

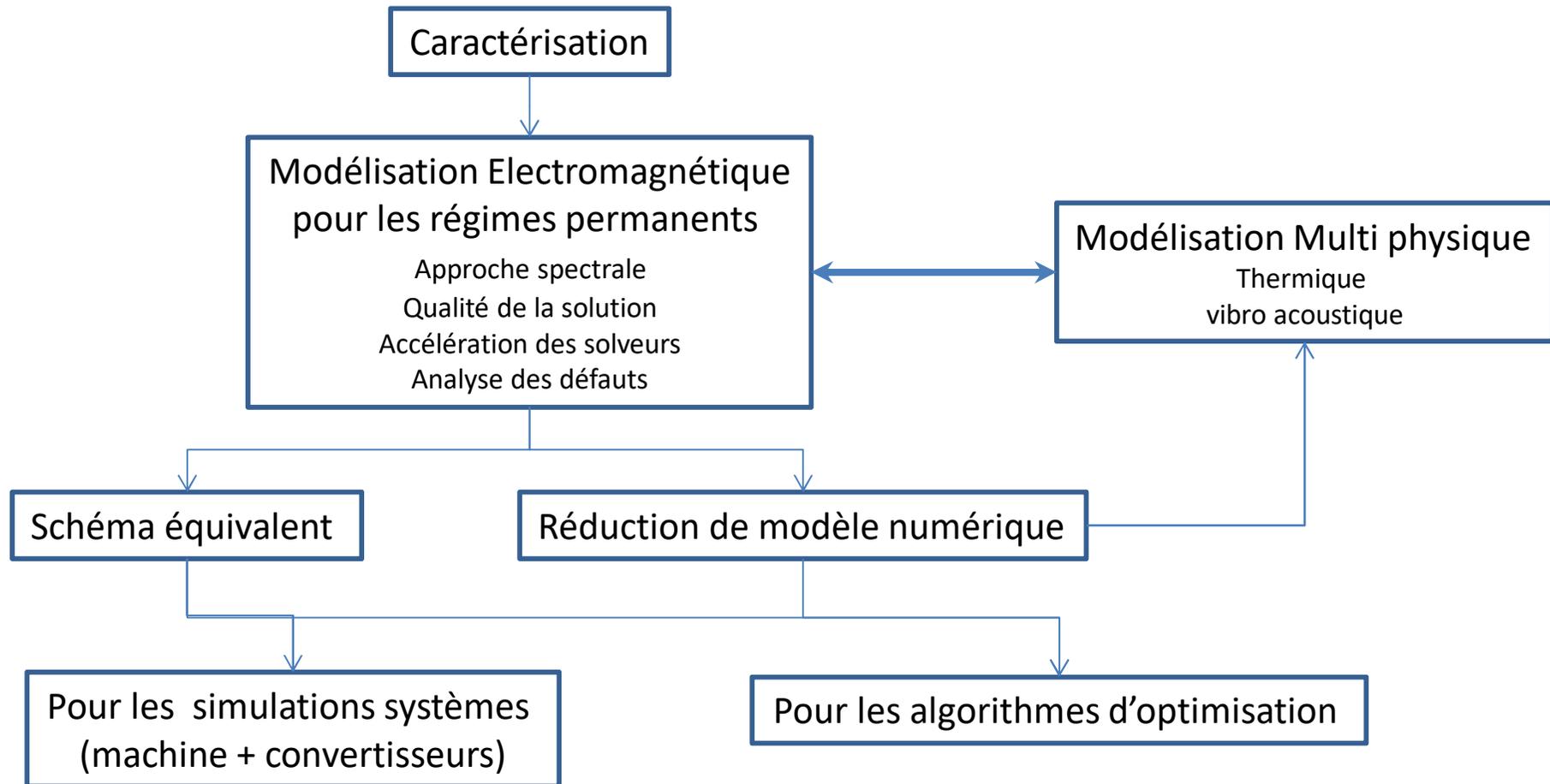


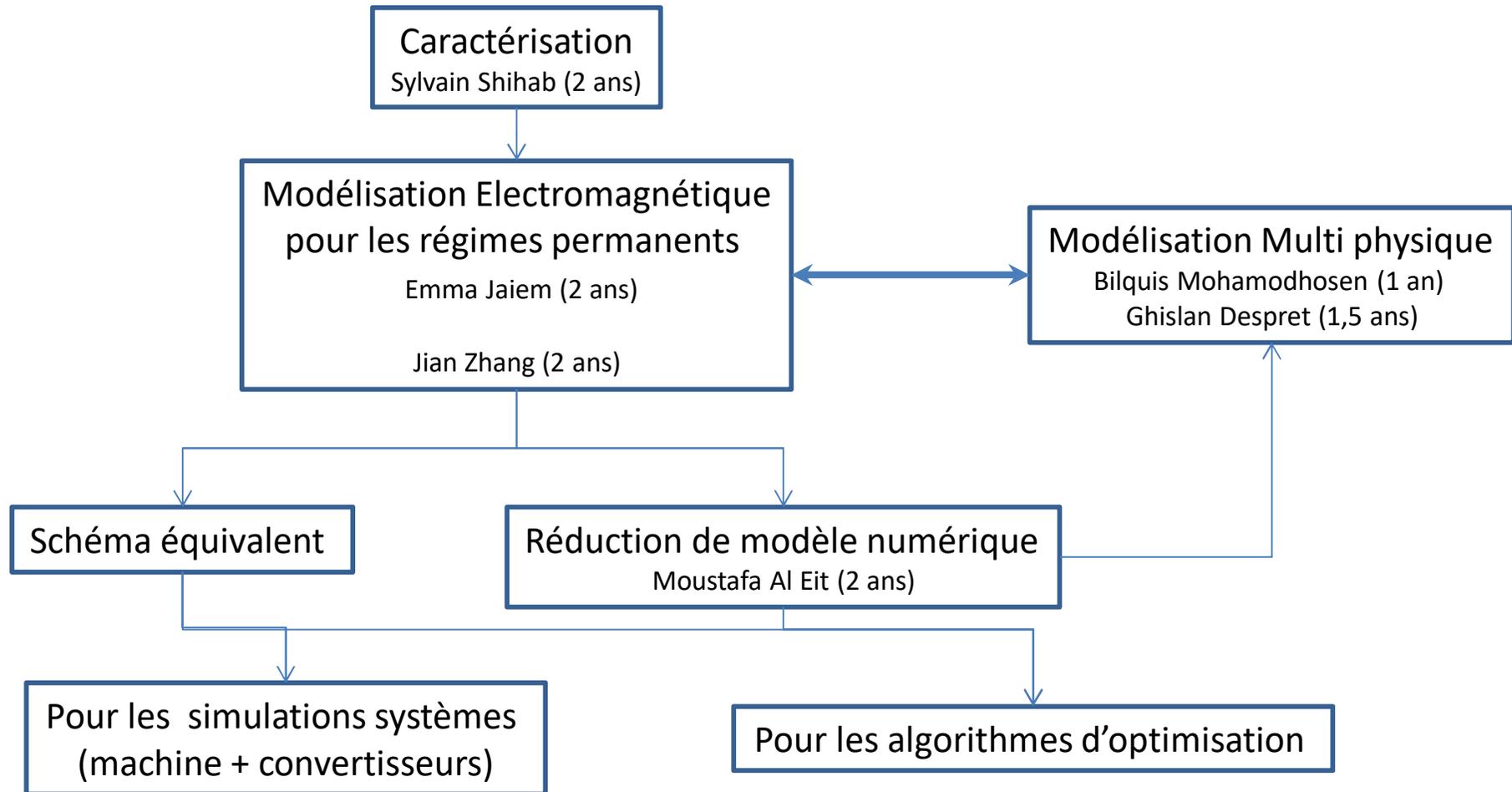
convertisseur  
d'énergie  
**Intégré  
Intelligent**

11 juillet 2018 – comité de suivi

# Développement d'outils de modélisation pour le projet CE2I Tâche 4

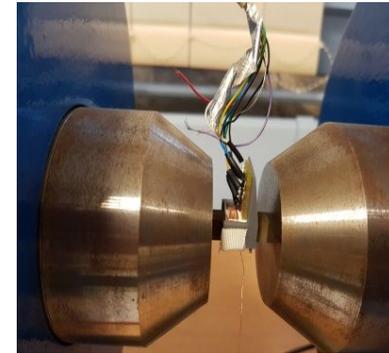






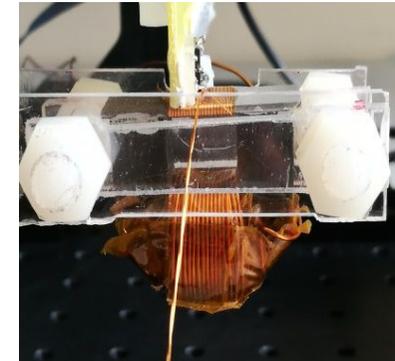
- **Caractérisation des matériaux**

- Caractérisations des propriétés magnétiques:
  - Lois de comportements, pertes, courbes normales
  - Matériaux massifs et laminés
- Caractérisation des propriétés électriques :
  - Conductivité électrique



- **Modélisation des propriétés matériaux :**

- Développement de modèles de pertes
- Développement de modèles de lois de comportement
- Création d'une base de donnée



- **Moyen expérimentaux**

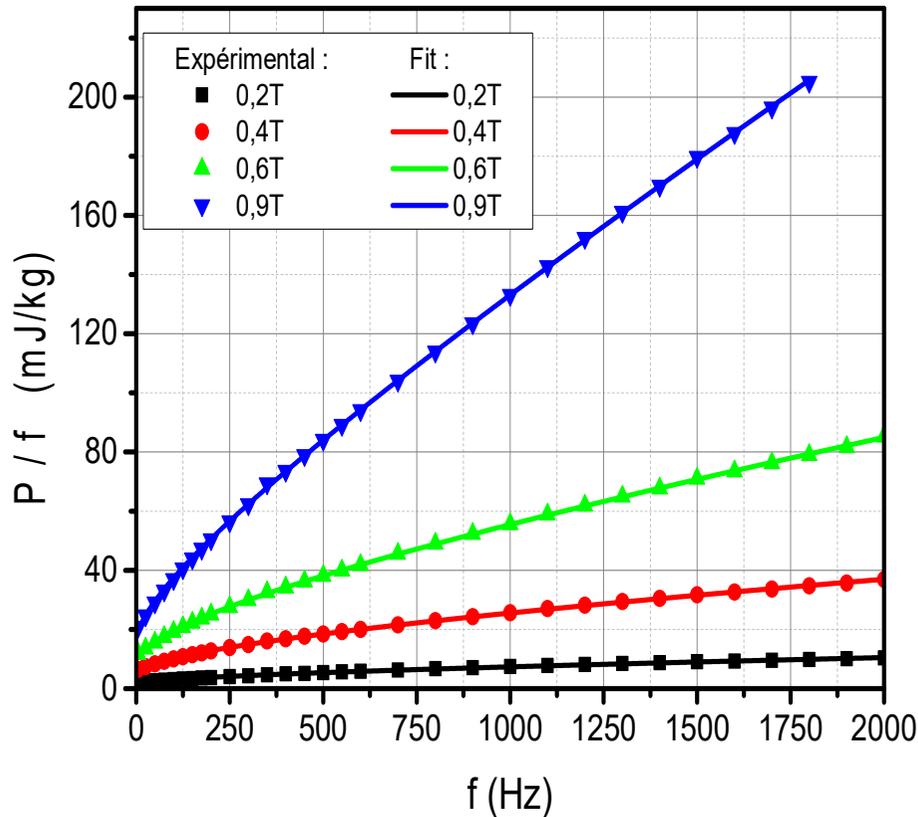
- Banc Epstein et SST et mini SST
- Banc de caractérisation acier massif
- Microscope Magnéto-optique
- Machine à bobiner les tores
- Etuve de recuit sous atmosphère contrôlée



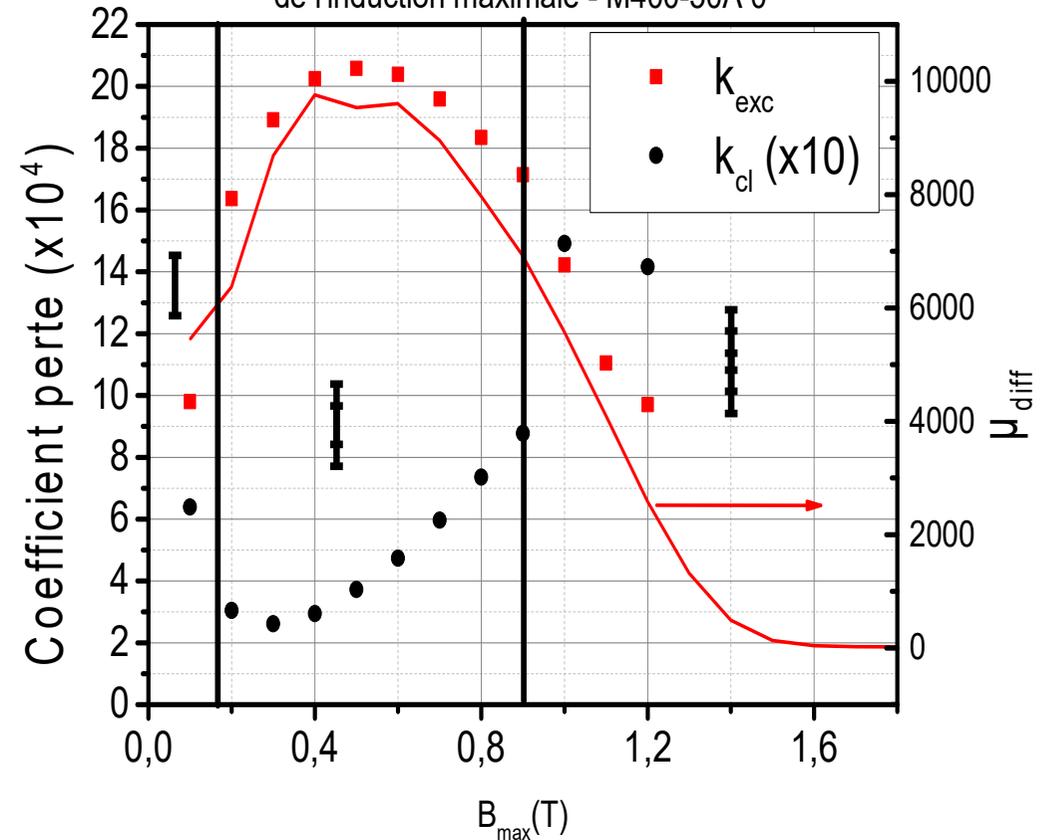
Utilisation de coefficients décrivant les pertes dynamiques variables avec l'induction

$$P = k_h f B_{max}^\alpha + k_{cl}(B_{max}) f^2 B_{max}^2 + k_{exc}(B_{max}) f^{1,5} B_{max}^{1,5}$$

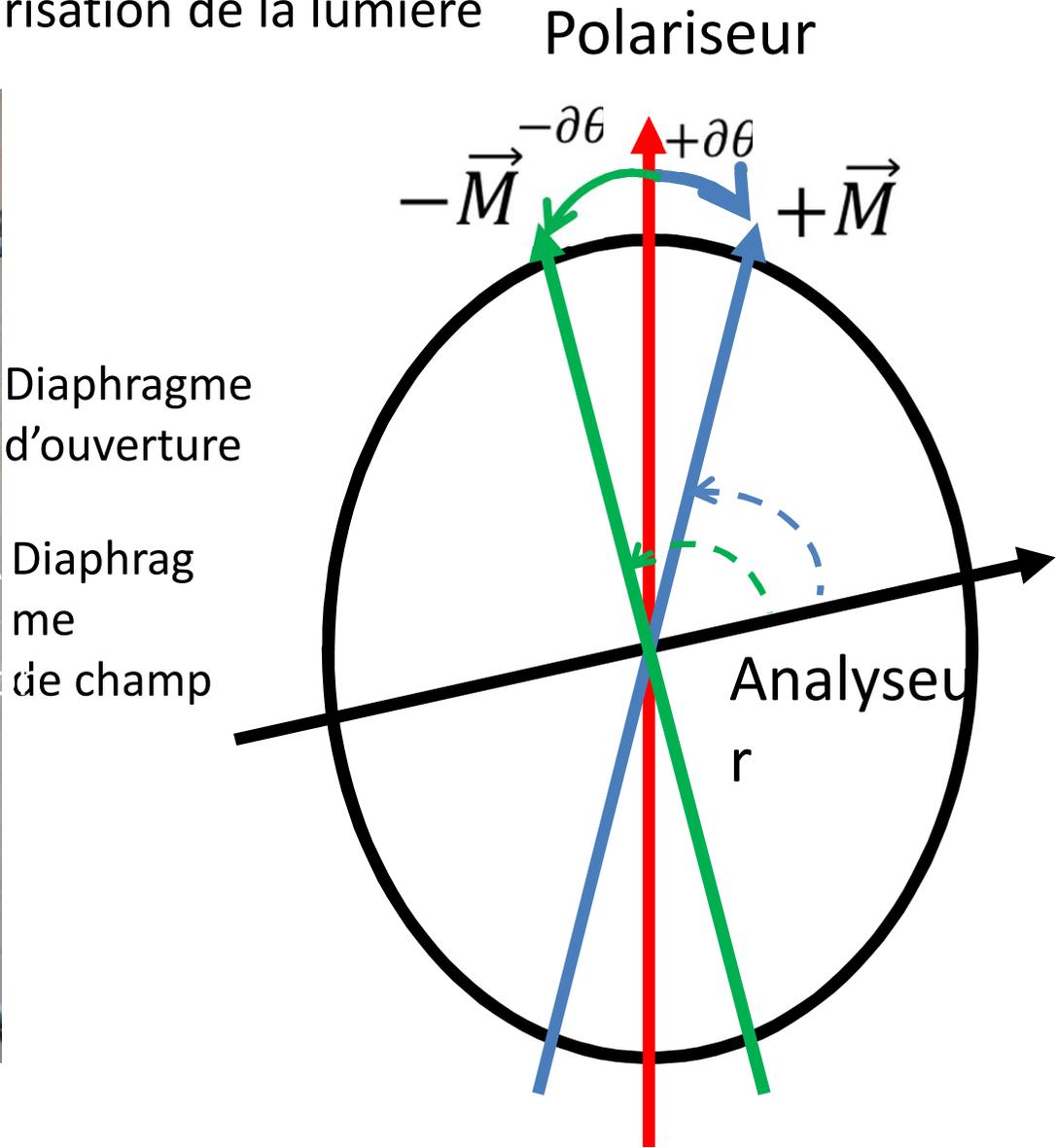
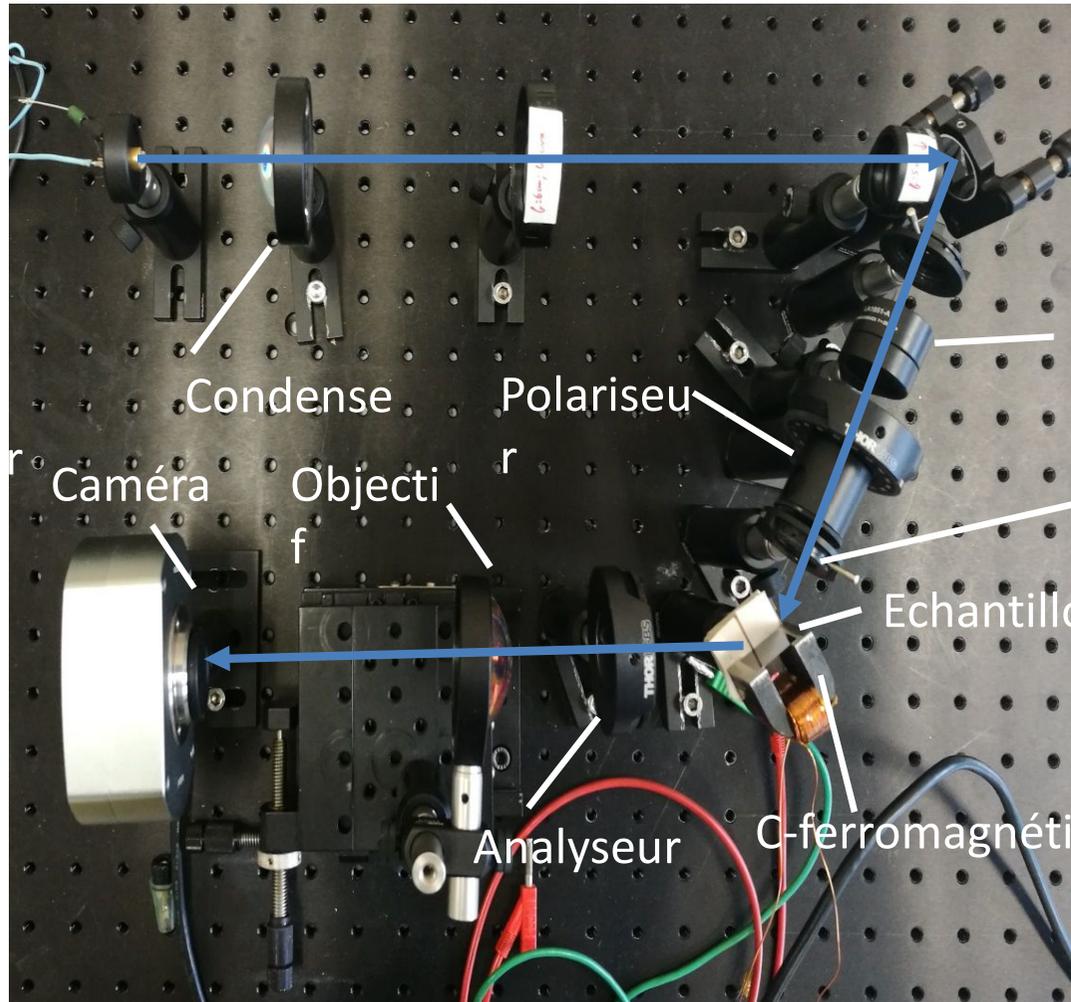
Pertes en fonction de l'induction maximale M400-50A 0°

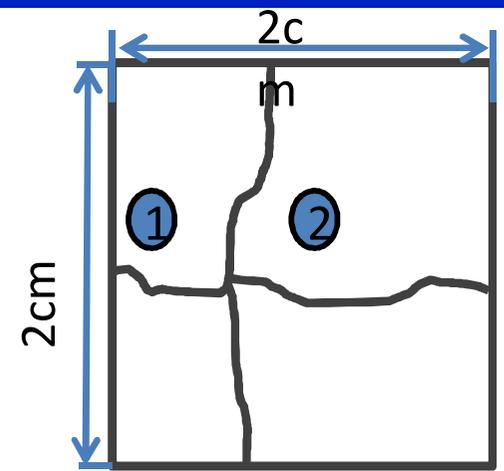


Variation du coefficient excédentaire en fonction de l'induction maximale - M400-50A 0°



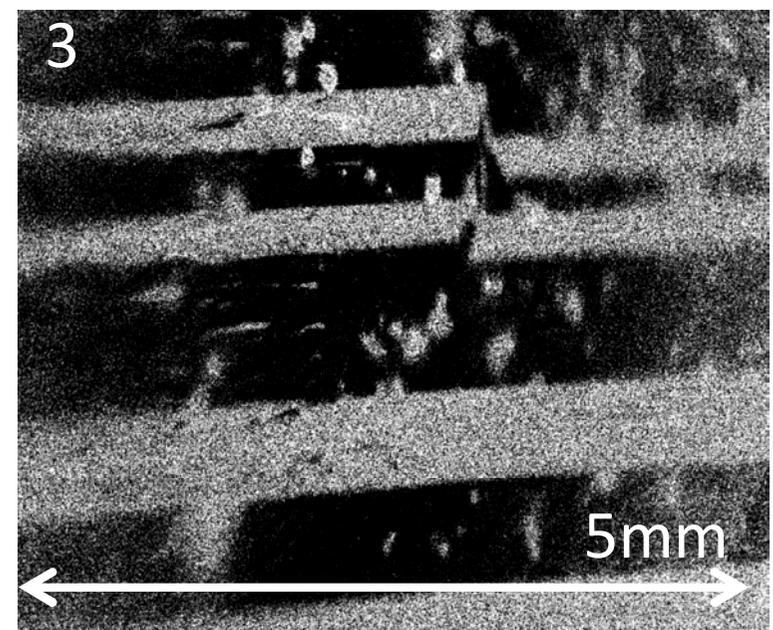
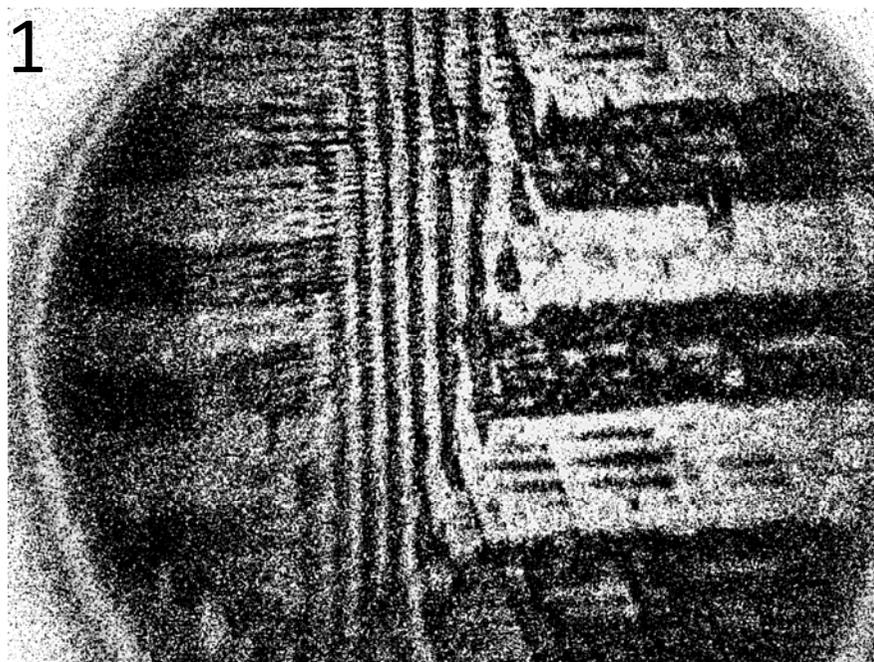
Principe : mesure de la rotation de la polarisation de la lumière





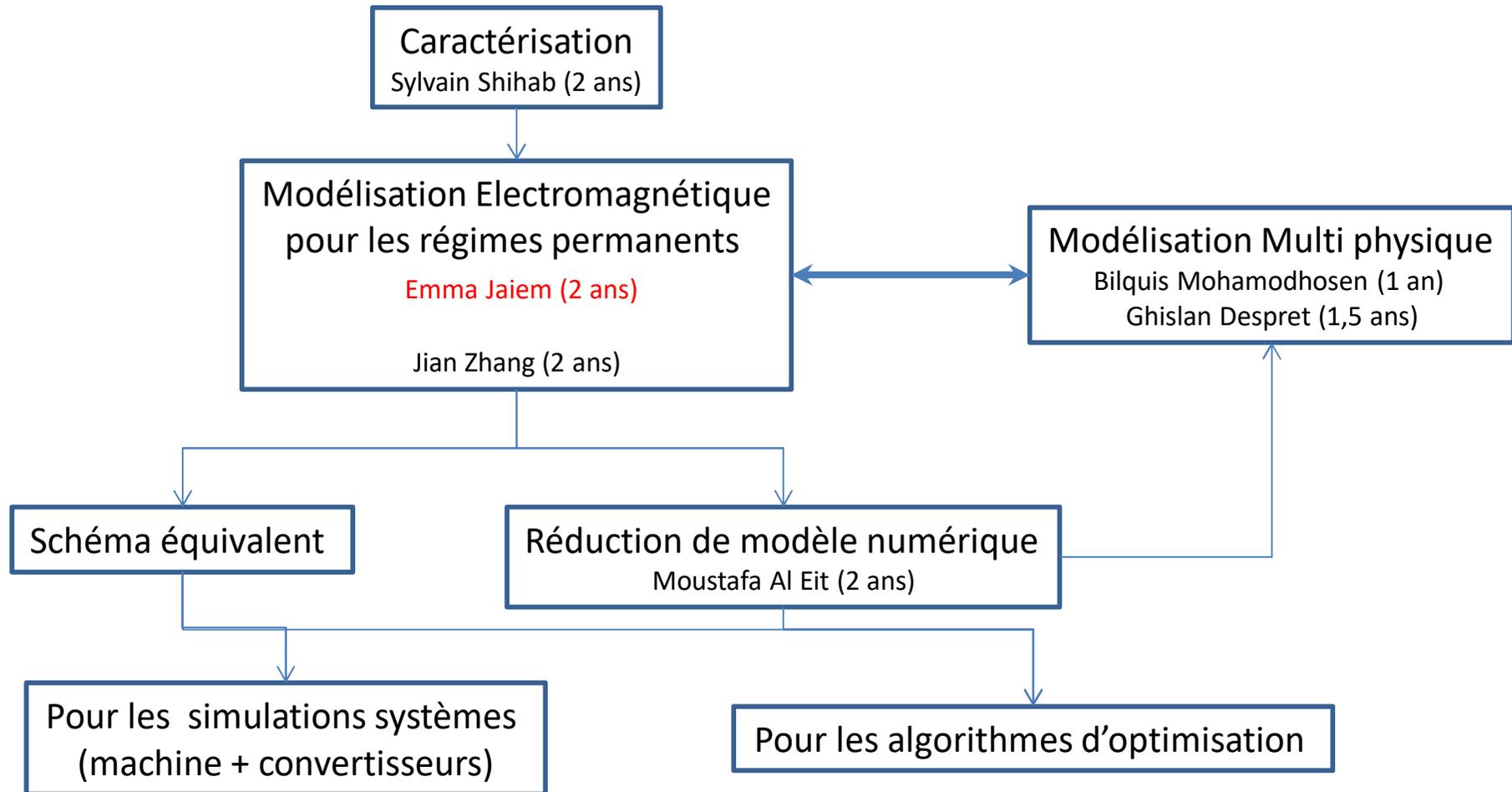
Zone perturbée

Zone non perturbée



\*Remerciements: J-P Lecointe, T Belgrand

- Shihab *et al*, EMF 2018 : physical interpretation of the variation of core-losses coefficient with the flux density (poster)
- Borsenberger *et al*, SGE2018 : Effets de la taille de grain et de la déformation plastique sur un acier magnétique massif
- Shihab *et al*, (revue en cours de rédaction) : physical interpretation of the variation of core-losses coefficient with the flux density



$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) \mathbf{A}(t) = \mathbf{F}(t) \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

■ Décomposition de la solution sous la base de Fourier

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) \sum_k \underline{\mathbf{A}}_k e^{j\omega_k t} = \mathbf{F}(t) \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

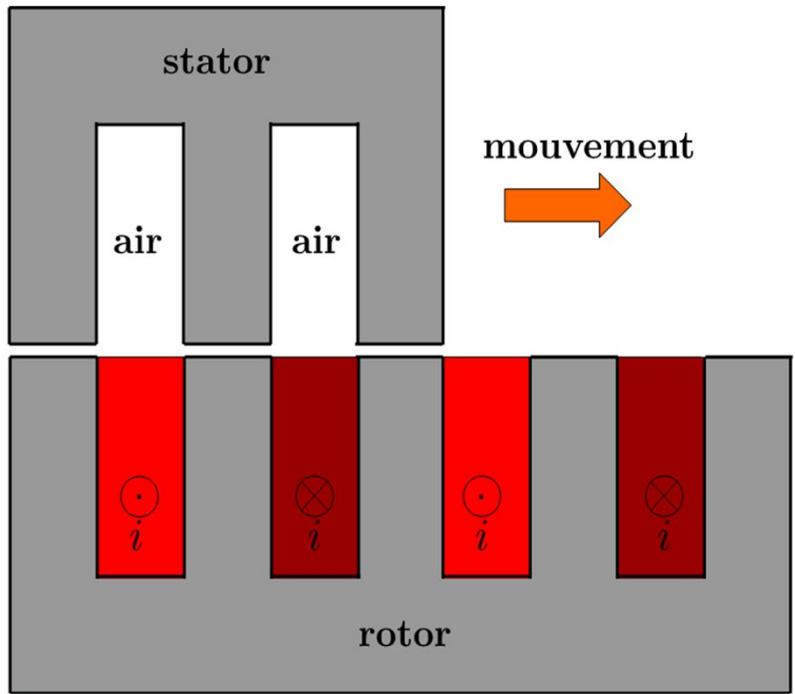
■ Passage au domaine de Fourier pour  $-N \leq l \leq N$

$$\sum_k \left( \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(\mathbf{t}) e^{j\omega(k-l)t} dt \right) \underline{\mathbf{A}}_k = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{F}(t) e^{-j\omega l t} dt$$

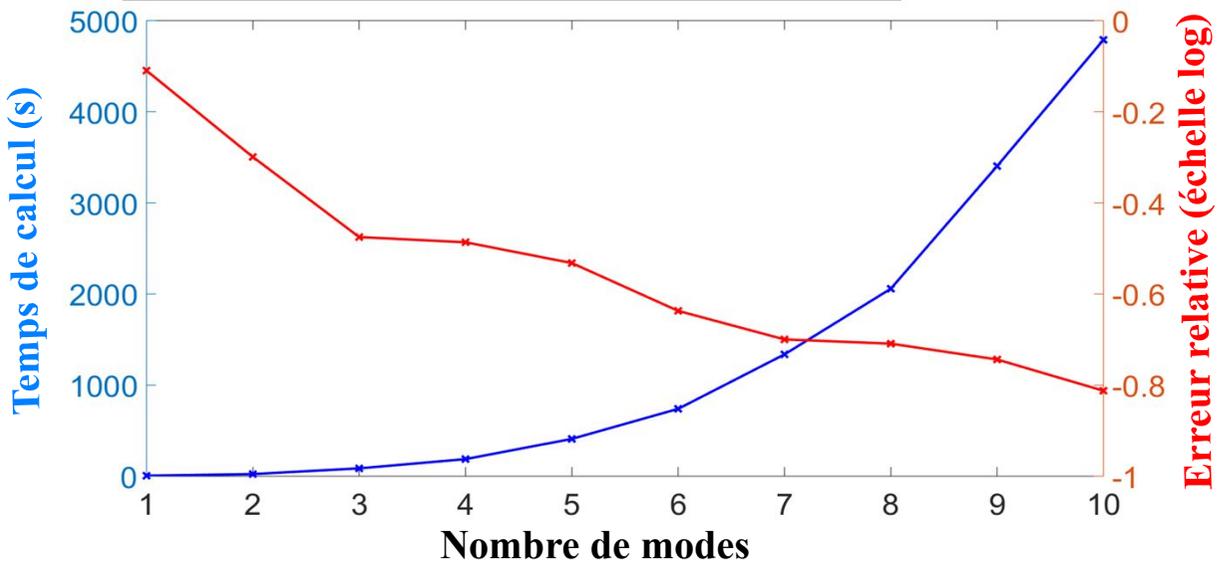
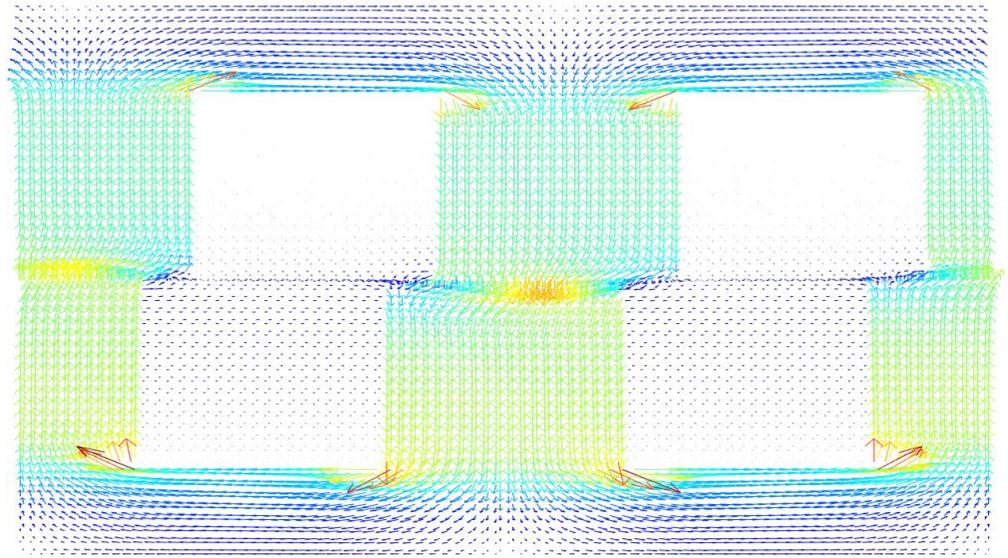
■ Système à résoudre : (Les  $\underline{\mathbf{A}}_k$  sont couplés)

$$\begin{bmatrix} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) dt \right] & & & \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) e^{j\omega(2N)t} dt \right] \\ & \dots & & \\ & & \dots & \\ \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) e^{j\omega(-N)t} dt \right] & \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) dt \right] & \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) e^{j\omega N t} dt \right] & \\ & & \dots & \\ & & & \dots \\ \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) e^{j\omega(-2N)t} dt \right] & \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) e^{-j\omega t} dt \right] & \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}(t) dt \right] & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{-N} \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_0 \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{-N} \\ \vdots \\ \mathcal{F}_0 \\ \vdots \\ \mathcal{F}_N \end{bmatrix}$$

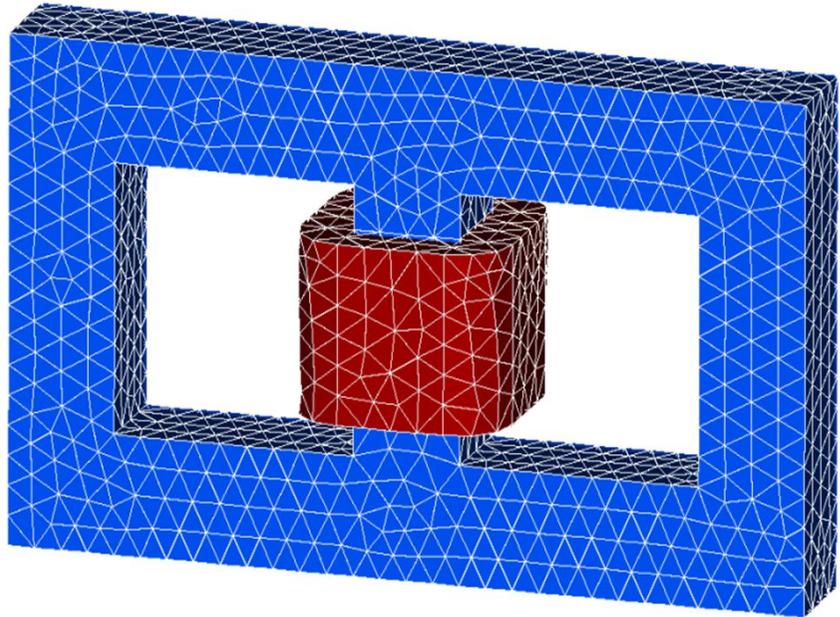
Machine linéaire



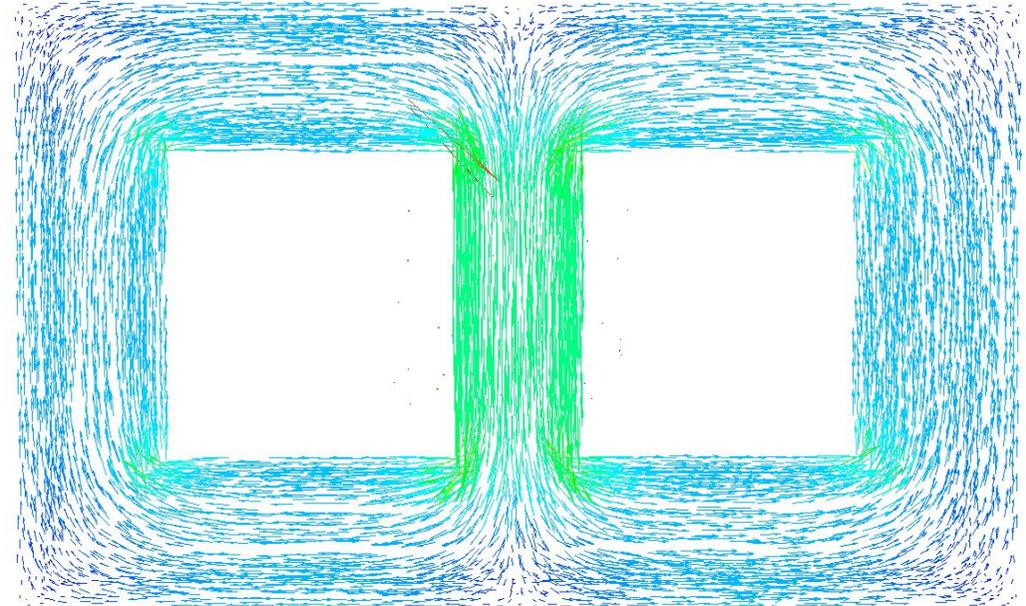
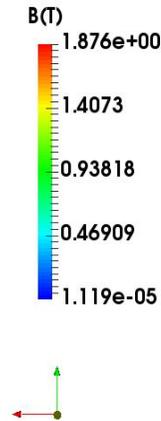
Distribution de l'induction magnétique (Méthode spectrale 5 modes)



Nombre de modes	Erreur relative entre l'approche spectrale et temporelle
3 modes	$5,6 \times 1e-3$
4 modes	$2,0 \times 1e-3$
5 modes	$1,7 \times 1e-3$



*Transformateur monophasé*



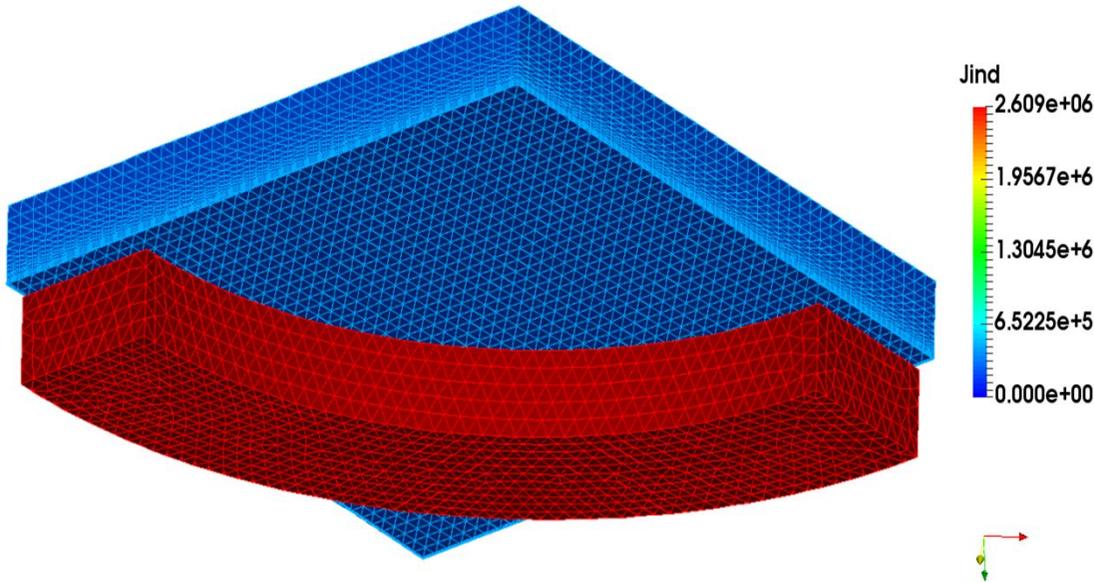
*Champ magnétique B (Méthode spectrale)*

### Paramètres

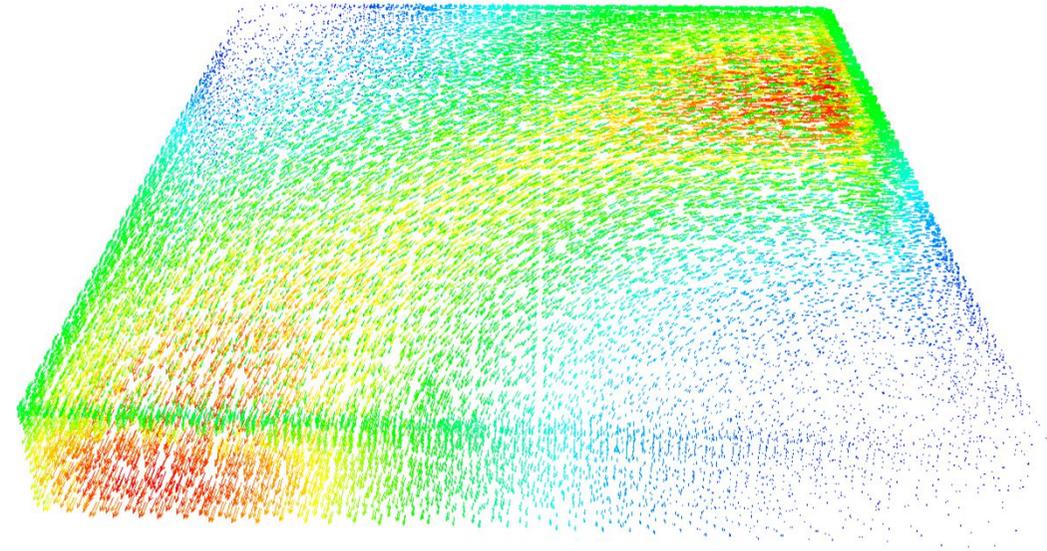
- **Source électrique :**  $i(t) = \sin(\omega t)$
- **Fréquence :**  $f = 50Hz$

### Comparaison avec la méthode temporelle

- **Erreur relative :**  $8E-2$
- **Temps d'exécution :**
  - Méthode temporelle : 80s
  - Méthode spectrale : 4s



*Bobine située entre deux plaques conductrices*



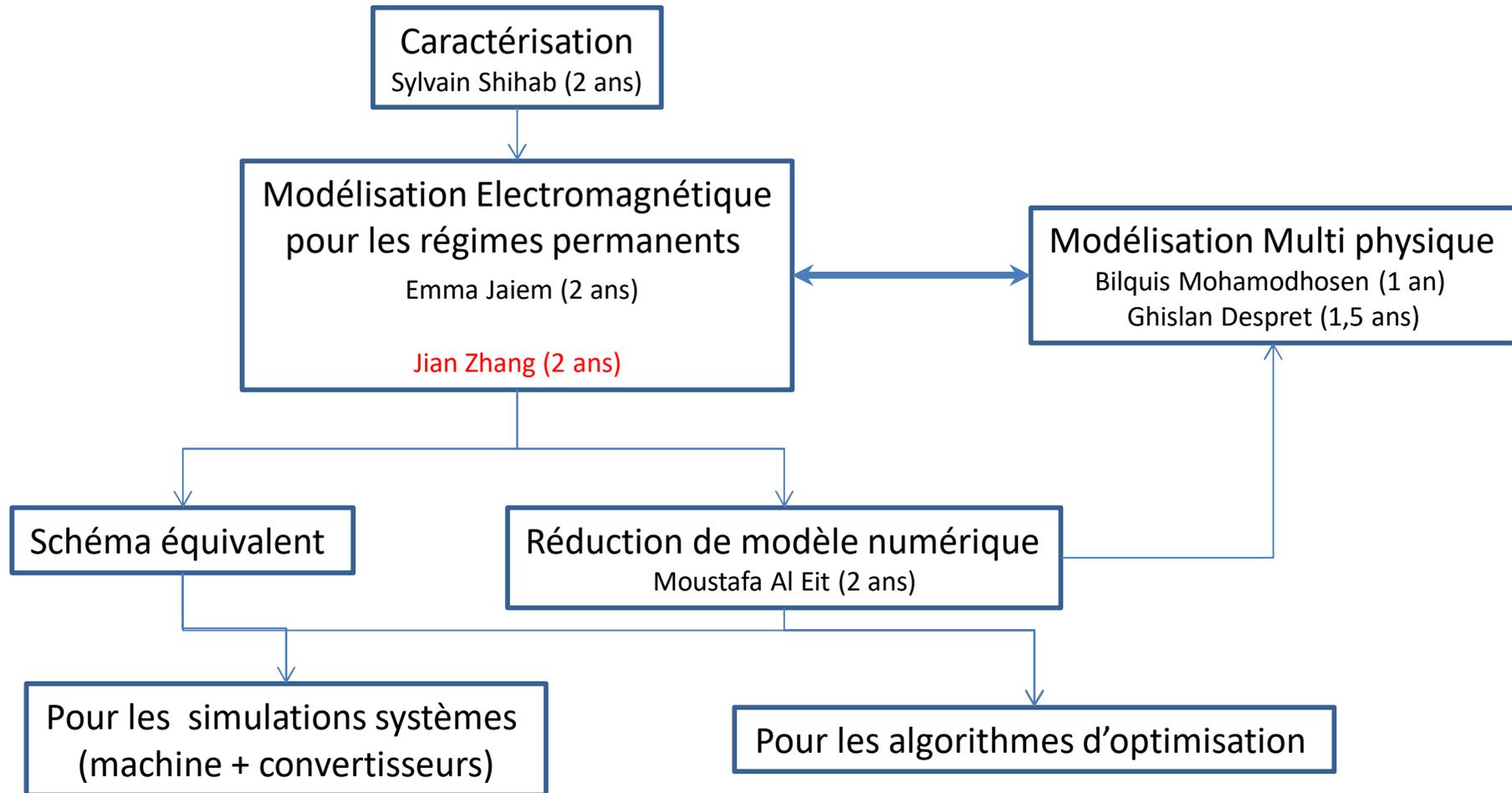
*Distribution des courants induits (Méthode spectrale)*

### Paramètres

- **Source électrique :**  $i(t) = 3 \sin(\omega t)$
- **Fréquence :**  $f = 50Hz$

### Comparaison avec la méthode temporelle

- **Erreur relative :** 4E-3
- **Temps d'exécution :**  
 Méthode temporelle : 7min  
 Méthode spectrale : 3min



1. Modélisation par méthode des éléments finis (Code\_Carmel) en mode sain et en défaut.
2. Analyse des courants et du flux dans l'entrefer.
3. Comparaison systématique des résultats de simulation aux mesures sur les machines dans les mêmes cas de fonctionnement.
4. Validation des méthodes de détection avec MAS et appliquer les méthodes à la machine CE2I.



Banc d'essais



Rotor reconfigurable

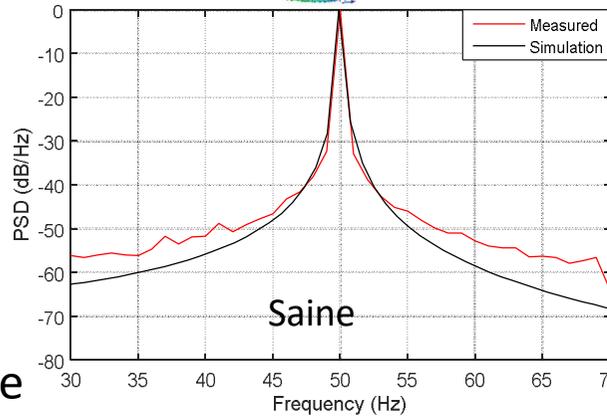
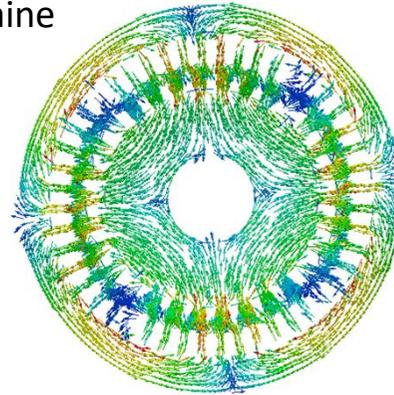
## Défauts:

- Rupture d'une ou plusieurs barres
- Excentricité
- Tension déséquilibrée

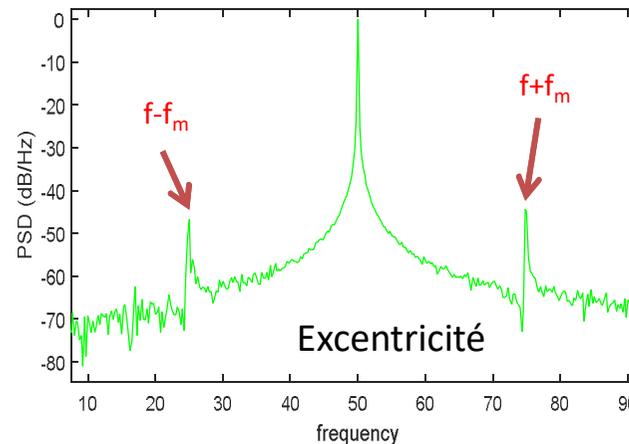
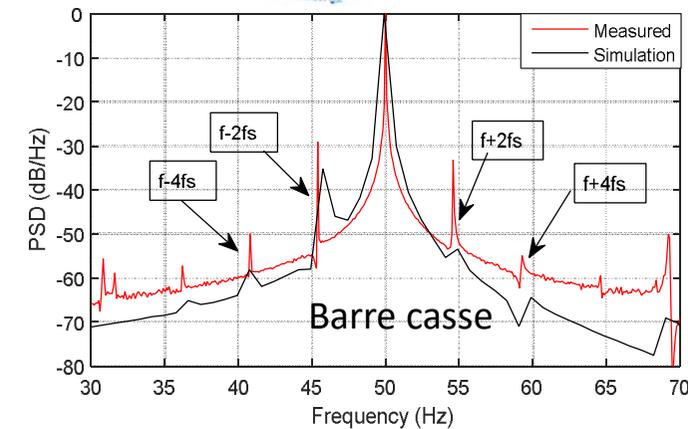
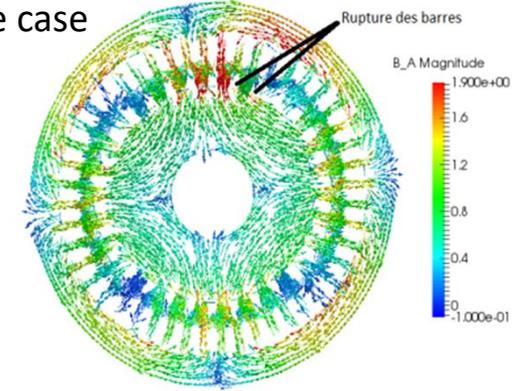
## Méthodes:

- Analyse sur le courant du stator
- Analyse de puissance instantanée
- Analyse de la sonde de flux

Saine



Barre case



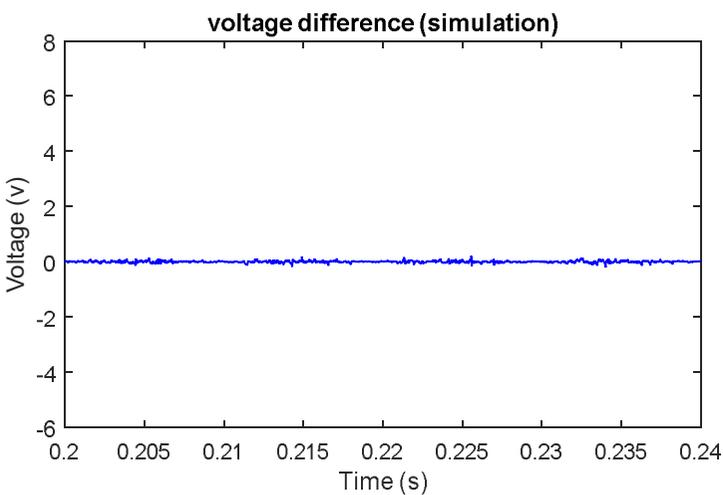
$f$ : fréquence de la source de tension  
 $f_m$ : fréquence de vitesse mécanique



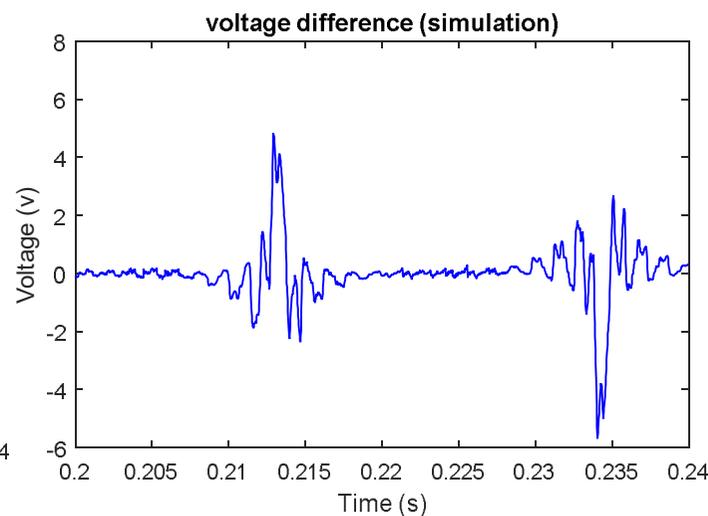
Deux sondes de flux placés à 180 degrés mécaniques

Les tensions dans les deux sondes sont presque identique en mode normal.

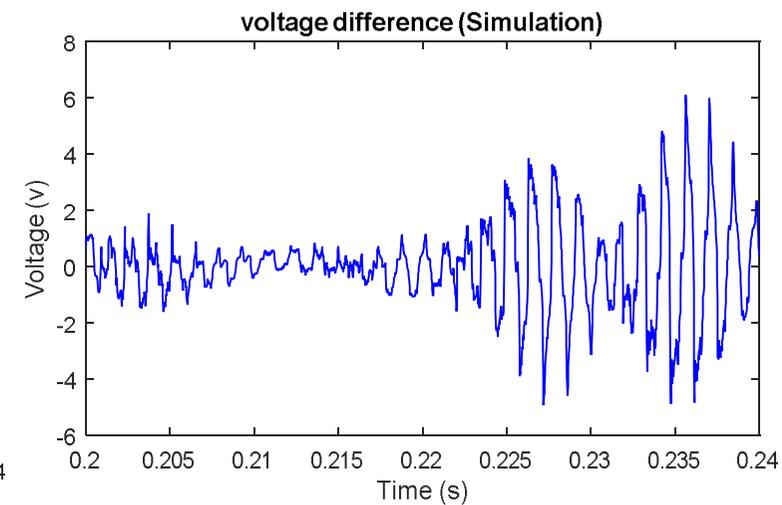
Détection des défauts en comparant les tensions issus des capteurs de flux.



Saine



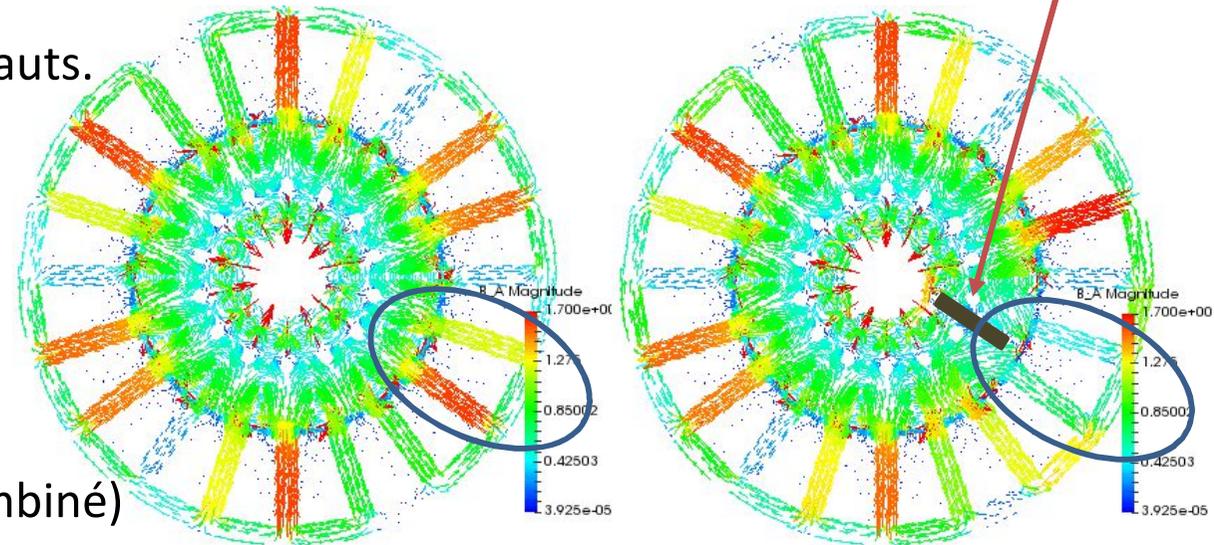
Barre casse



Excentricité

Saine

Mode demagnetization



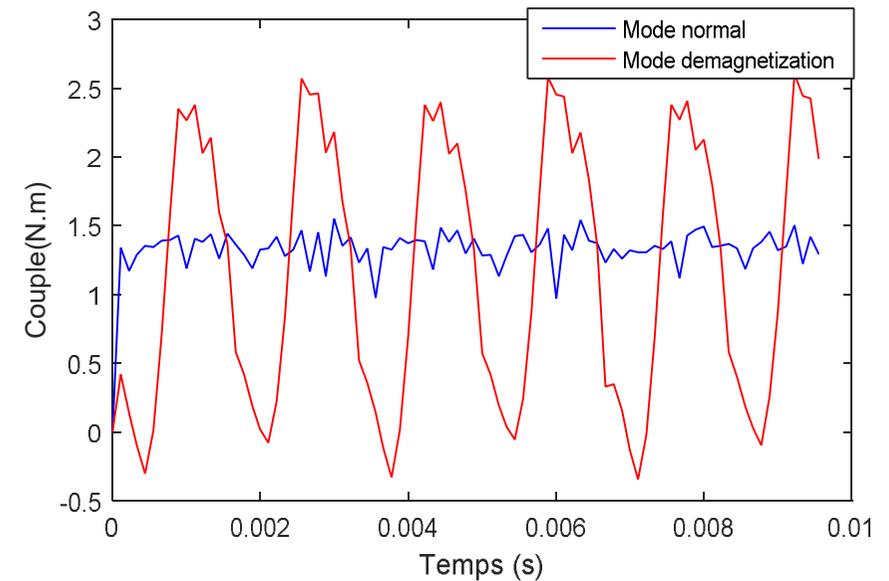
Comparaison entre mode normal et modes défauts.

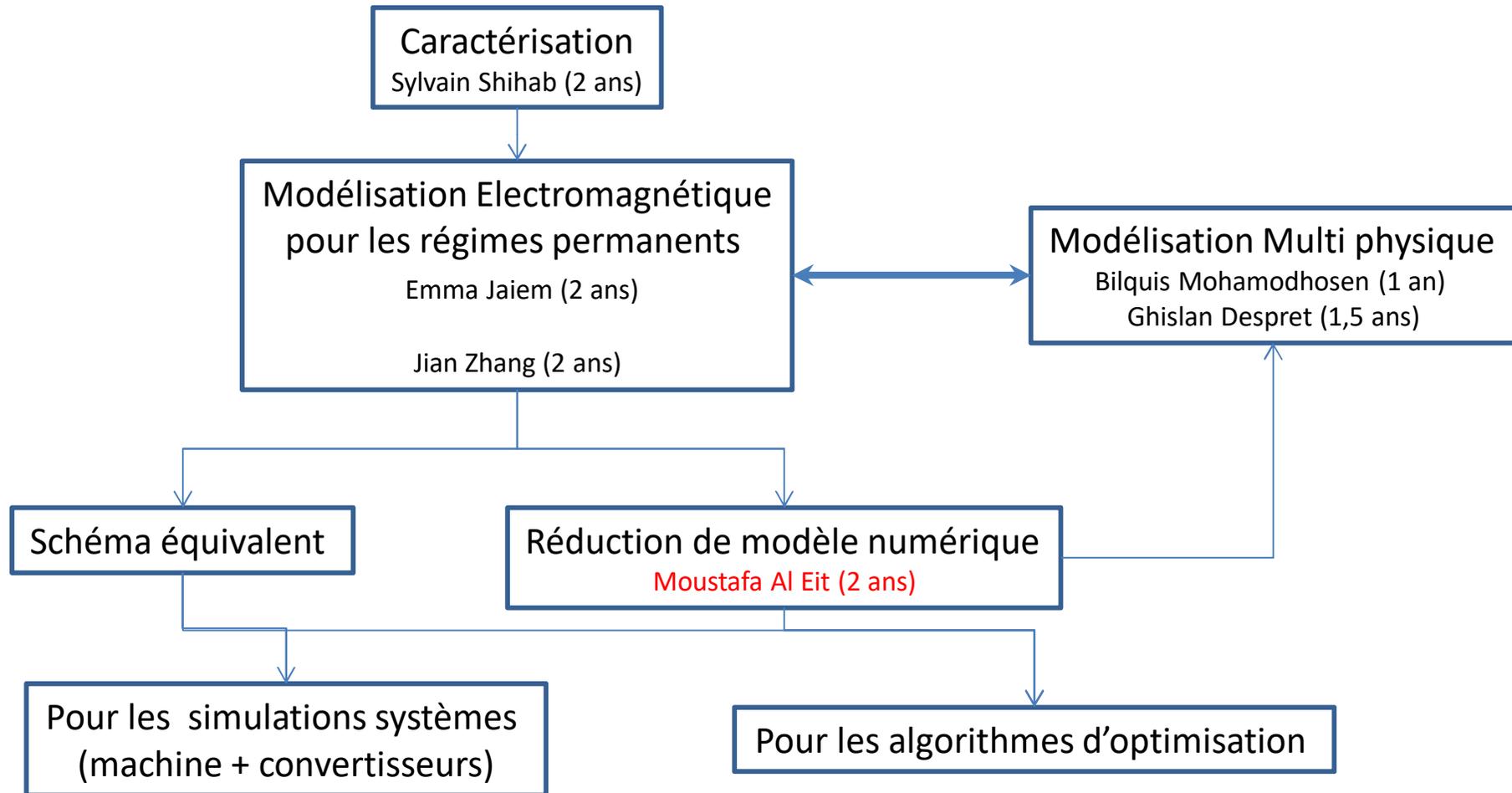
Les défauts:

- Tension déséquilibrée
- Court-circuit
- Démagnétisation
- Excentricité (Statique ,dynamique et combiné)

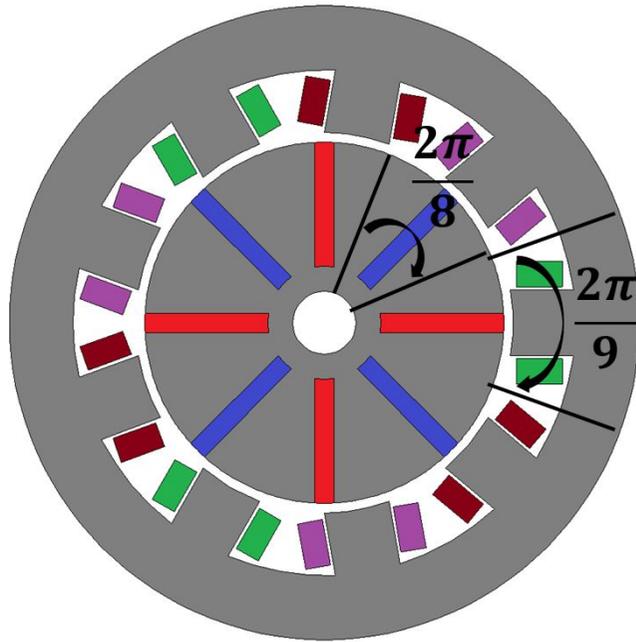
Méthodes:

- Densité spectrale de puissance des courants stator
- Sonde de flux
- Analyse en composantes principales



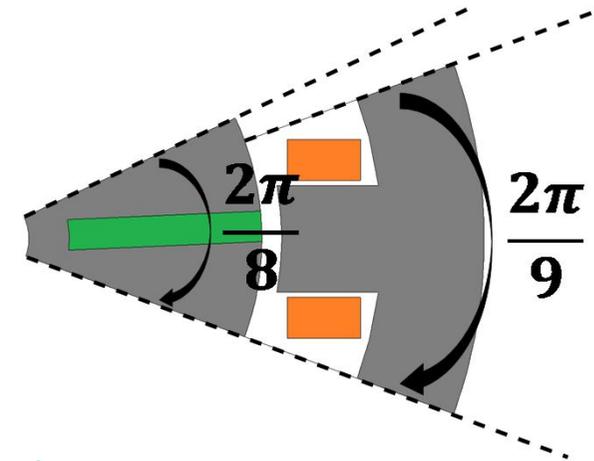


## Machines à aimants déposés $N_s=9/2p=8$



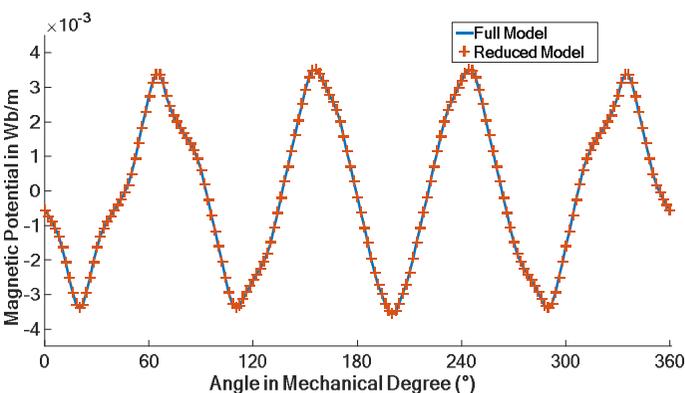
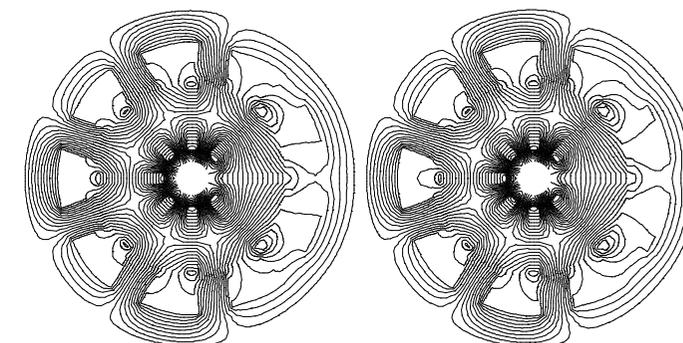
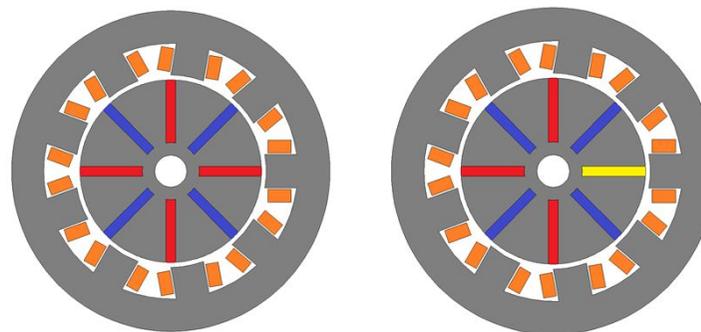
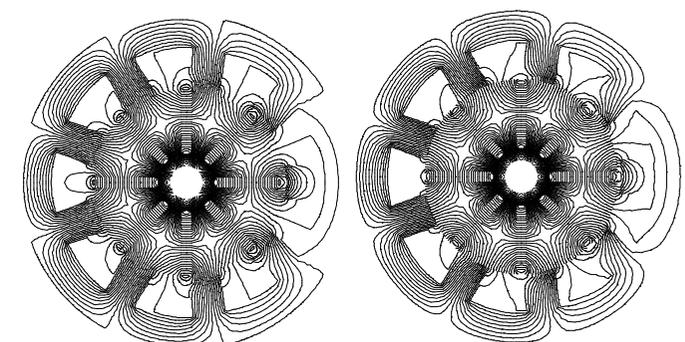
- Pas de symétrie magnétique  $\text{PGCD}(N_s=9, 2p=8)=1$
- Pas de périodicité géométrique globale  $\text{PGCD}(N_s=9, N_r=8)=1$
- Classiquement : modélisation complète indispensable
- Deux périodicité géométriques distinctes existantes au stator et rotor
- Solution : Modélisation d'une section  $1/N_s$  du stator et  $1/N_r$  du rotor

- Application de la méthode de la théorie des groupes
- Changement de base en utilisant deux transformations de Fourier discrètes distinctes au stator et au rotor
- Aboutissement à  $(N_s+N_r)$  systèmes indépendants couplés par un système à taille réduite au niveau de l'interface
- Résolution efficace accélérée en utilisant le complément de Schur et une méthode à base du gradient conjugué

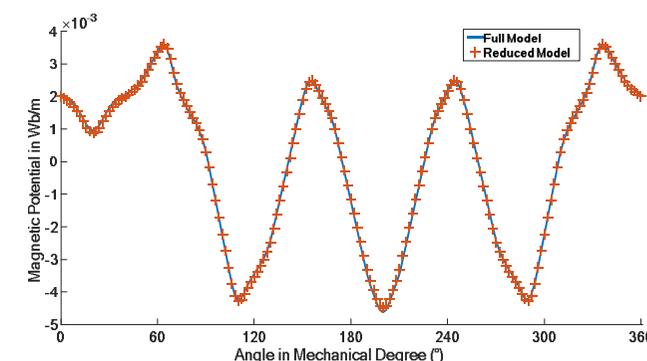


### Machine saine

### Machine en défaut



- Accélération de **11** fois en temps de calcul
- Erreur de **2,5 %**



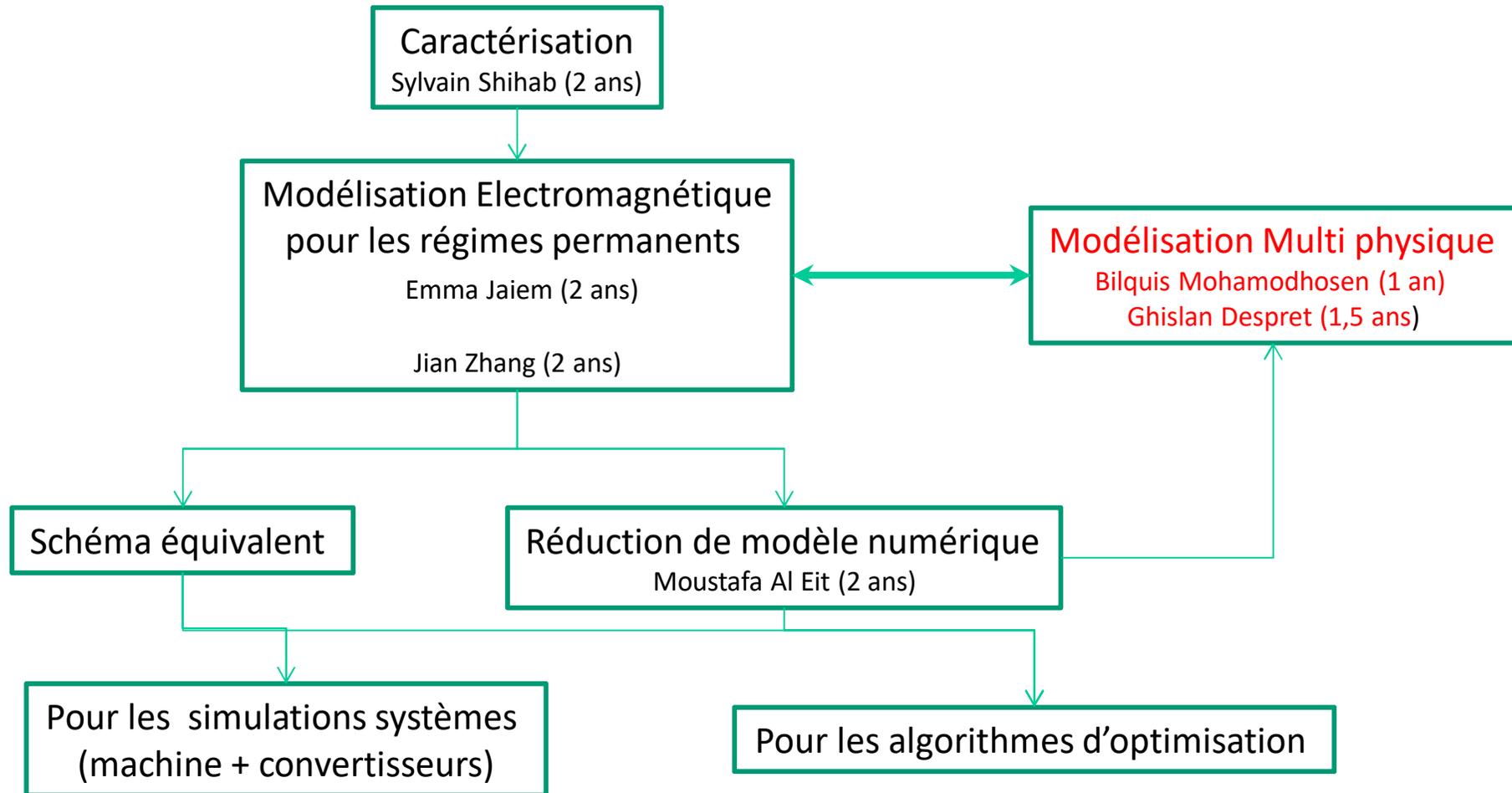
## Finite Element (FE) Model-Order Reduction of an Electrical Machine through Exploitation of Geometrical Symmetry

Conférence EMF 2018, 02/2018, AL EIT Moustafa, CLENET Stéphane, HENNERON Thomas

## Exploitation of Geometrical Symmetry towards a reduction of the Linear Finite Element Modeling of Rotating Machines

Conférence NUMELEC 2017, 07/2017 AL EIT Moustafa, CLENET Stéphane, HENNERON Thomas

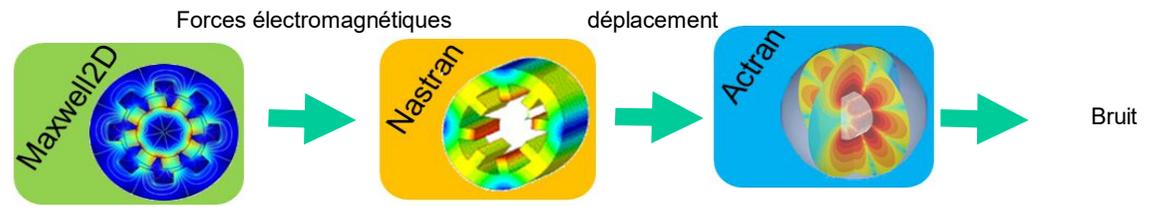
Total Exploitation of Stator and Rotor Geometrical Periodicities in Buried Permanent Magnet Machines Using the Schur Complement. AL EIT Moustafa, CLENET Stéphane, HENNERON Thomas, IEEE transmag à paraître



Outils existants ? (étude électro-vibro-acoustique / couplage avec des outils d'optimisation ?)

**Numerical approach :**

- Very accurate, 3D effects
- Very time consuming, Several days (variable speed with a sinus power).
- Projection of electromagnetic forces

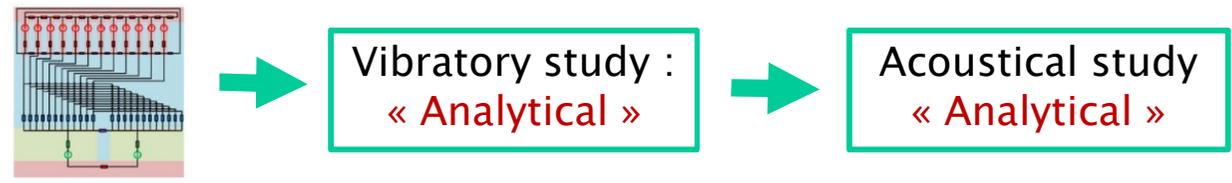


[P. Pellerey '12] [H MECHMECHE'15]

Permeances network coupled with electric circuit

**Permeance network approach :**

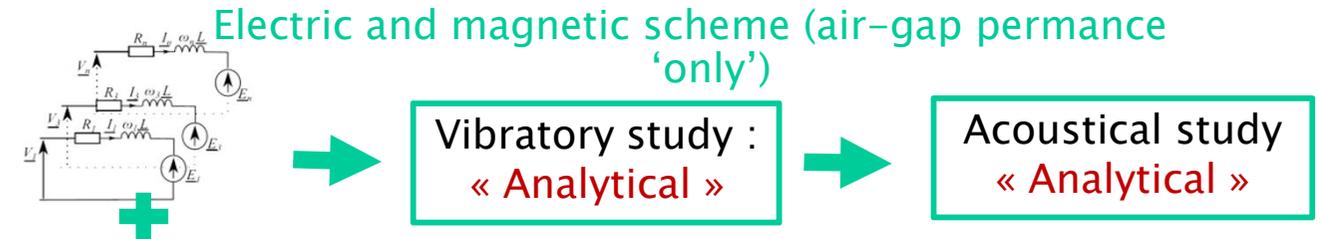
- Accurate
- Expensive in computation time with a fine discretization in the air-gap



[BRACIKOWSKI'12]

**Analytical approach :**

- Imprecise
- Good tendencies, fast and well suited for the design and optimization



[LE BESNERAIS'08 / FAKAM'14] Boisson & Verez [2014]

$$B(t, \alpha^s) = \Lambda(t, \alpha^s) (f_{mm}^r(t, \alpha^s) + f_{mm}^s(t, \alpha^s))$$

**Outils existants :**

- Outils **E.F. multi-physique** : Ansys, Altair, Jmag (multi-physique) / Code\_carmel & Aster
- Outils **analytique multi-physique** : Manatee / Diva (Dimensionnement vibro-acoustique)

## A] *Capitalisation* des différents travaux sur l'étude électro-vibro-acoustique des machines électriques

1. Travaux réalisés au sein du laboratoire
2. Outils libres sur la marché ?
3. Cahier des charges



## B] Réalisation de l'*architecture* de l'outil répondant à l'analyse des besoins.

1. Organiser toutes les fonctionnalités de l'outil(entrées/sorties)
2. Définir les pré & post-processing



## C] *Création de l'outil* sous Matlab et validation sur des cas connus

1. Développer le code scientifique
2. Valider le code avec des cas connus
3. Coder les interfaces graphiques

**Validation  
sur 3  
machines  
différentes**

## D] *Exploiter l'outil*

1. *Machine CE2I* (MSAP :  $Z_s=20$ ,  $p=7$ ) & Autres machines (SOMFY)
2. Prédire les potentielles améliorations pour réduire le bruit
3. Mesures de vibrations et de bruit sur la Machine CE2I

**A prévoir...**

**En cours...**

Modèle électromagnétique

Paramètres de la machine :  $Z_s, Z_r, p, q$ , entrefer, courant, angle de charge...

Perméance  $(t, \theta)$

FMMs  $(t, \theta)$

FMMr  $(t, \theta)$

*[Toliyat, Lipo 91 – 98], [Semail 2010]*

*[Brudny, 97] – [Gaussen, 2013]*

Induction radiale

Force radiale

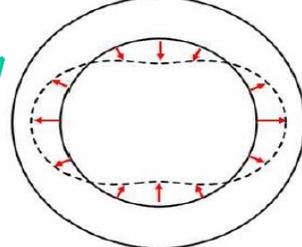
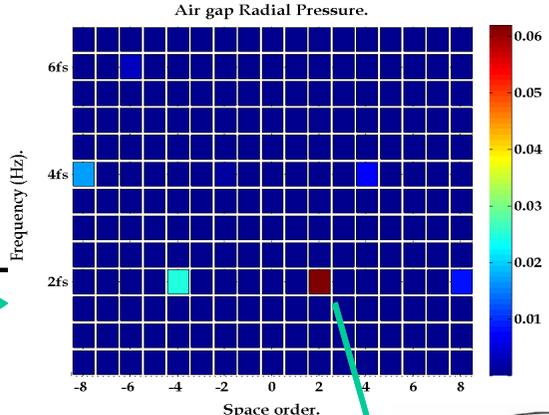
$B(t, \theta)$

Vibration

Bruit

$P_r(t, \theta)$

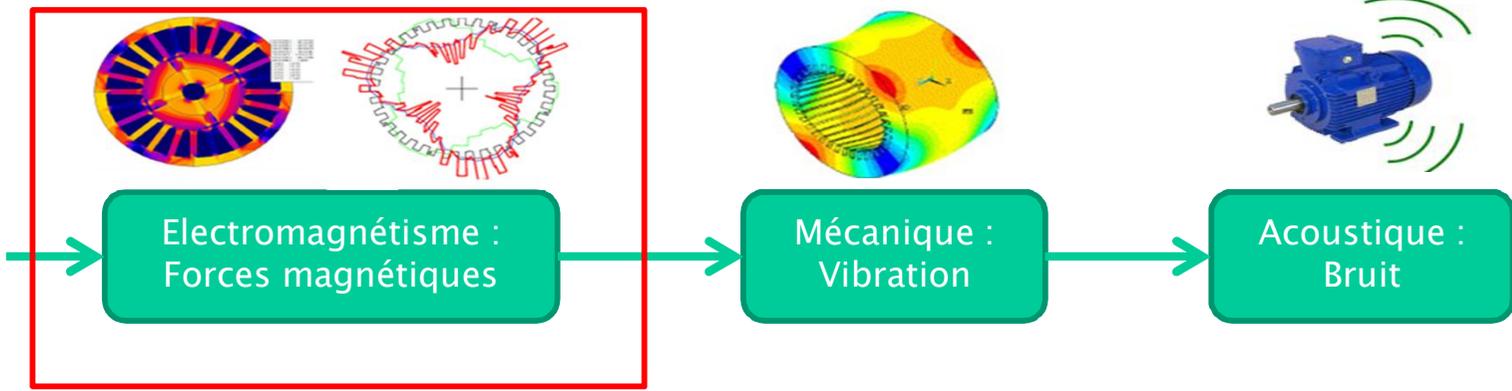
*[Le Besnerais, 2008]*



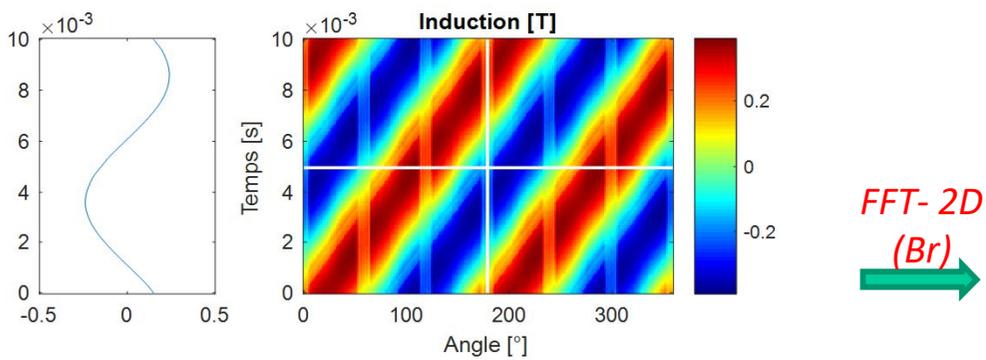
$$P_{rad}(t, \theta) = \sum_{f,r} P_{fr} e^{j(2\pi ft - r\theta + \phi_{fr})}$$

**(2, 2) / Space Order : 2**  
**Frequency order : 2**

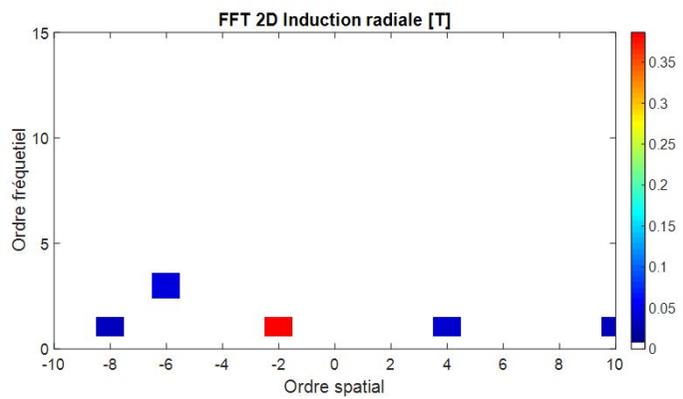
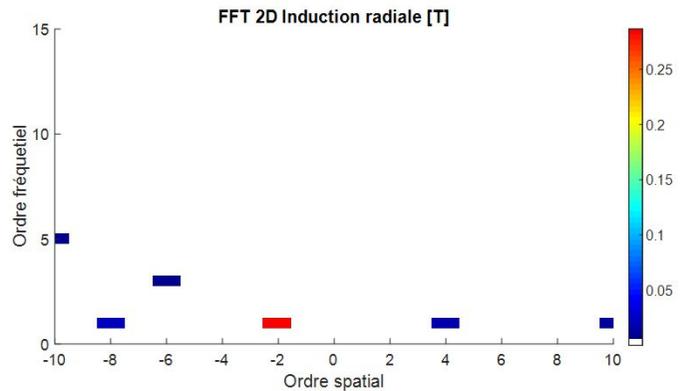




$$B_r(t, \theta) = P(t, \theta) \cdot \left[ \sum_{q=1}^{q_s} N_s^{(q)}(\theta) \cdot i_s^{(q)}(t) + \sum_{b=1}^{Z_r} N_r^{(b)}(t, \theta) \cdot i_r^{(b)}(t) \right]$$

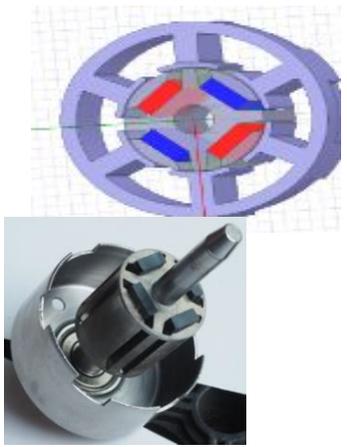


FFT-2D (Br)



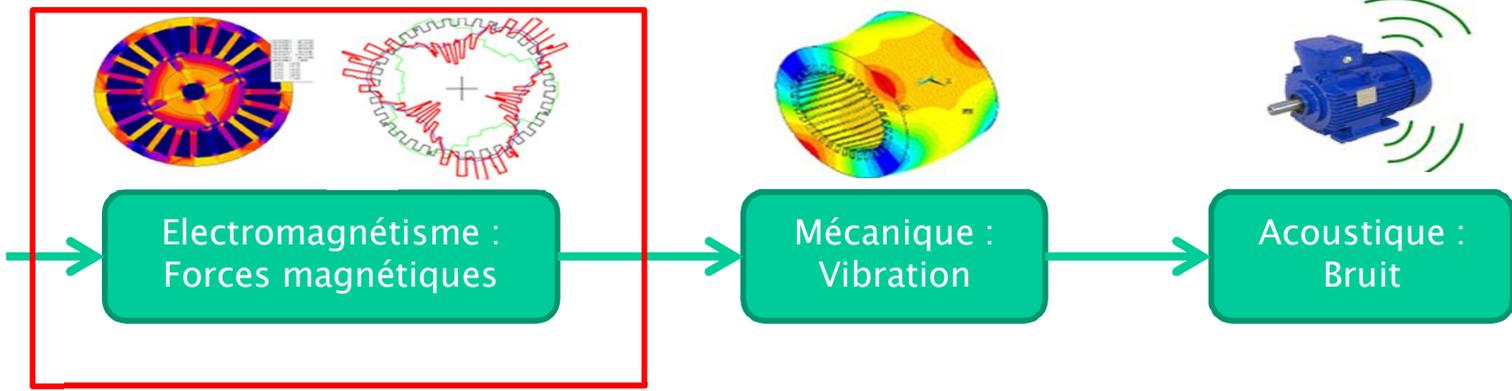
Analytique (Outil développé)

M.E.F.

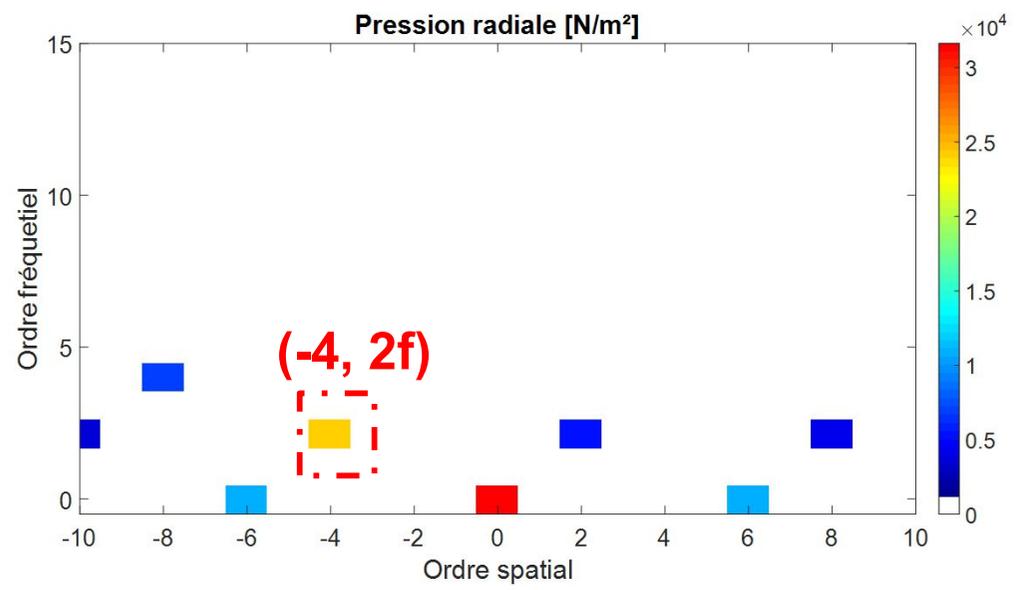


MSAP 6s/ 4p - CW (Somfy)

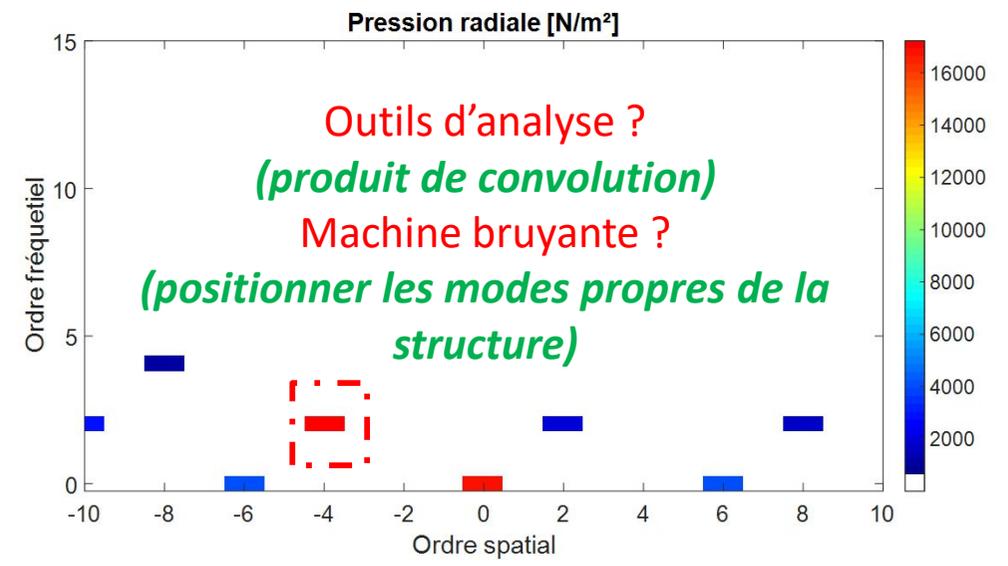




$$P_r(t, \theta) = \frac{1}{2\mu_0} B_r^2(t, \theta)$$



M.E.F.

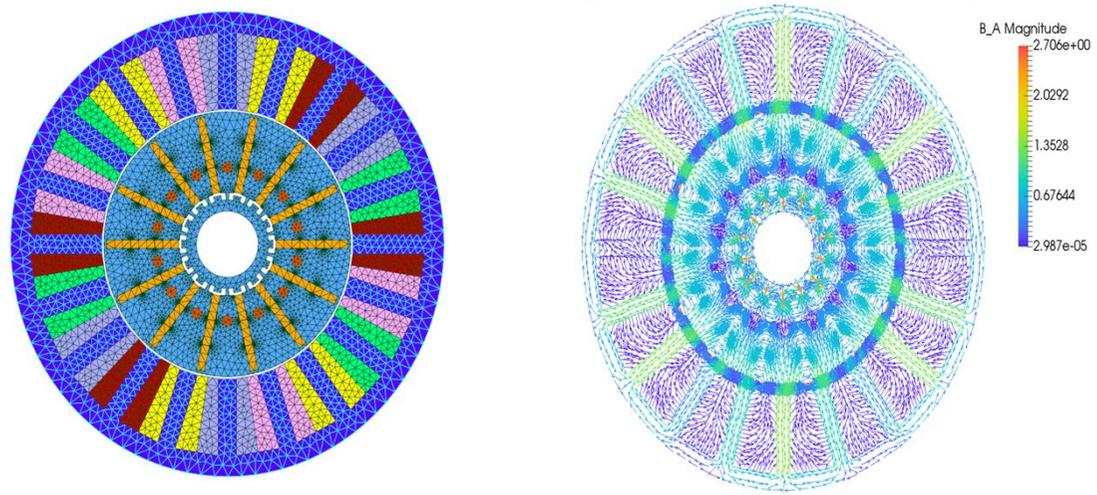


Analytique

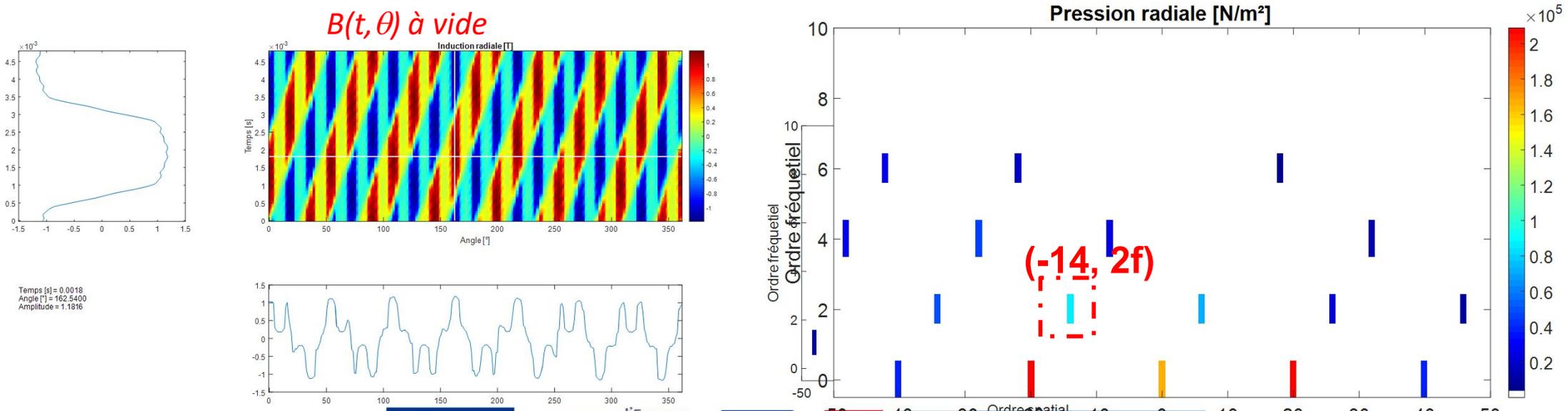
MSAP 6s/ 4p - CW  
(Somfy)



## Modélisation de la machine (Code\_Carmel) / simulation à vide $N=cste$



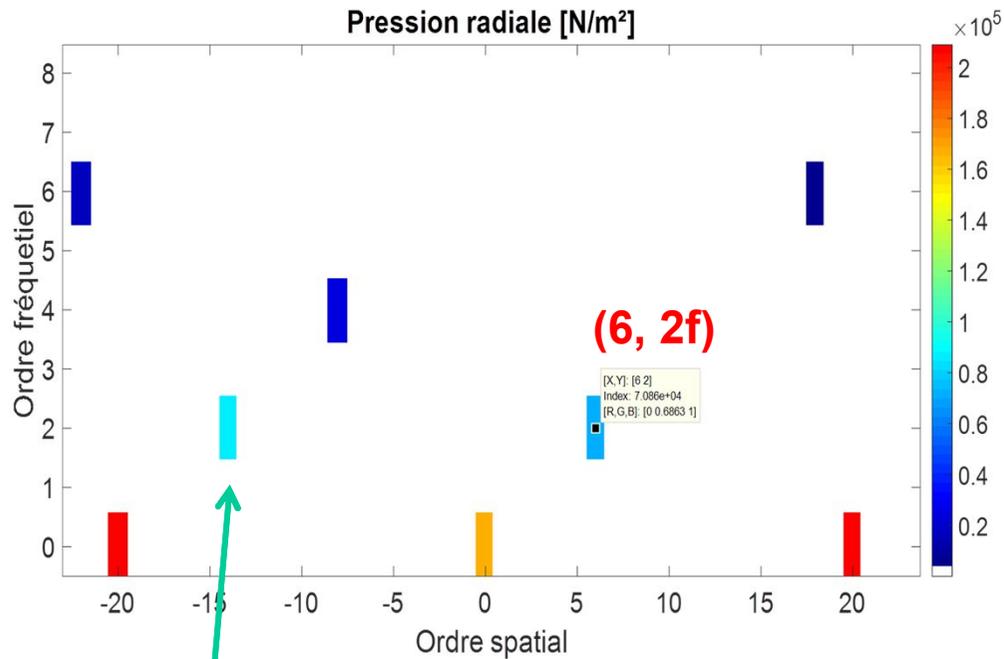
## Exploitation de l'outil couplé à code\_Carmel: vue de la FFT 2D de la pression



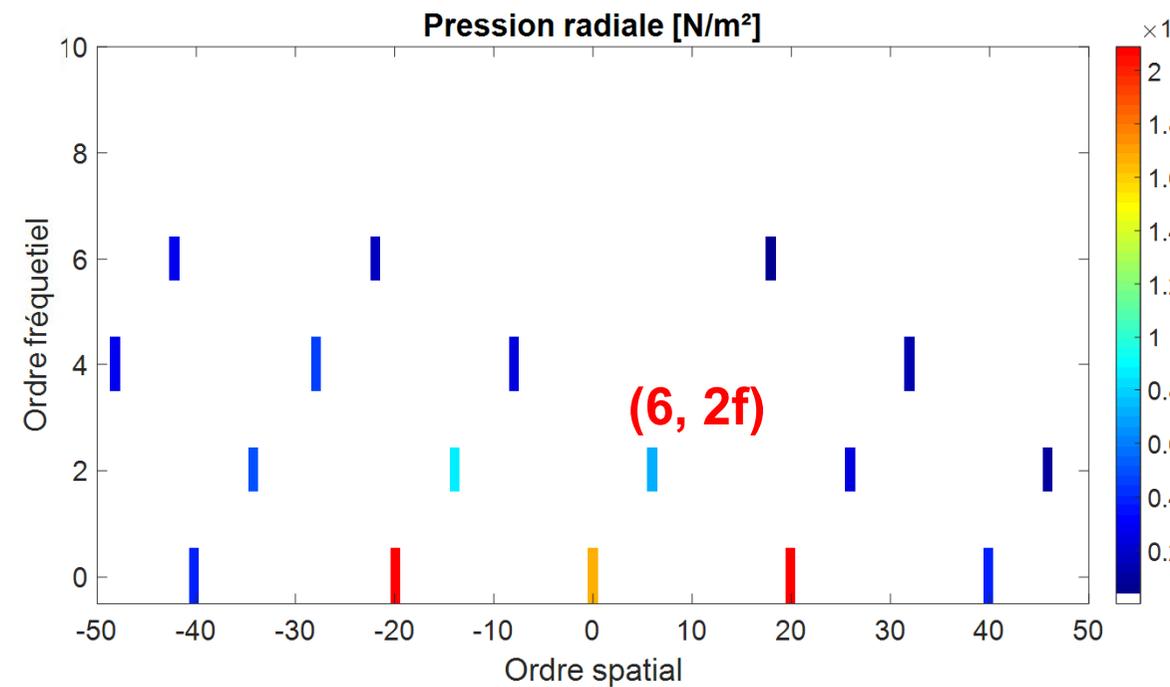
Temps [s] = 0.0018  
Angle [°] = 162.5400  
Amplitude = 1.1816



## Comparaison analytique et E.F. (à vide) sur les FFT – 2D des pressions radiales



Raie principale de pression :  
14, 2f



⇒ Application du PGCD ( $Z_s/2p$ ) : ordre spatial le plus faible hormis l'ordre spatial 0 (breathing mode)

## Principaux résultats

### *Objectifs atteints:*

Architecture de l'outil / Outil générique analytique en partie réalisée

Validation sur une machine de faible puissance : mesure en vue de valider les raies de forces existantes;

Exploitation du modèle CE2I sous code\_Carmel (simulation à vide) / Validation analytique via l'outil.

### *Objectifs manquants:*

Etendre aux différents points de fonctionnement / Validation par E.F. (code\_Carmel)

Application « analytique » de la machine CE2I en vue d'un couplage avec un outil d'optimisation

Optimisation de la structure afin de minimiser les raies de forces 'gênantes' : quel type de bobinage pour réduire la raie gênante ? (couplage code\_Carmel / sophemis)

## Type de machines

Induction obtenue par E.F.

- Paramètres de la machine →
- Bobinage →
- Fonction de bobinage →
- Courant stator →
- Fmm stator →
- Courant rotor →
- Fmm rotor →
- Perméance →
- Induction →
- Force →

Affichage

