

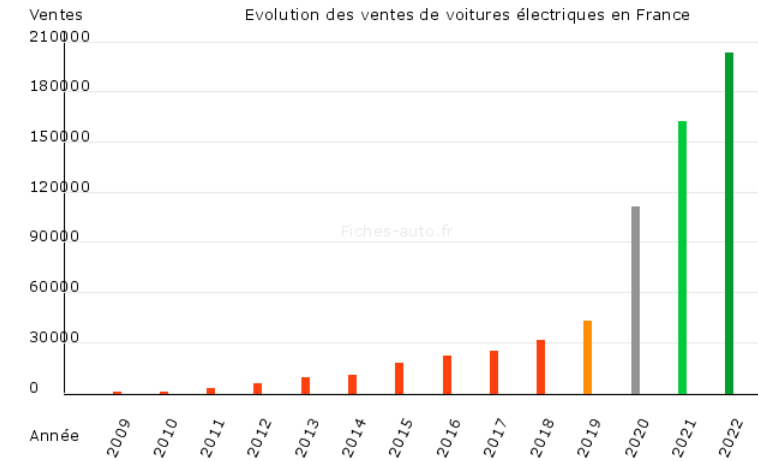
Analyse multiparamétrique du comportement magnéto-vibro-acoustique de moteurs électriques

**Liwaa Abou Chakra - Bertrand Lallemand - Franck Massa -
Thomas Henneron - Stéphane Clénet**

- ➔ **Contexte général et objectifs de l'étude**
- ➔ **Simulation numérique en électromagnétique et dynamique**
- ➔ **Réduction de modèle**
- ➔ **Analyse multiparamétrique et prise en compte de l'excentricité**
- ➔ **Conclusion et positionnement des travaux par rapport au GDR**

- **Conception et dimensionnement de machines électriques**
 - Regain d'intérêt pour les moteurs électriques (développement de voitures 100 % électriques ou hybrides)
 - Amélioration constante de l'efficacité énergétique, de la compacité, de la masse

- **Validation de normes environnementales de plus en plus sévères**
 - Réduction des nuisances sonores et amélioration du confort de l'utilisateur
 - Meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'origine de niveaux vibro-acoustiques

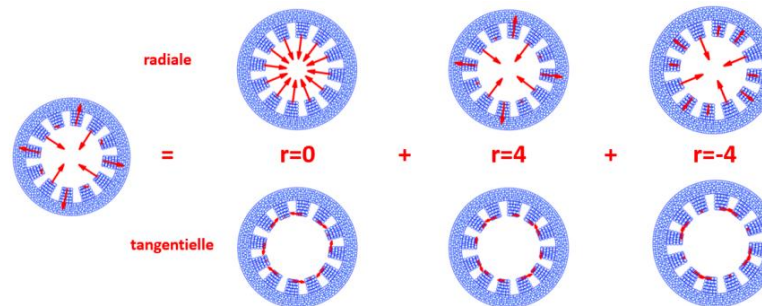
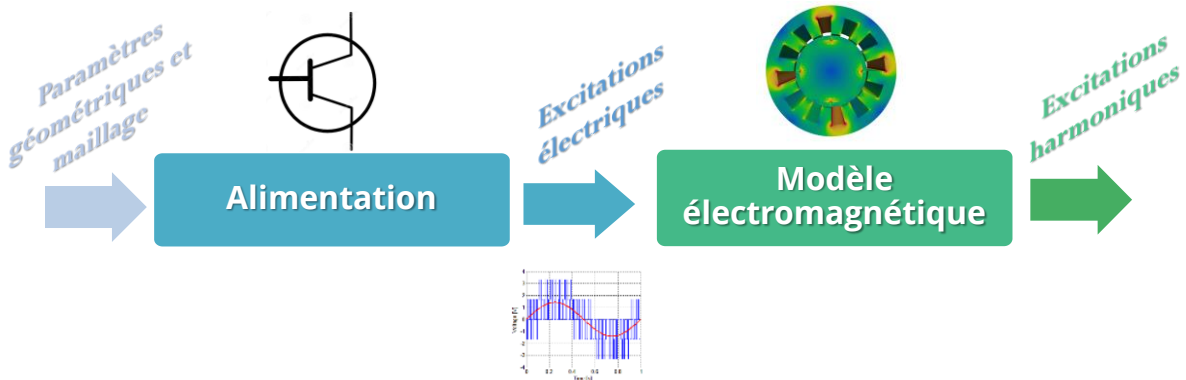


[1] source : <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/chiffres-de-l-auto/s-1941-evolution-du-nombre-de-voitures-electriques-vendues-en-france.php>

- **Nécessité de prendre en compte les incertitudes**
 - Perturbation du fonctionnement nominal de la machine électrique
 - Variabilités dimensionnelles
 - Variabilités matérielles
 - Variabilités sur les conditions d'assemblage (excentricités statiques ou dynamiques, efforts d'assemblage...)
 - Différences de polarisation des pôles
 - Alimentation électrique et la commande
 - Influence sur la répartition spatiale et temporelle des forces électromagnétiques
 - Apparition de nouvelles sources de vibrations et de bruit
- **Choix du couplage entre les disciplines et hypothèses de résolution**

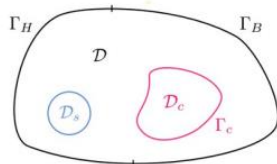
- Contexte général et objectifs de l'étude
- **Simulation numérique en électromagnétique et dynamique**
- Réduction de modèle
- Analyse multiparamétrique et prise en compte de l'excentricité
- Conclusion et positionnement des travaux par rapport au GDR

- Discrétisation du problème par éléments finis
 - Modélisation 2D extrudé ou 3D (avec fonction des défauts pris en compte)



Equations du problème :

$$\begin{cases} \text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_s & \text{avec } \mathbf{H} \times \mathbf{n}|_{\Gamma_H} = 0 \\ \text{div} \mathbf{B} = 0 & \text{avec } \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_B} = 0 \\ \mathbf{H} = \nu_B \mathbf{B} \end{cases}$$



Calcul des forces magnétiques :

$$\mathbf{F}_s = - \frac{\partial}{\partial s} \int_D \left[\int_0^B \mathbf{H} dB \right]_{B=cte} dv$$

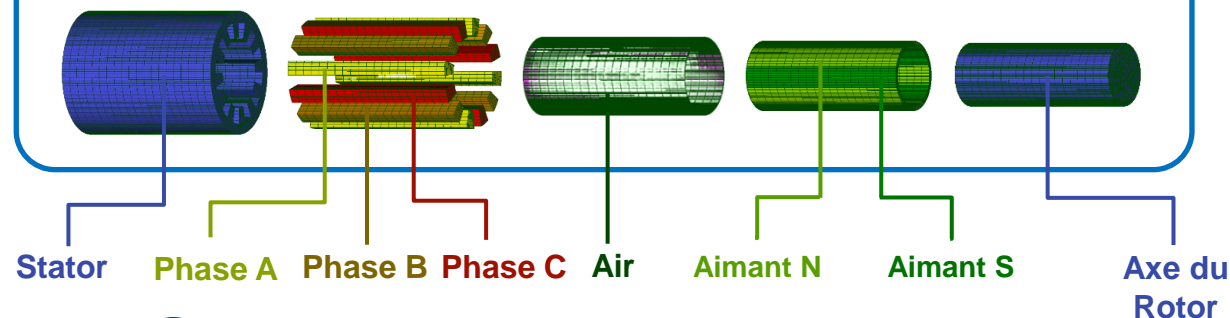
Equations discrètes du problème :

$$\mathbf{M}_{A_\theta} \mathbf{A}_\theta = \mathbf{g}_\theta$$

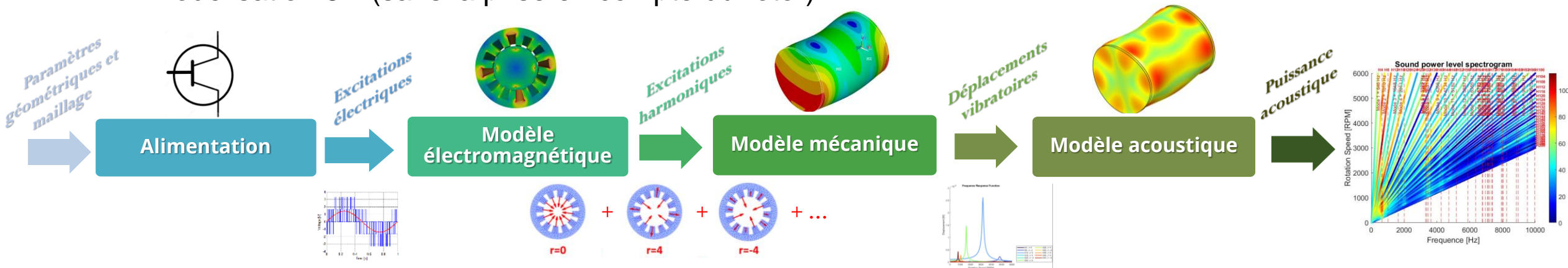
avec

$$\mathbf{M}_{A_\theta} = \int_D \nu_B \text{rot} \phi_i \cdot \text{rot} \phi_j d\mathcal{D} \quad \text{et} \quad \mathbf{g}_\theta = \int_D (\mathbf{J}_s \cdot \phi_i) d\mathcal{D}$$

Vue éclatée du modèle électromagnétique



- Discrétisation du problème par éléments finis
 - Modélisation 3D (sans la prise en compte du rotor)



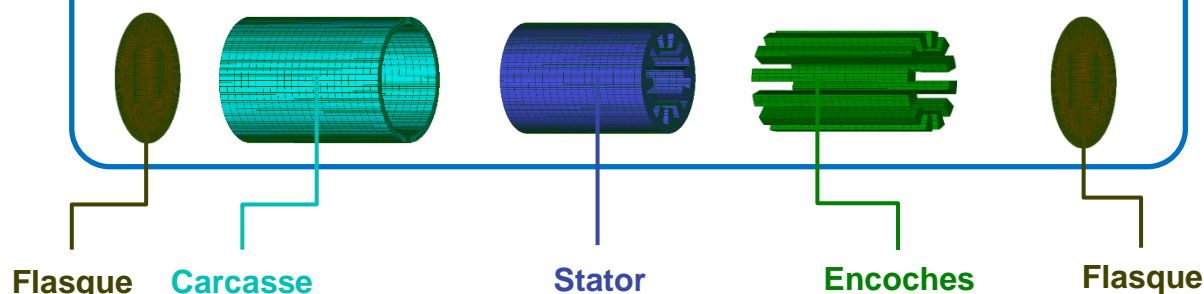
Equation du problème :

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} - \text{div}(\sigma) = f$$

Equations discrètes du problème mécanique :

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}}(t) + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{f}}(t)$$

Vue éclatée du modèle vibro-acoustique

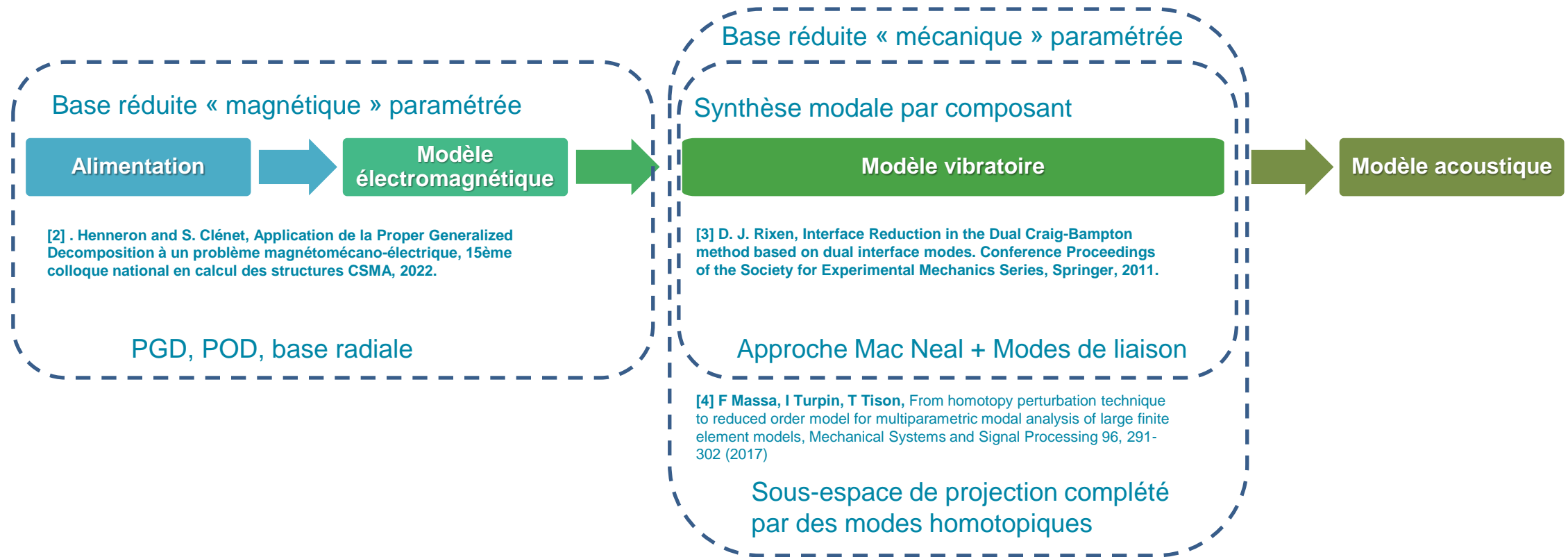


Equations discrètes du problème acoustique :

$$W(f) = \rho_0 c_0 S \sigma_a(f) |\mathbf{v}_n|^2 / 2 \quad \text{et} \quad L_w(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{W(f)}{W_0} \right)$$

- ➔ Contexte général et objectifs de l'étude
- ➔ Simulation numérique en électromagnétique et dynamique
- ➔ **Réduction de modèle**
- ➔ Analyse multiparamétrique et prise en compte de l'excentricité
- ➔ Conclusion et positionnement des travaux par rapport au GDR

- Définition de plusieurs niveaux de réduction de modèles
 - Maîtrise des temps de calcul en tout en conservant un degré de précision élevé
 - Synthèse modale par composant
 - Base réduite « mécanique » paramétrée
 - Base réduite « magnétique » paramétrée



■ Premier niveau de condensation

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{M}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\boldsymbol{\lambda}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{K}} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{f}} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \text{diag}(\bar{\mathbf{M}}^{(1)}, \dots, \bar{\mathbf{M}}^{(n)}) \quad ; \quad \bar{\mathbf{C}} = \text{diag}(\bar{\mathbf{C}}^{(1)}, \dots, \bar{\mathbf{C}}^{(n)}) \quad ; \quad \bar{\mathbf{K}} = \text{diag}(\bar{\mathbf{K}}^{(1)}, \dots, \bar{\mathbf{K}}^{(n)}) \quad ;$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{u}^{(n)} \end{pmatrix} \quad ; \quad \bar{\mathbf{f}} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{f}}^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{f}}^{(n)} \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}^{(n)} \end{pmatrix}^T$$

Les coordonnées physiques sont ensuite exprimées en fonction des coordonnées modales et des efforts de liaisons $\boldsymbol{\lambda}$ en utilisant la matrice \mathbf{T}_{DCB}

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi & -\mathbf{G}_r \mathbf{B}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{DCB} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix}$$

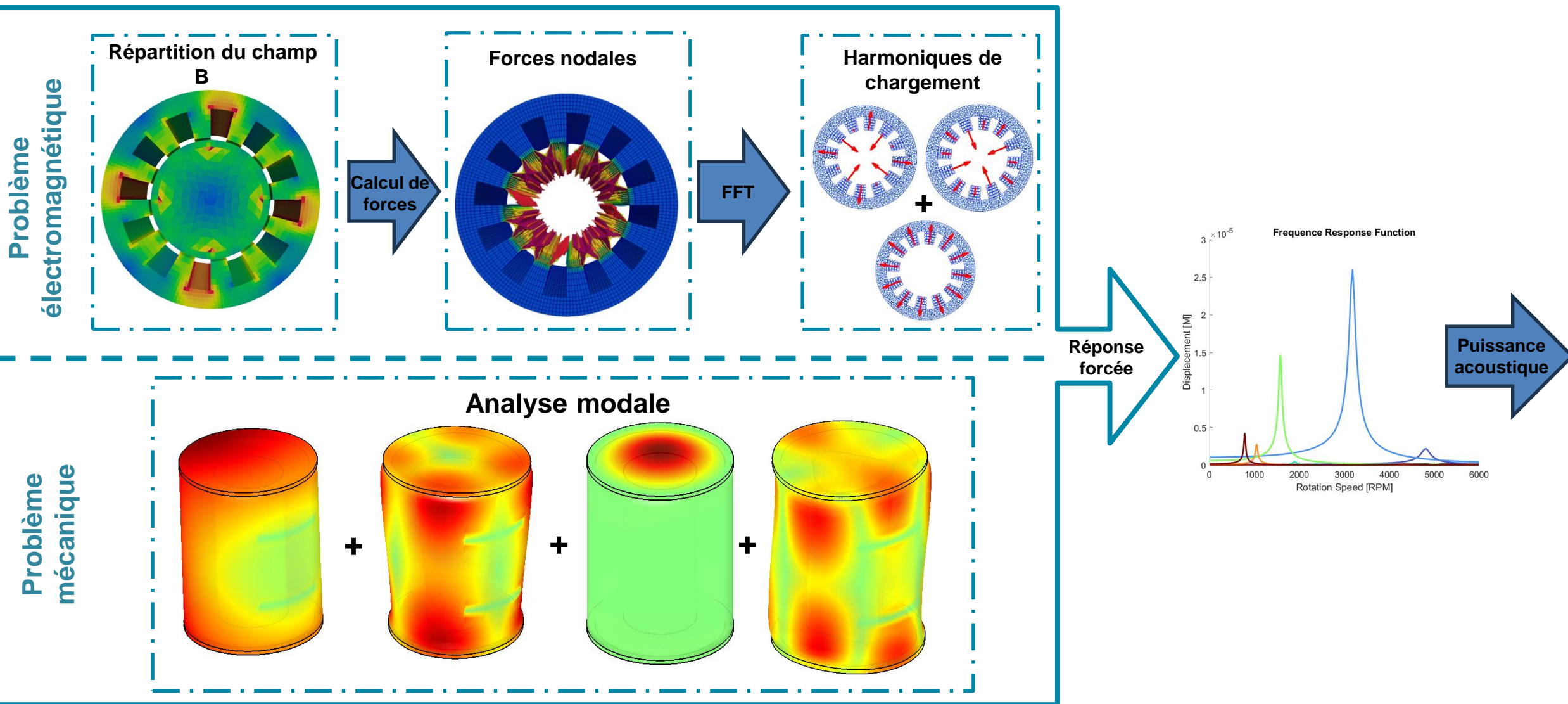
■ Second niveau de condensation

Réduire le nombre d'inconnues de liaisons $\boldsymbol{\lambda}$

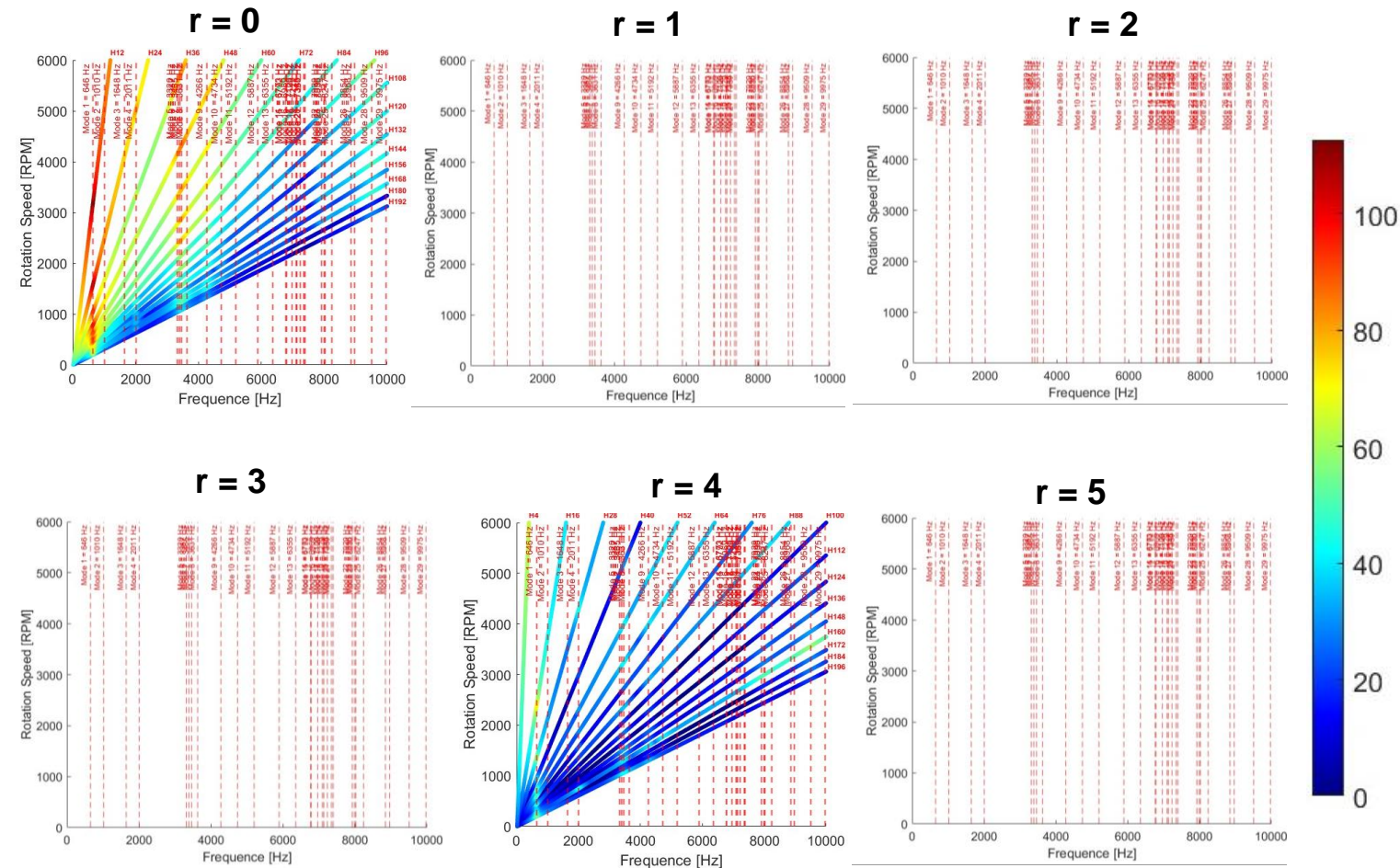
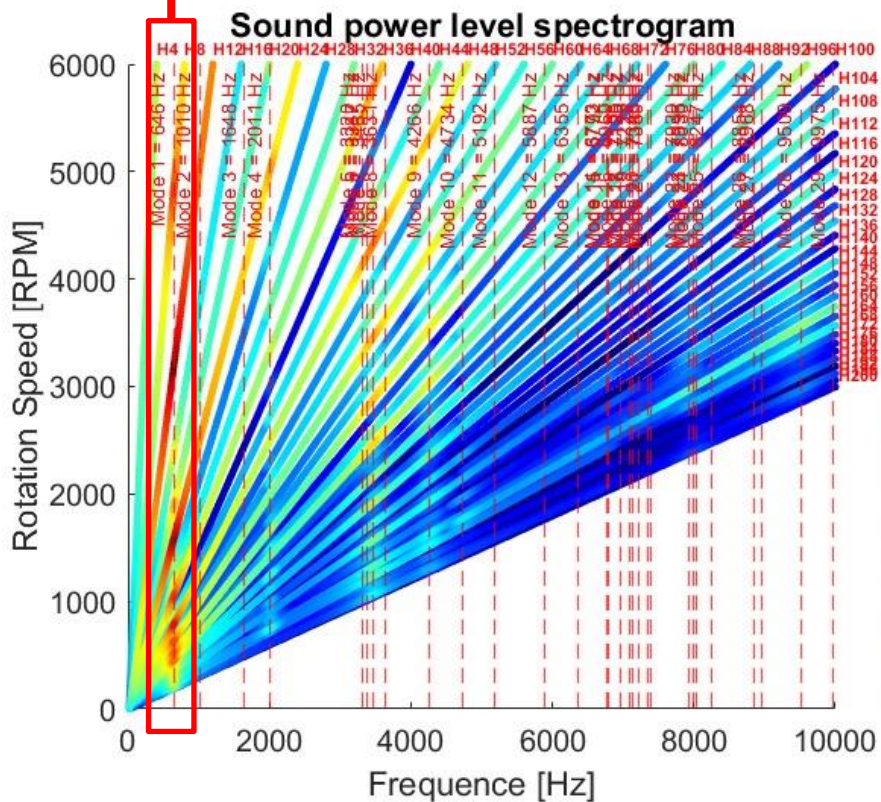
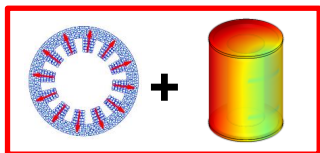
$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_{DCB} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\lambda}' \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{DCB} \mathbf{T}_D \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\lambda}' \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{DCB} \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} \\ \boldsymbol{\lambda}' \end{pmatrix}$$

- ➔ Contexte général et objectifs de l'étude
- ➔ Simulation numérique en électromagnétique et dynamique
- ➔ Réduction de modèle
- ➔ **Analyse multiparamétrique et prise en compte de l'excentricité**
- ➔ Conclusion et positionnement des travaux par rapport au GDR

■ Synthèse de vibrations électromagnétiques

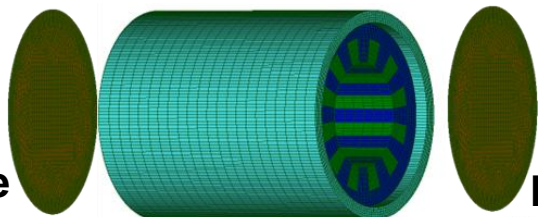
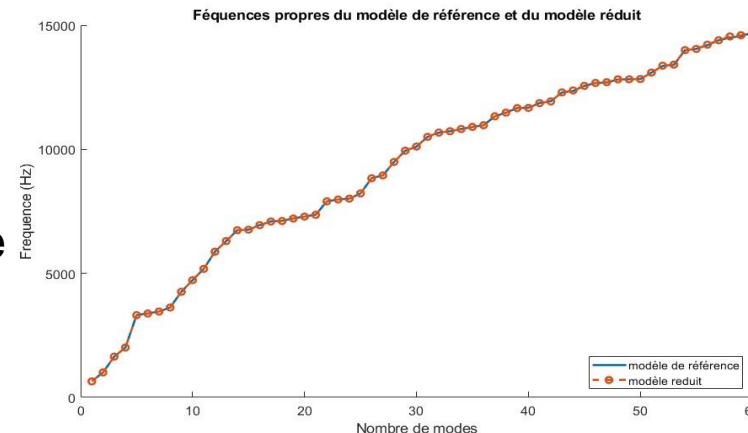


■ Spectrogramme et spatiogrammes du niveau de puissance sonore



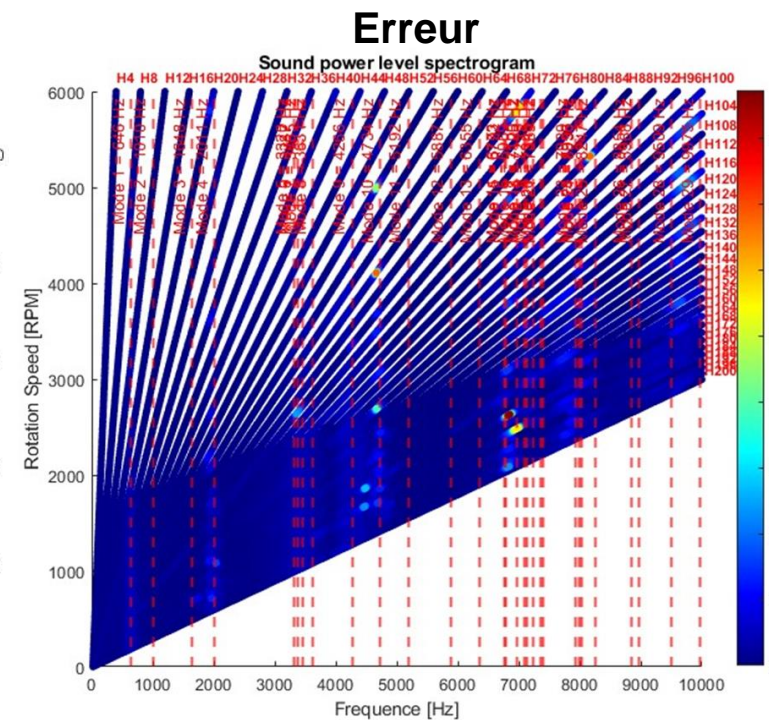
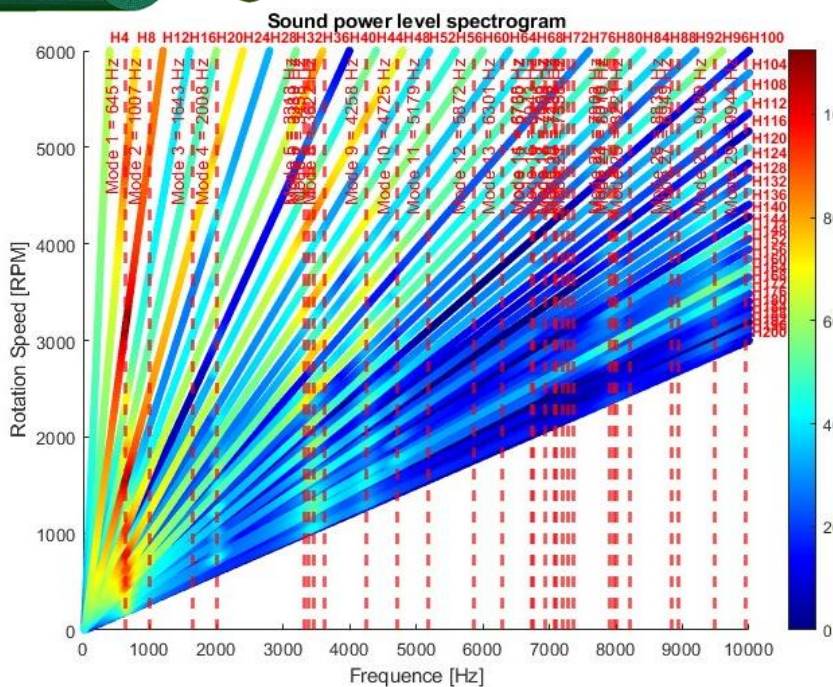
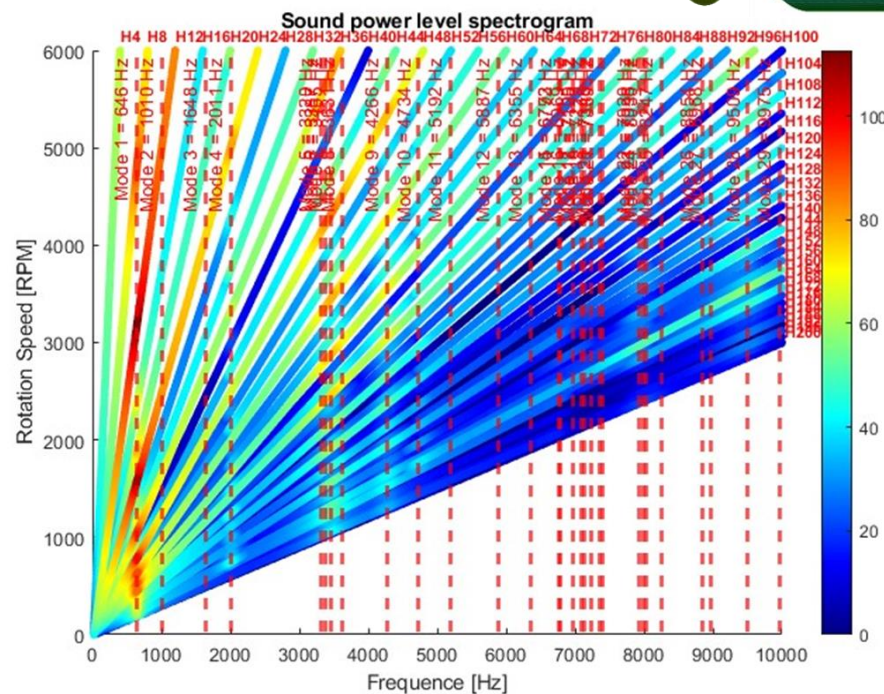
Validation de la synthèse modale et calcul du spectrogramme

- 8.33% (384/4608) des ddl d'interfaces sont retenus
- Erreur <0.5% est observée pour l'ensemble du spectre fréquentiel
- Temps de calcul du modèle réduit égal à 1/20 du modèle de référence



Modèle de référence

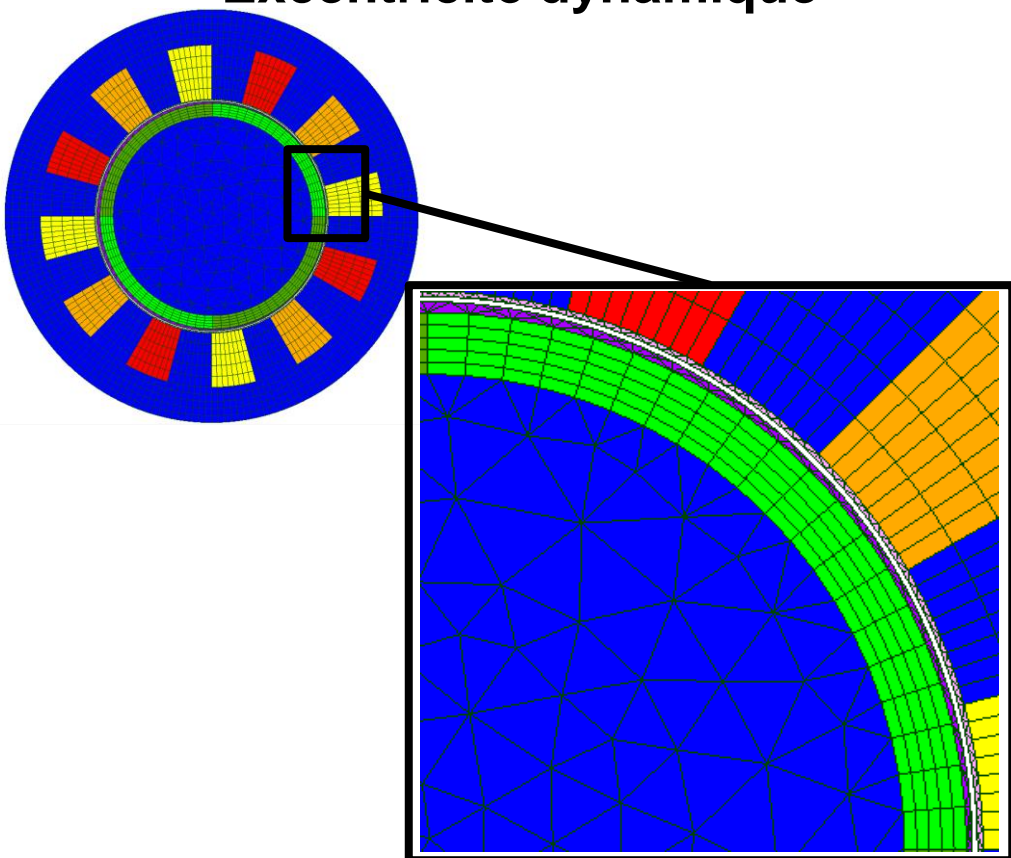
Modèle réduit



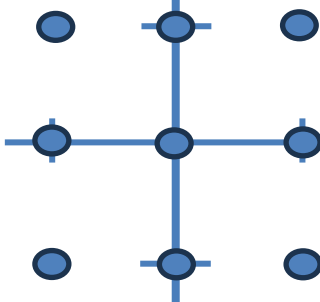
Erreur

- Prise en compte de l'excentricité statique et dynamique
 - Excentricité dynamique: Déplacement du rotor de 25% de l'épaisseur de l'entrefer la machine
 - Excentricité statique: Déplacement du stator de 25% de l'épaisseur de l'entrefer la machine

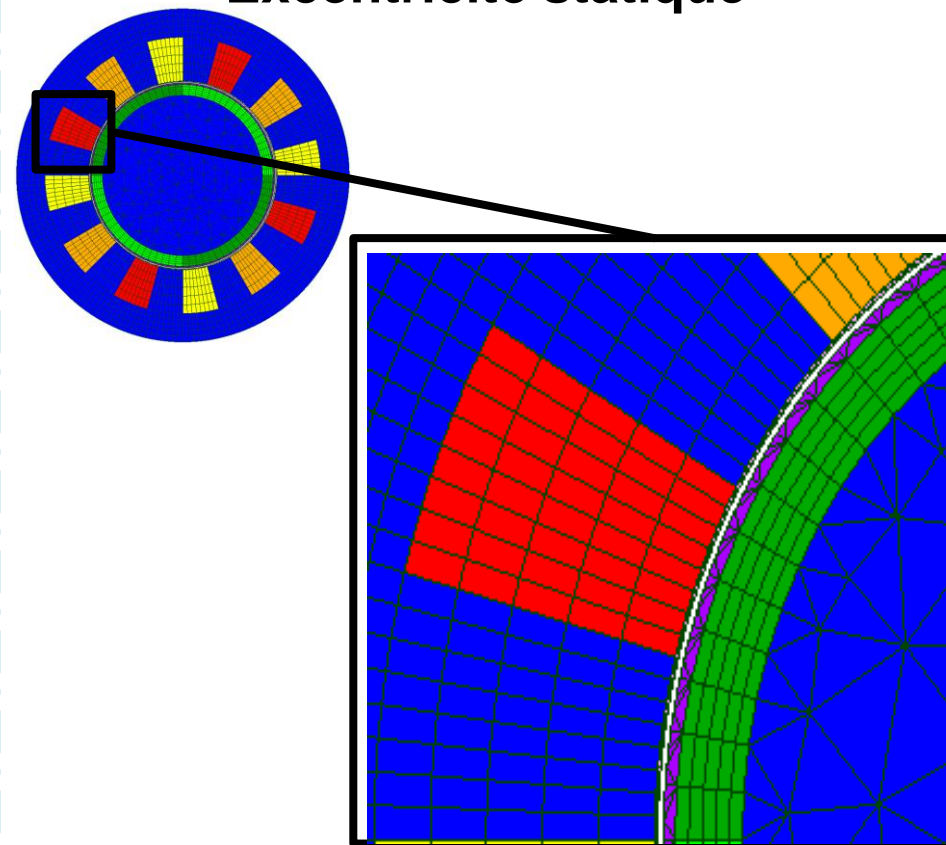
Excentricité dynamique



Excentricité
dynamique

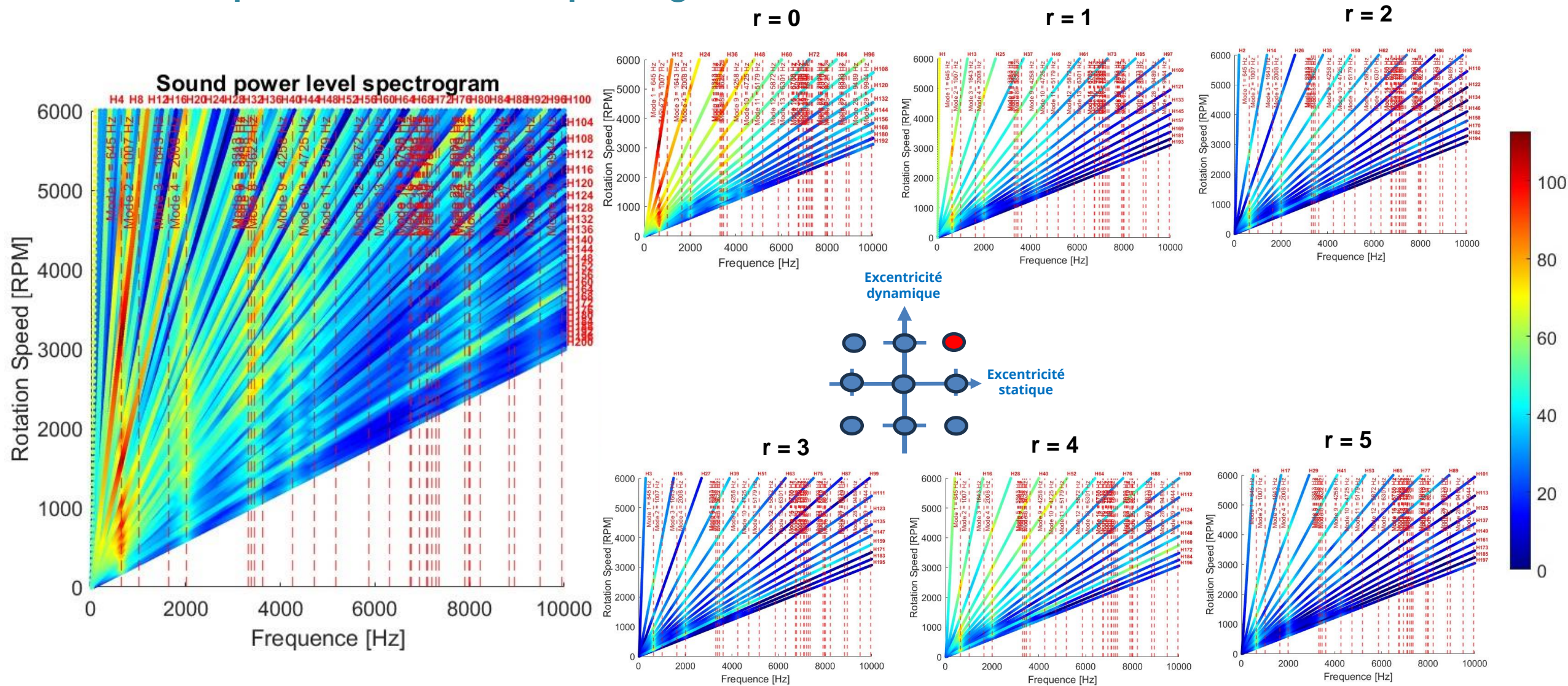


Excentricité statique



- Encoche A-
- Encoche A+
- Stator_extruded
- Axe du rotor
- Encoche B-
- Aimant N
- Aimant S
- Encoche C+
- Air stator
- Encoche C-
- Encoche B+
- Air rotor

Effet de perturbations sur le spectrogramme



- **Développement de modèles numériques réduits paramétrés pour la simulation des comportements magnéto-vibro-acoustique**
 - Validation de la stratégie de synthèse modale
 - Optimisation des bases de projection
 - Intégration des différentes réductions de modèles
- **Analyse multiparamétrique avec la prise en compte d'incertitudes**
 - Défauts d'excentricité statique et dynamique
 - Pôles mal positionnés
 - Aimantation déséquilibrée
 - Amplitude du courant déséquilibrée
- **Prise en compte de défauts géométriques altérant les deux disciplines**
 - Modification de la géométrie des dents du stator
 - Intégration du rotor et des paliers en analyse dynamique
 - Utilisation simultanée des réductions de modèles

- **Etude du couplage entre les deux physiques**
 - Prise en compte des non-linéarités des liaisons
 - Résolution itérative multi-physique
 - Analyse dynamique non-linéaire

Merci pour votre attention

Liwaa ABOU CHAKRA
Email : liwaa.abouchakra@uphf.fr