



convertisseur
d'énergie
**Intégré
Intelligent**

29 janvier 2020 – comité de suivi

Tâche 4

Développement d'outils de modélisation

Coordinateur
Y. Le Ménach



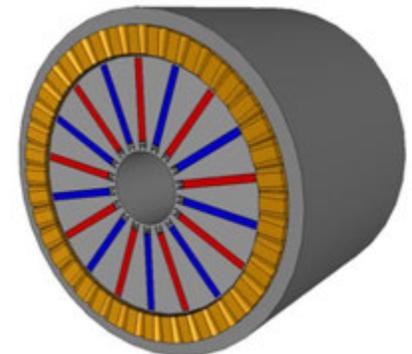
1. Objectif général

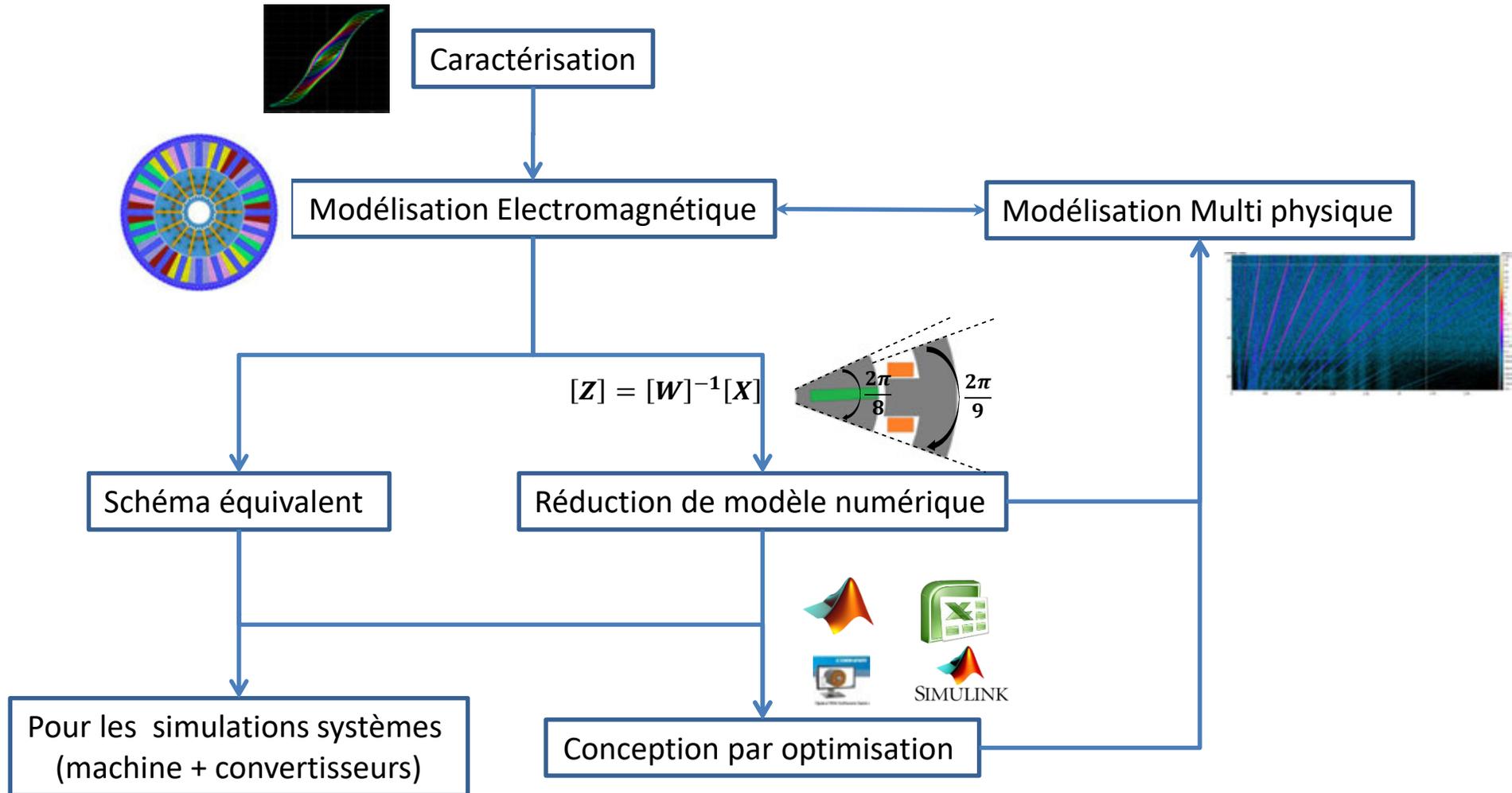
.....

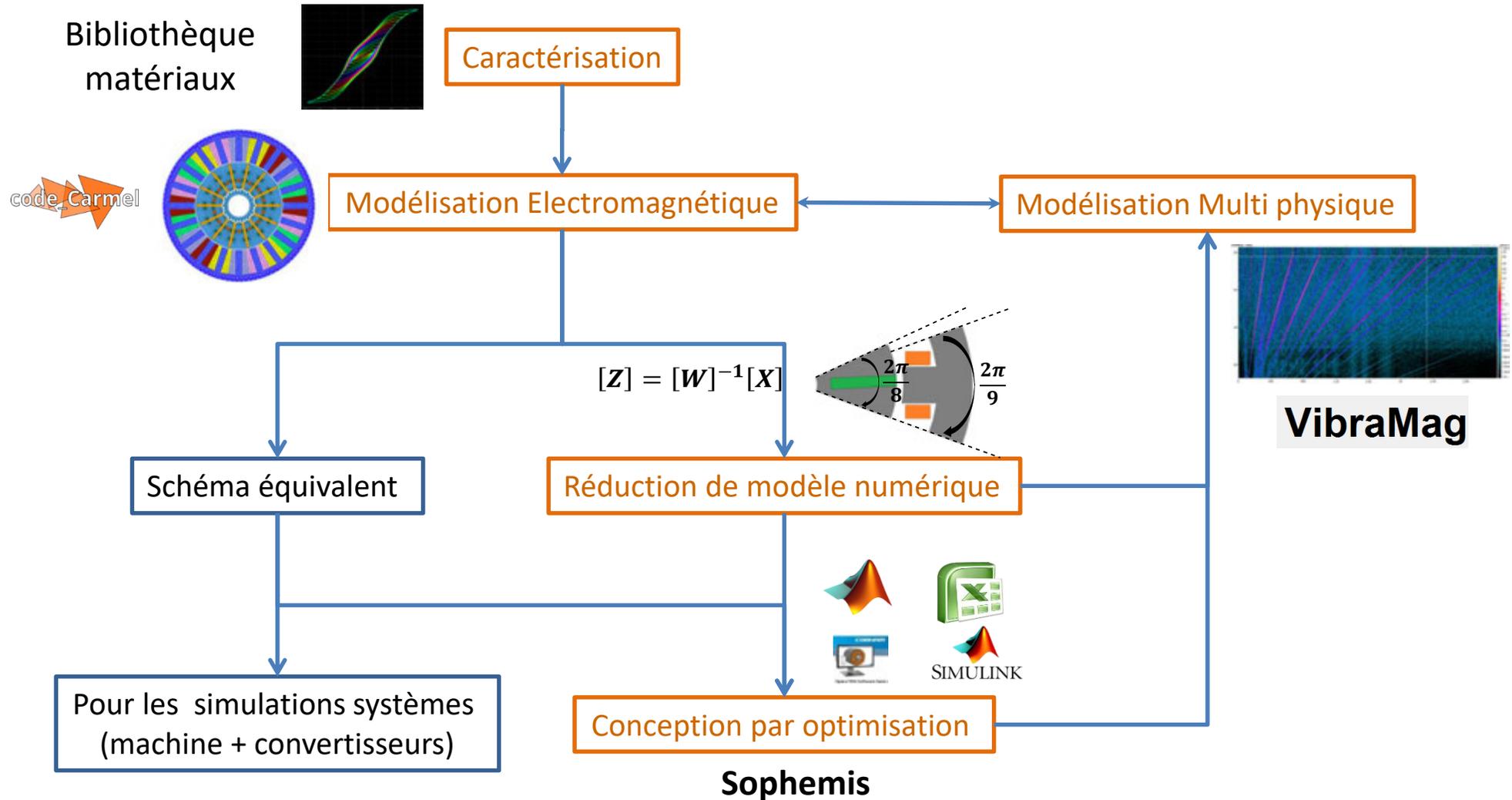
Concevoir et développer des outils numériques capables de répondre aux besoins exprimés pour la conception d'entraînements électriques fiables et intégrés
Développer une méthodologie pour la conception

Organisation en sous-tâches :

- **Modèles des matériaux ferromagnétiques**
- **Développement de modèles réduits pour la simulation dynamique et la commande**
- **Analyse des pertes et fonctionnements défaillants**
- **Conception par optimisation multi-physique et multi-objectif**







Objectifs de la sous-tâche

Développement de modèles numériques

.....

Obtenir une modélisation numérique rapide et précis pour

La conception optimale

La simulation de système (chaîne de conversion)

La simulation de défaut

code_Carmel

Développer la méthode spectrale pour la modélisation d'une machine tournante

Développer des méthodes de réduction basée sur la périodicité de la géométrie et/ou à partir de approches mathématiques

Coordinateurs : F. Guyomarch, Y Le Menach, T. Henneron, S. Clénet

Travaux : Emna Jaïem

- *Verrous*

Obtenir directement le régime permanent dans des cas de fonctionnement non linéaire

- *Différentes méthodes existantes:*

Time stepping (Preston 1998)

Harmonic balance (Gyselinck 2002)

Time-periodic (Takahashi 2011)

Méthode des éléments finis \Rightarrow Système matriciel

$$M_L A(t) + M_{NL}(A(t)) + A(t) + S \frac{dA(t)}{dt} + M_\theta(t) A(t) = F(t) \quad \forall t \in T$$

Prise en compte de **toutes les positions** de la machine et de **la non linéarité** avec **tous les modes considérés.**

$$M_L A(t) + M_{NL}(A(t)) + A(t) + S \frac{dA(t)}{dt} + M_\theta(t)A(t) = F(t) \quad \forall t \in T$$

Approche spectrale de type Fourier : Harmonic Balance Method

$$A(t) \cong \sum_k \underline{A}_k e^{j\omega_k t}$$

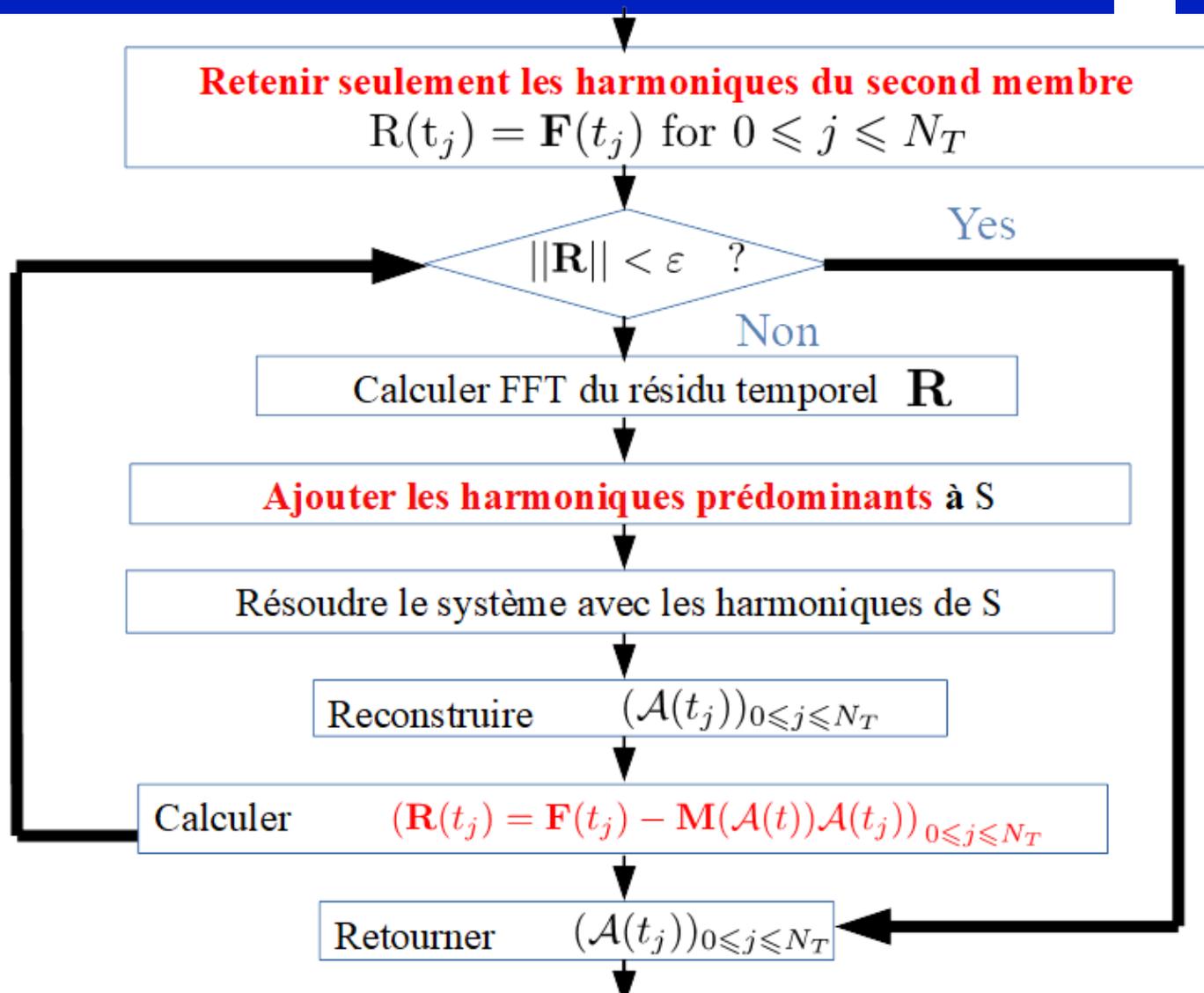
$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_L + \mathbf{M}_{\nu p} + j\omega(-N)\mathbf{S} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_L + \mathbf{M}_{\nu p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{M}_L + \mathbf{M}_{\nu p} + j\omega N\mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{-N} \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_0 \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{-N,-N} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{R}_{-N,N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \mathbf{R}_{0,0} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{N,-N} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{R}_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{-N} \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_0 \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{A}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{G}}_{-N} \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{G}}_0 \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{G}}_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{l,k} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}_\theta(t) e^{j\omega(k-l)t} dt$$

$$\mathbf{G}_l = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{F}(t) - \mathbf{M}_{fp}(\mathbf{A}(t))) e^{-j\omega l t} dt$$

Plus le nombre d'harmoniques **N** est élevé, plus la solution spectrale est précise mais plus la taille du système matriciel augmente et donc un temps de calcul long.

Comment choisir N ?



S est l'ensemble des harmoniques retenues

Fin



Machine synchrone à aimants permanents

Données sur la machine

- Machine tournant autour de l'axe OZ
- 2 paires de pôles réalisés par des aimants permanents
- 18 spires par phase
- Maillage 2D extrudé (6138 Prismes)

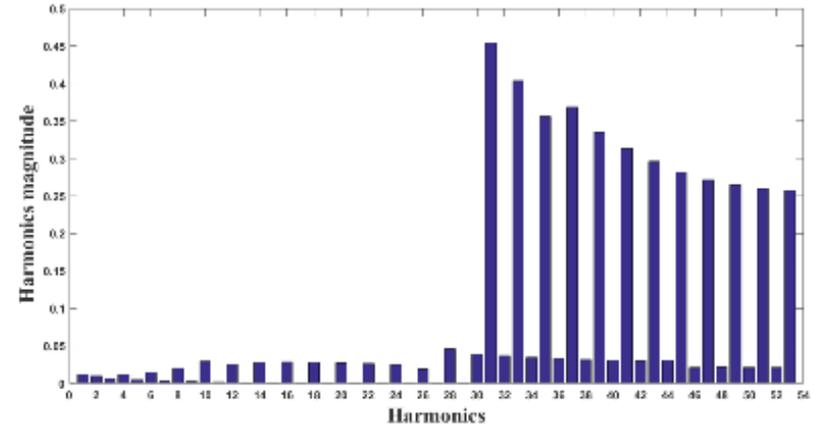
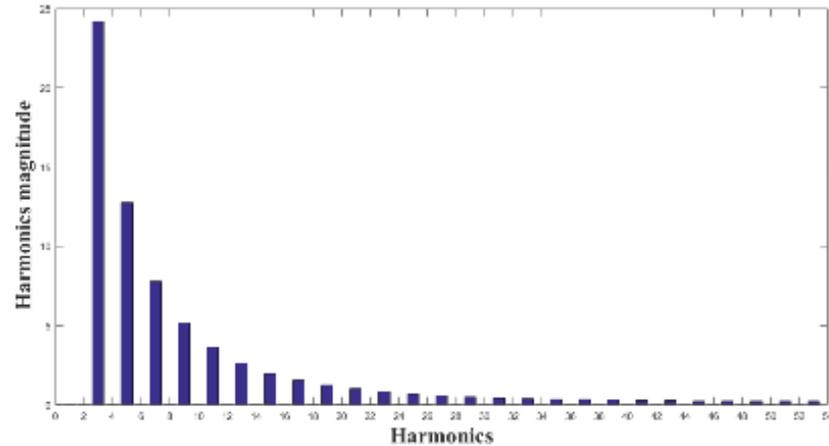
- Source électrique : pas de courant
- Fréquence fondamentale 37:
- Perméabilité relative du rotor et stator 3470
- Induction rémanente des aimants 0,38T

- Mouvement imposé : Méthode du pas bloqué
- Nombre de permutations 1:
- Nombre de pas de temps par période 108 :

Après avoir pris en compte la fréquence fondamentale



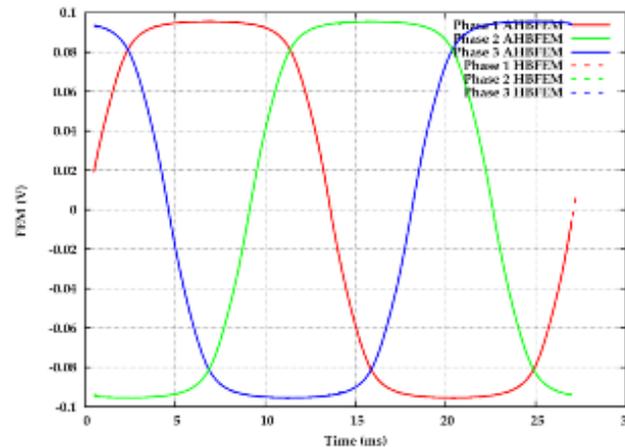
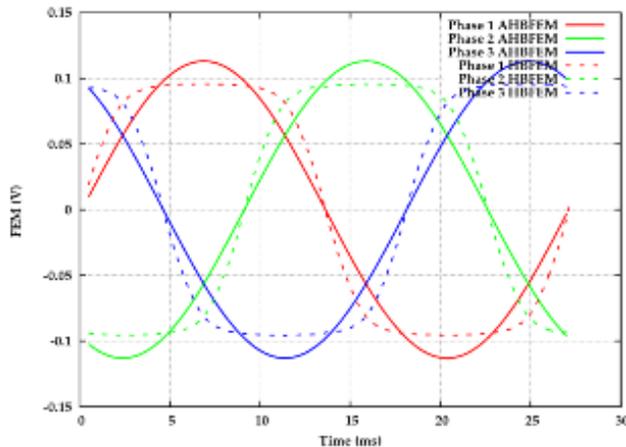
Après avoir pris en compte les harmoniques prédominants de l'itération précédente



FFT du résidu temporel après la 1ère itération

FFT du résidu temporel après la 2ème itération

FEM obtenu par AHBFFEM après la 1ère itération de l'algorithme de prédiction



FEM obtenu par AHBFFEM après la 2ème itération de l'algorithme de prédiction

Astuce : On peut calculer le résidu temporel dans des éléments spécifiques, par exemple un élément sélectionné dans le domaine magnétique **non linéaire** ou dans un domaine de **mouvement**

Gain en temps par rapport à la méthode d'équilibrage harmonique classique

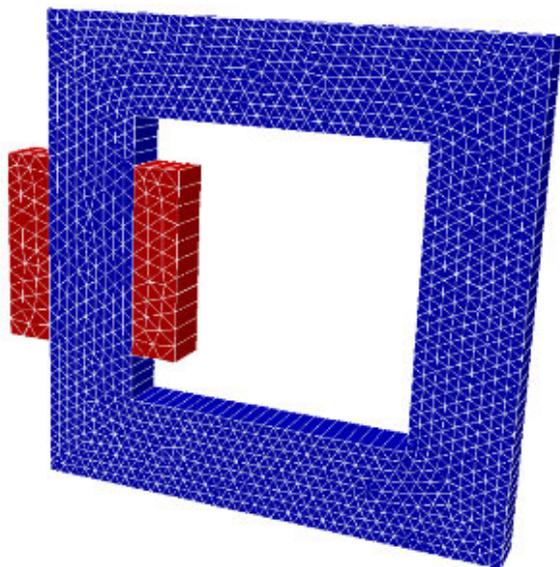
Temps d'exécution (Méthode spectrale classique en prenant en compte tous les harmoniques possibles)
2h et 13 min

Temps d'exécution (Méthode spectrale avec la prédiction des harmoniques)

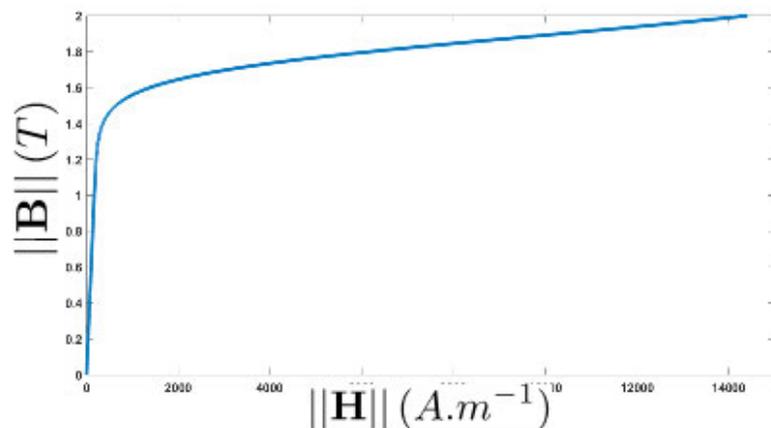
=

Temps d'exécution de la méthode spectrale avec la fréquence fondamentale (1ère itération de l'algorithme) +
Temps d'exécution de la méthode spectrale avec la prédiction des harmoniques (2ème itération de l'algorithme)
10 min et 36s

speed up = 12,5



Transformateur monophasé



- Nombres d'éléments : 6926
- Nombres d'inconnues : 3384
- Source électrique : $i(t) = 8 \sin(\omega t)$
- Fréquence fondamentale : $f = 50 \text{ Hz}$
- Nombre de pas de temps par période : 40
- Pas de temps : $dt = 5e - 4$
- Précision non linéaire : $\varepsilon = 1e - 8$

Coefficients de
la loi de Marrocco

$$\begin{cases} \epsilon_m &= 2,1101e - 4 \\ c_m &= 1,2158e - 2 \\ \alpha &= 8,0218 \\ \tau &= 2,3725e4 \end{cases}$$

FFT du résidu temporel après la 1ère itération, c-à-d après avoir pris en compte les harmoniques du terme source

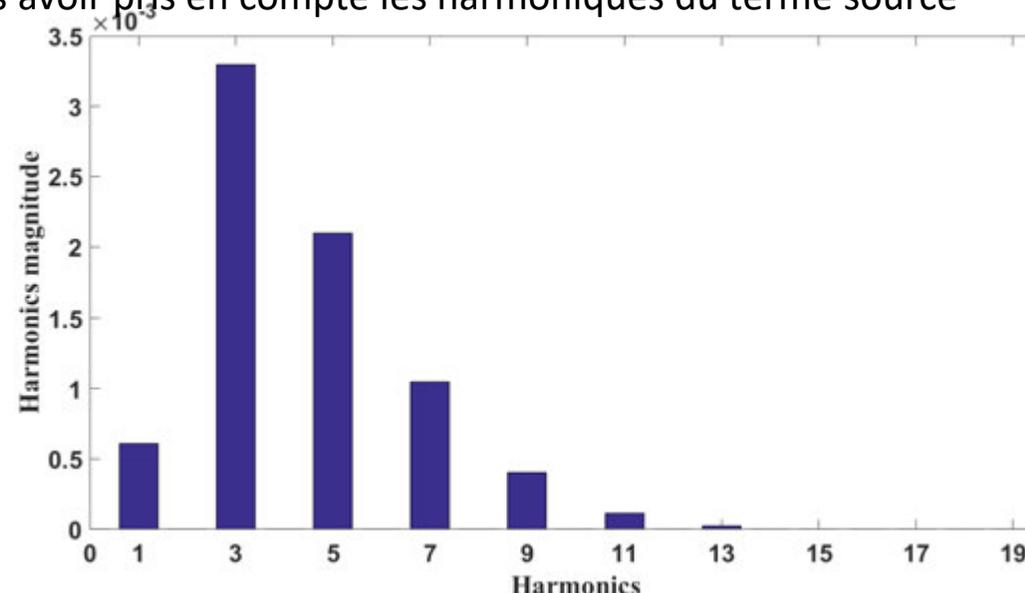
Temps d'exécution (Méthode spectrale classique en prenant en compte tous les harmoniques possibles)

4h et 52 min

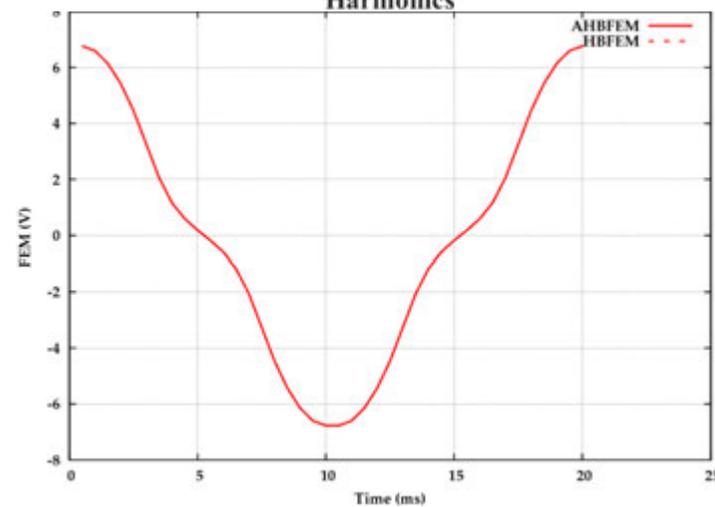
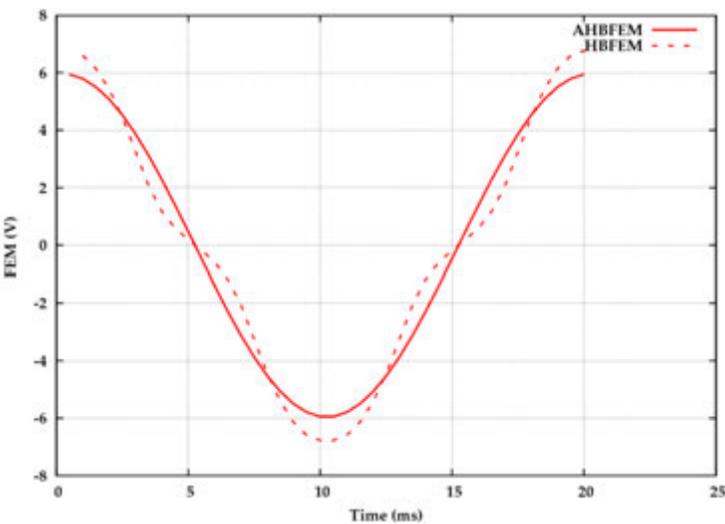
Temps d'exécution (Méthode spectrale avec la prédiction des harmoniques)

2h et 41 min

Speed up de AHBFEM par rapport à HBFEM est égal à 1,81

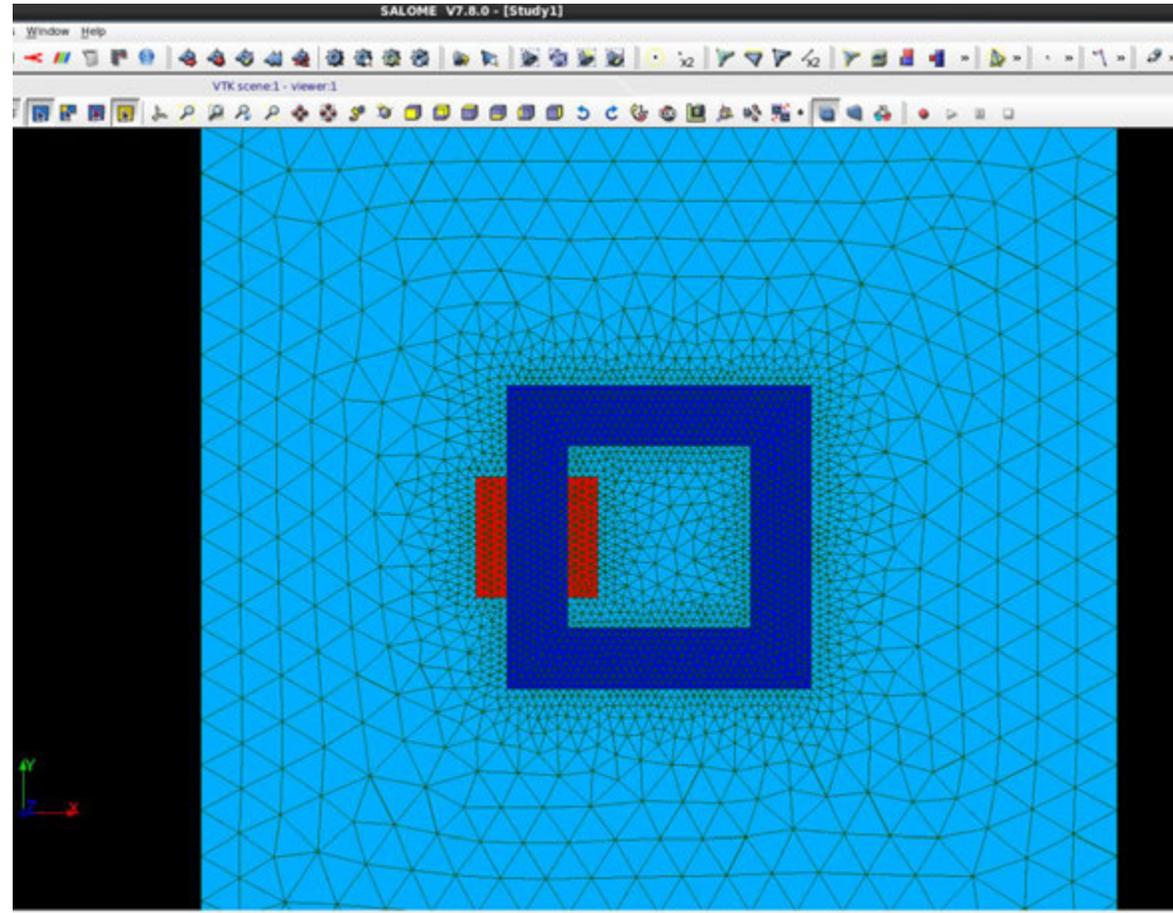


FEM obtenu par AHBFEM après la 1ère itération de l'algorithme de prédiction



Liste des fonctionnalités implémentées et validées

- Lecture d'un maillage 2D.
- Création de la structure Mesh 2D.
- Ajout d'outils utiles pour la méthode des éléments finis : Fonctions de forme et points de Gauss pour les triangles et les rectangles.
- Création des matrices éléments finis 2D.
- Assemblage des matrices linéaires.
- Assemblage de terme source (en cours).



Objectifs de la sous-tâche

Analyse des pertes et fonctionnements défectueux

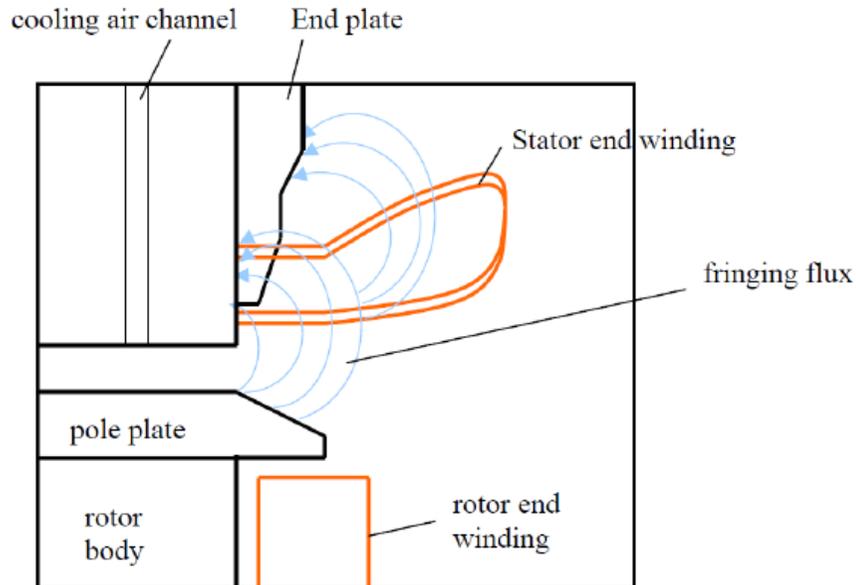
.....

Quantifier les pertes magnétiques et/ou par courant induits
Diagnostic de défaut d'origines magnétiques ou mécaniques

Coordinateurs : Abelmounaïm Tounzi, Abdelkader Benabou

Travaux : Kevin Darques

Dans les machines, le circuit magnétique est contraint à l'aide de plateaux de serrage situés aux deux extrémités du stator



Ces structures peuvent être conductrices et sont soumises à des champs magnétiques variables

- Génération de courants induits
- Génération de pertes

Objectif : Quantifier les pertes dans ces plateaux ainsi que dans les doigts de serrage

Mise au point d'une maquette pour estimer les pertes



Inducteur

Stator

Structure de serrage en laiton



Méthodologie :

- Avoir une bonne approximation des pertes fer statoriques (comparer les résultats du modèle EF aux mesures sur la maquette)
- Déterminer les pertes par courants induits dans les structures de serrage par EF
- Comparer les résultats à ceux issus de la maquette



La non-linéarité dans code_Carmel

Loi de Marrocco :

$$\frac{B}{\mu_0} \left[\frac{B^{2\alpha}}{B^{2\alpha} + \tau} (c - \varepsilon) + \varepsilon \right]$$

Implémentation d'une nouvelle loi B(H) dans code_Carmel

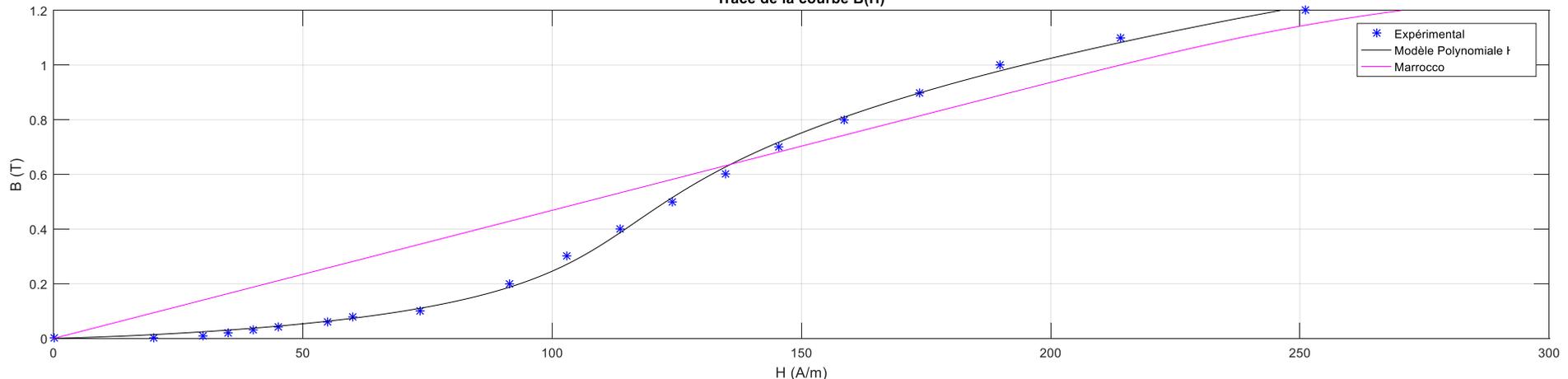
Modélisation de la courbe de 1^{ère} aimantation

$$\vec{H} = v(\|\vec{B}\|) \cdot \vec{B}$$

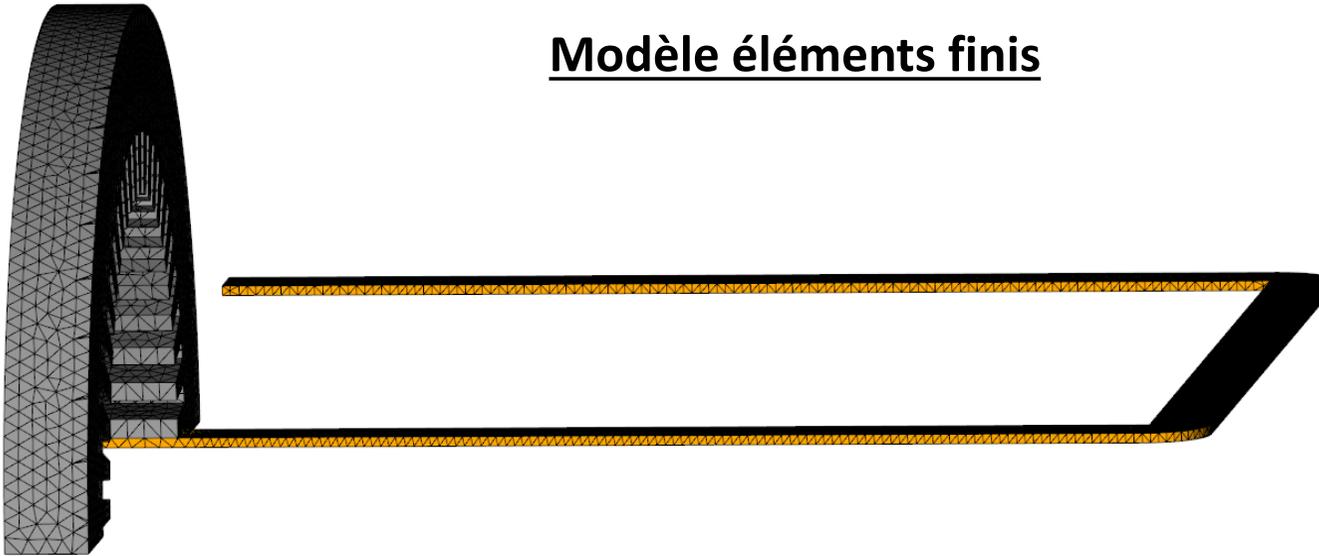
$$v(\|\vec{B}\|) = \alpha_1 \|\vec{B}\|^{1/2} + \alpha_2 \|\vec{B}\|^{1/4} + \alpha_3 \|\vec{B}\|^{1/6} + \alpha_4 \|\vec{B}\|^{1/8}$$

Détermination des coefficients à l'aide d'une régression non linéaire

Tracé de la courbe B(H)



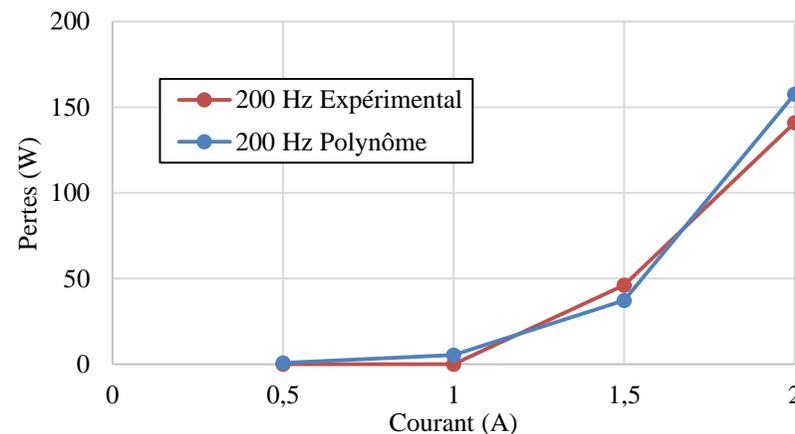
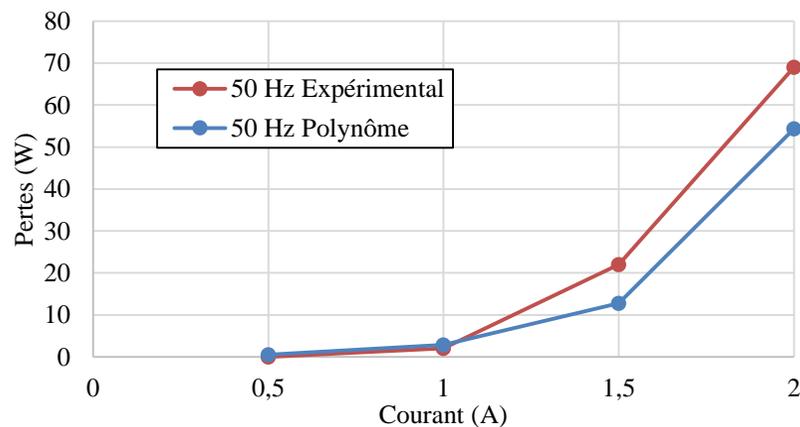
Modèle éléments finis

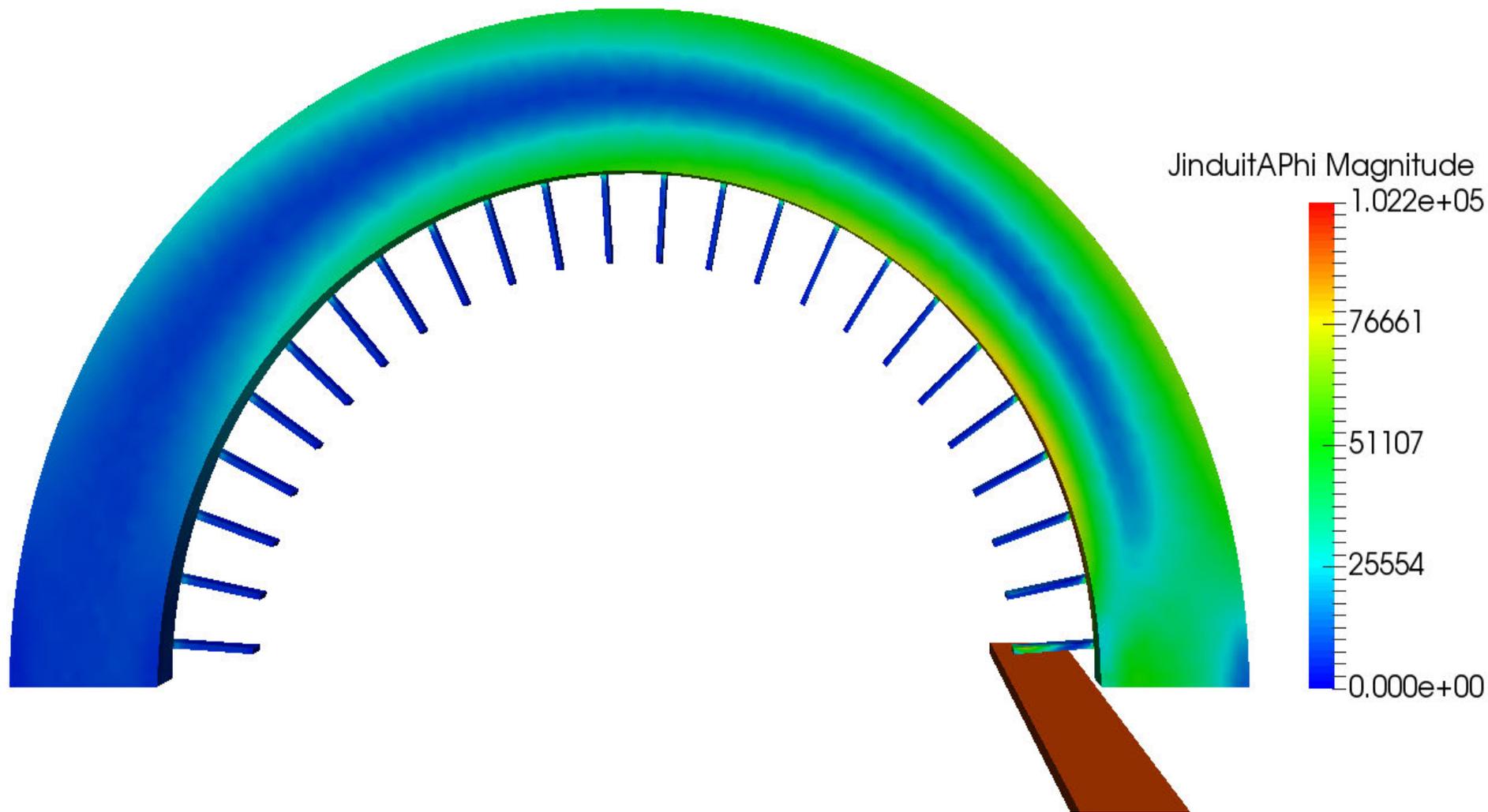


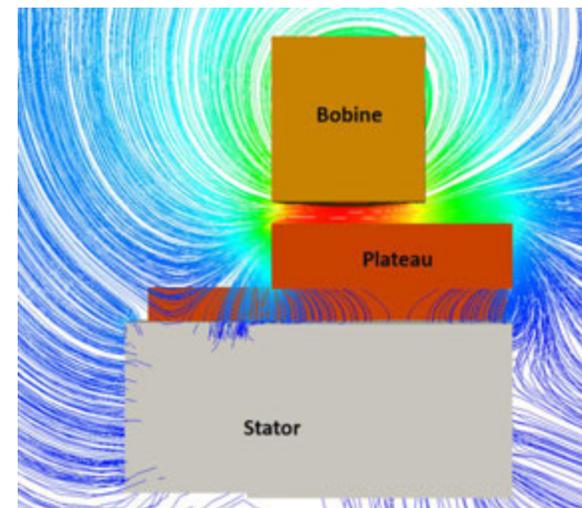
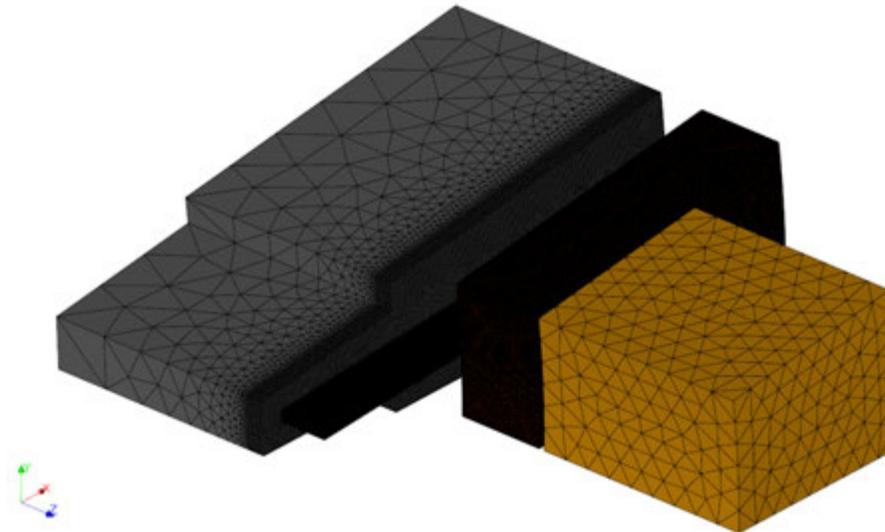
- Maillage de 1,3M d'éléments
- La structure de serrage n'est pas modélisée
- Modèle de Bertotti pour calculer les pertes fer

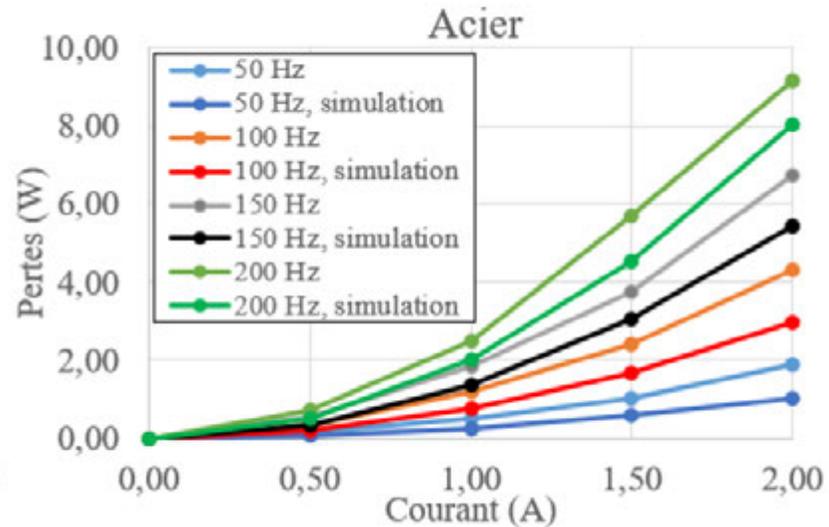
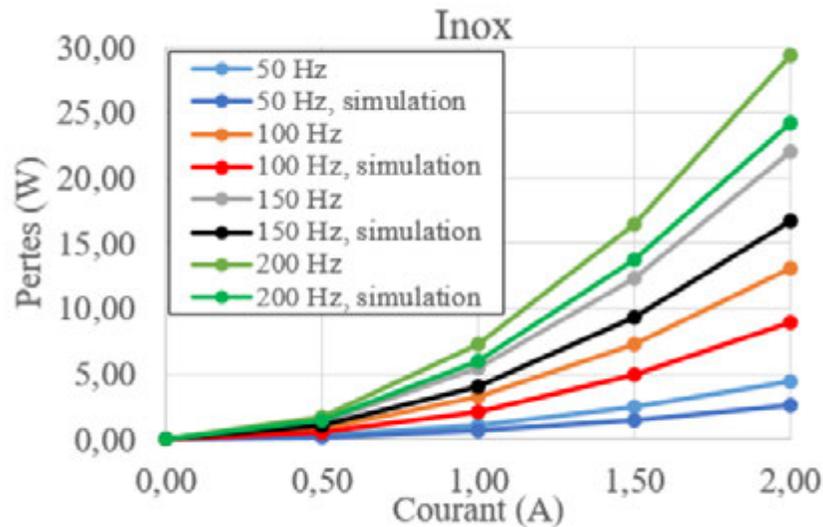
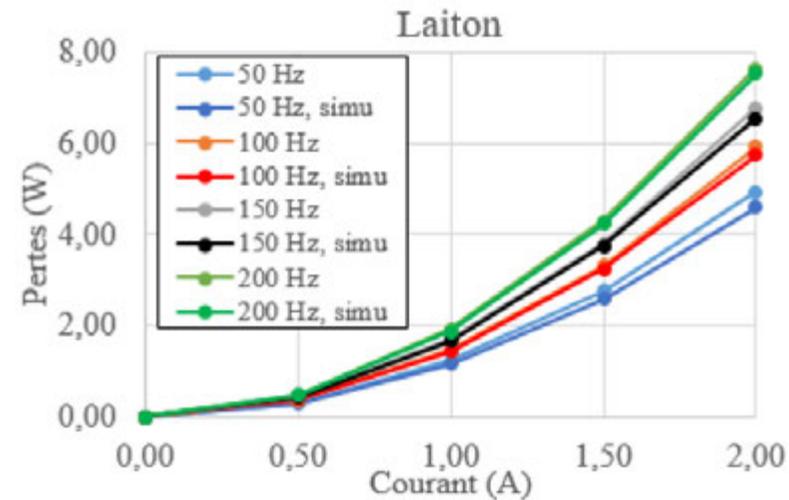
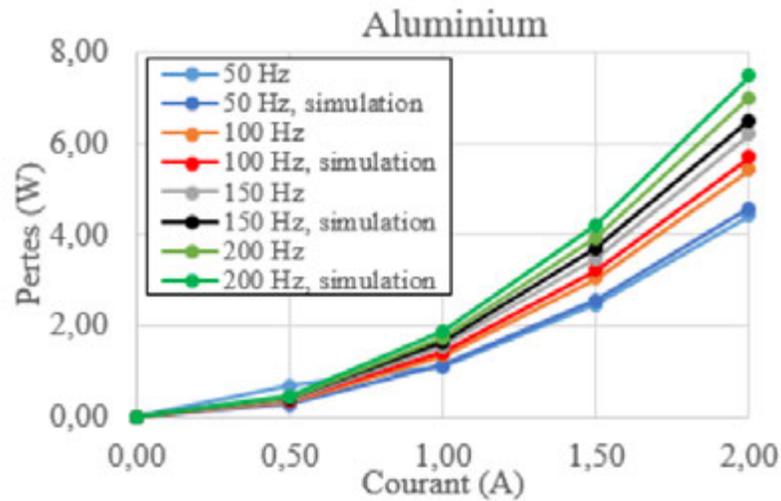
Impact de la fréquence sur la courbe B(H) → ajuster les coefficients du polynôme

Résultats









Objectifs de la sous-tâche

Modèles des matériaux ferromagnétiques

.....

Obtenir une meilleure compréhension de phénomènes magnétiques en vue de
Améliorer les modèles de matériaux magnétiques
Améliorer les modèles de pertes

Développer un banc magnéto-optique pour observer les phénomènes locaux

Développer une bibliothèque de matériau ferromagnétique

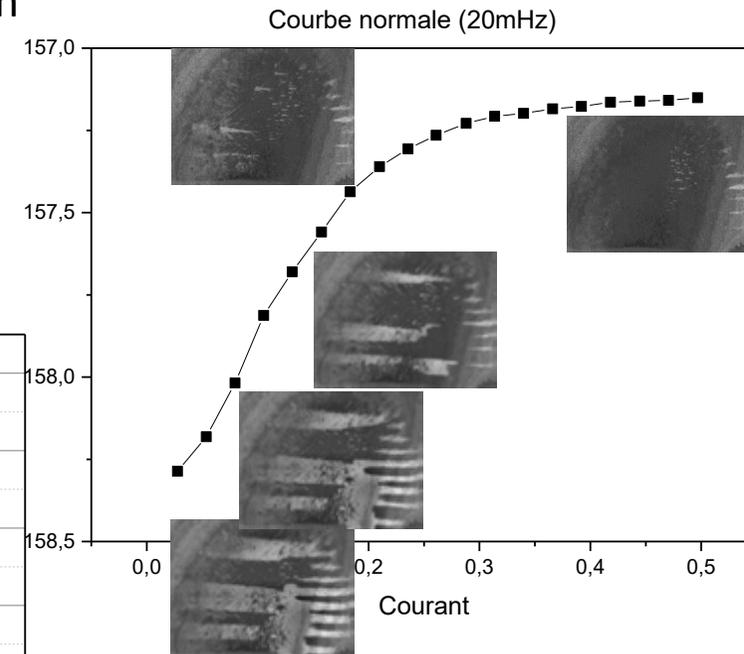
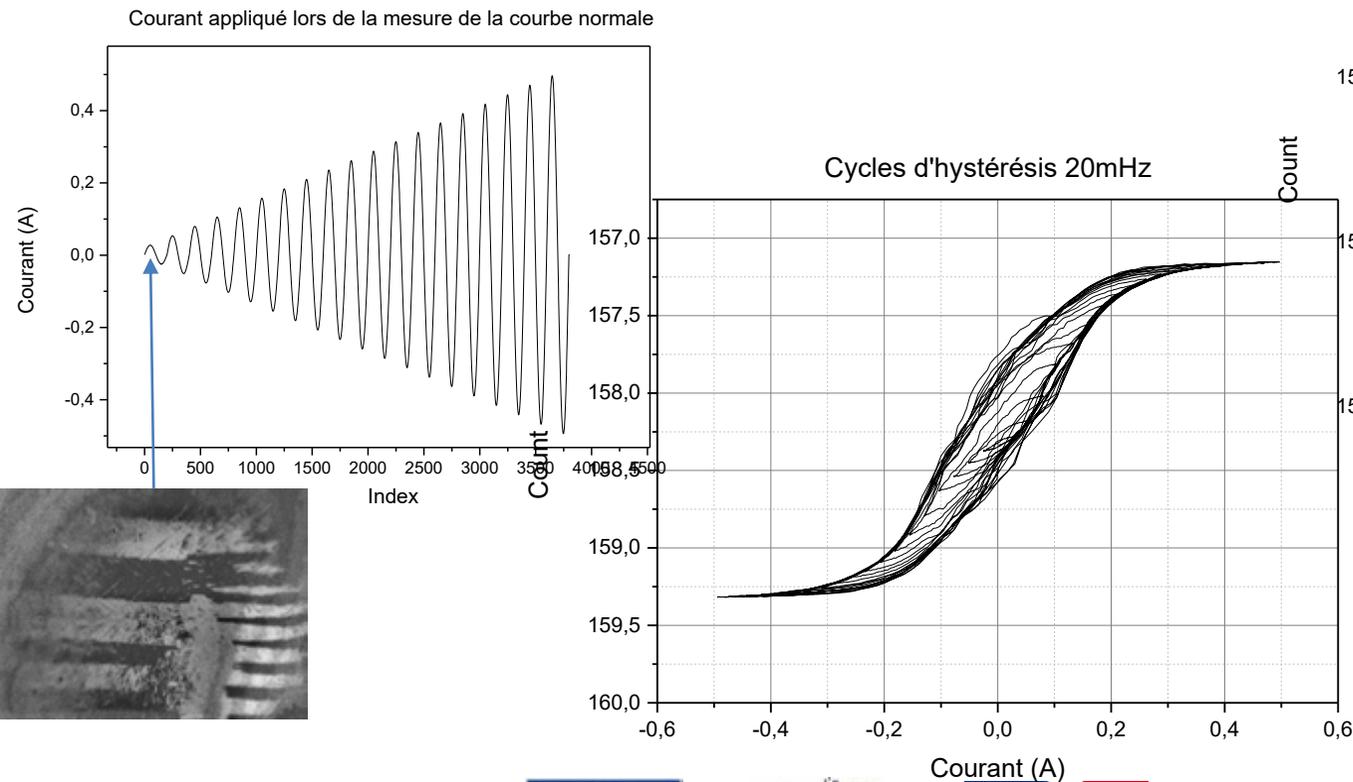
Coordinateur : Abdelkader Benabou

Travaux : Sylvain Sihab

- Observations des cycles mineurs d'une tôle GO

Procédure :

- Démagnétisation
- Excitation à 20mHz avec amplitude croissante jusqu'à saturation



- Interface locale Magneto (A. Benabou) : 7 → 30 matériaux, stockage des mesures (manuel)

Magneto

Menu Matériaux Analyse Administration

Rafraîchir RefreshAIDB

Liste des matériaux

Selection des données : Fréquence

Serie n°	μmax	Pertes 1.5T,50Hz (W/kg)	Pertes 1T,400Hz (W/kg)	Laminage	Experience	Remarques	Date
> Torque 30-15							
> Torque 27-13							
> T2B							
> Speed 30-510							
> SPC							
> Save 20-15L							
> NO30-19							
> NO20-19							
> M800-50A							
> M600-65A							
n° 18							
Magnétique							
291	Jeumont	2019-08-29					
266	3057.33	6.15688	61.7294	90deg	Epstein		
265	4408.79	6.5077	61.1094	mixte	Epstein		
265	7435.31	5.45119	55.9072	0deg	Epstein		
> Conductivité							
> M400-65A							
> M400-50A							
> M330-65A							
> M330-50A							
> M270-35AL							
> M250-35A							
> M235-35A							
> GO-EDF							
> CSA							
> CP30							
> B35A270							
> B30AV1500							
> B27AV1400							
> B27AHV1400							
> 35INP5							
> 30INP6L							
> 25INP6L							
> 20INEH1200							
> 030-160Y450							
> 027-180Y370							

	Freq (Hz)	Max Bmax(T)	Max Hmax(A/m)	Max P(W/kg)	μmax	FF	FF nominal
1	2.0	1.70002	4670.33	0.198008	4393.94	1.105565768259...	None
2	5.0	1.69995	4616.7	0.516525	4358.17	1.109327585240...	None
3	10.0	1.69984	5024.83	1.10141	4408.79	1.110796299421...	None
4	25.0	1.7	5020.29	3.175	4323.52	1.111606471920...	None
5	50.0	1.70007	11385.0	7.96221	4276.4	1.113511857512...	None
6	75.0005	1.69989	11353.1	14.1539	3850.21	1.113843479543...	None

Visualisation des données

Tableau de données : Hysteresis

	Bmax (T)	Hmax (A/m)	P (W/kg)	μr	FF
1	0.100012	64.133	0.0637886	1241.97	1.11057280325558
2	0.199983	79.0357	0.228731	2014.54	1.11066579999585
3	0.300014	89.7162	0.440748	2662.09	1.11074379747681
4	0.399965	100.124	0.689783	3179.88	1.1109910603183
5	0.500008	110.486	0.979454	3602.29	1.11098695707536
6	0.599994	121.985	1.31204	3915.09	1.11116553997727
7	0.700002	134.938	1.68379	4129.15	1.11111096076115
8	0.799935	148.891	2.08582	4276.4	1.11135356362287
9	0.899943	171.161	2.50644	4185.09	1.11142108968994
10	0.999928	200.293	2.95495	3973.76	1.1115327002333
11	1.1	235.198	3.43894	3722.76	1.11163626269113
12	1.19993	281.92	3.96893	3388.04	1.11189745171051
13	1.29997	503.801	4.87372	2054.36	1.11562185890499
14	1.40015	984.878	5.67195	1132.31	1.11304913029153
15	1.50006	2464.24	6.5077	485.412	1.11603107841681
16	1.59991	5776.56	7.28884	221.402	1.12158548758278
17	1.70007	11385.0	7.96221	119.83	1.12933603570554

Export de données :

Parcourir

Fichier

Export Multiple export

paraison

- Salome + CarmelStudy (LAMEL) : matériaux utilisés par code_Carmel

The screenshot displays the SALOME 9.3.0 interface with a CarmelStudy workspace. The main view shows a 3D meshed model of a circular motor component. The 'Materials properties' dialog box is open, showing the 'Iron losses' tab. The system material is 'TEAM13' (ACIER PERTESFER ET M). The dialog includes input fields for permeability, permittivity, conductivity, magnetics, iron losses, and a description. A table shows the relationship between maximum magnetic flux density (B_{max}) and iron losses for various frequencies. A graph plots iron losses (W/Kg) against B_{max} (T) for frequencies from 50.0 Hz to 400.0 Hz, showing that losses increase significantly with both flux density and frequency.

Materials properties dialog - Iron losses tab

System material cannot be modified. Copy material

Permeability | Permittivity | Conductivity | Magnets | **Iron losses** | Description

Volumic mass
 $\rho = 7650.0$ kg/m³

Iron losses coefficients
 $k_h = 0.01452$
 $k_{ec} = 7.242e-05$
 $k_{exc} = 0.0005869$
 Units: W/Kg

50 Hz

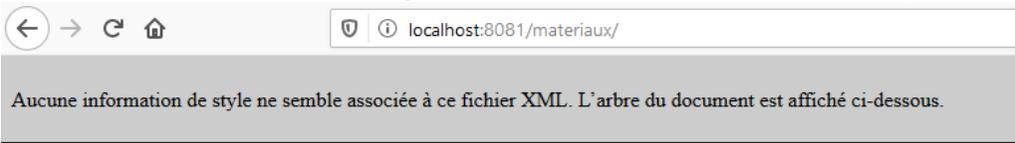
B_{max} [T]	Losses [W/Kg]
0	0
0.2	0.1
0.4	0.2
0.6	0.4
0.8	0.5
1	0.8
1.2	1.2
1.4	2.1

Graph: Losses [W/Kg] vs B_{max} [T]

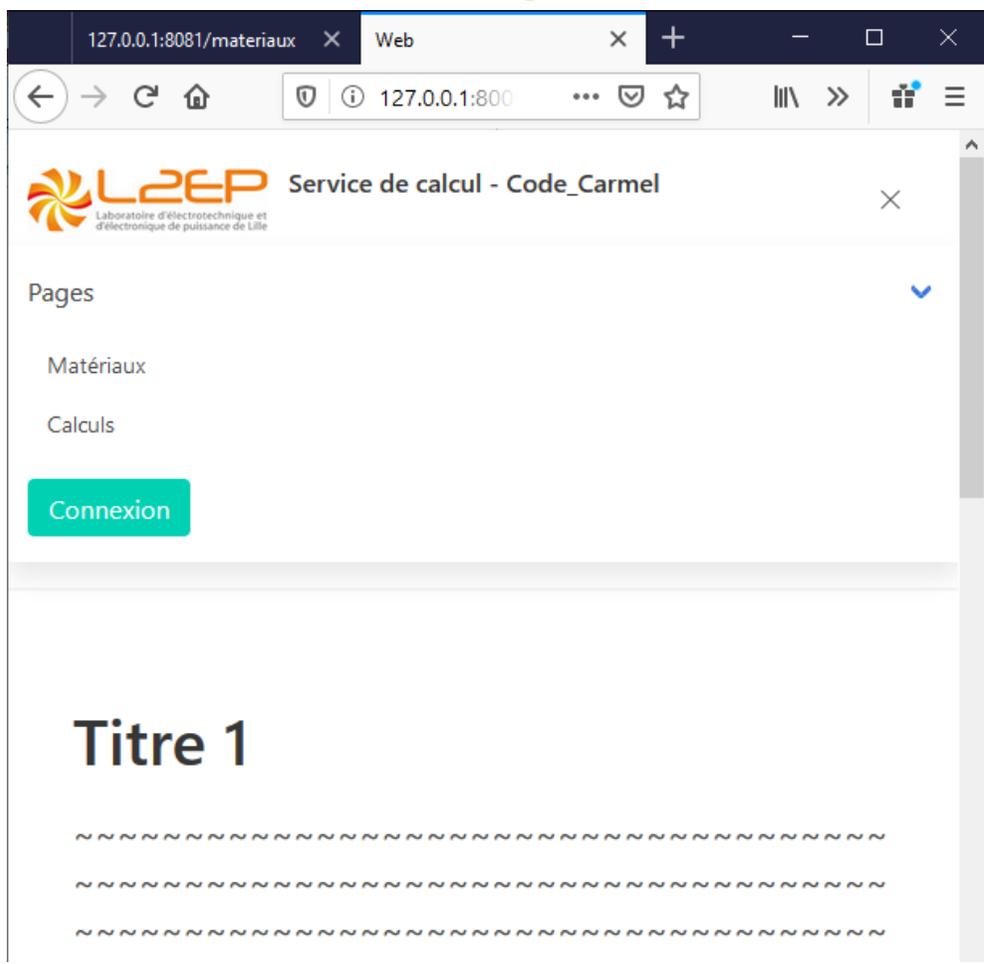
- 50.0 Hz
- 50.0 Hz, interpolation
- 100.0 Hz
- 100.0 Hz, interpolation
- 200.0 Hz
- 200.0 Hz, interpolation
- 400.0 Hz
- 400.0 Hz, interpolation

Buttons: Add material | Copy material | Delete material | Apply | Close | OK

- Services et interface web (matériaux, code_Carmel), F. Guyomarch :
 - Validation du prototype en 2019 (stage A. Hanson) : service ok, interface en cours,
 - Mise en production (serveur dédié, sécurité) courant 2020 (même stagiaire).



```
<-matériau version="1">
  <-matériau>
    <nom>B30AV1500</nom>
    <source>http://0.0.0.0:8081/materiaux/B30AV1500/source</source>
    <infos>http://0.0.0.0:8081/materiaux/B30AV1500/info</infos>
    <rapport>B30AV1500.pdf</rapport>
    <-pertes>
      <-Bertotti units="massic" bmax="1.92825">
        <kh>2.69468E-4</kh>
        <kec>2.44586E-4</kec>
        <kexc>2.13851E-4</kexc>
      </Bertotti>
    </pertes>
    <-permeabiliteNonLineaireScalaire>
      <-Marrocco freq="50.0">
        <epsilon>9.43964E-4</epsilon>
        <c>1.99995</c>
        <alpha>6.62243</alpha>
        <tau>803558.0</tau>
      </Marrocco>
    <-mesures freq="50.0" format="HBrow">
      <-H>
        21174.7, 337.661, 19147.6, 105.993, 12021.2, 22242.7, 23165.3, 3155.97, 18075.0, 67.2231, 143.173, 24
        167.899, 274.846, 16897.9, 197.897, 79.2223, 91.8579, 13062.0, 25256.0
      </H>
      <-B>
        1.91306, 1.30018, 1.89937, 0.599956, 1.81866, 1.91912, 1.92355, 1.5996, 1.89059, 0.300171, 0.800132,
        1.78364, 0.899846, 1.19988, 1.87964, 0.999982, 0.399947, 0.500055, 1.83422, 1.93192
      </B>
    </mesures>
    </permeabiliteNonLineaireScalaire>
  </matériau>
</matériau>
<nom>B35A270</nom>
```



Objectifs de la sous-tâche

Intégration de Sophemis au Mésocentre de ULille

.....

Mutualiser les moyens de calcul scientifique

Augmenter la puissance de calcul sans dégrader les fonctionnalités de Sophemis

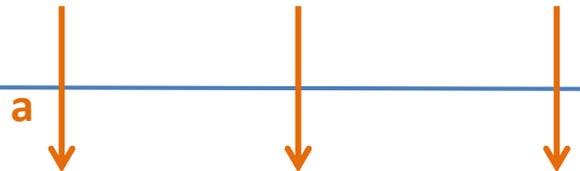
Valider le fonctionnement sur l'optimisation topologique 3D d'un électroaimant

Coordinateurs : Loïc Chevallier, Stéphane Brisset, Frédéric Guyomarch

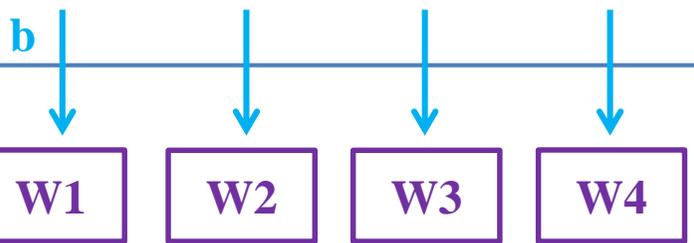
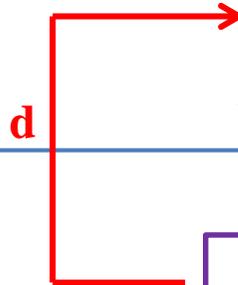
Travaux : Ahmed Aboutaj

Architecture du serveur d'optimisation Sophemis

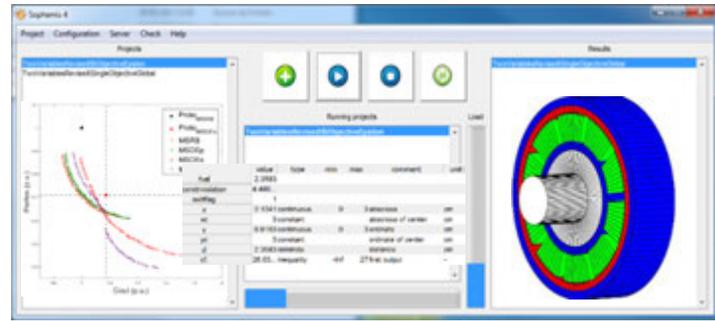
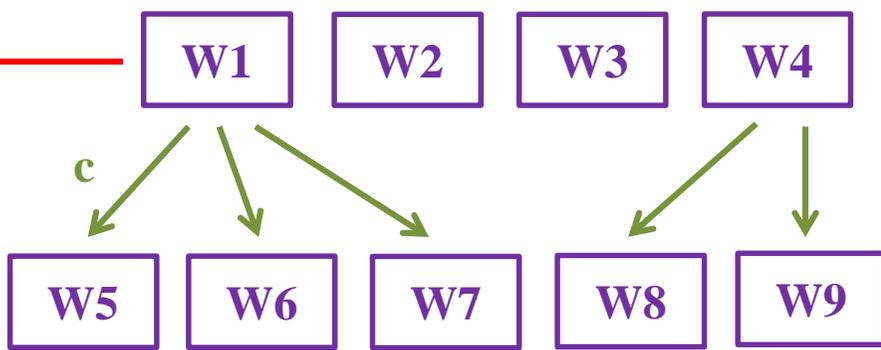
Clients



Serveur



Cluster



Difficultés :

Le Mésocentre Ulille ne permet pas :

- d'héberger un service persistant comme le serveur Sophemis
- les communications entrantes vers un nœud de calcul

Les licences ANSYS et Matlab sont liées à l'établissement Centrale Lille et ne peuvent pas être placées sur un ordinateur en dehors de nos murs.

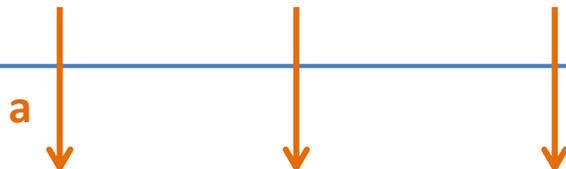
Solution retenue :

Le serveur et un mini-cluster sont hébergés à Centrale Lille (y compris ESPRIT)

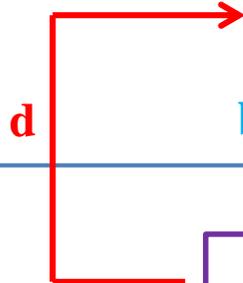
Un worker du mini-cluster gère la soumission des calculs avec la frontale du Mésocentre

Les workers du Mésocentre Ulille exécutent les simulations avec code_Carmel

Clients



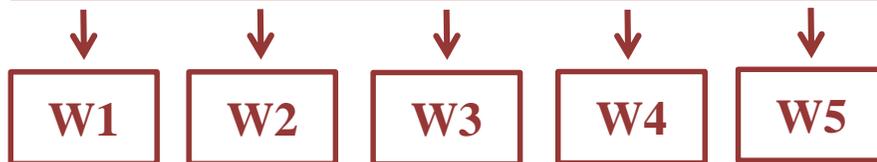
Serveur



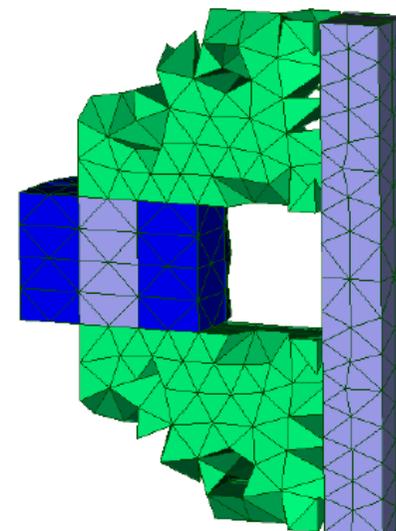
Mini-Cluster



Mésocentre
ULille



Optimisation topologique 3D d'un électroaimant



code_Carmel

Le temps d'optimisation
est réduit de 17 heures à
49 minutes en exploitant
22 workers

ELECTRIMACS 2019,

"Detection of magnetization loss in a PMSM with Hilbert Huang transform applied to non-invasive search coil voltage", ZHANG Jian, TOUNZI Abdelmounaïm, BENABOU Abdelkader, LE MENACH Yvonnick

ISEF 2019

"Quantification of iron losses for eddy current loss estimation in clamp plate"

Darques Kévin, Tounzi Abdelmounaïm, Korecki Julien, Laloy Daniel, Boughamni Walid

"Attenuation of vibro-acoustic noise in a multi-phase machine", Mohamodhosen B, Despret G, Hecquet M.

COMPUMAG 2019

"Harmonic Balance Finite Element Method Applied to Electrical Machines with rotor movement : Comparison of Two Potential Formulations", JAIEM E., GUYOMARCH F., LE MENACH Y., BEDDEK K.

"Harmonics Prediction Algorithm to Solve Nonlinear Magnetostatic Problems with the Harmonic Balance Method", JAIEM E., GUYOMARCH F., LE MENACH Y., BEDDEK K

SMM 2019

"Linking the differential permeability and loss coefficients", SHIHAB S., BENABOU A.

"Magneto-thermal characterization of forged steel used in claw pole machine", SMM 2019, Poznan, Poland, 09/2019, Jamil M., Benabou A., Clénet S., Le Bellu Arbenz L., Mipo J.-C., Shihab S.

➤ **Revue 5 revues en cours**



convertisseur
d'énergie
**Intégré
Intelligent**

24 mai 2019 – comité d'évaluation externe

Fin de la présentation

