



convertisseur  
d'énergie  
**Intégré  
Intelligent**

# Prototypage virtuel et optimisation

Y. Le Menach (L2EP, Univ Lille)

F. Gillon (L2EP, EC Lille)

R. Romary (LSEE, Univ Artois)

Les rencontres  
de la Recherche  
& de l'Innovation



Événement animé par



Initié et  
financé par

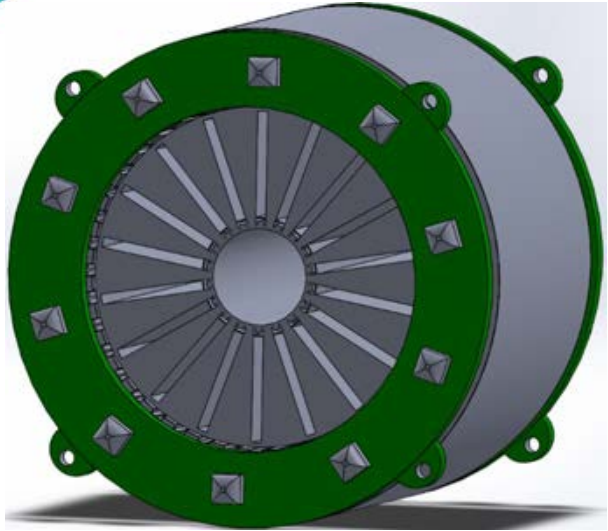
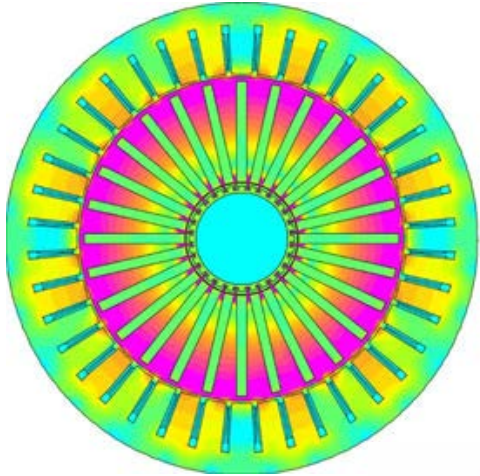
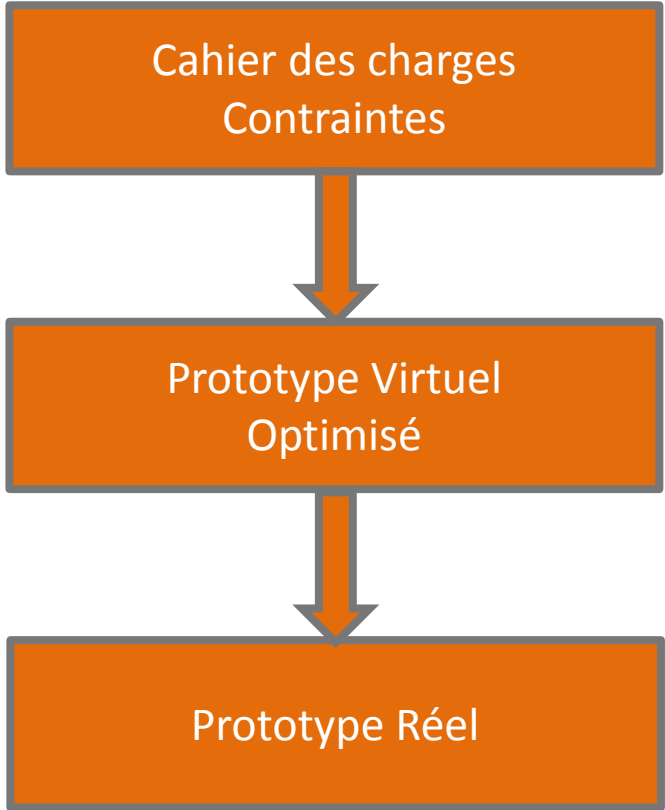


Cofinancé par



Le projet est cofinancé par l'Union européenne  
avec le Fonds européen de développement régional





# Démarche de conception d'un prototype De Convertisseur Intégré



## Cahier des charges (démonstrateur projet CE2I)

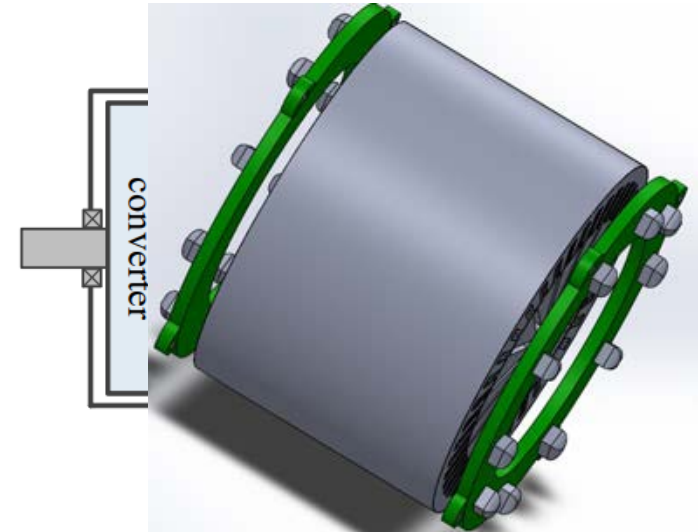
### ▪ Machine 1

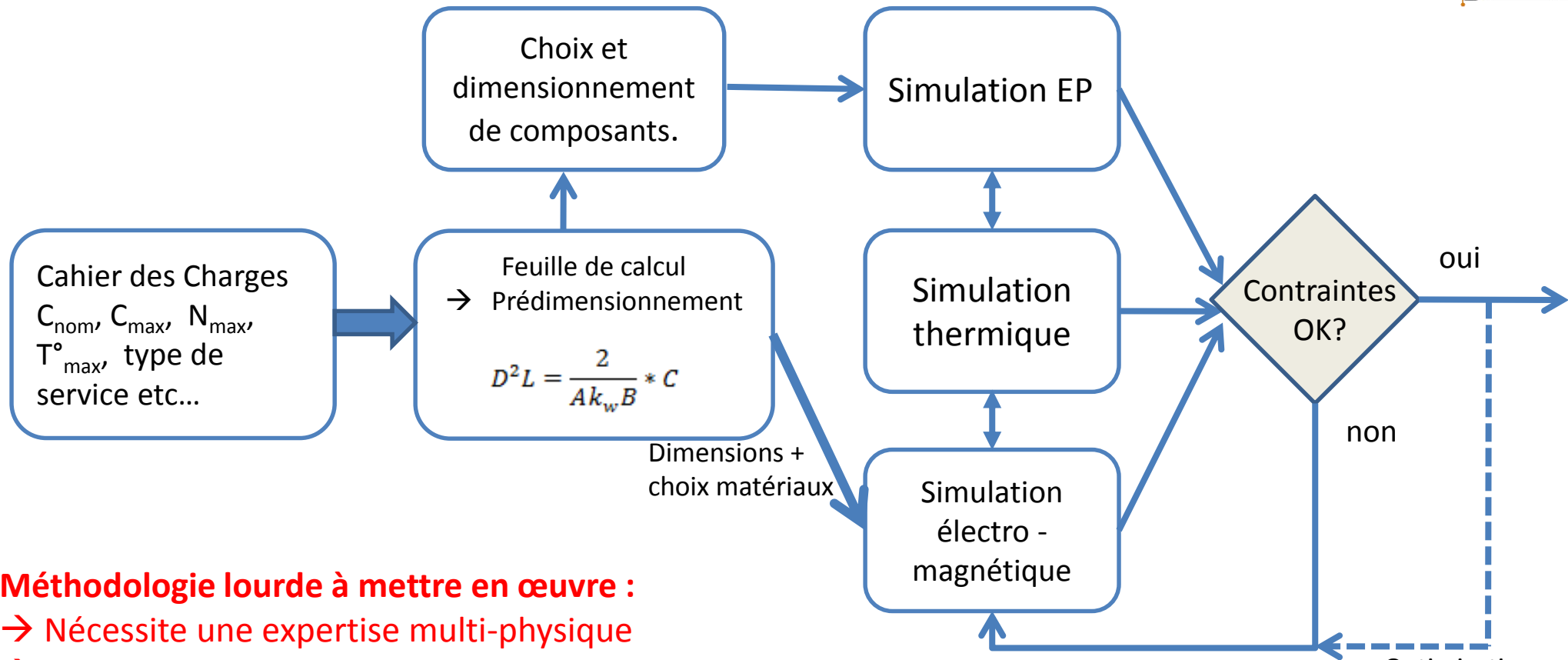
- ✓ Machine 45kW max, 4500trs/min,
- ✓ 2\*5 phases,
- ✓ Bobinage concentrique, aimants intérieurs,
- ✓ Tension bus DC :300V.
- ✓ 2 demi convertisseurs de chaque coté.

### ▪ Machine 2

- ✓ Caractéristiques identiques à la précédente
- ✓ Mais fonctionnant à haute T° (diminution des masses)

→ Structure à définir.





Dimensions +  
choix matériaux

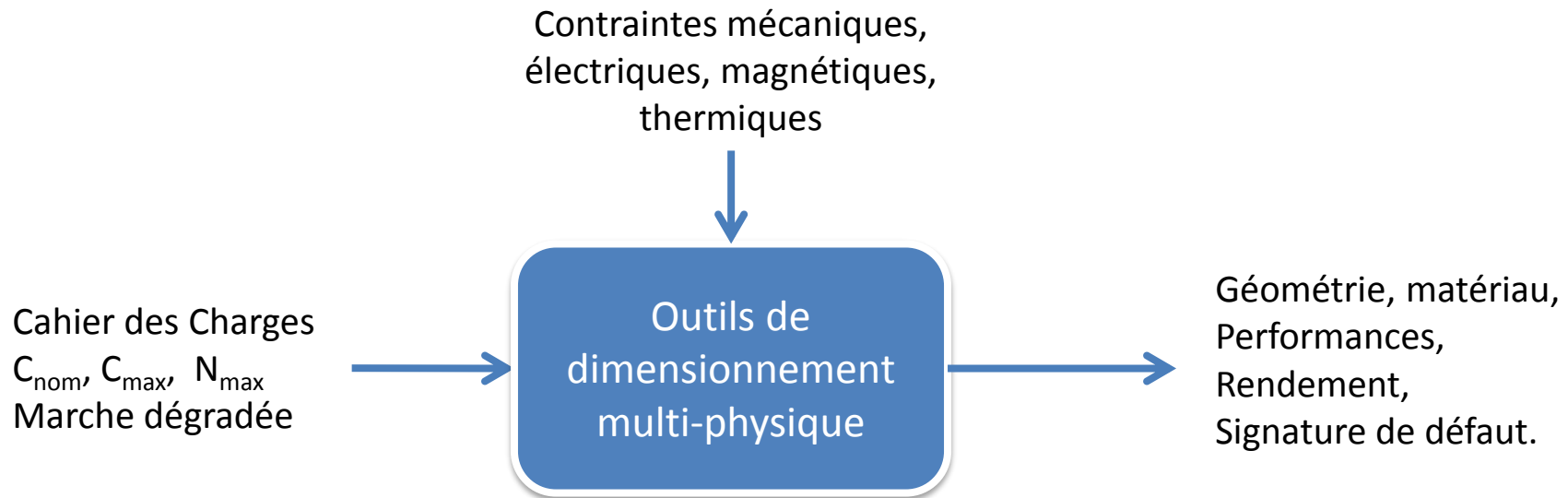
Redimensionnement

Et/Ou:

- modification du matériau (magnétique, isolant),
- modification du refroidissement
- changer le type de composant

Optimisation  
paramétrique  
et topologique

**Méthodologie lourde à mettre en œuvre :**  
→ Nécessite une expertise multi-physique  
→ Nécessite des outils numériques importants  
→ Limite le développement des systèmes intégrés.



## Outils de dimensionnement multi-physique obtenu par:

- Des modèles réduits électrique, magnétique, thermique, mais couplés
- La définition de règles de conception par:
  - ✓ La capitalisation de l'expertise des équipes impliquées dans CE2I
  - ✓ Les retours d'expérience des prototypes réalisés

## ☐ Scientifiques et techniques

### ➤ Multi-physique

- Electromagnétisme
- Thermique (Echauffement)
- Aéraulique (Refroidissement)
- Mécanique (Vibrations,...)

### ➤ Multi-echelle

- 0D  $\Rightarrow$  3D
- $\mu\text{m} \Rightarrow \text{m}$

### ➤ Incertitudes sur les paramètres

- Dimensions
- Matériaux

### ➤ Qualité des résultats

### ➤ Temps de calcul

## ☐ Scientifiques et techniques

### ➤ Multi-physique

- Electromagnétisme
- Thermique (Echauffement)
- Aéraulique (Refroidissement)
- Mécanique (Vibrations,...)

- ✓ Couplage entre code
- ✓ Projection de grandeurs

### ➤ Multi-dimension

- 0D  $\Rightarrow$  3D
- $\mu\text{m} \Rightarrow \text{m}$

- ✓ Réduction de modèle
- ✓ Homogénéisation

### ➤ Incertitudes sur les paramètres

- Dimensions
- Matériaux

- ✓ Approches probabilistes
- ✓ Caractérisation de matériaux

### ➤ Qualité des résultats

- ✓ Estimateurs d'erreur

### ➤ Temps de calcul

- ✓ Approche spectrale
- ✓ Parallélisme



## ☐ Scientifiques et techniques

### ➤ Multi-physique

- Electromagnétisme
- Thermique (Echauffement)
- Aéraulique (Refroidissement)
- Mécanique (Vibrations,...)

- ✓ Couplage entre code
- ✓ Projection de grandeurs

### ➤ Multi-dimension

- 0D  $\Rightarrow$  3D
- $\mu\text{m} \Rightarrow \text{m}$

- ✓ Réduction de modèle
- ✓ Homogénéisation

### ➤ Incertitudes sur les paramètres

- Dimensions
- Matériaux

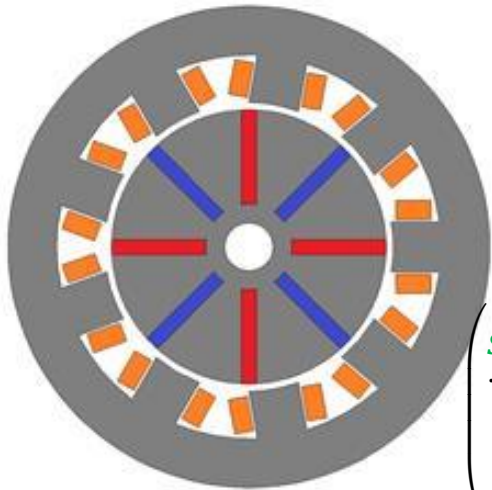
- ✓ Approches probabilistes
- ✓ Caractérisation de matériaux

### ➤ Qualité des résultats

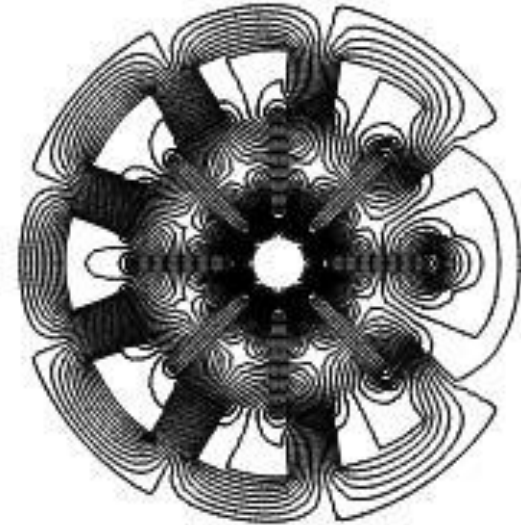
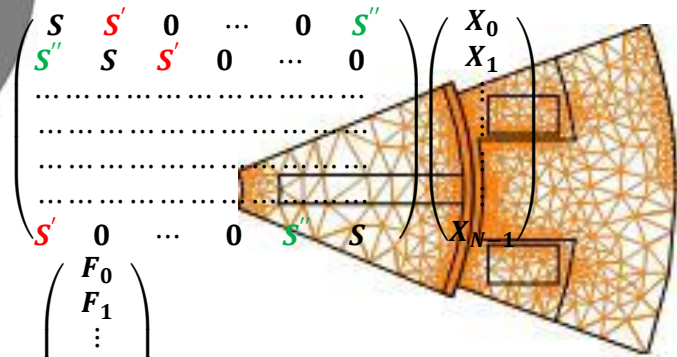
- ✓ Estimateurs d'erreur

### ➤ Temps de calcul

- ✓ Approche spectrale
- ✓ Parallélisme



$$[S_c] = [W][S_\Delta][W]^{-1}$$



$$\begin{pmatrix} S & S' & 0 & \dots & 0 & S'' \\ S'' & S & S' & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S' & 0 & \dots & 0 & S'' & S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ \vdots \\ F_{N-1} \end{pmatrix}$$

$$[S_\Delta] = \begin{pmatrix} S_{00} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & S_{11} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & S_{22} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{00} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & S_{11} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & S_{22} & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \end{pmatrix}$$

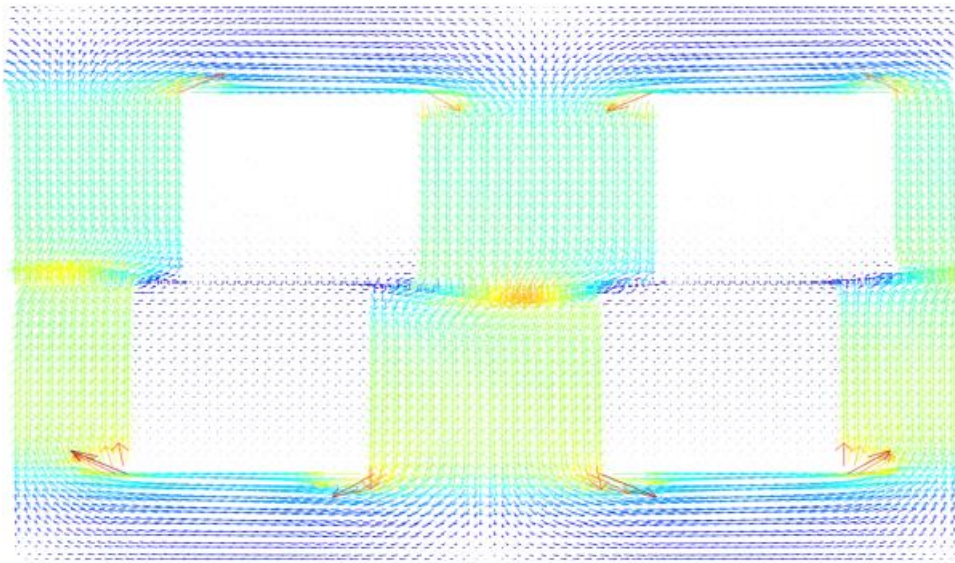


- ❑ Obtenir le régime permanent sans calculer le régime transitoire
- ❑ Approche spectrale de type Fourier : Harmonic Balance Method (Base orthogonale)

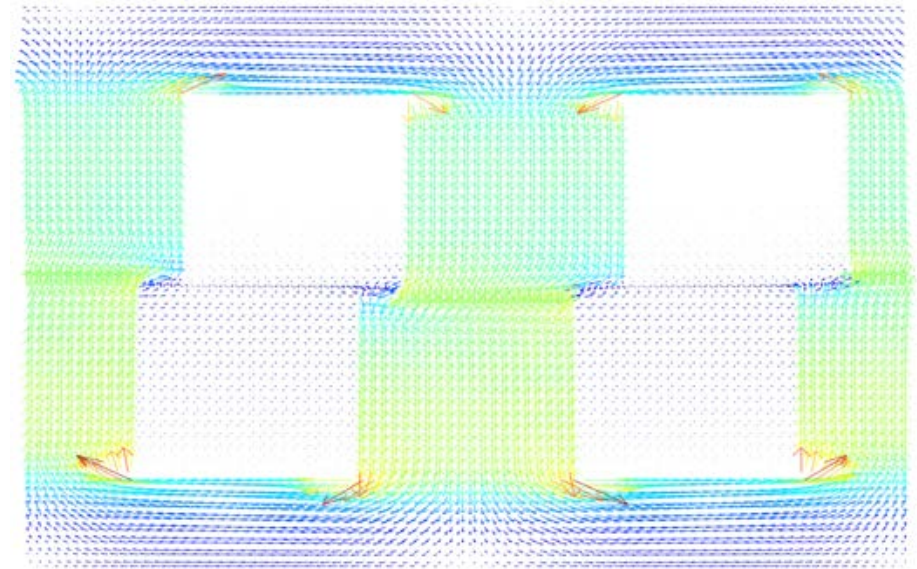
$$\mathbf{A}(t) \cong \mathbf{Re} \left( \mathbf{A}_0 + \sum_{k=1}^N \underline{\mathbf{A}}_k e^{j \omega_k t} \right)$$

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

Distribution de l'induction magnétique  
(Méthode temporelle)



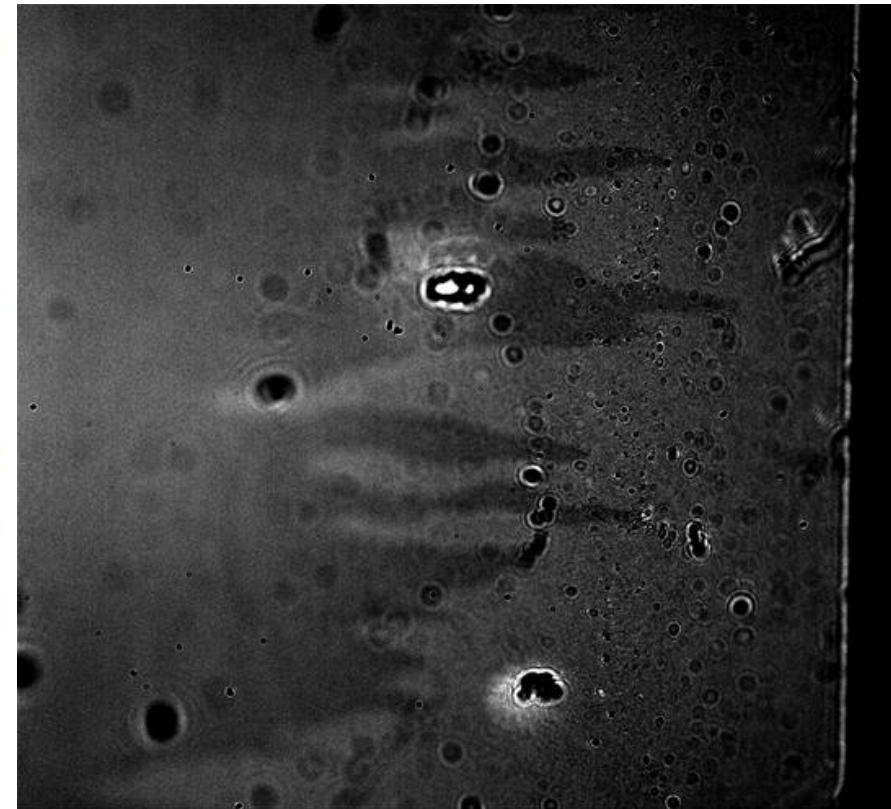
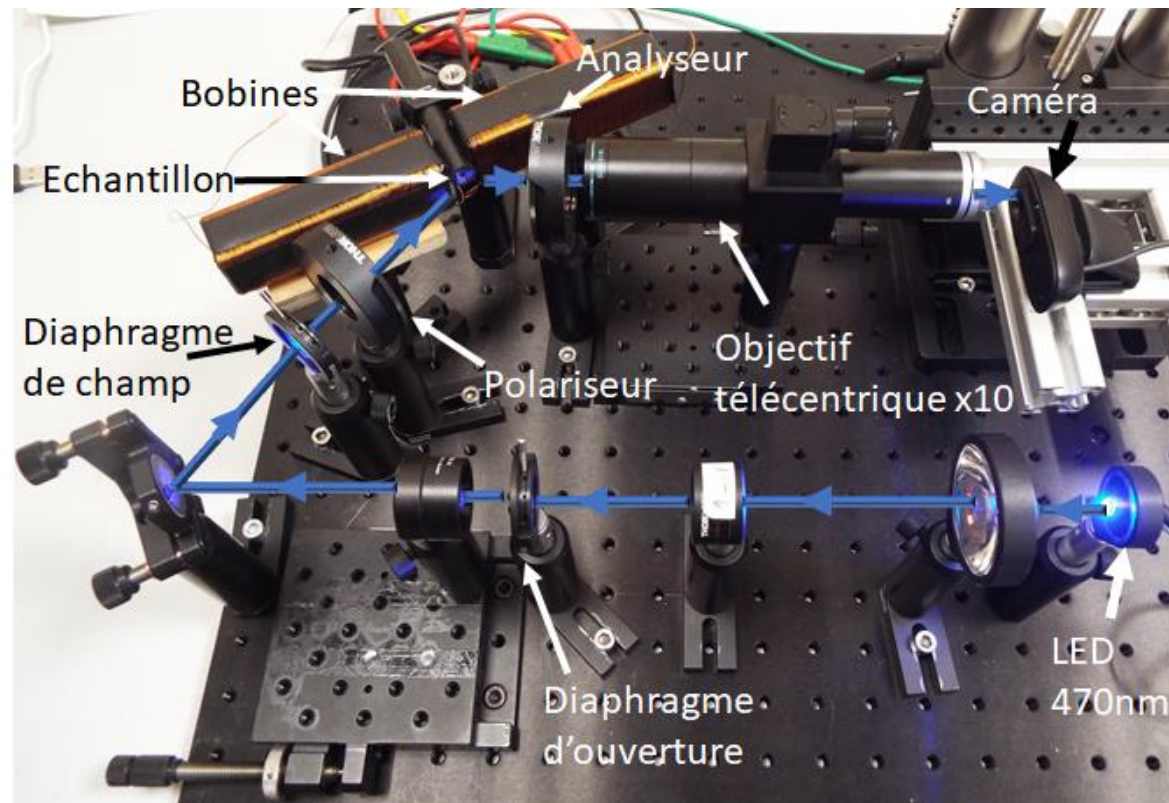
4 pas de mouvement



	3 modes	4 modes	5 modes
Erreur entre l'approche spectrale et temporelle	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$

## Montage expérimental

Domaines magnétiques sur FeGa (100nm), H // [110]

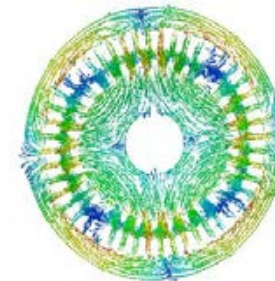


Modélisation par méthode des éléments finis (Code\_Carmel) en mode sain et en cas de défaut (rupture d'une ou plusieurs barres).

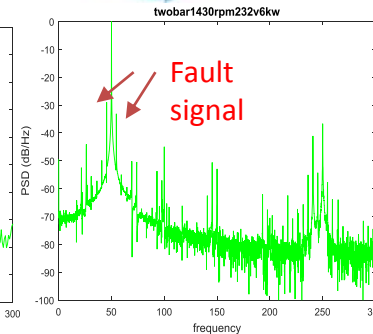
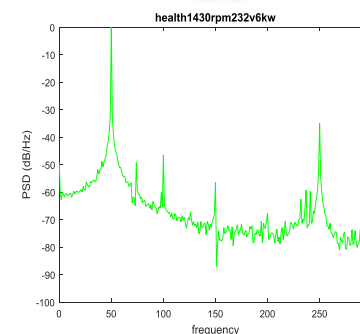
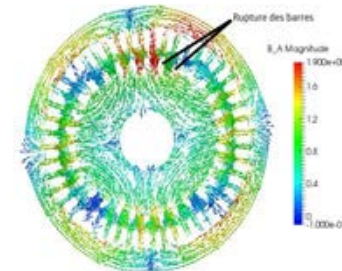
Comparaison systématique des résultats de simulation aux mesures sur les machines dans les mêmes cas de fonctionnement.

Analyse les courants et les tensions dans la 'search coil' (Densité spectrale de puissance).

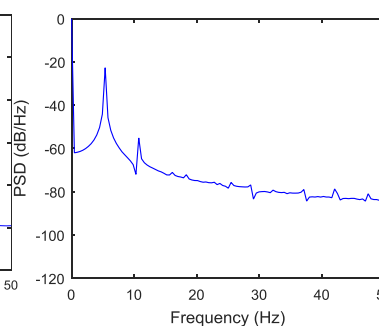
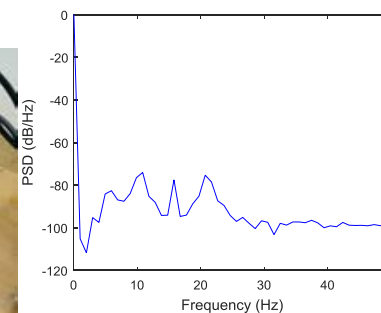
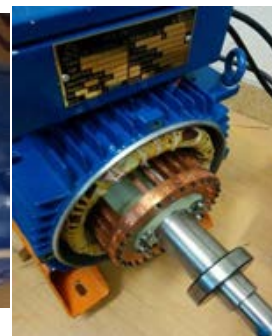
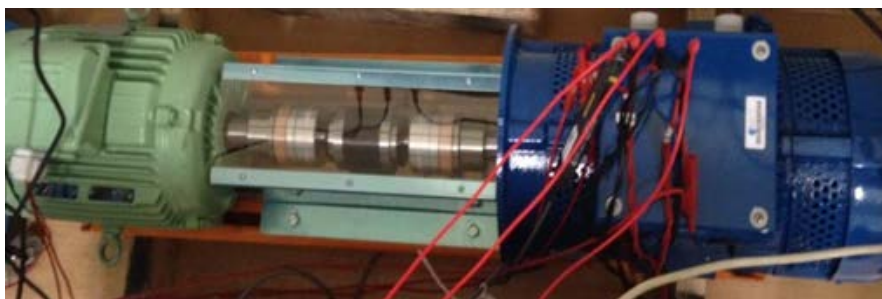
Sain



Mode dégrade



Densité spectrale de puissance des courants stator



Densité spectrale de puissance de l'enveloppe des courants

## □ Développement de méthodes numériques pour la modélisation de systèmes électrotechniques

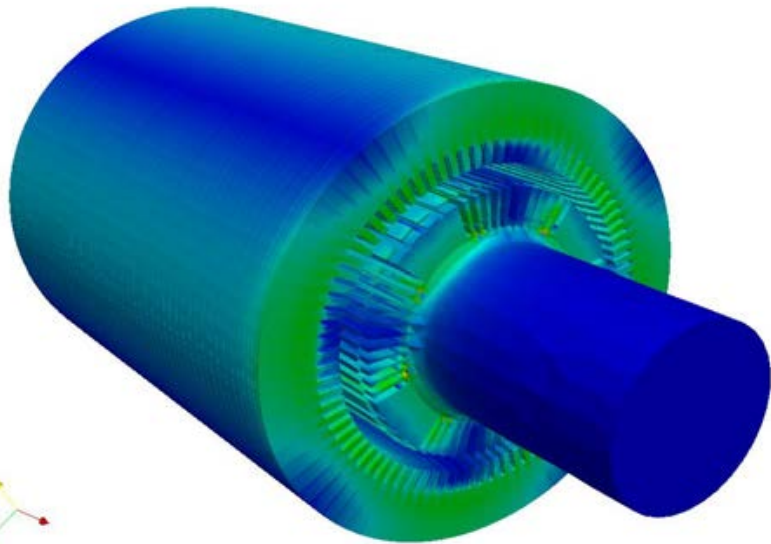
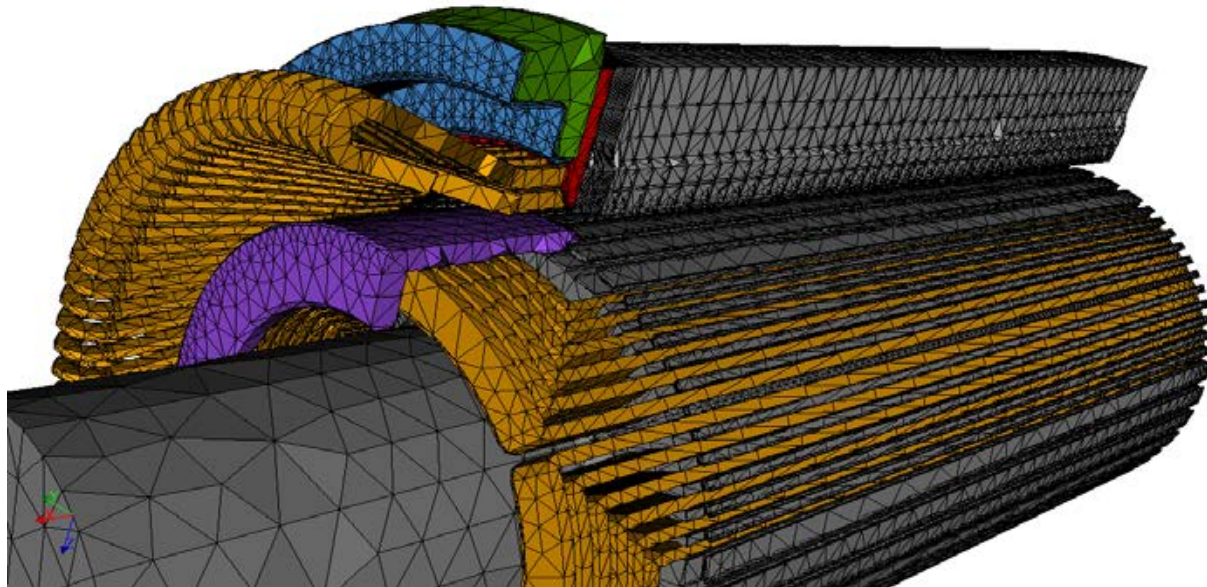
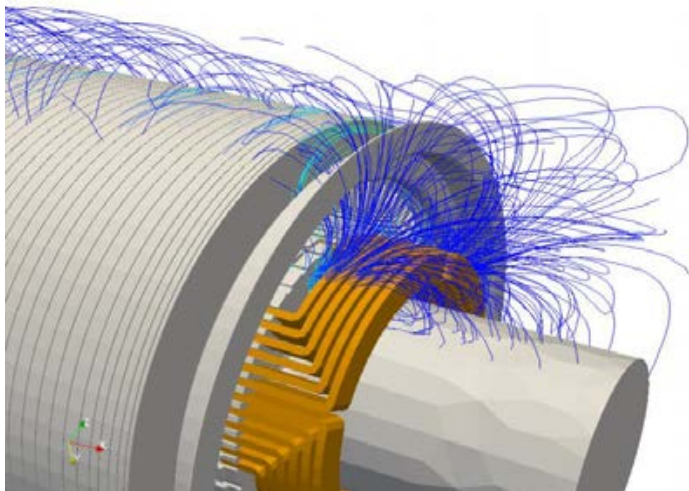
### ➤ Code\_carmel

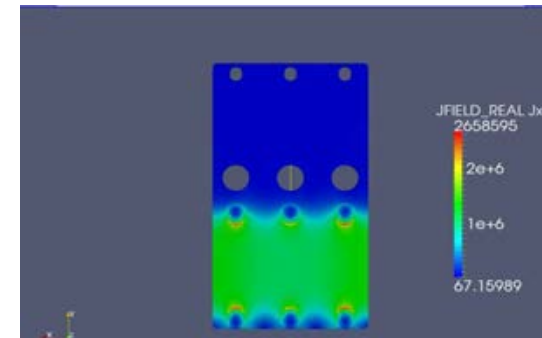
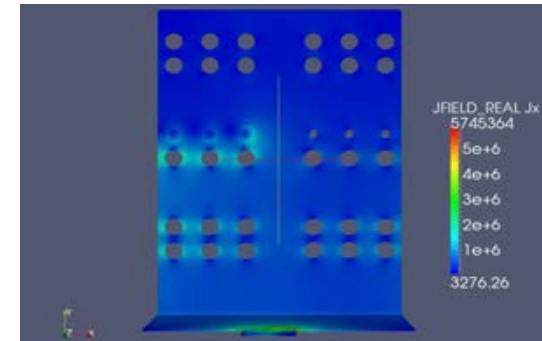
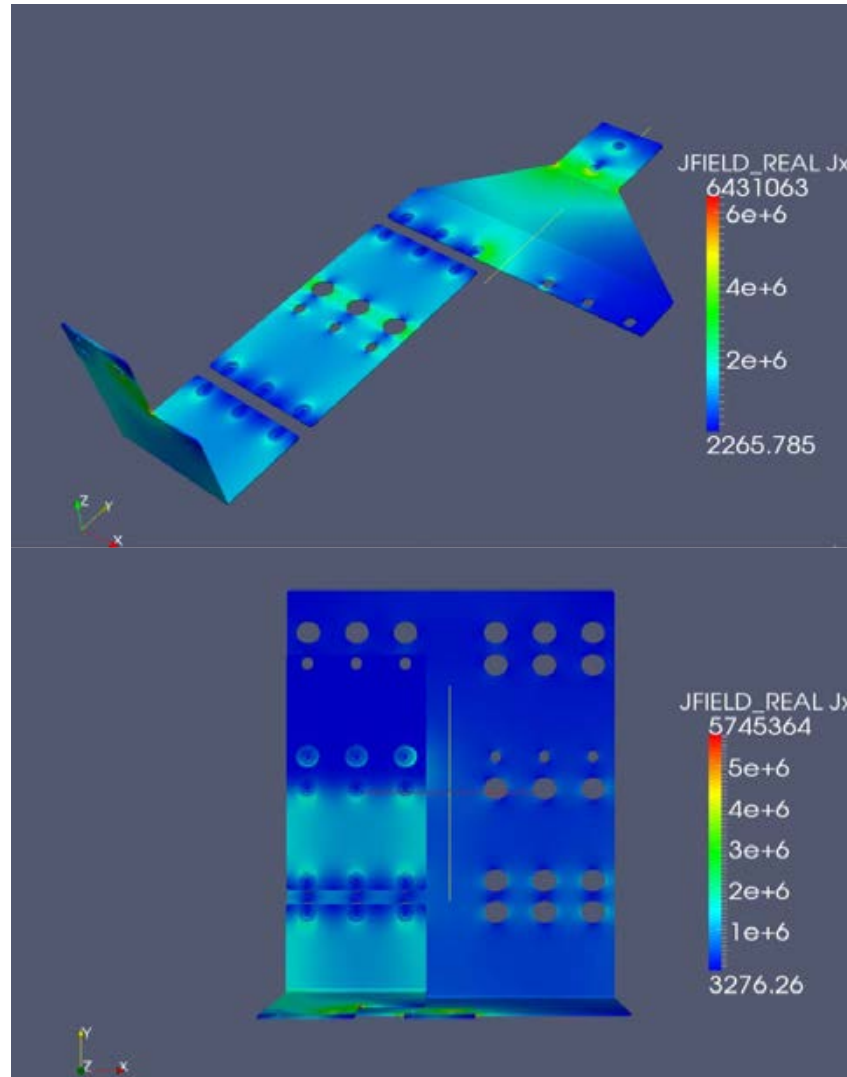
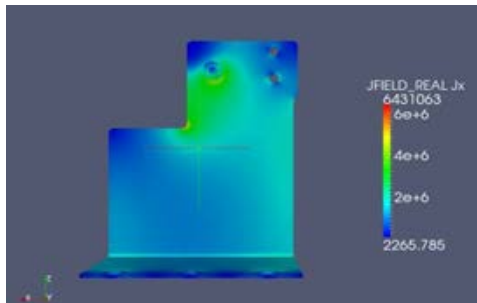
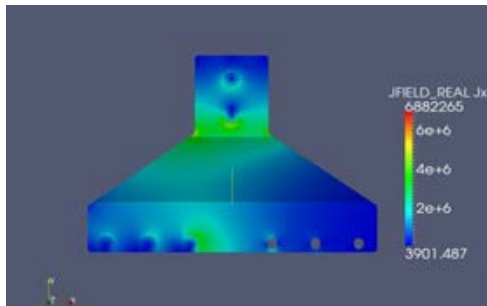
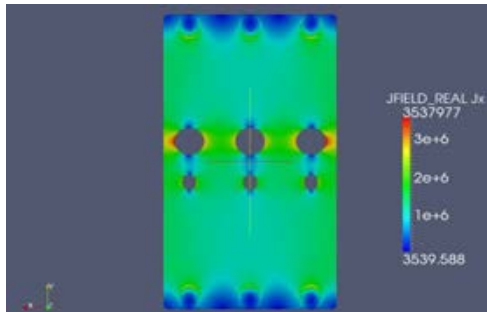
- Code éléments finis 3D
- 20 ans de développement dont 10 en co développement avec EDF
- Licences gratuites



### ➤ Sophémis

- Plate forme d'optimisation sous Matlab
- 15 ans de développement
- Accès au service







# De la Conception par Optimisation À L'Optimisation Topologique



## Dimensionnement d'une machine de production d'électricité

Le problème d'optimisation reprend comme variables **les grandeurs géométrique du rotor** ainsi que **la longueur de fer**. Le **diamètre extérieur** de la machine est **imposé** par le système.

### Premier niveau

$\min(\text{[Pertes, Coût]})$

$X = \left\{ \begin{array}{l} \text{Variables} \\ \text{géométrique} \end{array} \right\}$

### Second niveau

Boucle d'optimisation du point nominal

Soumis à

$$\delta_j < 3,5 \text{ A/mm}^2$$

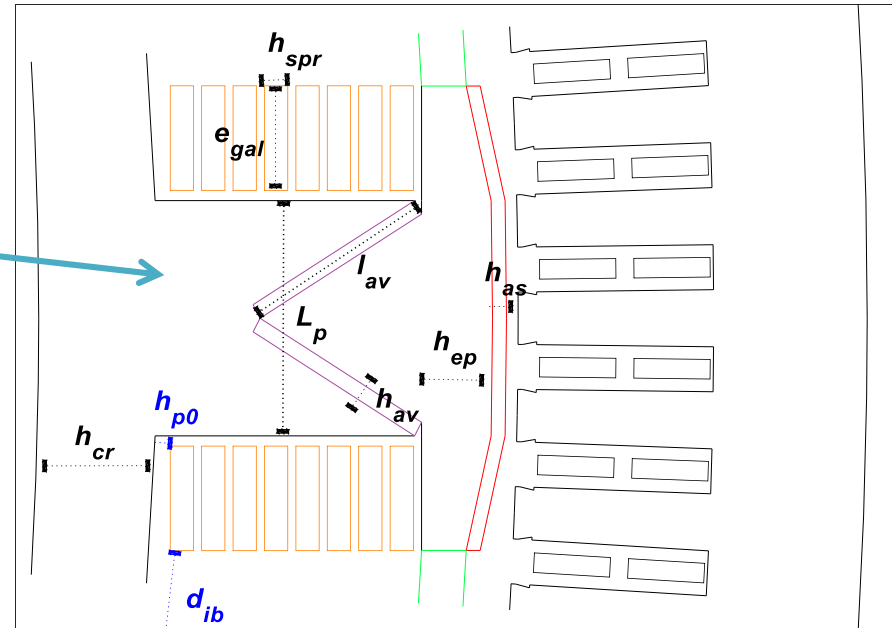
$$\delta_{Is} < 3,5 \text{ A/mm}^2$$

$$B_d < 1,7 \text{ T}$$

$$B_{cs} < 1,5 \text{ T}$$

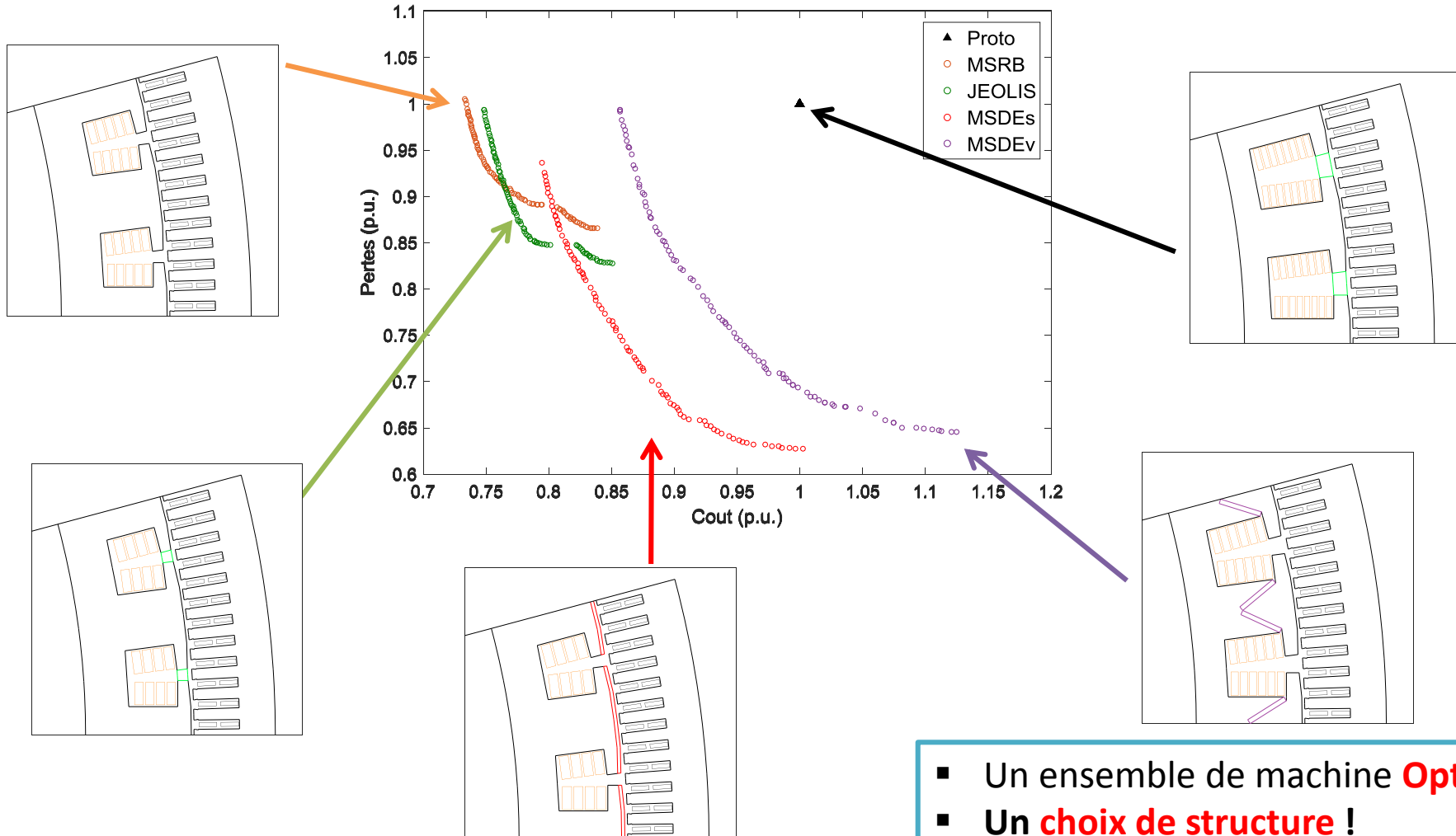
$$d_{ib} < 10 \text{ mm}$$

$$h_{p0} < 5 \text{ mm}$$



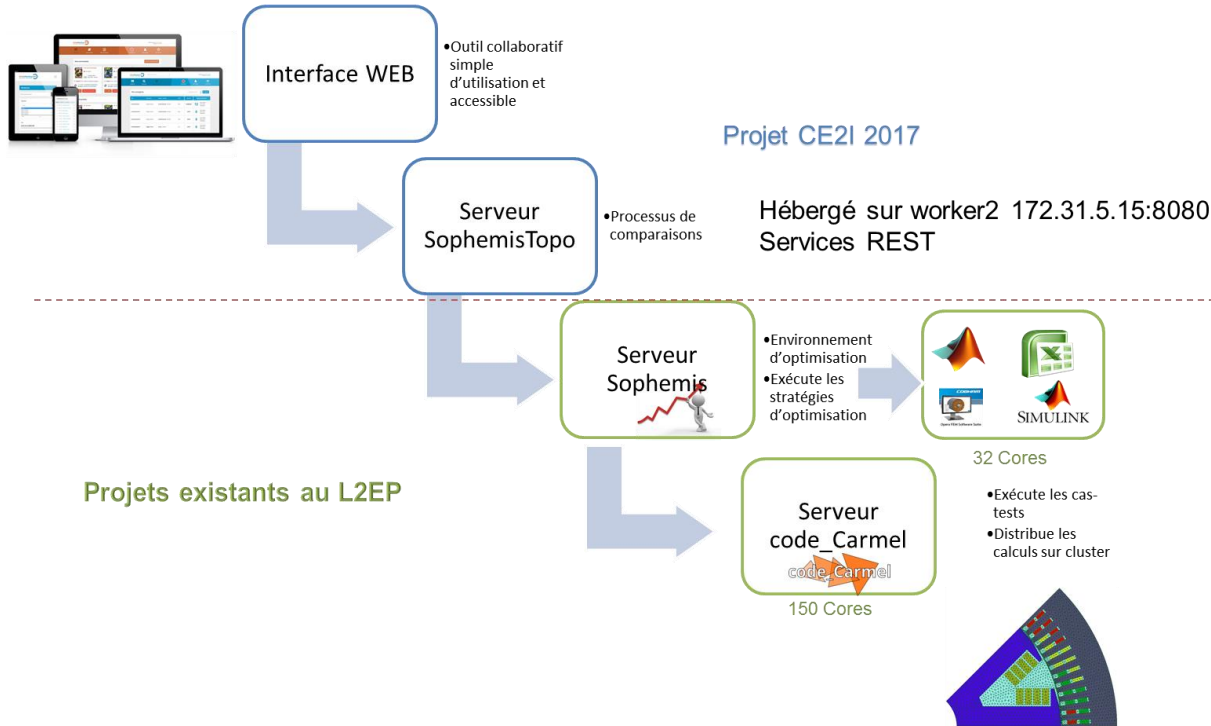
- Problème **d'optimisation géométrique** multi-objectif

## Dimensionnement d'une machine de production d'électricité



- Un ensemble de machine **Optimale**
- Un **choix de structure** !

## SophemisTopo : Architecture fonctionnelle



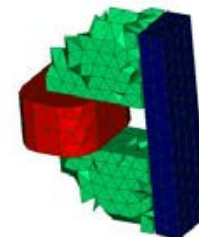
## Interface Web



## Soumission de stratégie d'optimisation



- Des **liens** et des **interfaces**



Energy = 0.79452  
 MQ = 0.79499  
 FF = 0.64862  
 Poulsen =

Stratégies- Cas-tests-

**Généralités**

Informations générales sur le benchmark

Stratégie	SimpFF01Algorithm
Cas-Test	Square_64_RN_Linear
Note	0.764 / 1

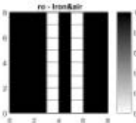
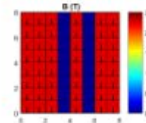
**Solution trouvée**

Fval = -7.501250e-1  
 Constriction = 0.000000e+0

Entrées	Sorties
d	volume = 7.500000e-1
Bx	=
Poulsen	0.000000e+0
By	=
objectif	7.501250e-1
feasibility_factor	5.288181e-17
energy	7.501250e-1
Bmod	=

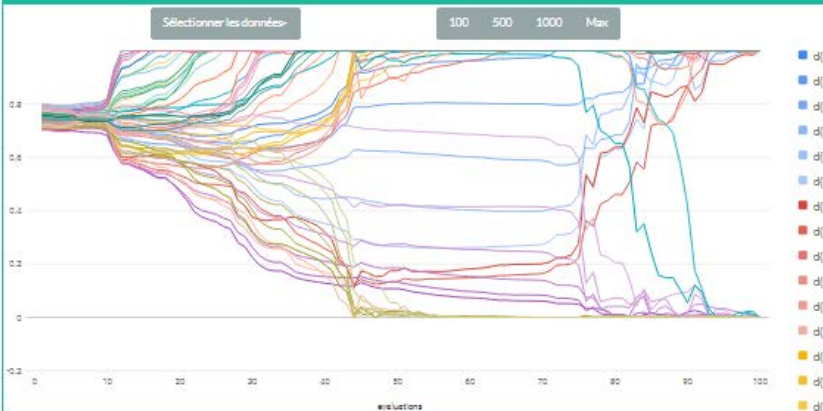
**Affichage**

Energy = 0.79413  
 MQ = 0.75  
 FF = 5.2882e-17  
 Poulsen = 0

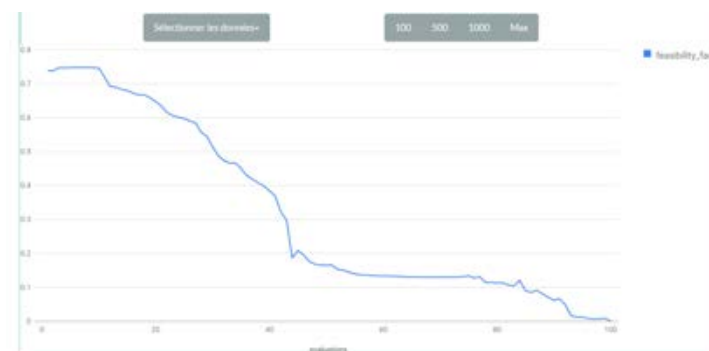
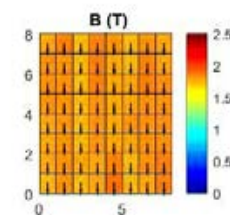
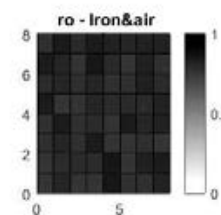



**Evolution**

Sélectionner les données-> 100 500 1000 Max



Exportier les résultats sous CVS Exportier les résultats sous MATLAB

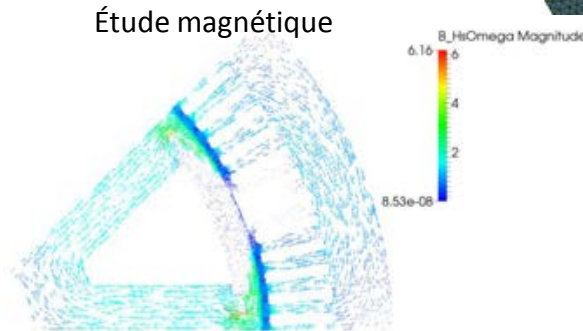
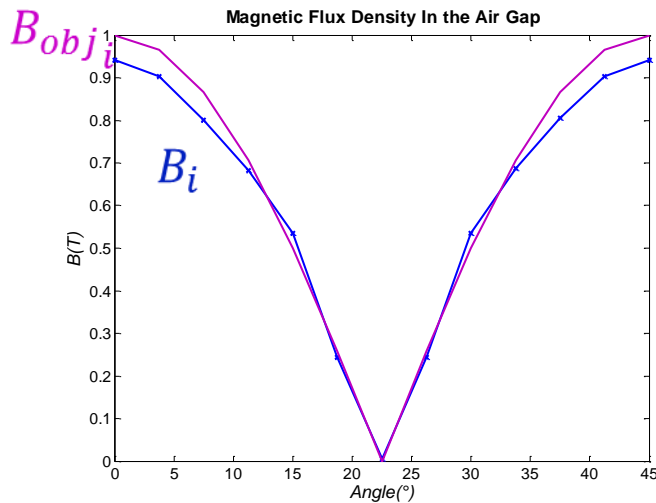


## Definition du problème :

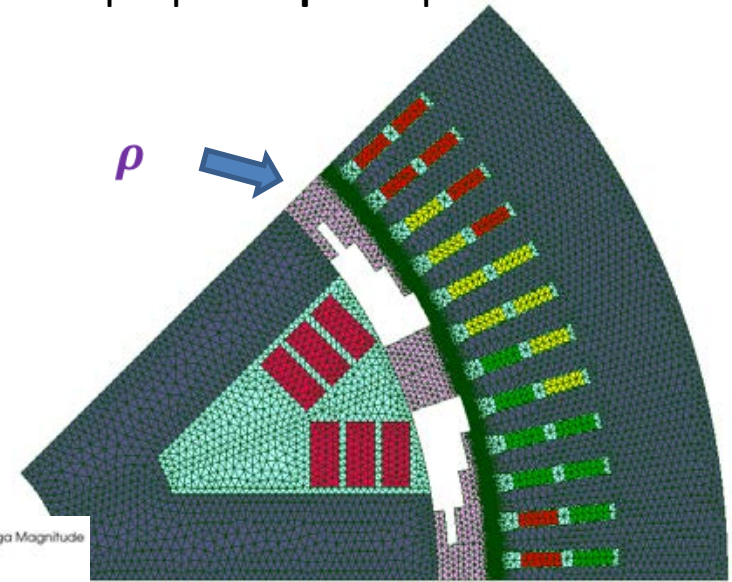
$$\min_{\rho} \left( \gamma \cdot \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( \frac{B_i(\rho) - B_{obj_i}}{B_{obj_i}} \right)^2 + \lambda \cdot FF(\rho) \right)$$

L'induction dans l'entrefer doit être sinusoïdale;  $B_{obj_i}$

- Analyse du résultat :



- Solution proposée par l'optimisation:



- Un résultat pas classique, qui permet de se poser des questions pour **progresser**, **innover** (?)