

# Conception de machines électriques par optimisation topologique

Par Théodore CHERRIÈRE  
Prix de thèse Ampère-SEE 2024

# Parcours

09/2020 – 08/2023

## Thèse

dirigée par S. Hlioui,  
F. Louf, L. Laurent

ÖAW  
ÖSTERREICHISCHE  
AKADEMIE DER  
WISSENSCHAFTEN

RICAM  
JOHANN · RADON · INSTITUTE  
FOR COMPUTATIONAL AND APPLIED MATHEMATICS

12/2024 - ...

## Enseignant Chercheur

université  
PARIS-SACLAY

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

SATIÉ

LMPS le cnam  
Imssc

09/2023-11/2024

## Post-doctorat

université  
PARIS-SACLAY



CentraleSupélec

GeePS  
Génie électrique et électronique de Paris

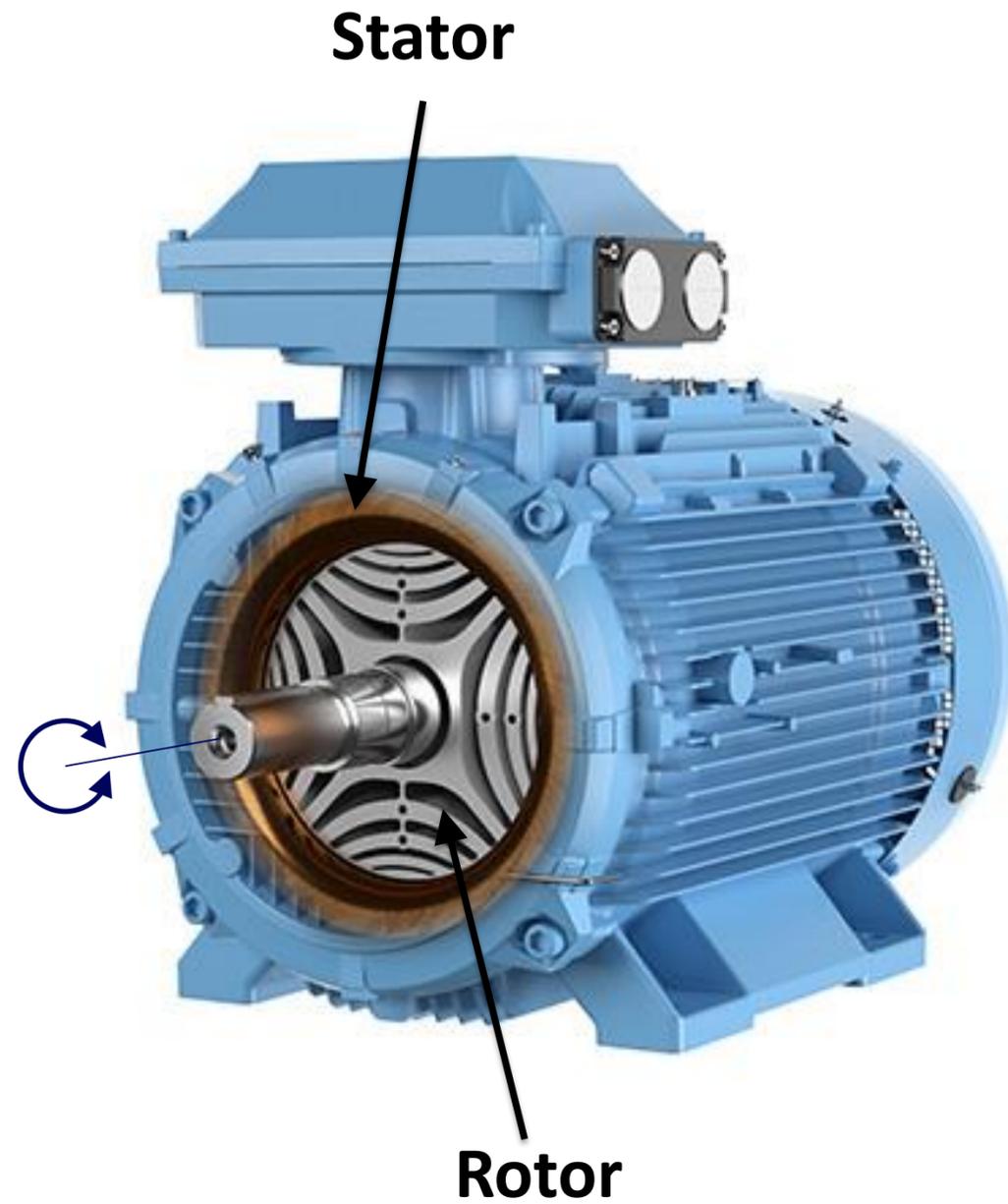
# Sujet de thèse

Élaboration d'outils logiciels pour l'**optimisation topologique magnéto-mécanique** de **machines électriques tournantes**

# Sujet de thèse

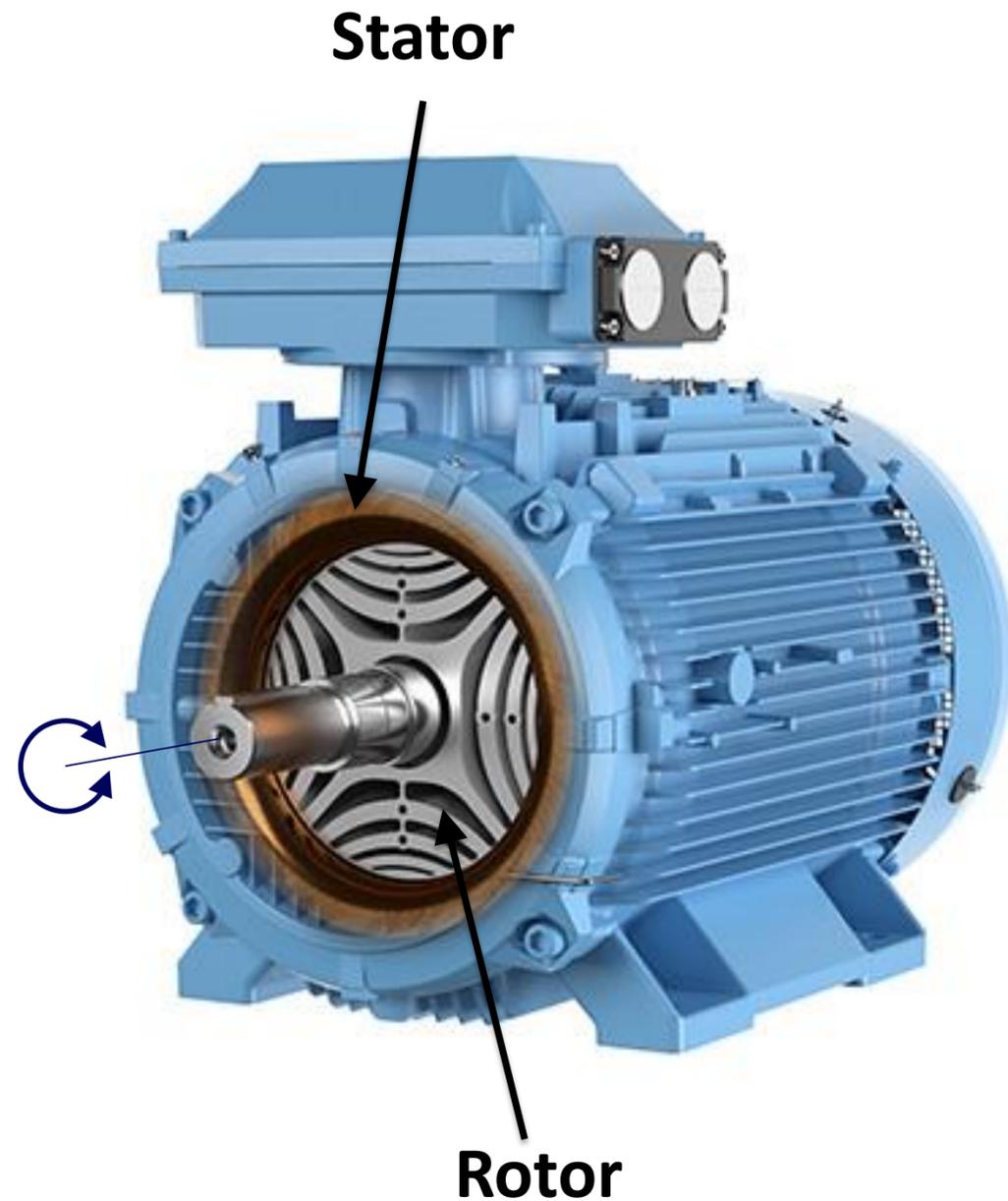
Élaboration d'outils logiciels pour l'**optimisation topologique magnéto-mécanique** de **machines électriques** tournantes

# 1) Machines électriques : généralités



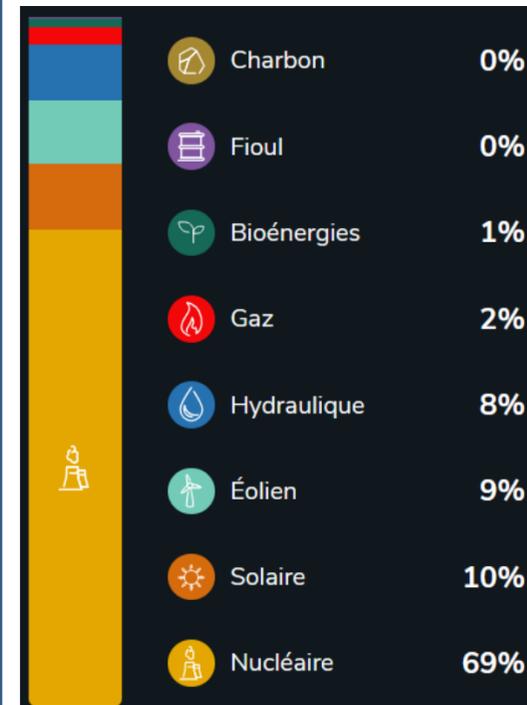
Machine SynRM ABB

# 1) Machines électriques : généralités



Machine SynRM ABB

## Quelques chiffres



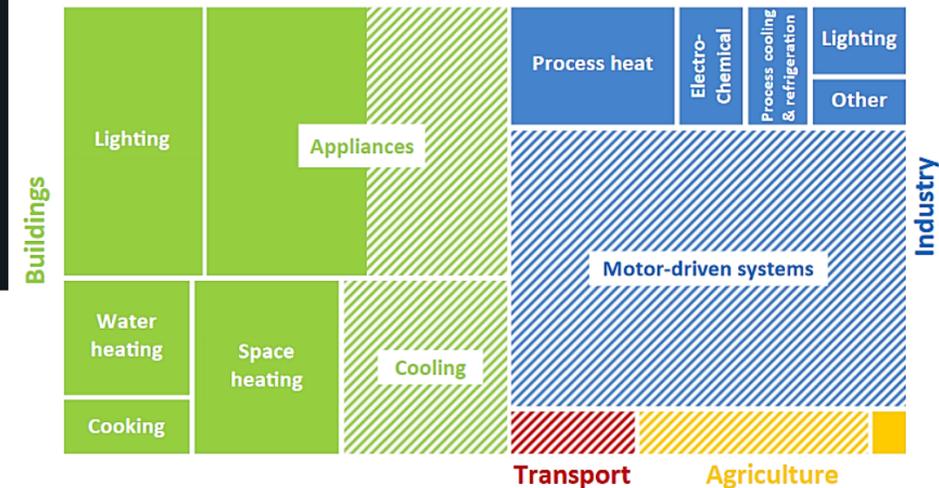
65% de la consommation d'électricité

- 2006 : 46%
- 2014 : 53%
- 2023 : 65%

*Source* : IEA, World Energy Outlook 2023

> 90 % de la production d'électricité

*Source* : RTE éCO2mix, 01/12/2024, 13:00



Share of motors: 53%

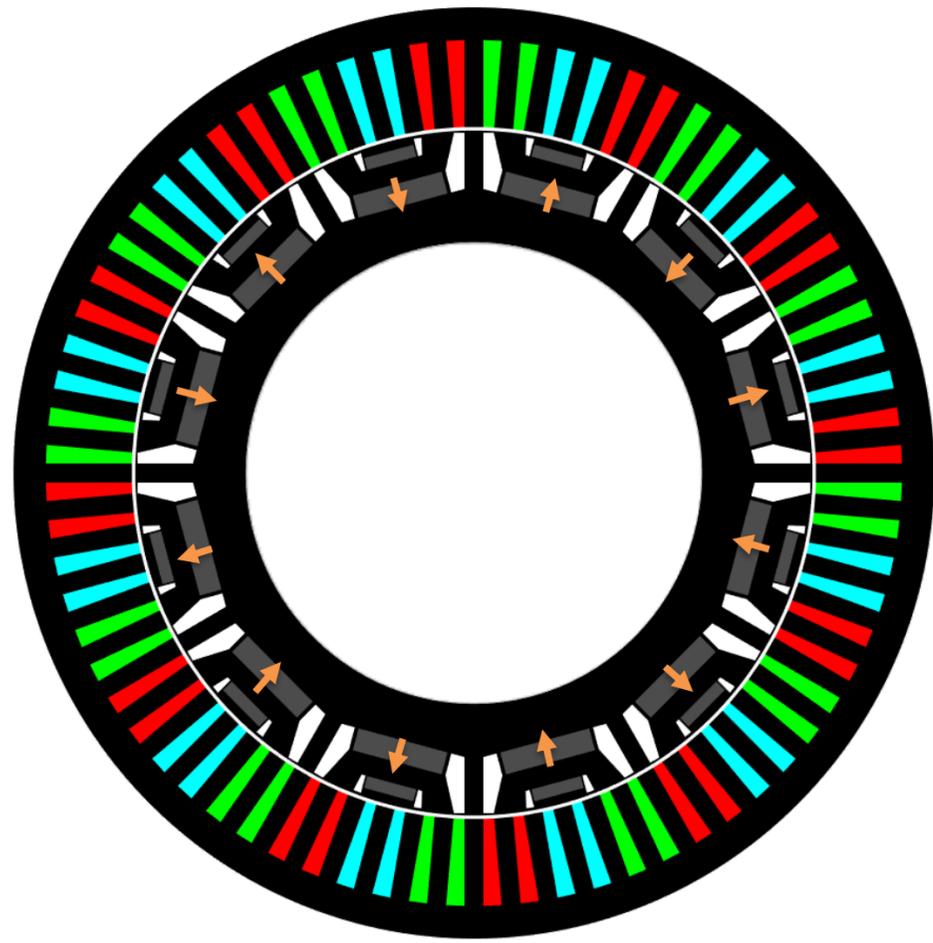
Motors account for more than half of today's electricity consumption

**Perspectives d'évolution :**

- x23 véhicules électriques
- x10 pompes à chaleur

*Source* : scénario EDF net zéro 2050

# 1) Machines électriques : conception optimale



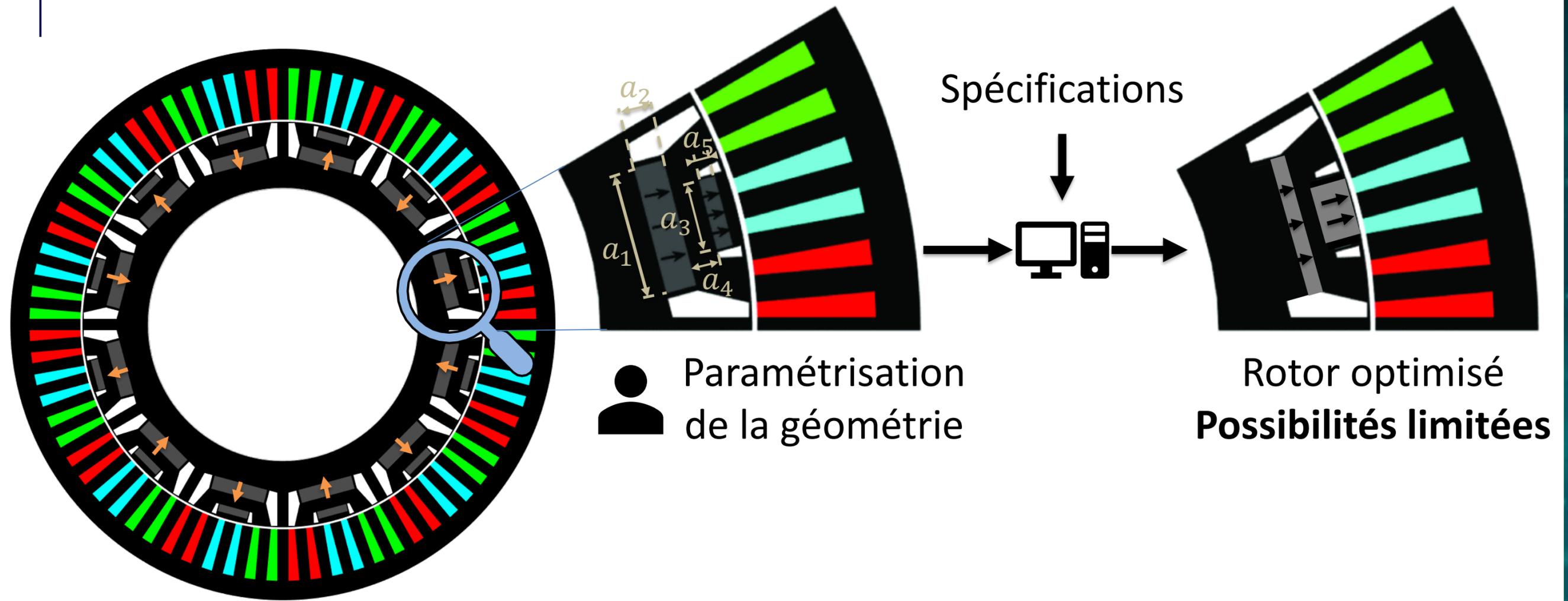
■ Acier

□ Air

↑ Aimant

Conducteurs  
électriques

# 1) Machines électriques : conception optimale



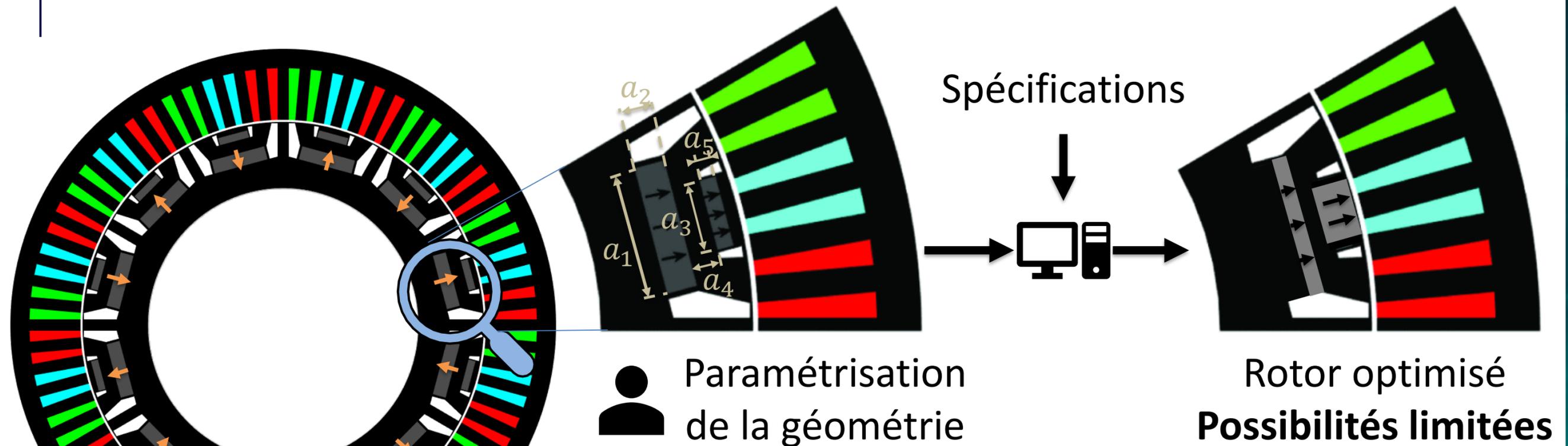
■ Acier

□ Air

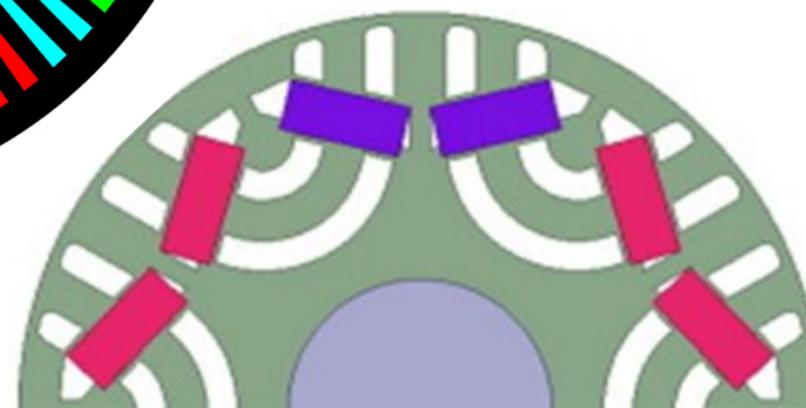
↑ Aimant

Conducteurs  
électriques

# 1) Machines électriques : conception optimale

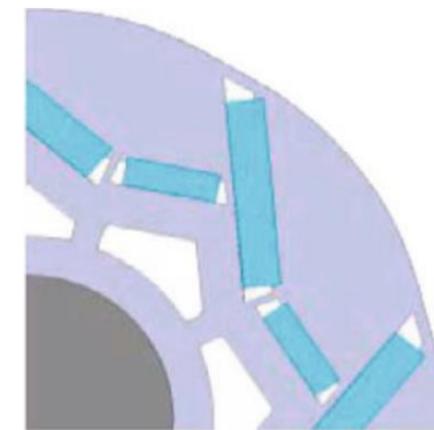


- Acier
- Air
- Aimant
- } Conducteurs électriques
- }
- }

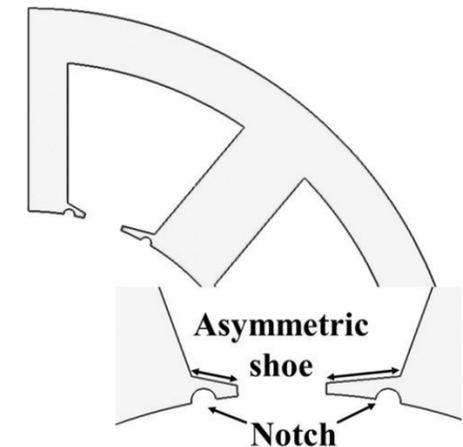


Autres dispositions d'acier et d'aimants ? [1]

- [1] Kashif & Singh (2022)
- [2] Zhang, Shi, Liu et. al. (2021)
- [3] Moon & Kang (2022)



Assymétrie ? [2]



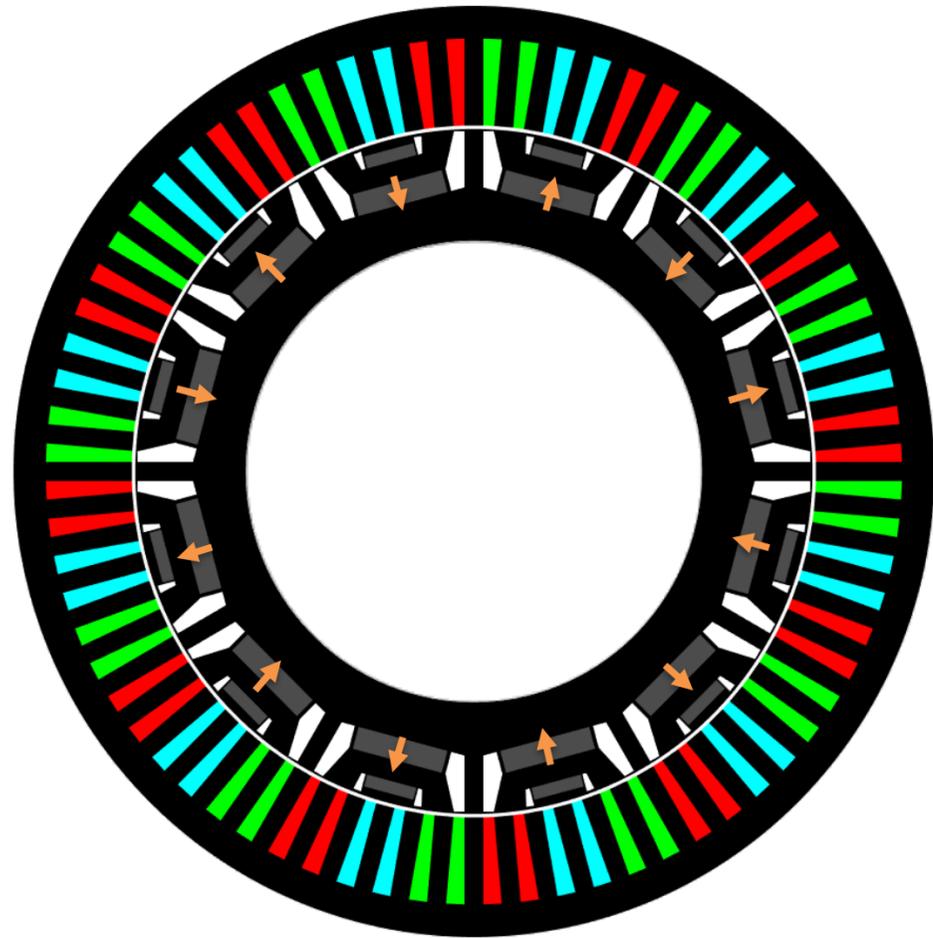
Stator ? [3]

“Asymmetric Design in Electric Motors: Enhancing Performance and Efficiency”  
[www.emworks.com](http://www.emworks.com) (2022)

# Sujet de thèse

Élaboration d'outils logiciels pour l'**optimisation topologique**  
**magnéto-mécanique** de **machines électriques** tournantes

## 2) Optimisation topologique : motivations

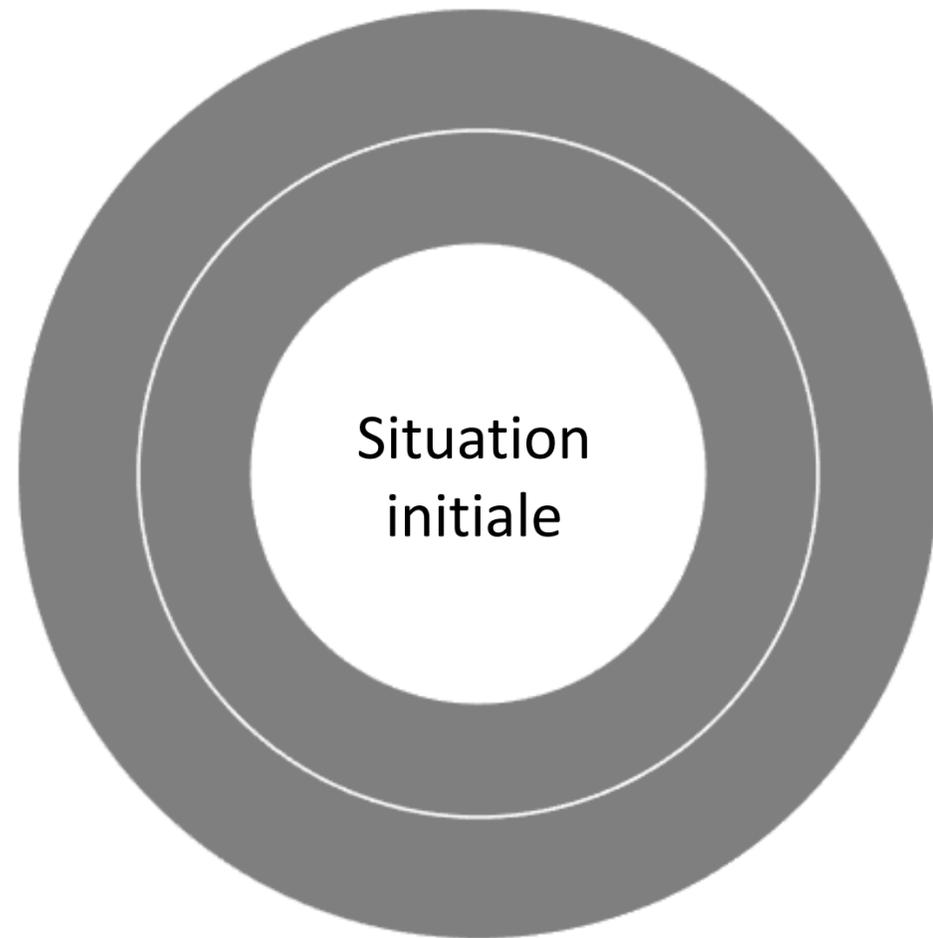


Comment distribuer les différents matériaux de manière **optimale**, sans **information initiale** sur la géométrie ?

■ Acier  
□ Air  
■↑ Aimant

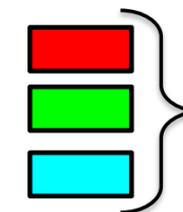
■  
■  
■ } Conducteurs  
électriques

## 2) Optimisation topologique : motivations

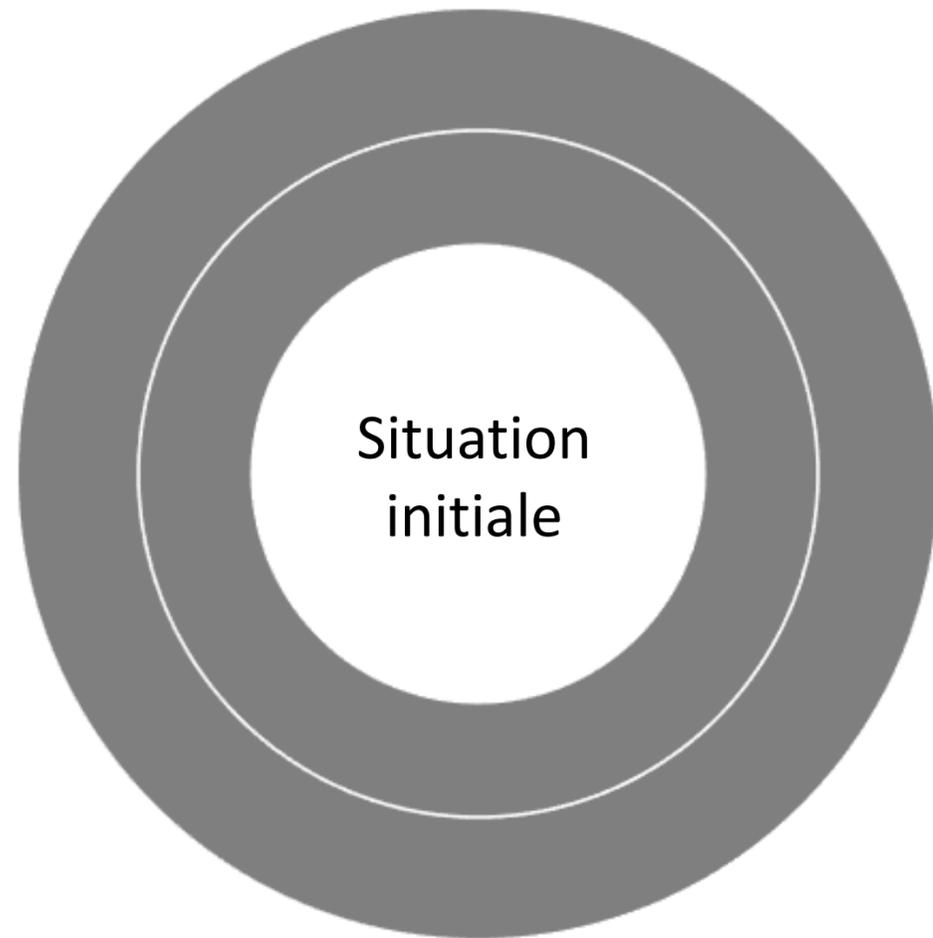


Comment distribuer les différents matériaux de manière **optimale**, sans **information initiale** sur la géométrie ?

- Acier
- Air
- ↑ Aimant

 Conducteurs électriques

## 2) Optimisation topologique : motivations

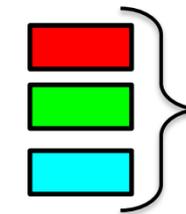


Comment distribuer les différents matériaux de manière **optimale**, sans **information initiale** sur la géométrie ?

■ Acier

□ Air

↑ Aimant



Conducteurs  
électriques



**Solution** : Optimisation Topologique

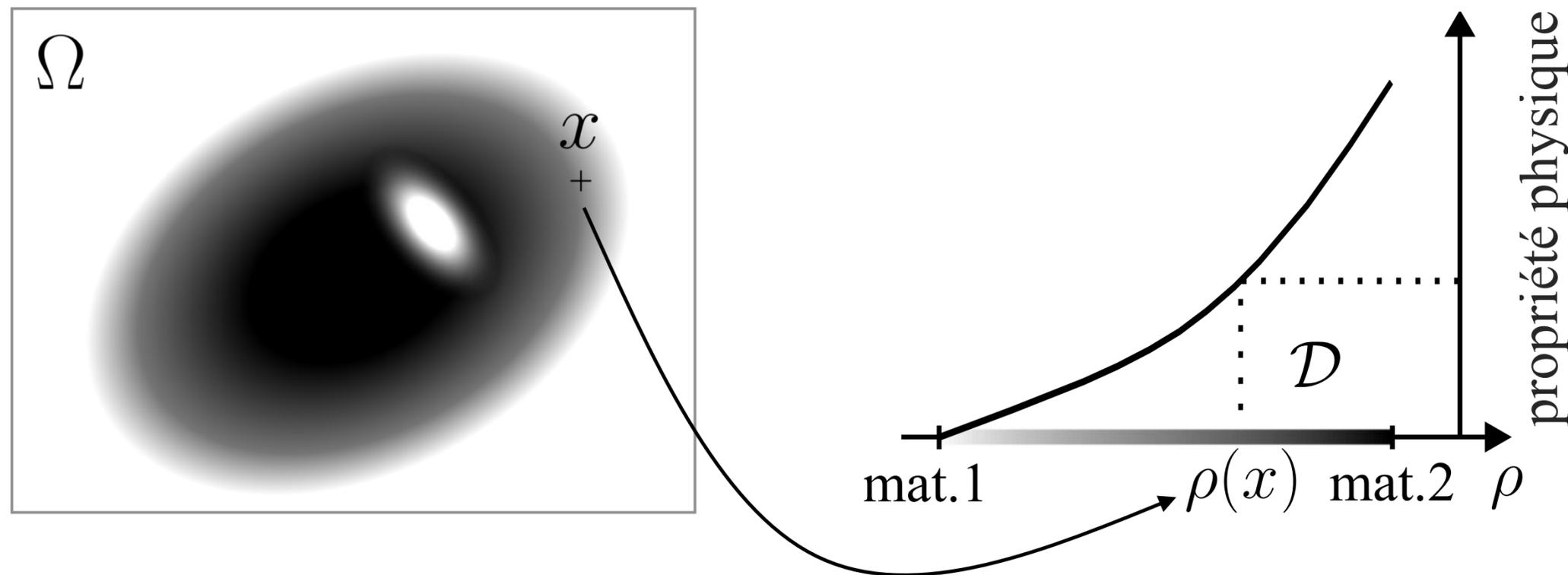
## 2) Optimisation topologique : méthode

- ❓ Quelles quantités doit-on optimiser ?
- ❓ Comment représenter une forme sans paramètres géométriques ?

## 2) Optimisation topologique : méthode

- ❓ Quelles quantités doit-on optimiser ?
- ❓ Comment représenter une forme sans paramètres géométriques ?

### Méthode à densité \*



**Intérêt** : problème dérivable  $\Rightarrow$  algorithmes rapides (descente de gradient)

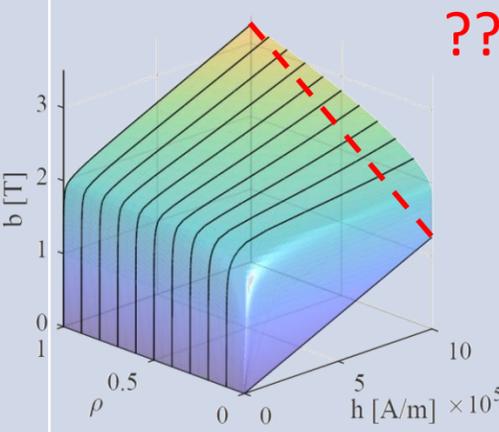
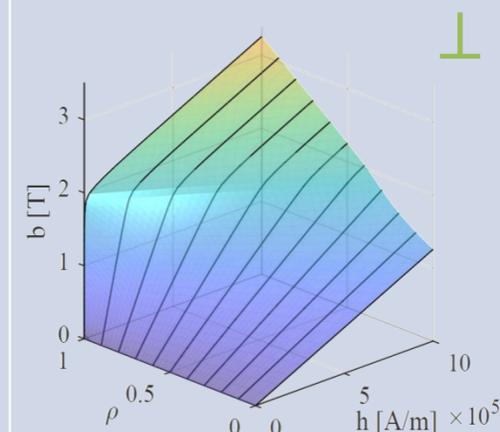
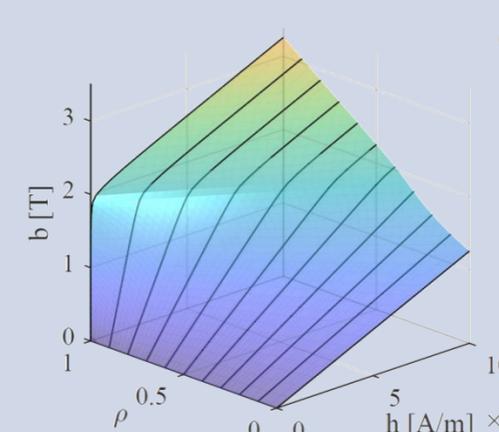
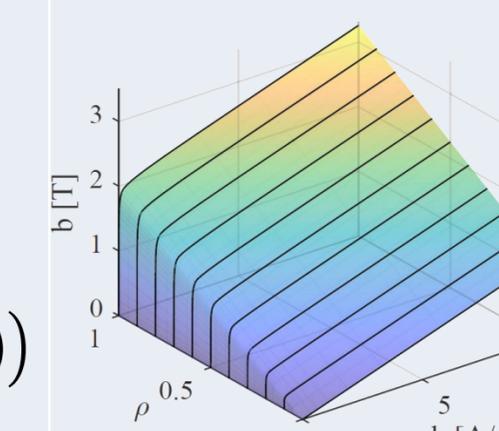
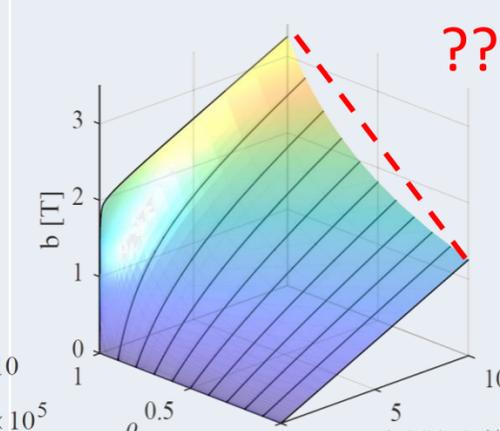
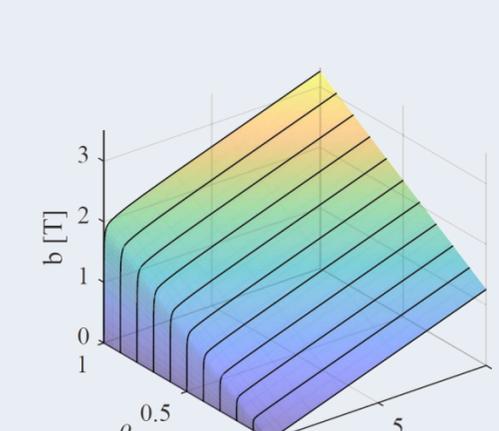
\*Bendsøe, M. P. (1989). "Optimal shape design as a material distribution problem". *Structural Optimization*

## 2) Optimisation topologique : magnétostatique

🔍 Quelle grandeur physique interpoler ? \*

Proposition

Littérature

Formulation	Équations	Interpolation de $\mu$	Interpolation de $\nu$	Interpolation de $\vec{M}$
B – conforme (Kennelly)	$\text{rot}(\nu(\vec{B}) \vec{B}) = \vec{j}$ $\vec{H} = \nu(\vec{B}) \vec{B}$ $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}(\vec{B})$			
H – conforme (Sommerfeld)	$\text{div}(\mu(\vec{H}) \vec{H}) = 0$ $\vec{B} = \mu(\vec{H}) \vec{H}$ $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}(\vec{H}))$			

Interpoler la **magnétisation** est le choix naturel pour la **magnétostatique**.

\* TC et. al. (2023) "A Multimaterial Topology Optimization Considering the PM Nonlinearity," *IEEE Trans. Mag.*

## 2) Optimisation topologique : premiers résultats

La machine optimisée n'est *symétrique* que si son *utilisation* l'est aussi\*

100% moteur



- $\langle C_m \rangle = 2552 \text{ Nm/m}$
- $\langle C_g \rangle = -1595 \text{ Nm/m}$

50% moteur / 50% générateur



- $\langle C_m \rangle = 2499 \text{ Nm/m}$
- $\langle C_g \rangle = -2501 \text{ Nm/m}$

100% générateur



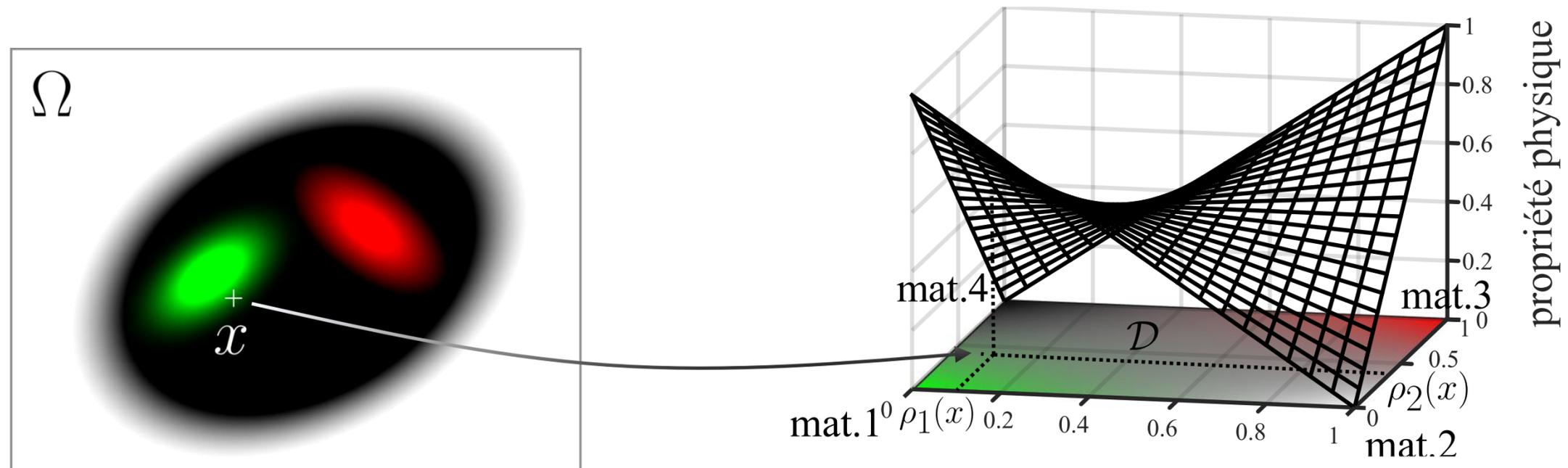
- $\langle C_m \rangle = 1612 \text{ Nm}$
- $\langle C_g \rangle = -2553 \text{ Nm}$

\* TC et. al. (2022) "Topology Optimization of an Asymmetric PMSM Rotor" ICEM 2022.

## 2) Optimisation topologique : multi-matériaux

! Un actionneur électrique doit aussi comporter des sources

Extension de la méthode à densité à plusieurs natures de matériaux \*

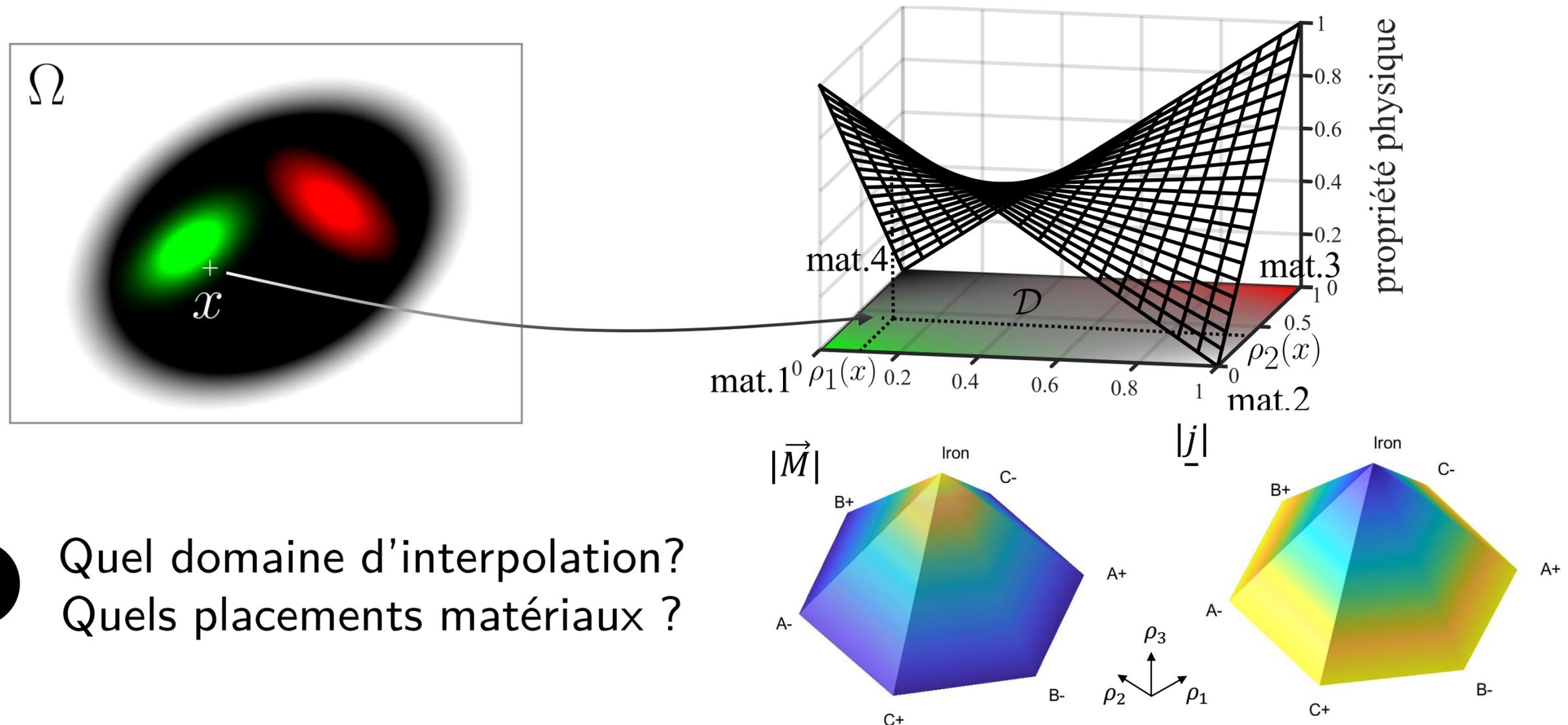


\* TC et. al. (2022) "Multi-material topology optimization using Wachspress interpolations for designing a 3-phase electrical machine stator ». *Struct Multidisc Optim* .

## 2) Optimisation topologique : multi-matériaux

! Un actionneur électrique doit aussi comporter des sources

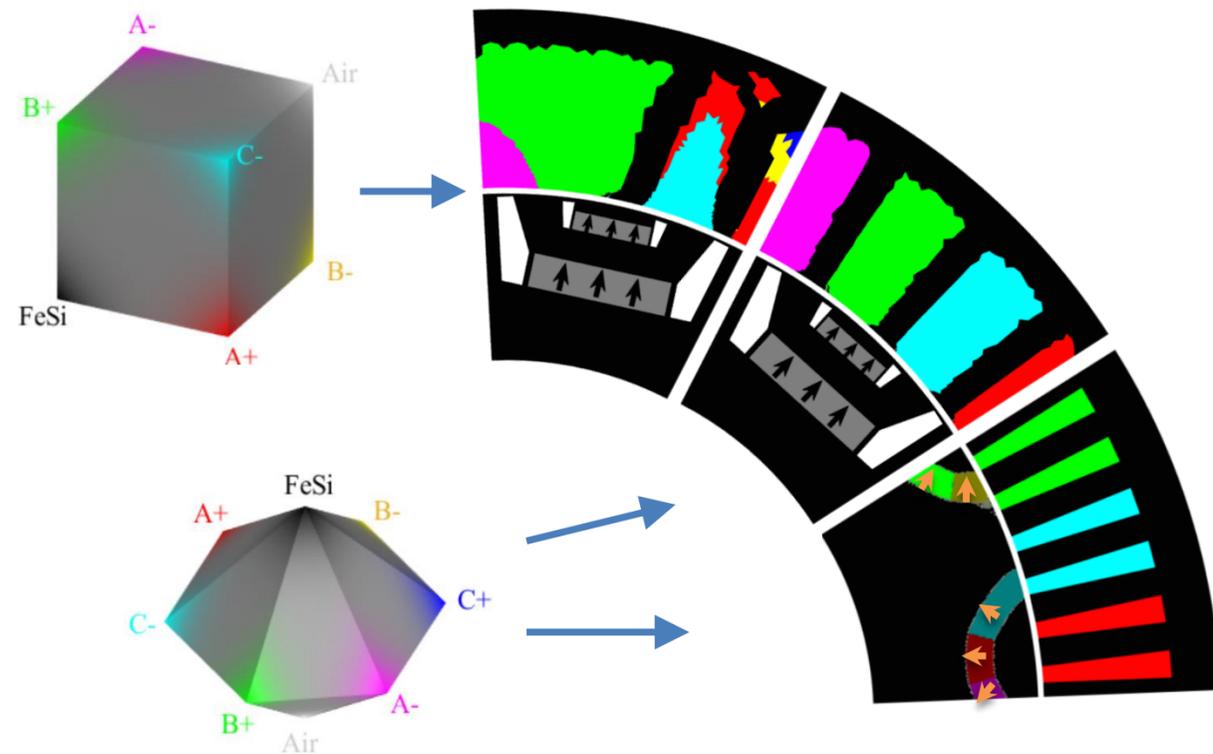
Extension de la méthode à densité à plusieurs natures de matériaux \*



? Quel domaine d'interpolation?  
Quels placements matériaux ?

\* TC et. al. (2022) "Multi-material topology optimization using Wachspress interpolations for designing a 3-phase electrical machine stator ». *Struct Multidisc Optim.*

## 2) Optimisation topologique : résultats



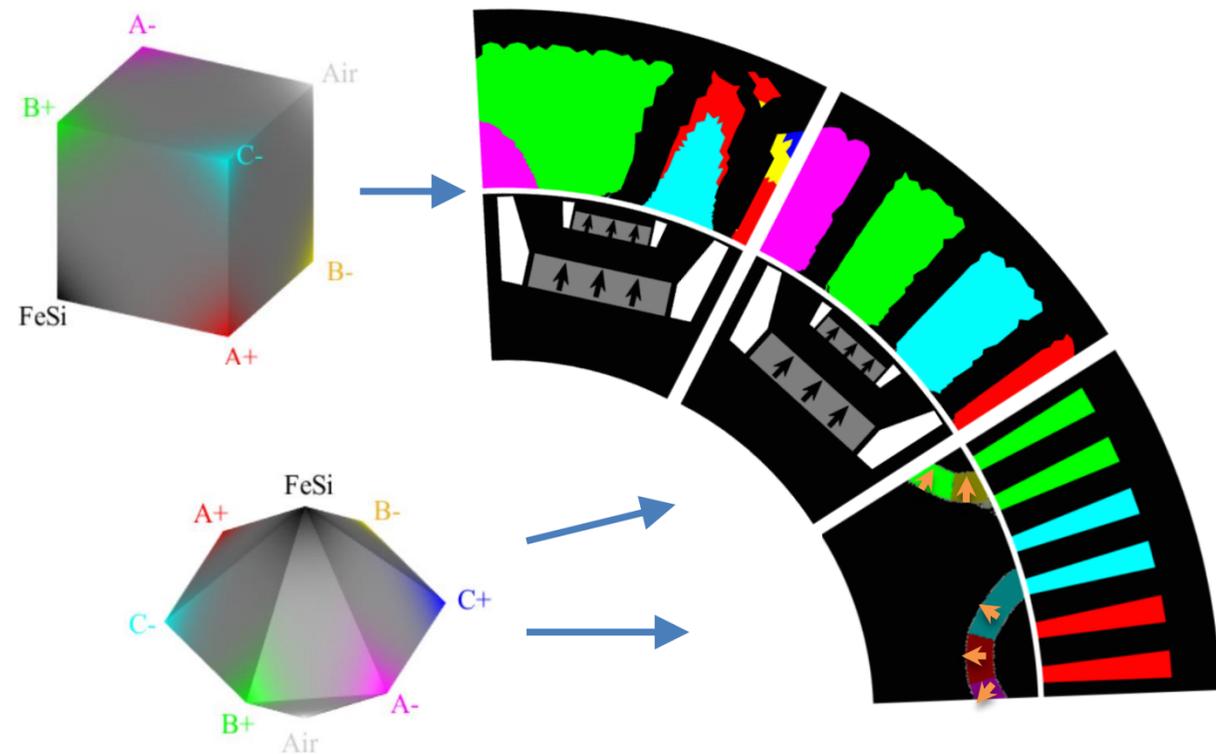
Optimisations de **stators triphasés [1,2]**, et **rotors à aimants [3]**

[1] TC et.al (2022) "Multi-material topology optimization using Wachspress interpolations for designing a 3-phase electrical machine stator," *Struct Multidisc Optim*

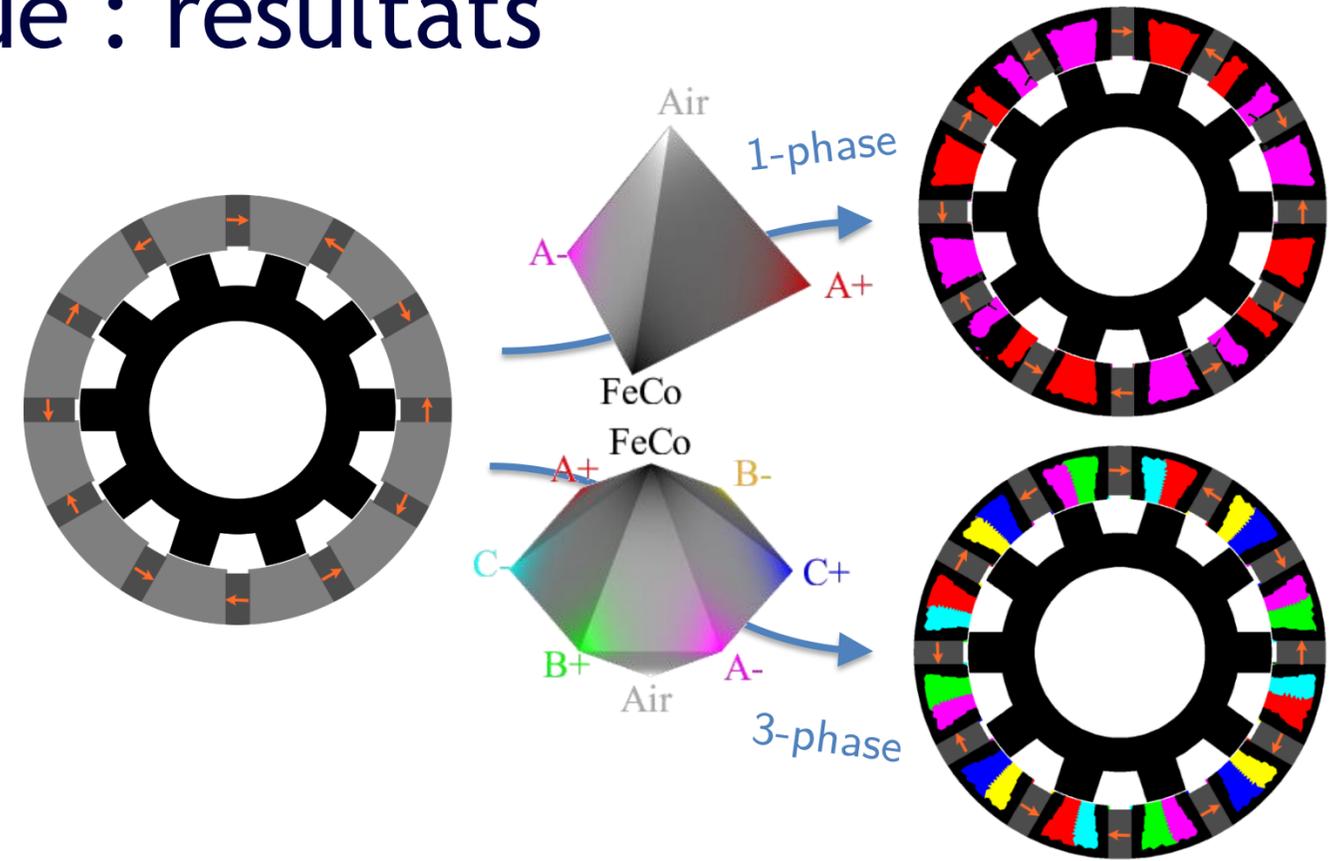
[2] TC et.al (2023) "Effects of Filtering and Current-Angle Adjustment on the Multi-Material Topology Optimization of a Three-Phase Stator," *IEEE Transactions on Magnetics*

[3] TC et.al (2024) "Multimaterial filtering applied to the topology optimization of a permanent magnet synchronous machine", *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*

## 2) Optimisation topologique : résultats



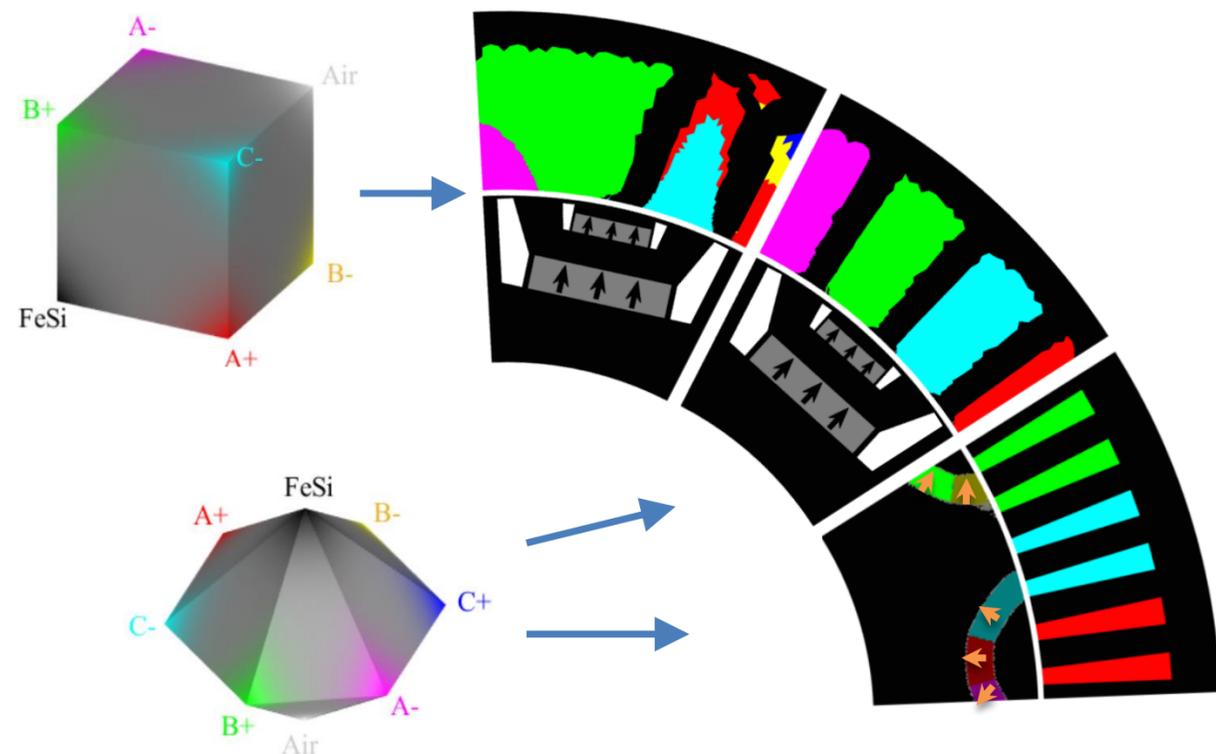
Optimisations de **stators triphasé**, et **rotors à aimants**



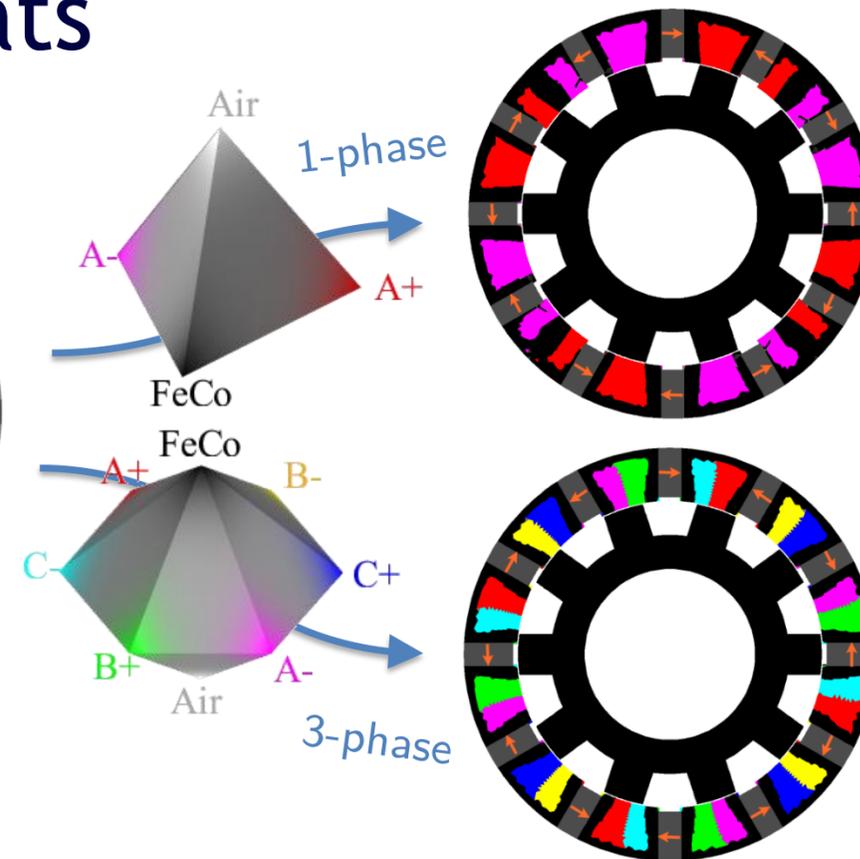
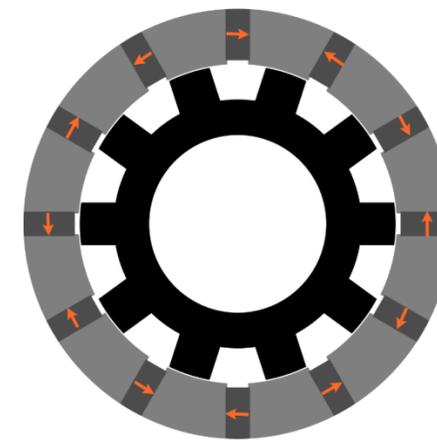
Optimisations de **machines non-conventionnelles\***

\* TC et.al. (2023) " Multi-material topology optimization of a flux switching machine ". *Science and Technology for Energy Transition*

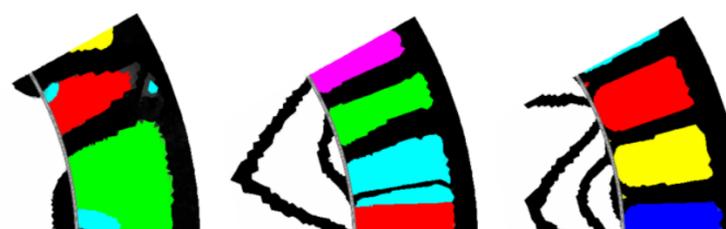
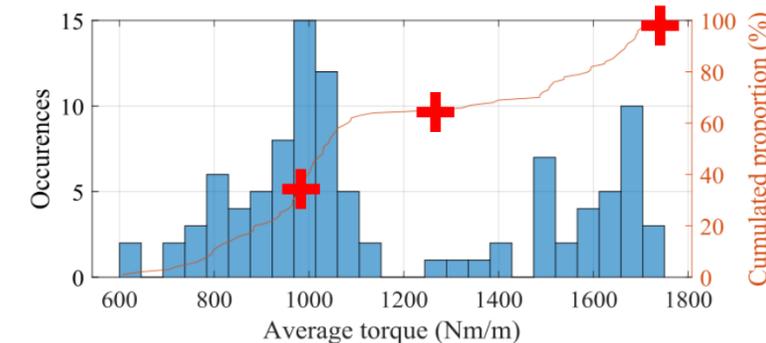
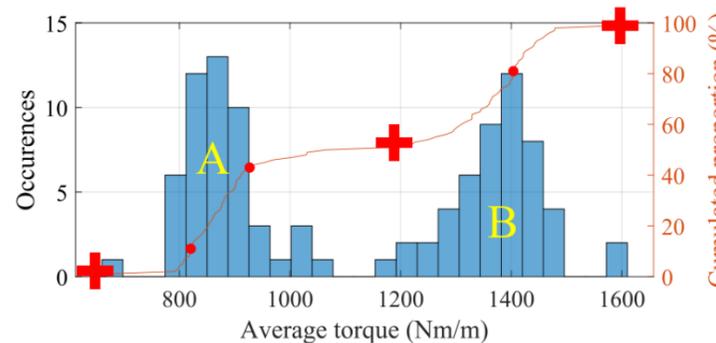
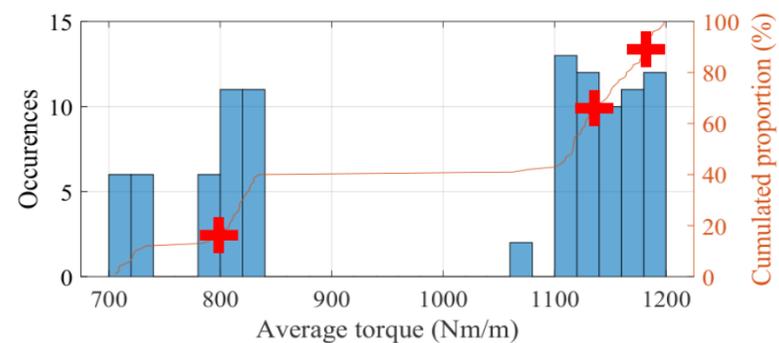
## 2) Optimisation topologique : résultats



Optimisations de **stators triphasé**, et **rotors à aimants**



Optimisations de **machines non-conventionnelles**



Optimisations de **machines complètes** (rotors + stators)\*

\* TC et.al (2024) "Topology Optimization of a Complete Reluctance Machine with no Initial Information on its Geometry," ICEM 2024

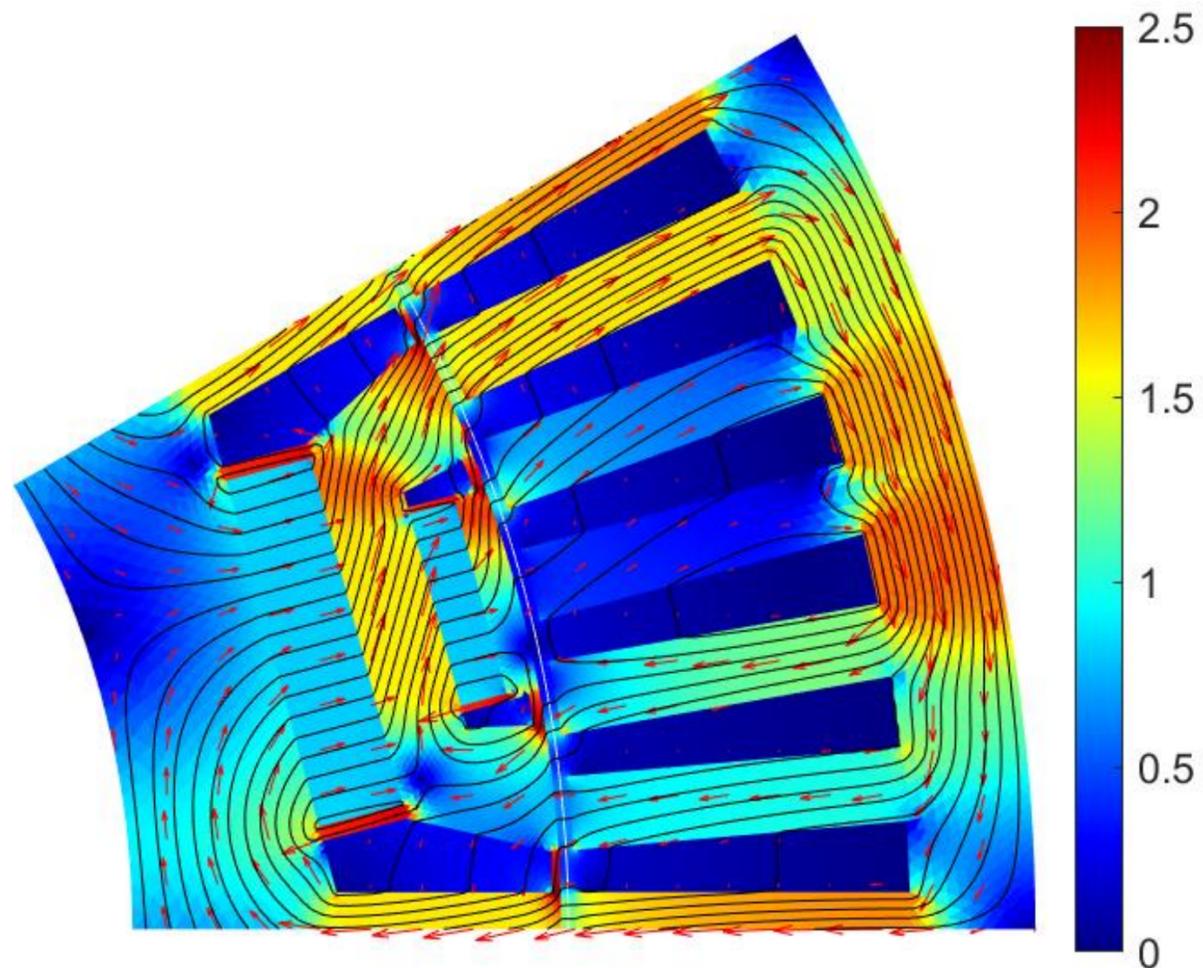
# Sujet de thèse

Élaboration d'outils logiciels pour l'**optimisation topologique**  
**magnéto-mécanique** de machines électriques tournantes

### 3) Magnéto-mécanique : difficultés

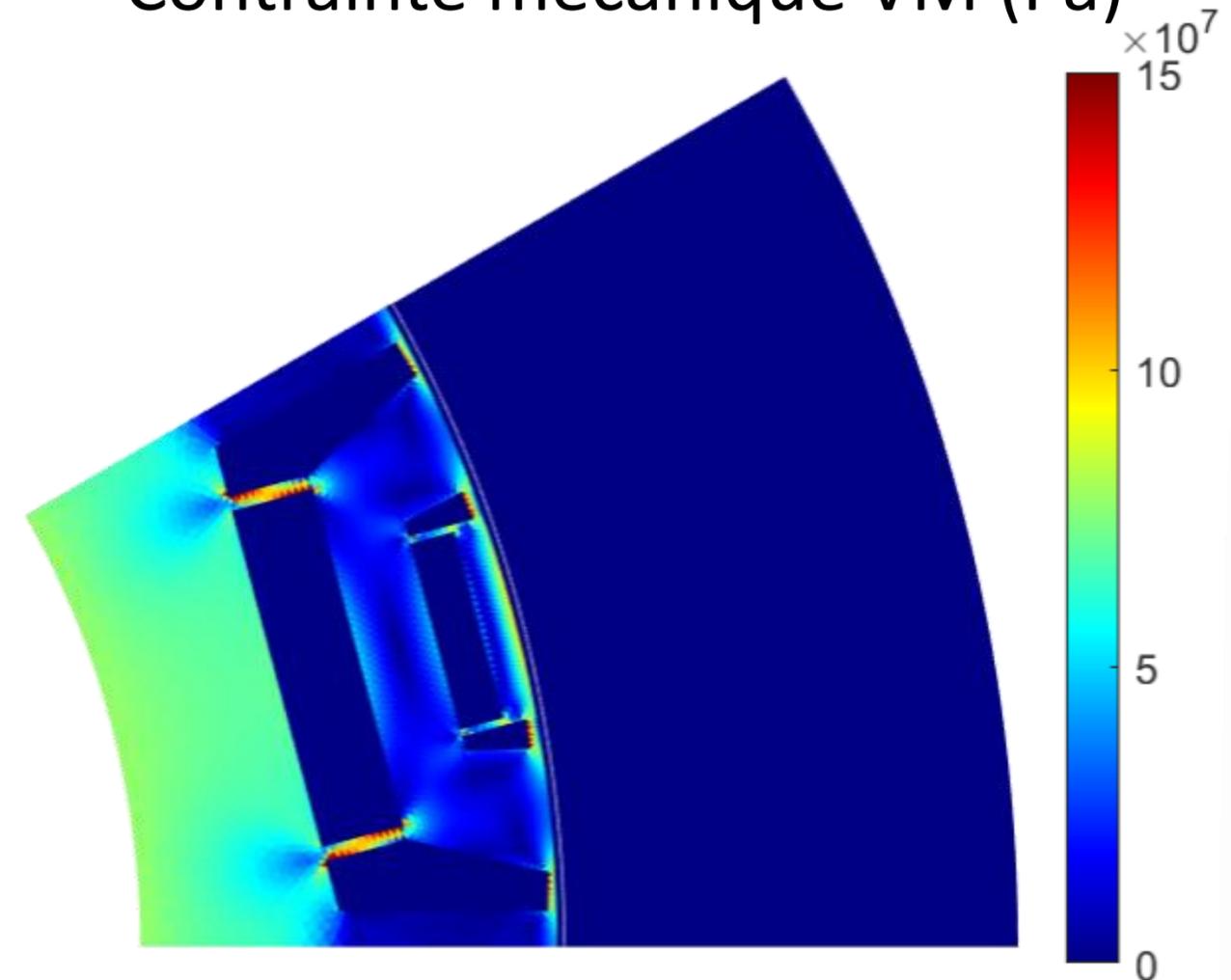
❗ Objectifs magnétiques et mécaniques contradictoires

Induction magnétique (T)



**Court-circuits** magnétiques  
⇒ ponts en acier à **supprimer** !

Contrainte mécanique VM (Pa)



Concentration de contrainte, risque de  
**rupture** ⇒ ponts en acier à **élargir** !

### 3) Magnéto-mécanique : résultats

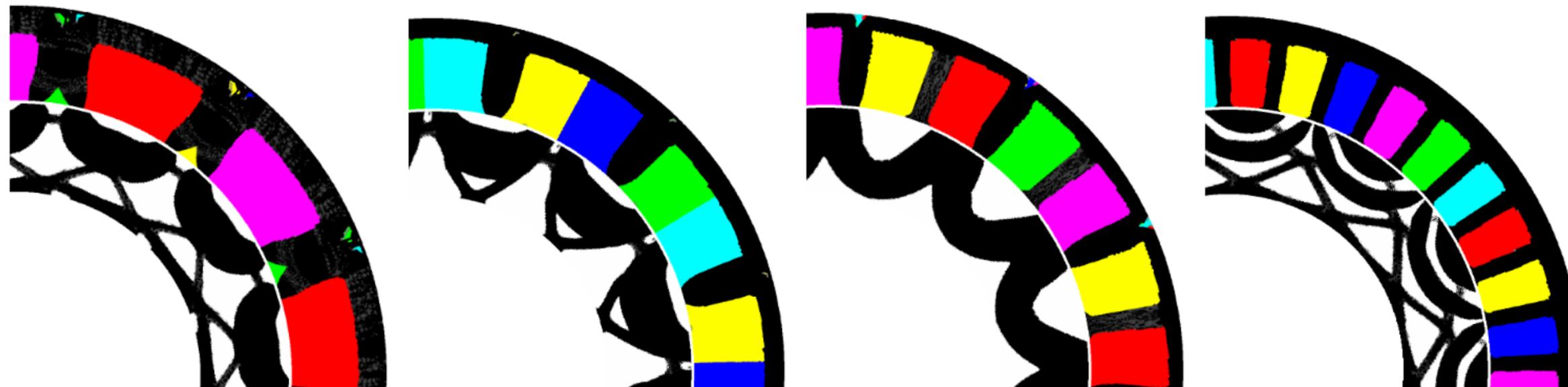


TC et. al. (2024) "Optimisation topologique magnéto-mécanique d'un rotor de machine électrique synchro-réductante. "  
*16ème Colloque National en Calcul de Structures*

### 3) Magnéto-mécanique : résultats



TC et. al. (2024) "Optimisation topologique magnéto-mécanique d'un rotor de machine électrique synchro-réductante. "  
*16ème Colloque National en Calcul de Structures*



TC (2023) "Élaboration d'outils logiciels pour l'optimisation topologique magnéto-mécanique de machines électriques tournantes".  
Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, p. 227

# Résumé

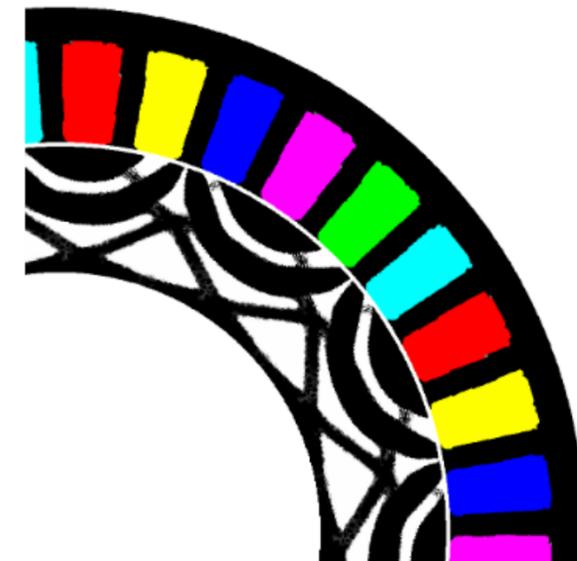


Comment distribuer les différents matériaux de manière **optimale**, **sans information initiale** sur la géométrie ?



Pour concevoir des **machines électriques entières** par **optimisation topologique**, il faut :

- Adapter la méthode au **problème physique**
- Gérer **plusieurs natures de matériaux**
- Gérer **plusieurs physiques antagonistes**



# Perspectives

Vers des **outils ouverts et accessibles** :

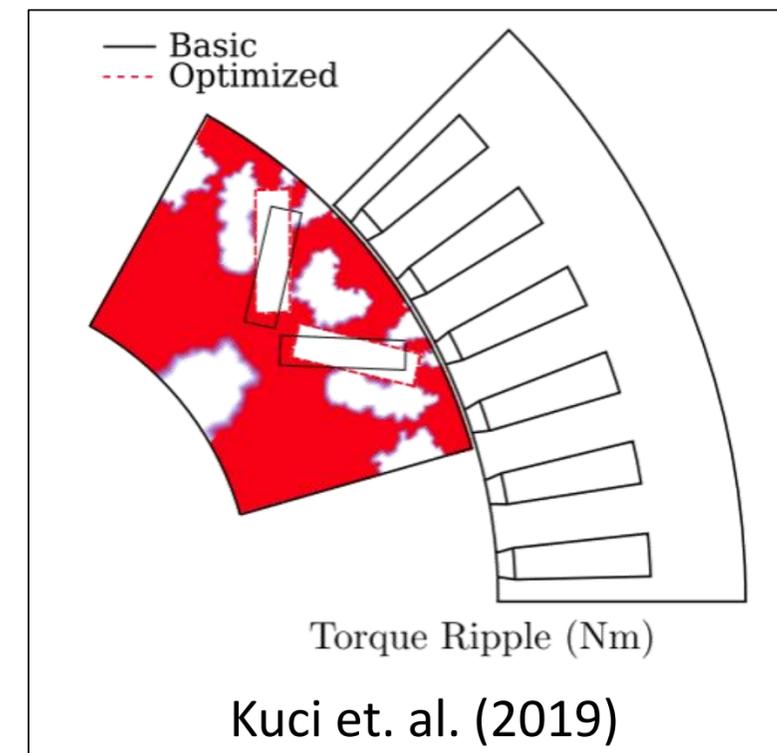
- Nombreux codes disponibles en **ingénierie mécanique**... pas encore le cas en **génie électrique**.
- **Solveurs polyvalents** open-sources (NGSolve, FeniCs, FreeFem++, GetDP,...)

Vers des **méthodes hybrides** :

- Optimisation **topologique ET paramétrique**

**Au-delà** de l'optimisation géométrique :

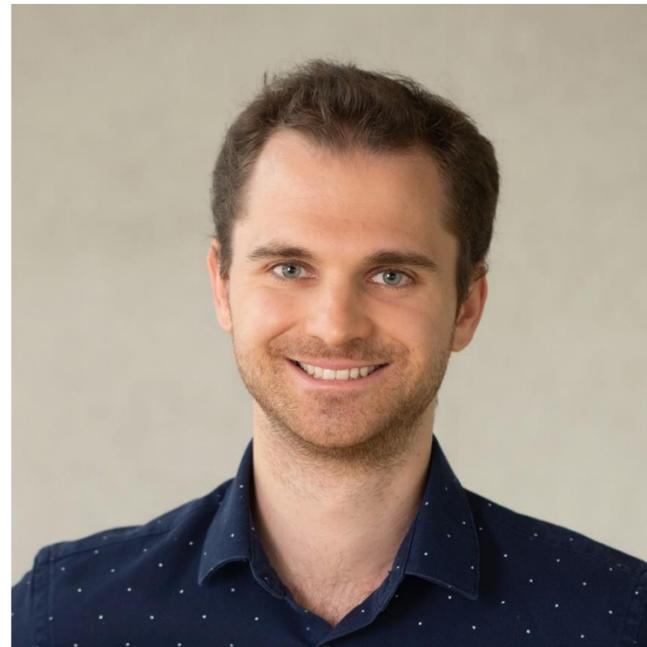
- Optimisation des **paramètres matériaux et microstructures**
- Intégration de **grandeurs externes** (commande, chaîne de traction)



# Conception de machines électriques par optimisation topologique



Site web  
personnel



Accès thèse

Par Théodore CHERRIÈRE

**QUESTIONS / RÉPONSES**