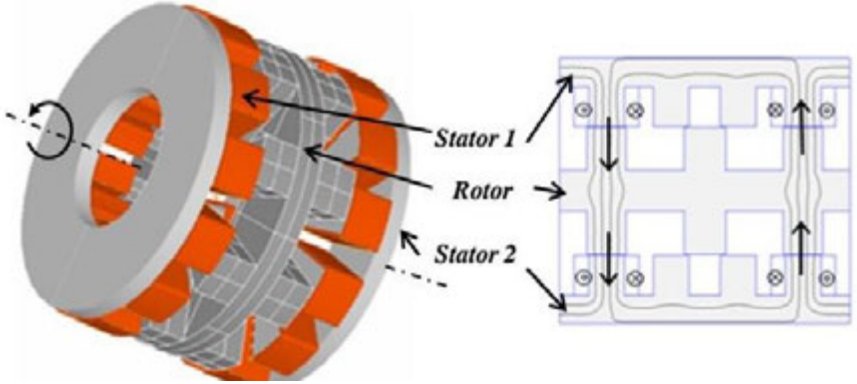
- Qu'est ce qu'un **acier GO** ?
  - Anisotrope
  - Utilisé dans les transformateurs (*anisotropie mieux exploitée*)



- Modélisation : quels **verrous** ?
  - Prise en compte de l'**anisotropie** (*compromis entre précision et convergence*)
  - **Temps de calculs conséquents** pour un modèle 3D

- Intégration au **rotor**
  - Structure **adaptée** pour intégrer des acier GO
  - Flux traversant la culasse rotorique ⇒ exploitation des **avantages** liés à la direction de laminage = facile aimantation
  - Rotor allégé
  - Intégration de l'acier GO **moins complexe** qu'au stator
  - Dents trapézoïdales encapsulées dans une structure amagnétique
  - Tôles **empilées** au niveau du rotor

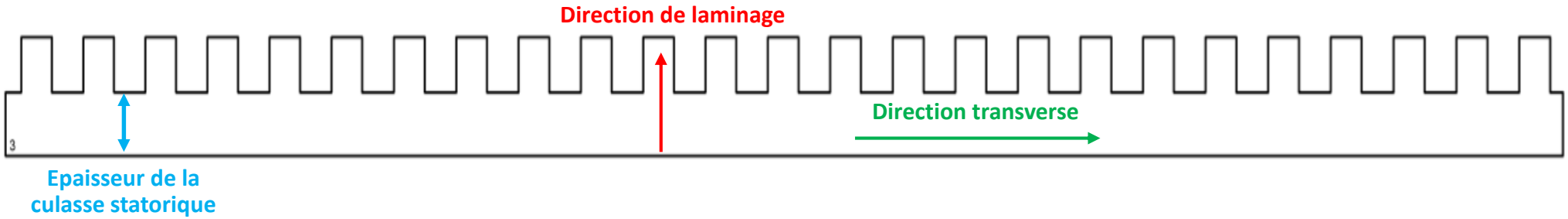




Intégration de l'acier GO

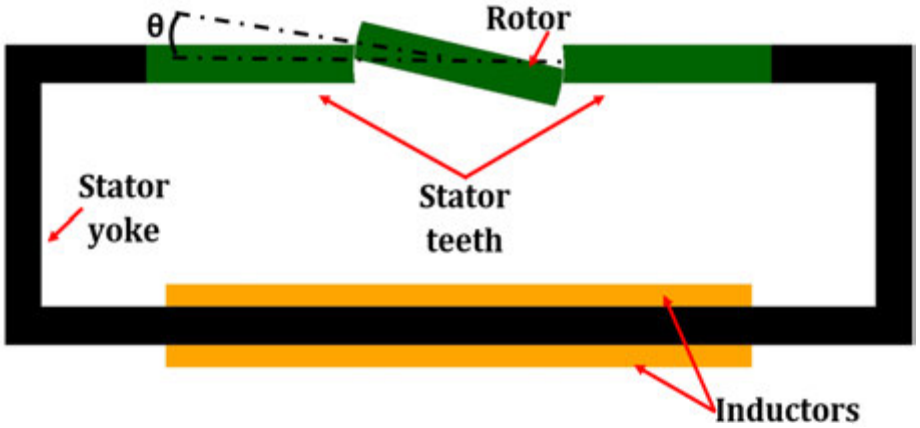
- Intégration au **stator :**

  - Intégration de l'acier GO **plus complexe** qu'au rotor (dents + culasse)
  - GO au dents statoriques et NO à la culasse :
    - *Différence de perméabilités (différents matériaux)*
    - *Faisabilité technologique : Comment maintenir les dents + culasse sans introduire des entrefers indésirables ?*
  - Problématique au niveau de la jonction entre les dents et la culasse statorique (*si segmentation*)
  - Un stator en GO : tôle **découpée** selon un motif (*dents + encoches*) et **enroulée** en créant des dents trapézoïdales (respectant les ouvertures et la hauteur des dents)



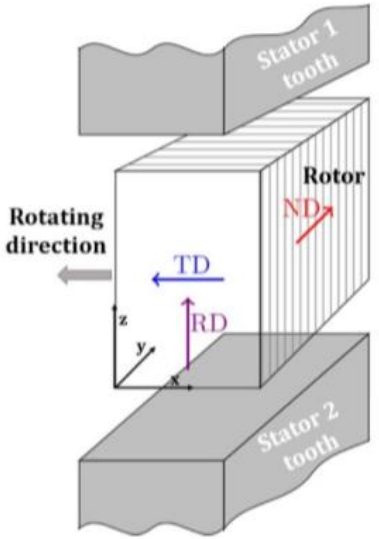
Intégration de l'acier GO : modèle simplifié

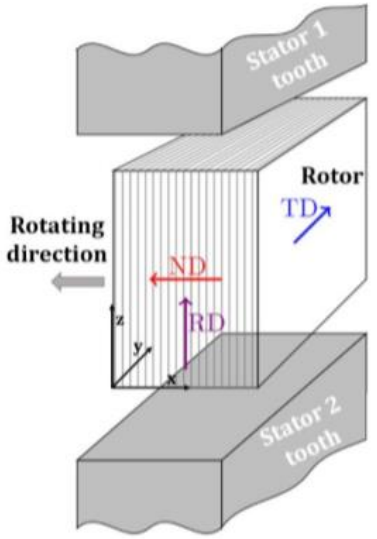
- **Modèle numérique 2D simplifié** :
  - Reproduisant les phénomènes physiques (rotation, effet de saillance, …)
  - Permettant d'analyser/séparer les effets de l'**anisotropie** de la **haute perméabilité**.
  - Permettant une analyse locale des phénomènes



- **Avantages de la maquette numérique 2D :**
  - Gain en temps de calcul
  - Permet une convergence rapide
  - Conclure rapidement sur les **performances** des tôles GO

- **Différents cas étudiés :**
  - **Isotrope** à grains NO (M400)
  - **Anisotrope** à grains orientés (HGO35) (*2 configurations*)
  - **Isotrope** avec même caractéristique RD que HGO35 (sans anisotropie) ➔ **Matériau non existant**





UNIVERSITÉ D'ARTOIS

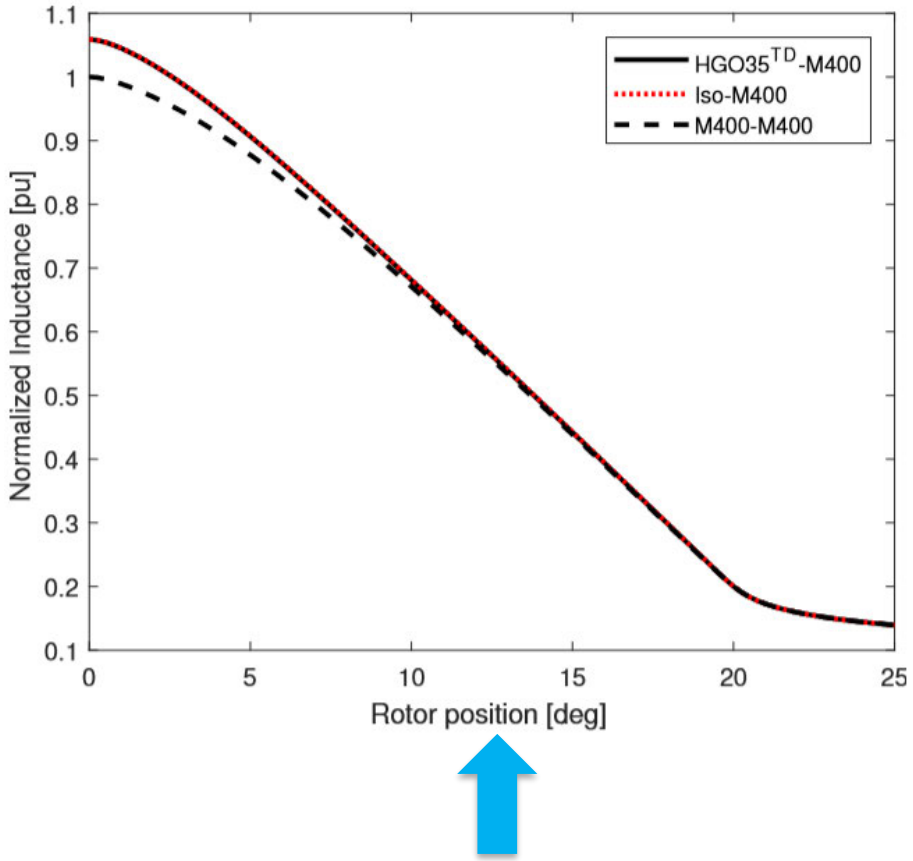
UNION EUROPÉENNE

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Région Hauts-de-France

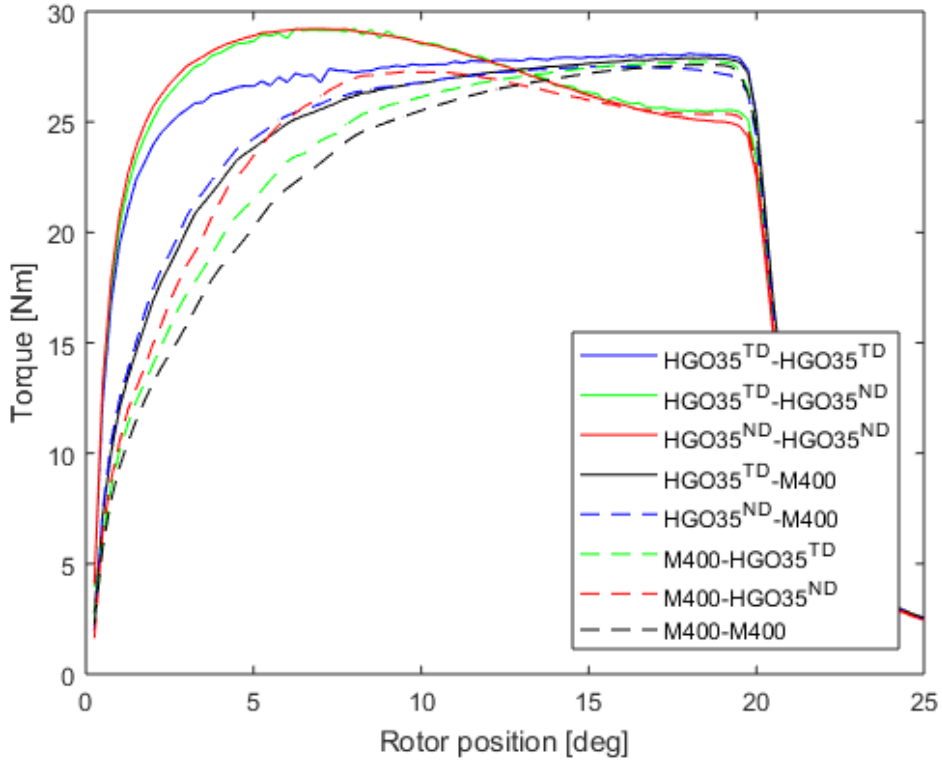
LSEE
Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement

Intégration de l'acier GO : modèle simplifié/résultats



- Séparation des paramètres **perméabilité** / **anisotropie**
- Anisotropie ➔ pas d'influence sur la pente de l'inductance

- Gain de **14,4%** sur la valeur moyenne du couple par rapport au cas utilisant la tôle conventionnelle (grâce aux caractéristiques de l'acier GO)



Intégration de l'acier GO : modèle simplifié/ résultats

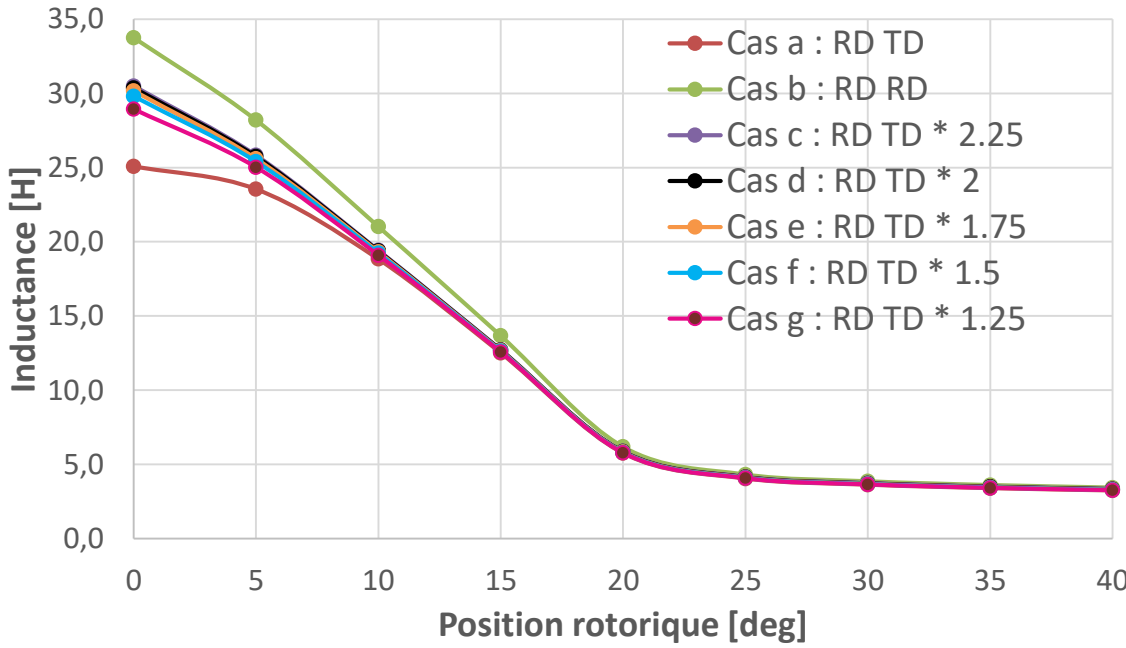
- **Objectif** = Estimer l'**épaisseur de la culasse statorique** permettant au flux de s'établir

➔ Compromis **épaisseur de culasse** avantageuse (gain en couple) et **encombrement** minime.

- **Résultats**

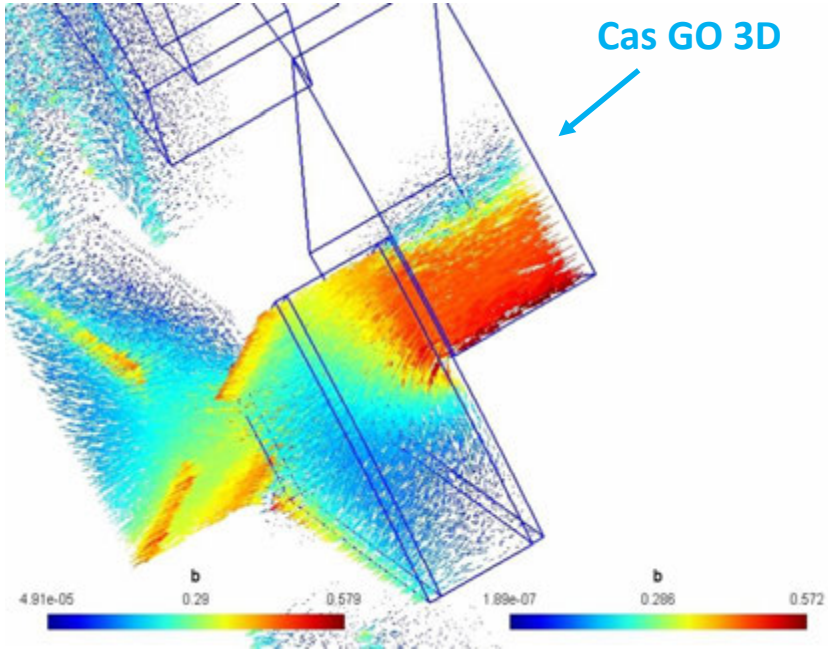
- Pentes d'inductances **plus raides**.
- **Gains** en couple électromagnétique moyen de **12,5%** à **17,7%** par rapport au cas de référence (***cas a***) .

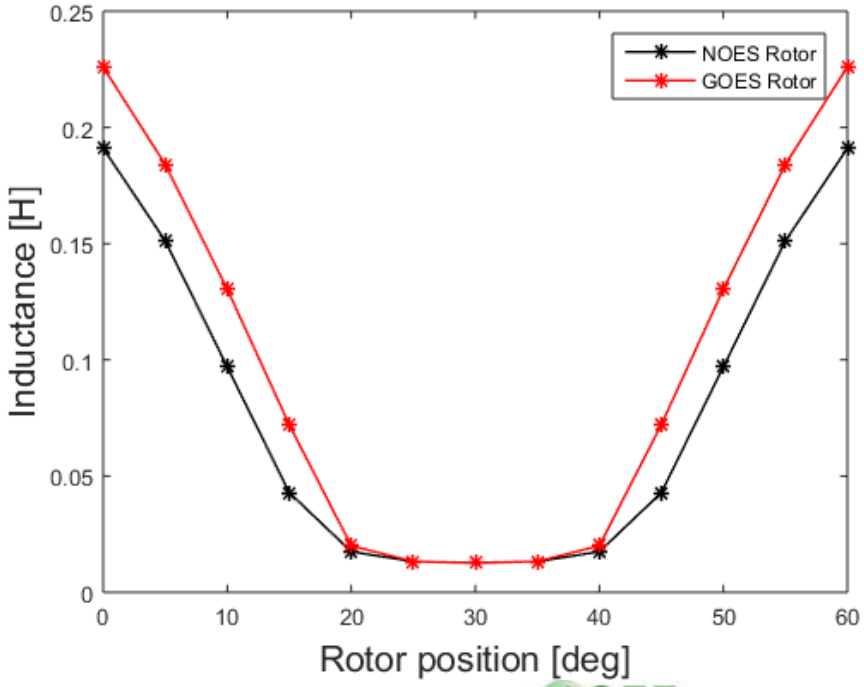
- Une **limite** au niveau <u>épaisseur de culasse/performance</u> est atteinte.
- **Atténuation** de l'**effet** de l'épaisseur de la culasse (lorsqu'elle augmente) sur les pentes d'inductances ➔ *pentes quasiment superposées pour les cas c et d*



Intégration de l'acier GO : modèle 3D

- Problématiques de **convergence** et du **temps de calcul** avec le modèle 3D:
  - Problèmes de **convergence** lorsque le GO est introduit dans tout le circuit magnétique (stator et rotor).
  - **Difficultés** à converger pour des points de fonctionnement proches du coude de saturation (quasi-impossible pour la position de conjonction ou autour).
  - Adaptation du maillage => un compromis entre temps et précision des calculs.
  - Adaptation **des paramètres** pour la méthode itérative (Nbr d'itérations, facteur de relaxation, critère d'arrêt,…)
- **Comparaison** cas NO au rotor et GO au rotor 3D





UNIVERSITÉ D'ARTOIS
UNION EUROPÉENNE
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Région Hauts-de-France
LSEE

- **Utilisation d'un algorithme génétique pour le dimensionnement de la MRVFA :**
  - Dimensionnement analytique pour une puissance **10 kW** et une vitesse de **10000 tr/min**
  - Déduire toutes les dimensions géométriques et paramètres de la machine :
    - Définition des **objectifs** (minimiser l'encombrement, maximiser le couple,…)
    - Définition des **contraintes** (densité de courant, volume total,…)
    - Définition des **intervalles** des variables recherchées

Paramètres	Unité	Valeur
Rayon interne	mm	47,8
Rayon externe	mm	99,2
Ouverture dent statorique	deg	22,2
Ouverture dent rotorique	deg	24
Hauteur dent statorique	mm	20
Hauteur dent rotorique	mm	18,6
Rayon de l'arbre	mm	20
Epaisseur de la culasse	mm	28,5
Nombre de dents au stator	-	8
Nombre de dents au rotor	-	6

Conclusion

Bilan des travaux

- Dimensionnement d'une MRVFA équivalente ➔ + compacte et un couple massique développé plus important par rapport à la machine radiale
- Modèle 2D **simplifié** développé pour l'investigation de l'impact de l'acier GO=> Analyse locale des phénomènes + conclure sur le modèle 3D
- Seule la haute perméabilité a une influence sur la pente d'inductance (anisotropie = aucune influence)
- Intégration de tôles GO ➔ gain jusqu'à 14,4% sur la valeur moyenne du couple électromagnétique
- Construction du prototype de la machine à flux axiale avec acier GO

Conférences :

- « **Investigating the use of grain-oriented electrical steel in axial flux switched reluctance machines** » Racha AYDOUN, Guillaume PARENT, Jean-Philippe LECOINTE and Abdelmounaïm TOUNZI. **Conférence EPNC 2018, Arras.**
- « **Comparison des performances de machines à reluctance variable 8/6 à flux radial et axial**» Racha AYDOUN, Guillaume PARENT, Abdelmounaïm TOUNZI et Jean-Philippe LECOINTE. **Conférence SGE 2018, Nancy.**
- « **Comparison of a NO and a GOES rotor in an axial-flux switched reluctance machine** » Racha AYDOUN, Guillaume PARENT, Jean-Philippe LECOINTE and Abdelmounaïm TOUNZI. **Conférence Intermag 2020, Montréal.**

Publications:

- « **Investigating the use of grain-oriented electrical steel in axial flux switched reluctance machines** » Racha AYDOUN, Guillaume PARENT, Jean-Philippe LECOINTE and Abdelmounaïm TOUNZI. **IJAEM.**
- « **Comparison of 8/6 radial and axial flux switched reluctance machines**» Racha AYDOUN, Guillaume PARENT, Abdelmounaïm TOUNZI et Jean-Philippe LECOINTE. **COMPEL.**

convertisseur d'énergie Intégré Intelligent

Merci pour votre attention