

# Atelier digital - MEDEEE FOCUS n°1

**De la conception à la maintenance :  
Analyser les bruits et vibrations des systèmes électriques**

Introduction par Michel Hecquet, Président du Comité Scientifique

## La contrainte bruits et vibrations : modélisation et conception en génie électrique

- 1. Simulation multiphysique des bruits et vibrations d'origine électromagnétique : compromis précision vs vitesse de calcul**  
Par Jean Le Besnerais, Président d'EOMYS Engineering
  - 2. Amélioration des performances acoustiques et vibratoires des machines asynchrones par enroulement amortisseur**  
Par Raphaël Romary, Enseignant-Chercheur au laboratoire LSEE de l'Université d'Artois
  - 3. Réduction du bruit par la commande**  
Par Michel Hecquet, Enseignant-Chercheur au laboratoire L2EP, Centrale Lille
  - 4. Etudes vibratoires de systèmes complexes**  
Par Vincent Lanfranchi, Enseignant-Chercheur au laboratoire Roberval de l'Université de Technologie de Compiègne
- Questions / Réponses (15 min.)

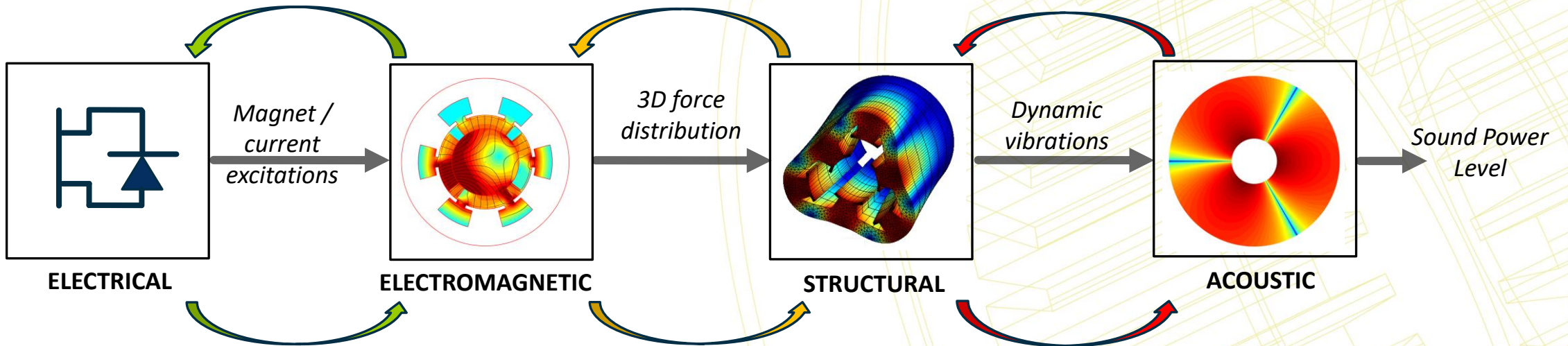
## Les apports de la vibro-acoustique : monitoring et maintenance des systèmes électriques

- 1. Surveillance non invasive d'un parc de machines de production d'électricité – Outil ARMONIC**  
Par Raphaël Romary, Enseignant-Chercheur au laboratoire LSEE de l'Université d'Artois
  - 2. Capteurs connectés pour le suivi d'équipements électriques**  
Par Nicolas Côté, Cofondateur de Wavely
- Questions / Réponses (15 min.)

# Partie 1 - La contrainte bruits et vibrations : modélisation et conception en génie électrique

**Simulation multiphysique des bruits et vibrations d'origine  
électromagnétique : compromis précision vs vitesse de calcul**

# Electromagnetic noise & vibrations – a multiphysic problem



Equivalent Electrical Circuits  
Coupled ODE

Permeance / MMF  
Subdomain  
Magnetoharmonic FEA  
Magnetostatic FEA  
Transient FEA

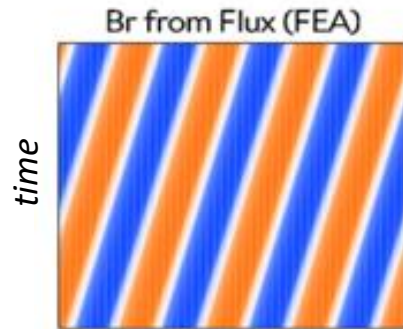
Equivalent cylindrical shells  
Lumped Mass Spring  
FEA

Disk / sphere / cylinder radiation  
Equivalent Radiated Power  
Acoustic BEM  
Acoustic FEM

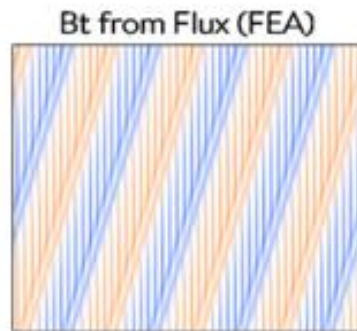
CPU time?

Accuracy?

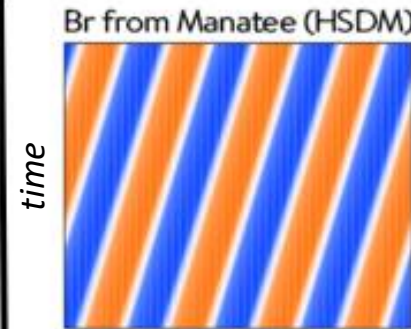
**Fast does not mean inaccurate...**



airgap angle



Flux: ~1 hour



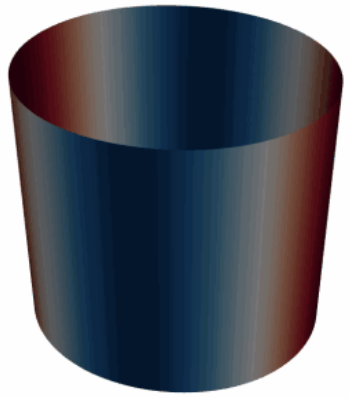
airgap angle



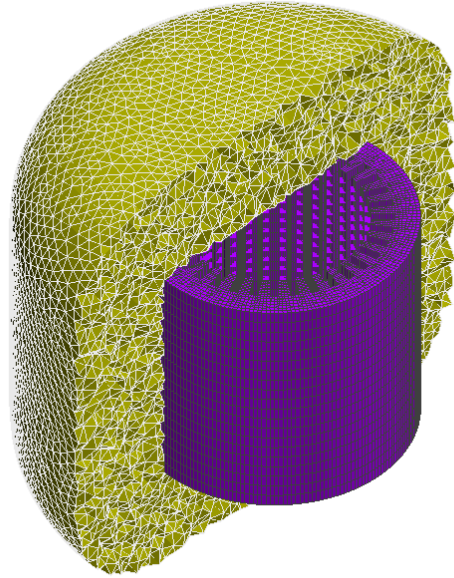
Manatee: ~1 sec



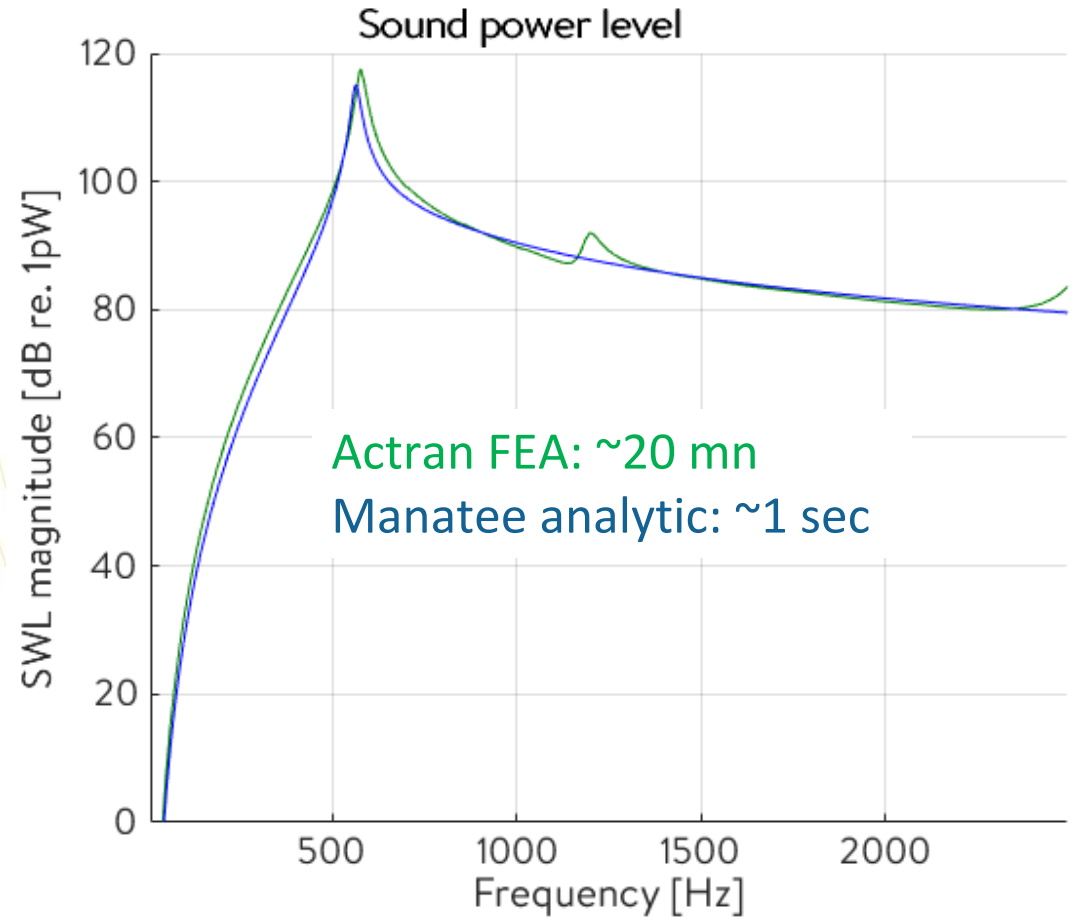
*Fast does not mean inaccurate...*



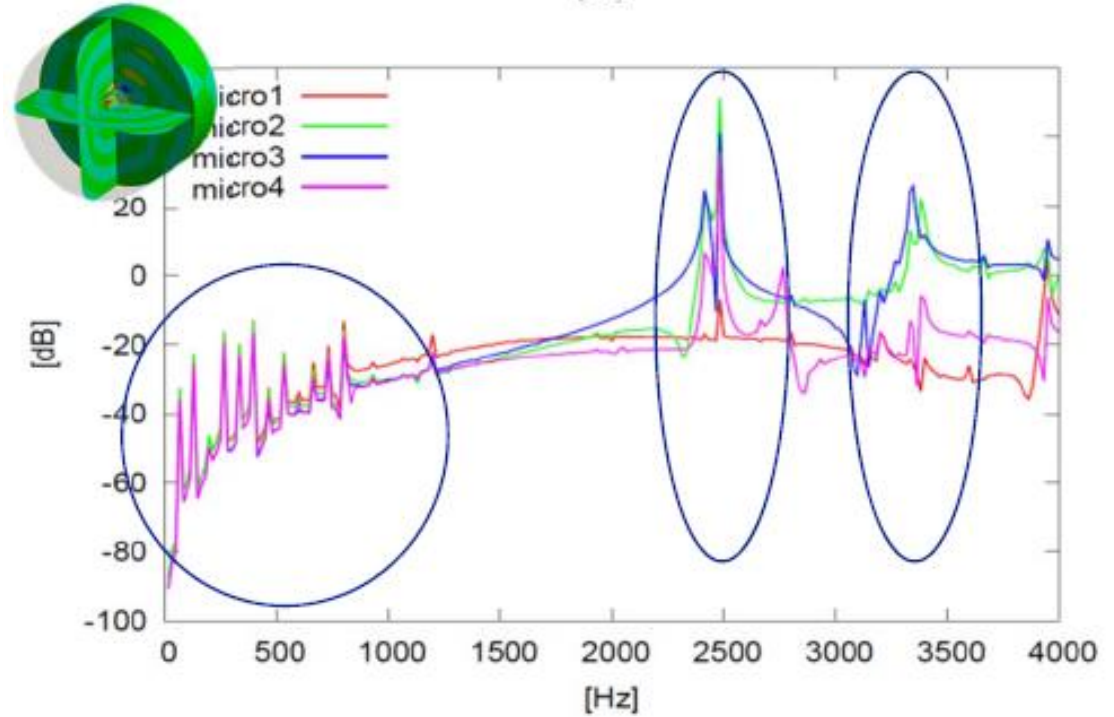
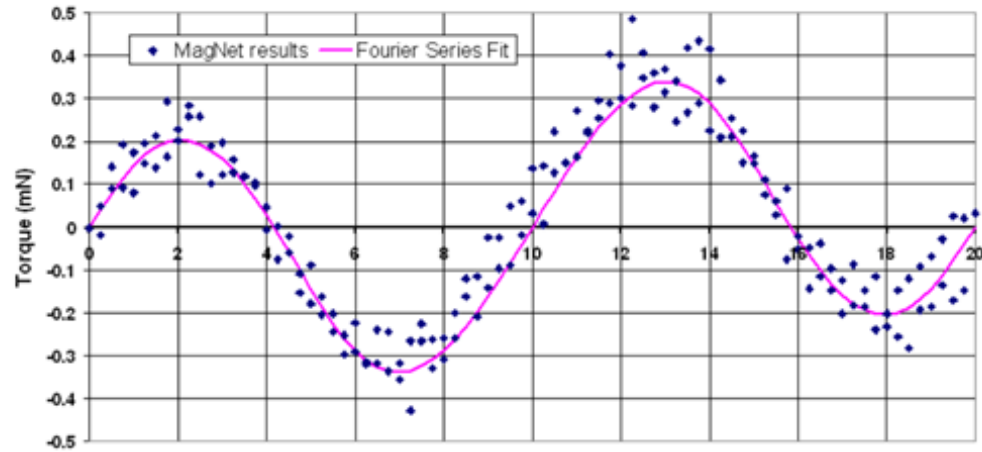
**manatee**  
by EOMYS



**Actran™**



# Slow does not mean accurate...



# Accuracy Vs speed trade-offs – example of Manatee workflows



Conceptual electrical design

e-NVH risk assessment

Electromagnetic design optimization

Detailed magnetic & mechanical design

CAE based e-NVH mitigation actions

Implementation

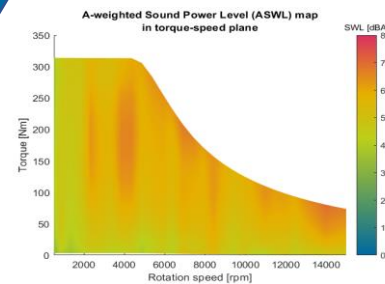
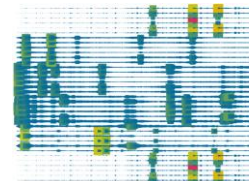
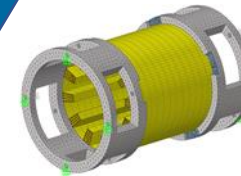
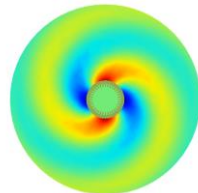
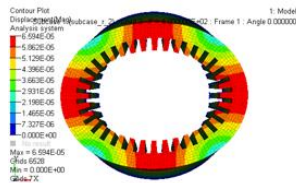
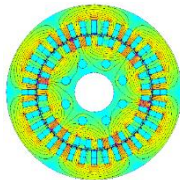
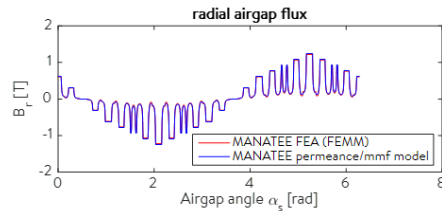
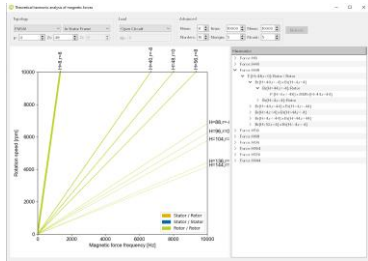
Operation and maintenance

Redesign actions

CAE model update

e-NVH root-cause analysis

Integration, test and verification





# Jean Le Besnerais Président d'EOMYS Engineering

[jean.lebesnerais@eomys.com](mailto:jean.lebesnerais@eomys.com)

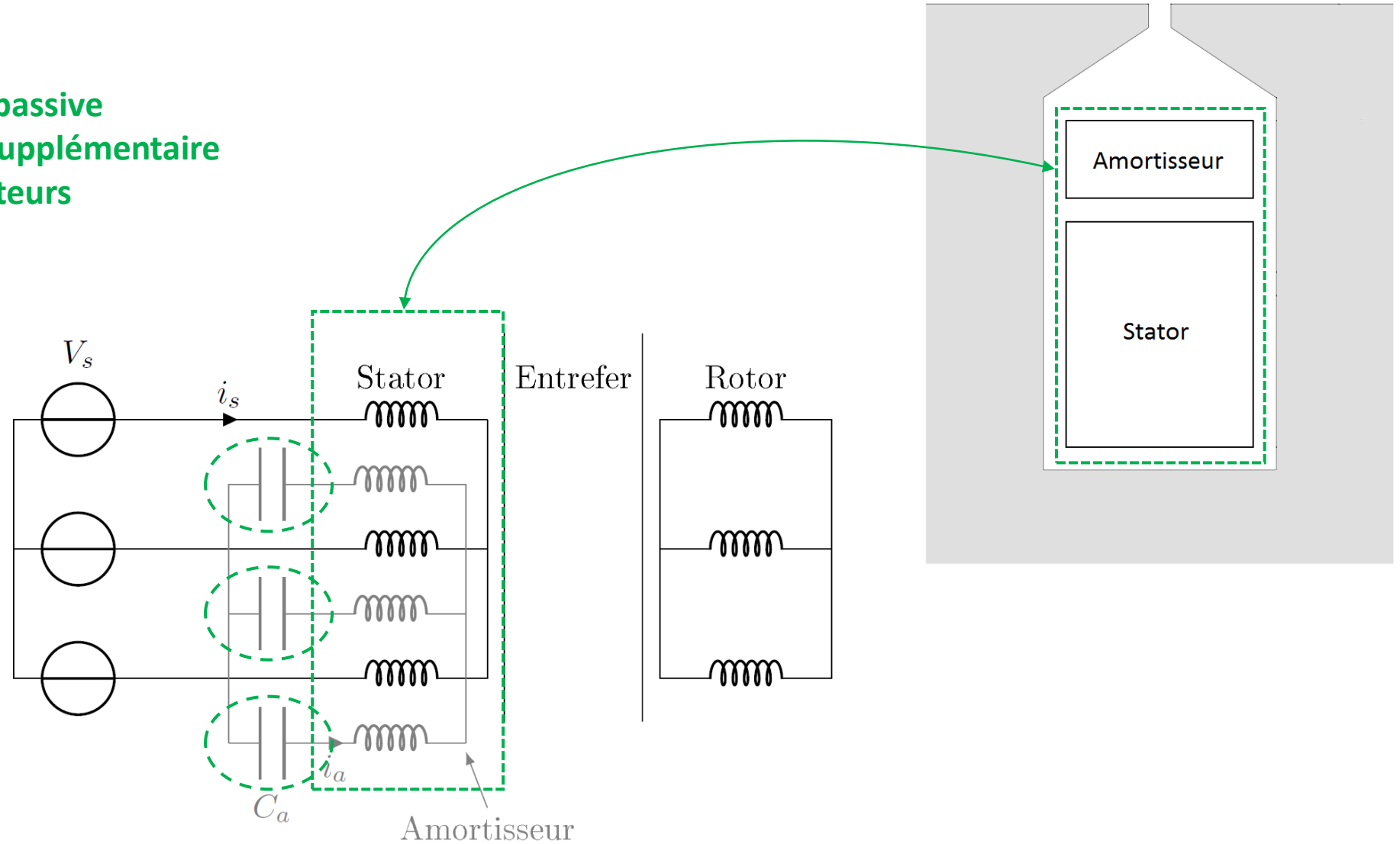
[eomys.com](http://eomys.com)

# Partie 1 - La contrainte bruits et vibrations : modélisation et conception en génie électrique

**Amélioration des performances acoustiques et vibratoires des machines asynchrones par enroulement amortisseur**

➤ Principe général :

- Méthode de réduction **passive**
- Enroulement **triphase supplémentaire**
- Connecté à **3 condensateurs**



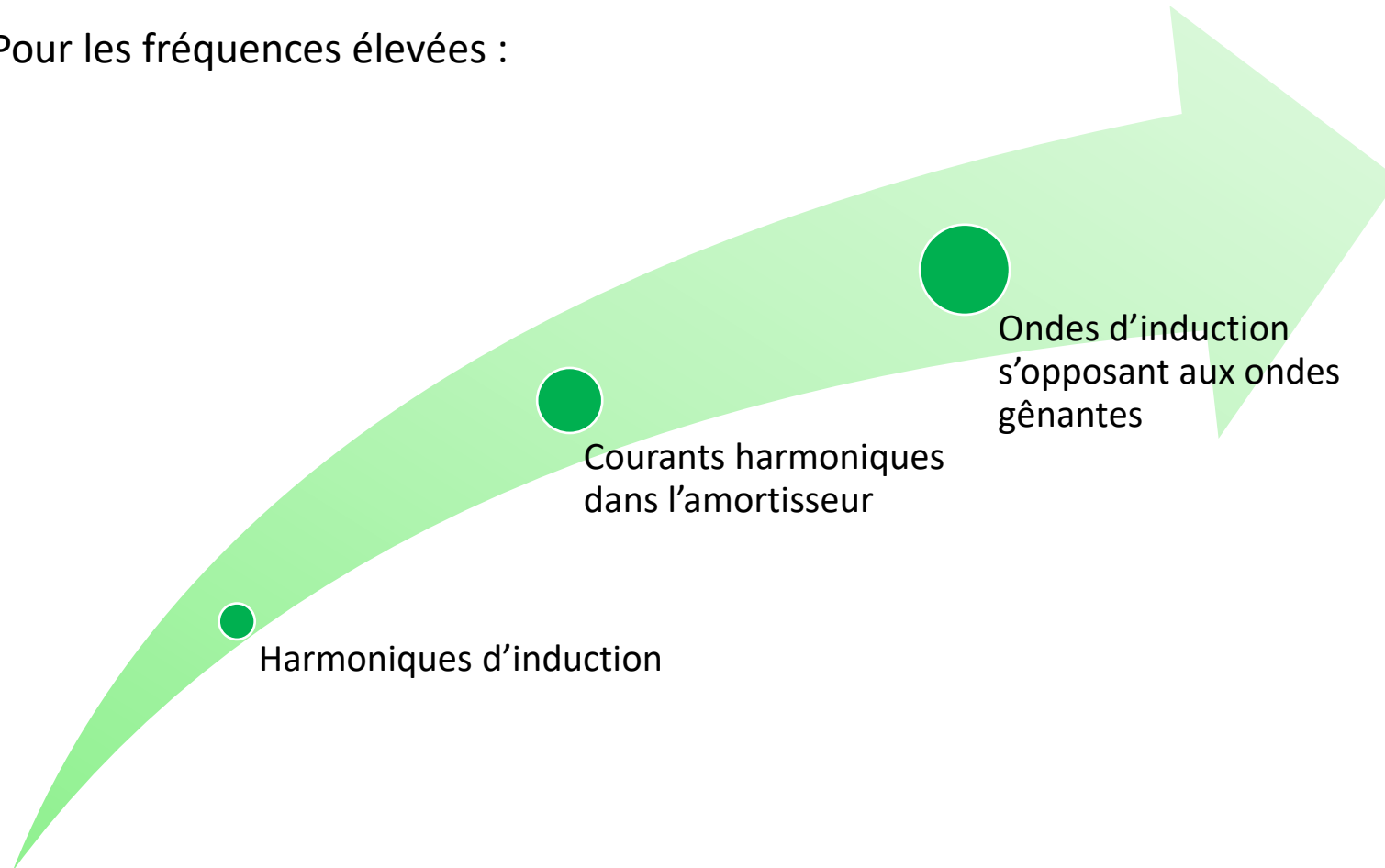
➤ Phénomène physique :

- Pour les basses fréquences : **sans effet grâce aux condensateurs**
- Pour les fréquences élevées :

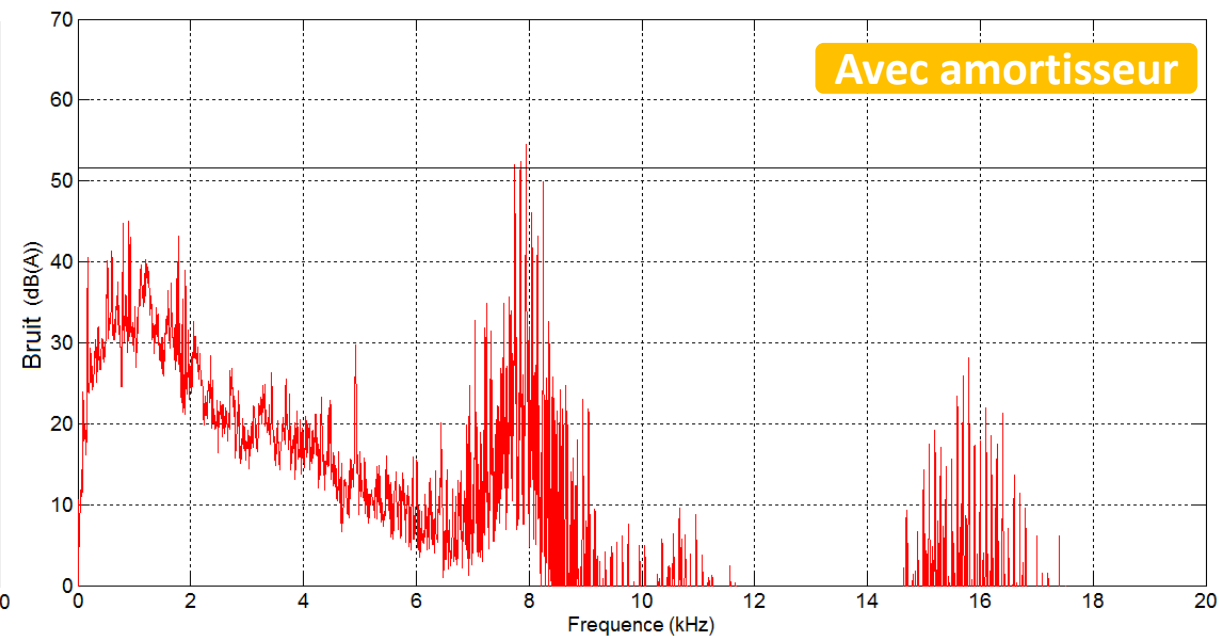
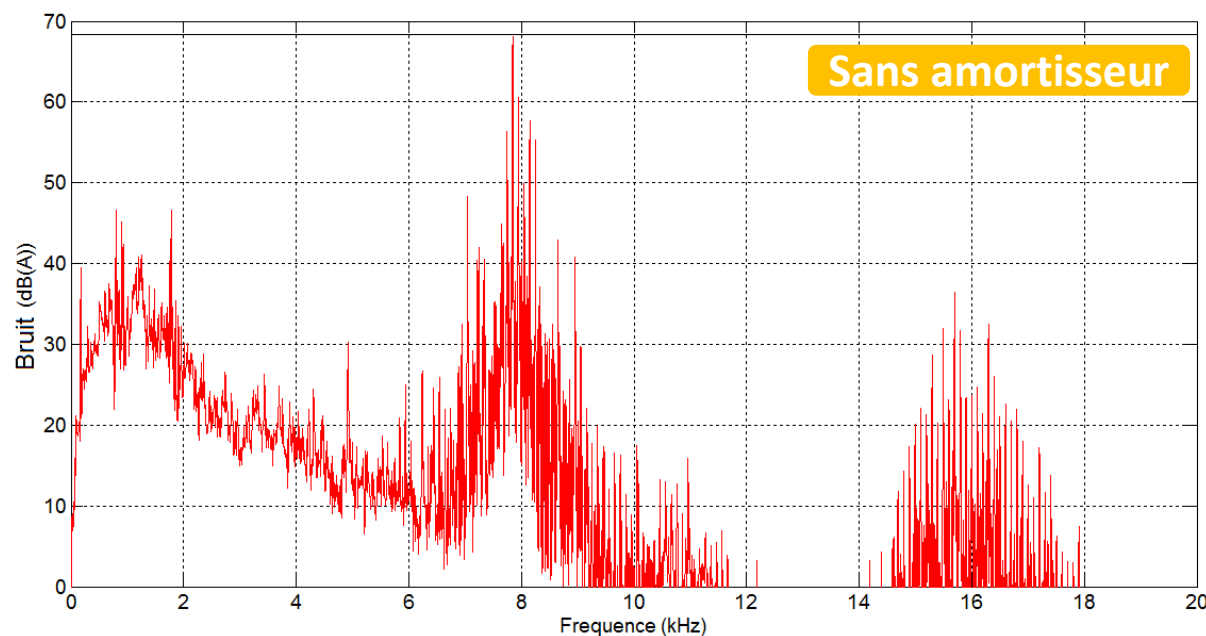
✓ **Effets harmoniques réduits**

→ **Induction d'entrefer davantage sinusoïdale**

→ **Bruits et vibrations réduits**

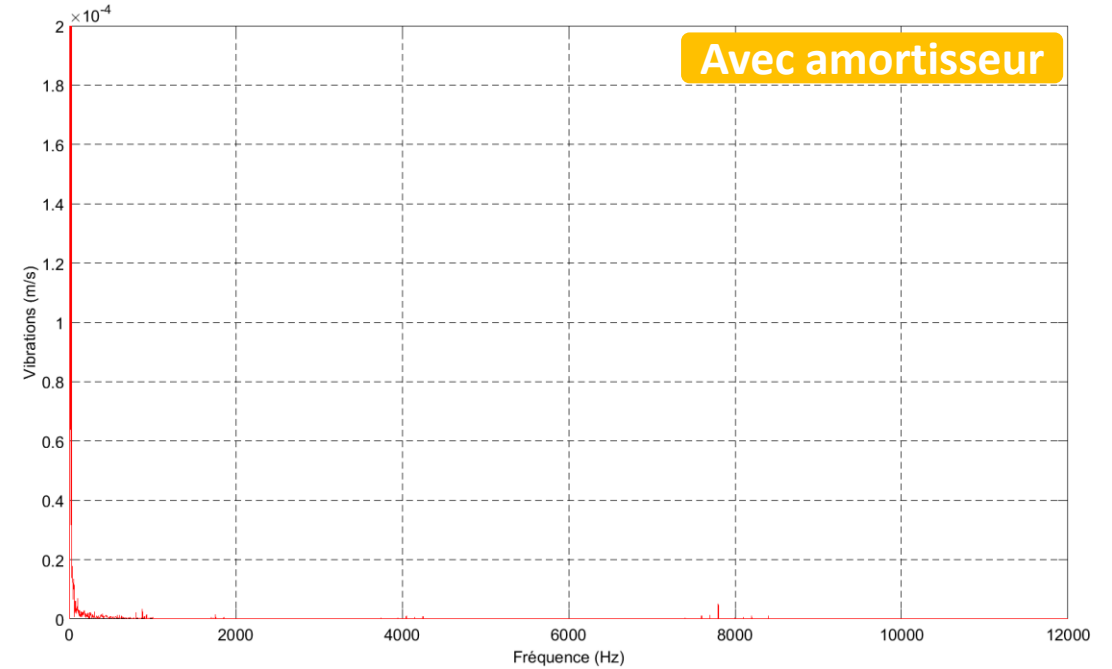
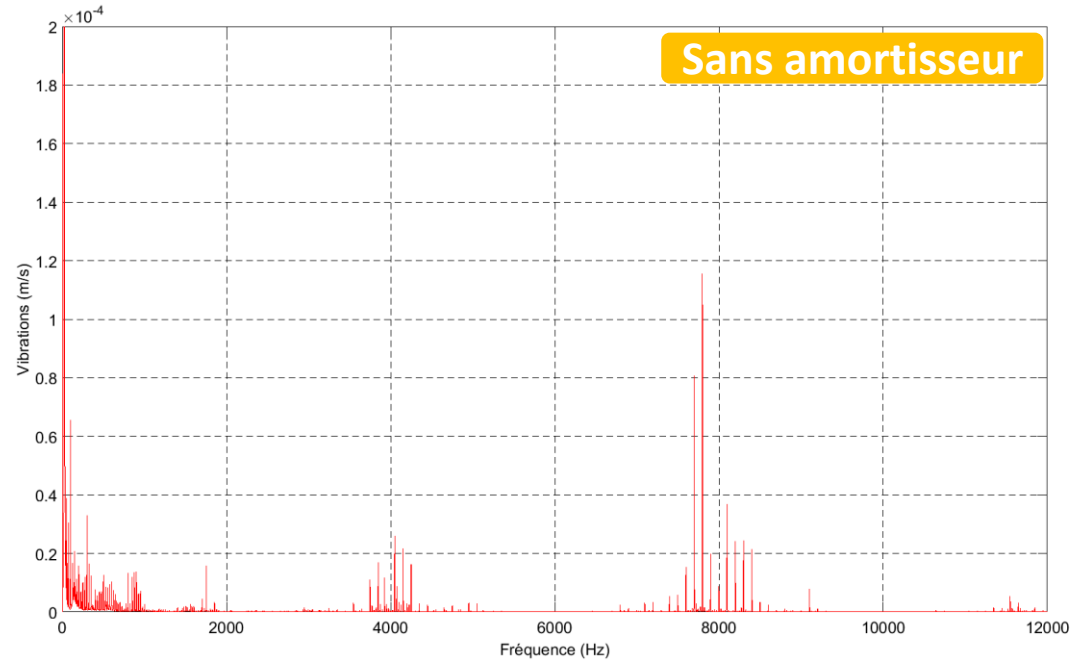


➤ Spectres de bruit :  $f_{MLI} = 8 \text{ kHz}$ , 1500 tr/min, à vide



	Sans amortisseur	Avec amortisseur	Réduction
7850 Hz	68 dB(A)	52 dB(A)	16 dB(A)
<b>Global</b>	<b>70,4 dB(A)</b>	<b>61,7 dB(A)</b>	<b>8,7 dB(A)</b>

➤ Spectres de vibrations :  $f_{MLI} = 4 \text{ kHz}$ , 1500 tr/min, à vide



	Sans amortisseur	Avec amortisseur	Réduction
<b>Global</b>	<b>247 <math>\mu\text{m/s}</math></b>	<b>39,5 <math>\mu\text{m/s}</math></b>	<b>84%</b>

➤ Impact de l'ajout de l'amortisseur sur la masse de la machine :

	Machine	4kW	55kW
<b>Fer</b>	% masse ajoutée (fer)	+2,75%	+1,52%
<b>Cuivre</b>	% masse ajoutée (cuivre)	+3,78%	+0,47%
<b>Fer + Cuivre</b>	<b>% masse ajoutée (totale)</b>	<b>+6,53%</b>	<b>+1,99%</b>

Impact d'autant plus faible que le gabarit de la machine est grand



# Raphaël Romary

## Enseignant-Chercheur au laboratoire LSEE

### Université d'Artois

[raphael.romary@univ-artois.fr](mailto:raphael.romary@univ-artois.fr)

[lsee.univ-artois.fr](http://lsee.univ-artois.fr)  
[univ-artois.fr](http://univ-artois.fr)



# Partie 1 - La contrainte bruits et vibrations : modélisation et conception en génie électrique

## Réduction du bruit par la commande

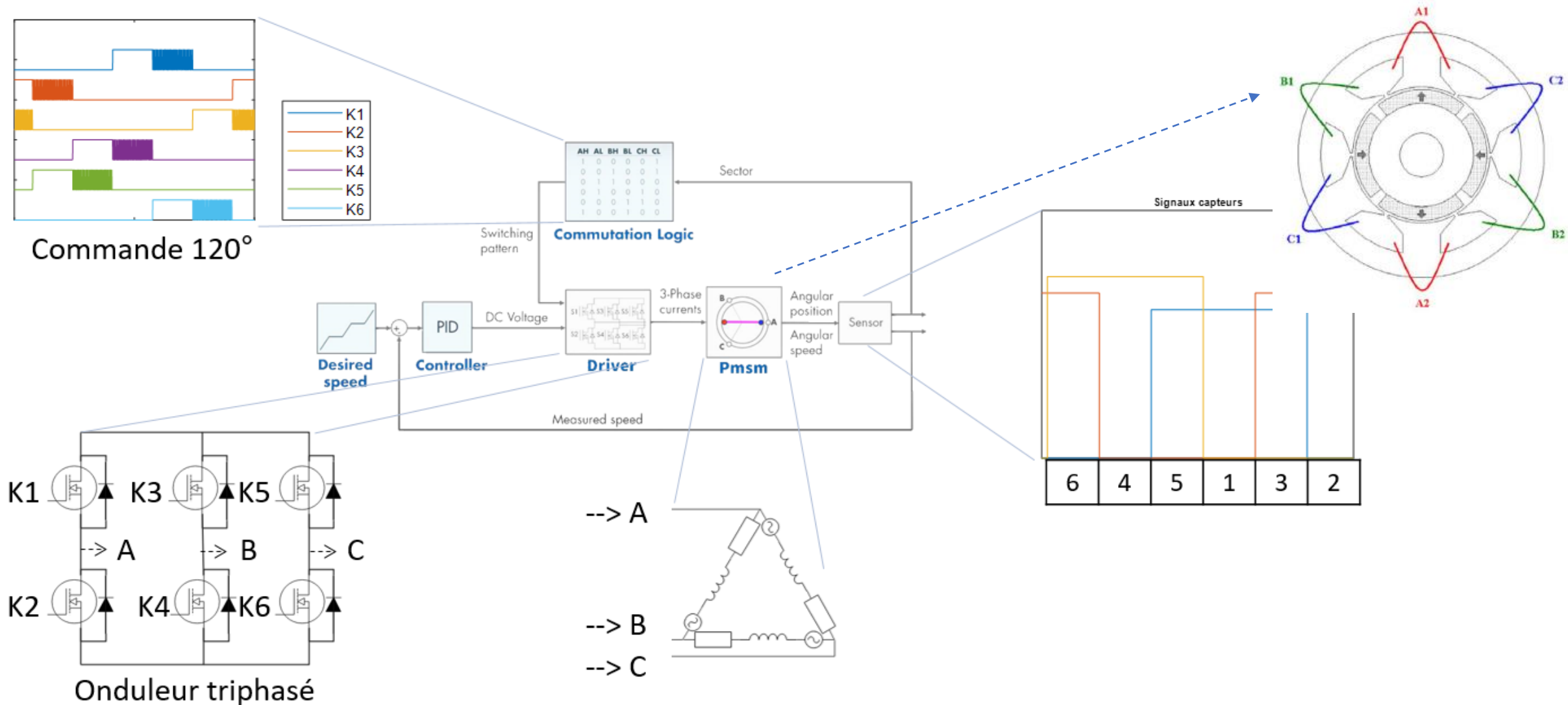


Michel Hecquet, Enseignant-Chercheur au laboratoire L2EP – Centrale Lille



# Réduction du bruit d'actionneurs électriques pour la domotique : action sur la commande

➤ **Contexte:** consommation énergétique, sécurité, fiabilité, coût, encombrement, discrétion visuelle et acoustique



# Réduction du bruit d'actionneurs électriques pour la domotique : action sur la commande

> **problématique:** Harmoniques magnétiques spatio-temporels importants avec un bilan technico-économique optimisé

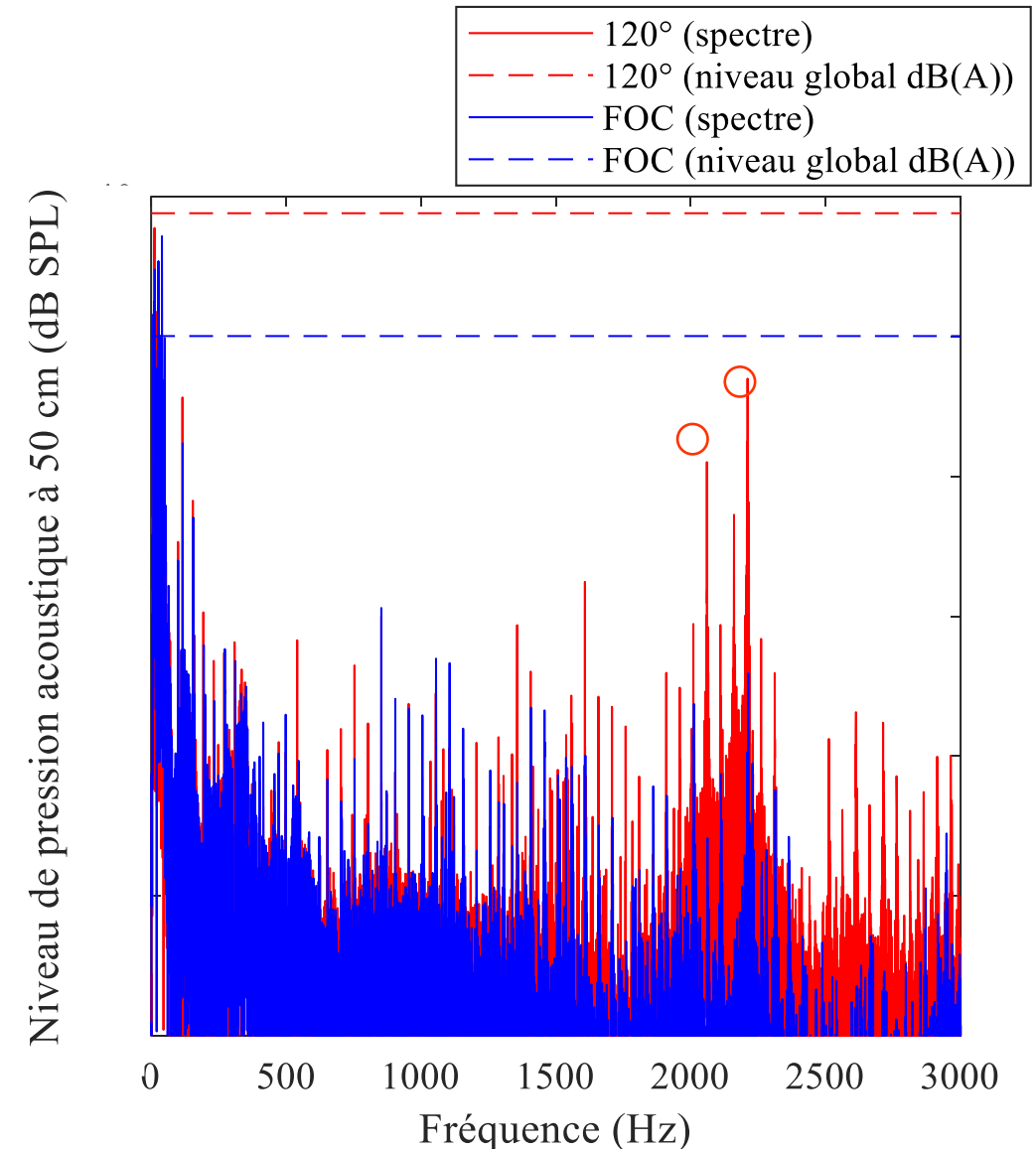
- Bobinage dentaire → harmoniques spatiaux
- Commande 120° → harmoniques temporels

Commande	FOC	120°
Performances	Élevées	Suffisantes
Coût	Élevé	Faible
Bruit	Faible	Élevé

Mesures acoustiques en dB(A) avec une commande sinusoïdale (FOC) vs trapézoïdale (120°) à performances constantes.

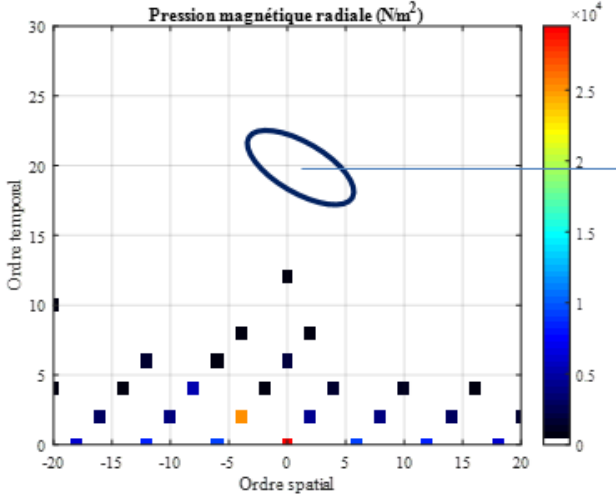
→ augmentation du bruit global de la commande trapézoïdale: + 8 dB(A)

→ Objectifs : étude des harmoniques à l'origine du bruit et réduction du bruit par la commande.



# Réduction du bruit d'actionneurs électriques pour la domotique : action sur la commande

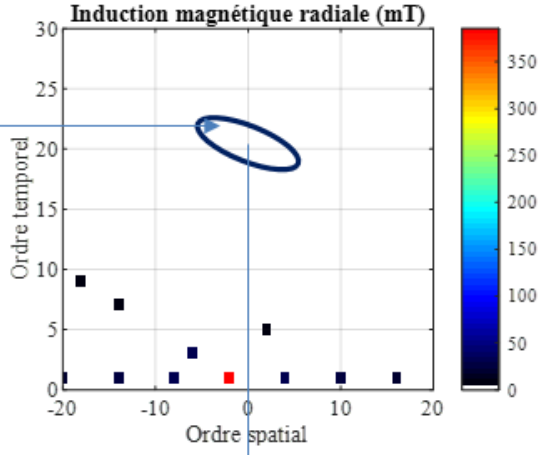
> Bilans : • Utilisation du produit de convolution sur le modèle E.F. :



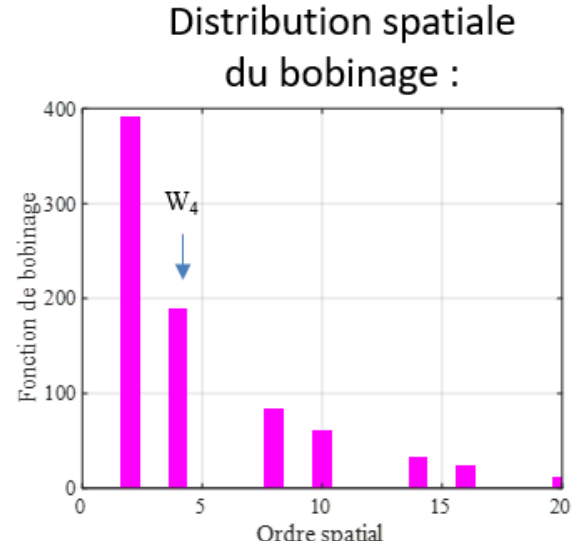
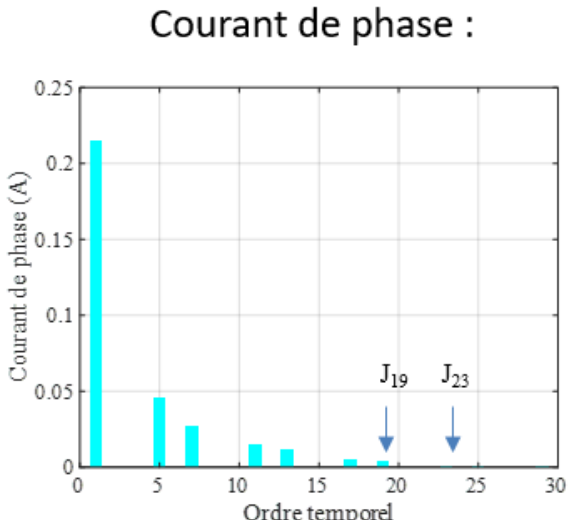
$$\frac{\mathcal{F}[B_{rad}(t, \theta)] \otimes \mathcal{F}[B_{rad}(t, \theta)]}{2\mu_0}$$

Au lieu de :

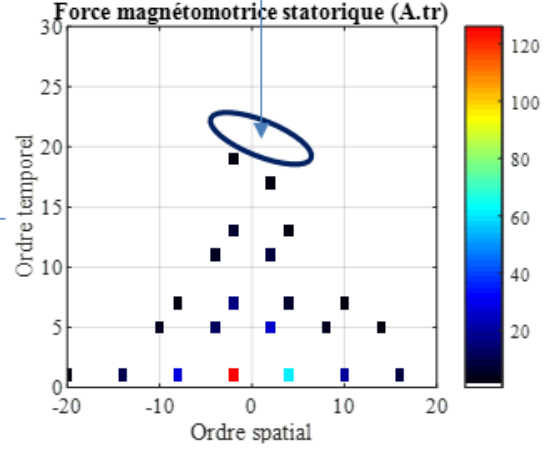
$$\frac{\mathcal{F}[B_{rad}(t, \theta)^2]}{2\mu_0}$$



• Utilisation du produit de convolution sur le modèle « FMM-Pe » :



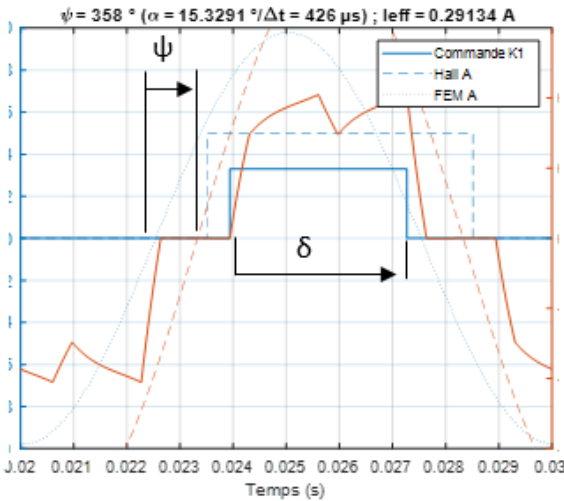
$$\mathcal{F}[F_{mm}(t, \theta)] \otimes \mathcal{F}[\Lambda_e(t, \theta)]$$



# Réduction du bruit d'actionneurs électriques pour la domotique : action sur la commande

> Bilans : • Paramètres de commande influençant les harmoniques de courant :

- Angle de charge  $\psi$  (angle entre E et I)
- Angle de conduction (durée de conduction des transistors)



• Mesures acoustiques sur moteur seul ( $\delta = 130^\circ/135^\circ, 155^\circ/160^\circ + \Psi = [-15^\circ, 15^\circ]$ )  
• Résultats retenus :

Angle de conduction	Angle de charge	Courant efficace	Réduction du bruit
135°	-10°	+28%	-4,7 dB(A)
155°	-5°	+47%	-4,9 dB(A)

# Michel Hecquet

## Enseignant-Chercheur au laboratoire L2EP

### Centrale Lille

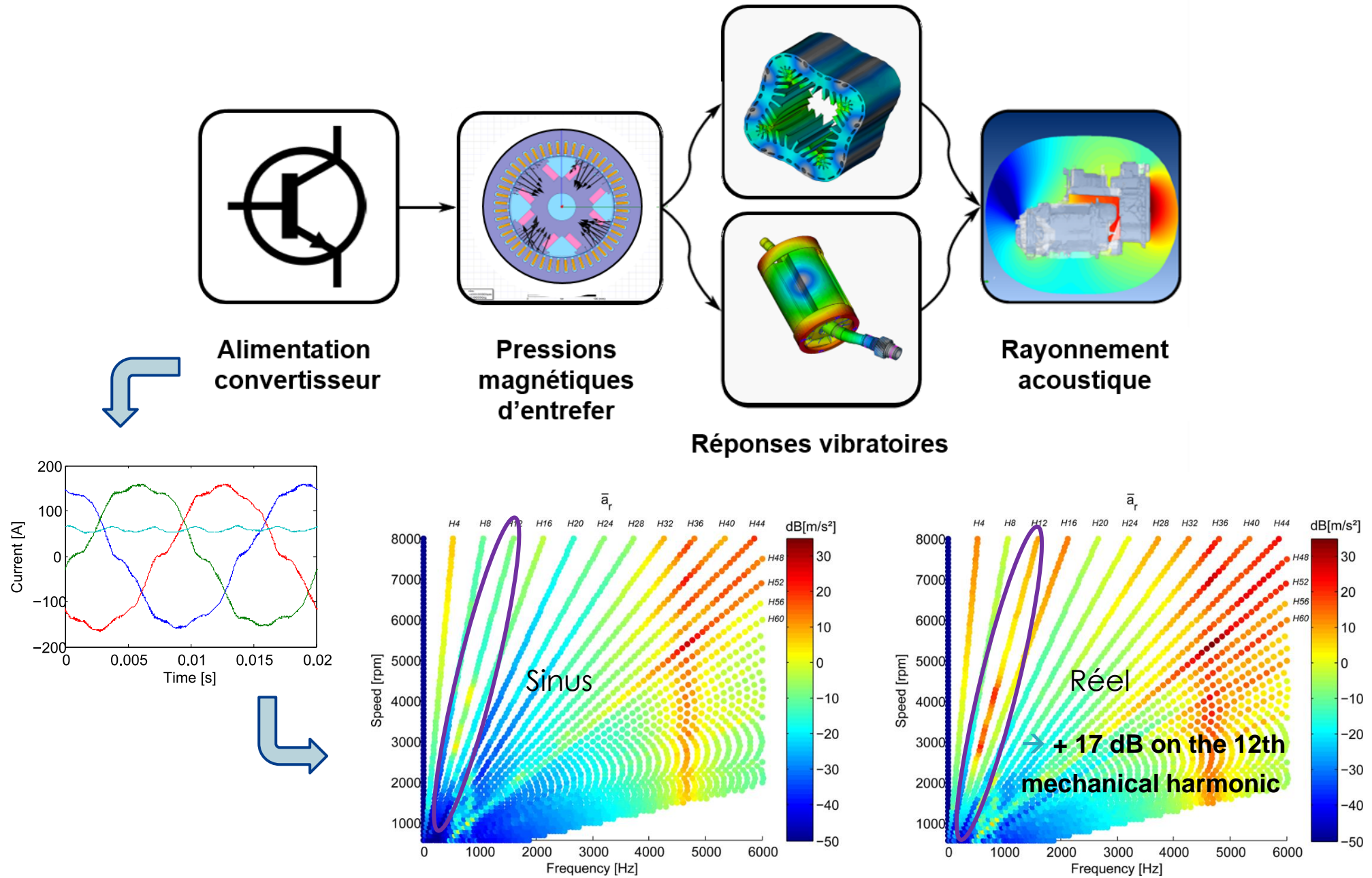
[michel.hecquet@centralelille.fr](mailto:michel.hecquet@centralelille.fr)

[l2ep.univ-lille.fr](http://l2ep.univ-lille.fr)  
[centralelille.fr](http://centralelille.fr)

# Partie 1 - La contrainte bruits et vibrations : modélisation et conception en génie électrique

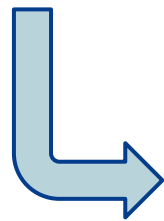
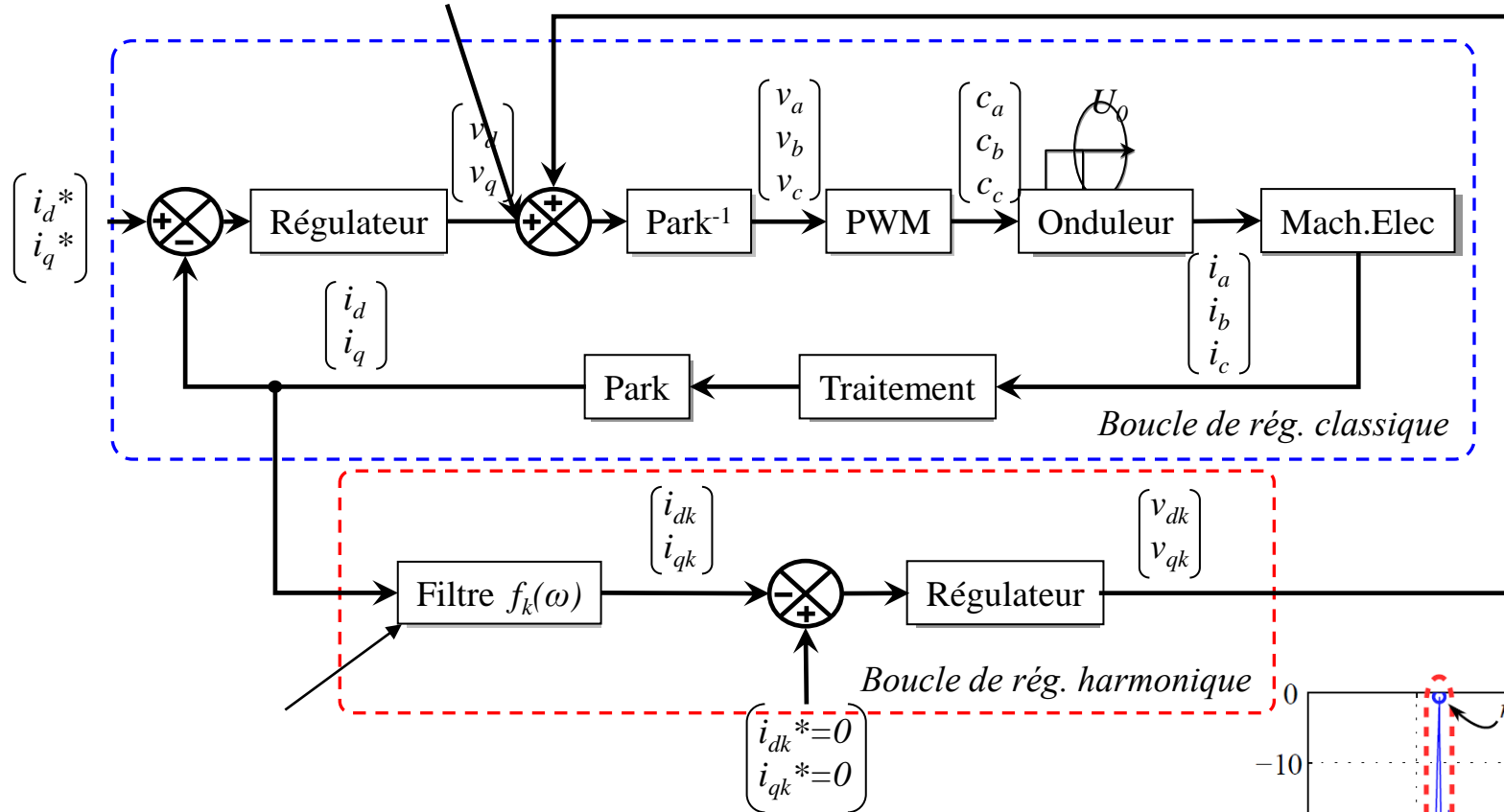
## Etudes vibratoires de systèmes complexes

# Complexité système: alimentation électrique / mécanique

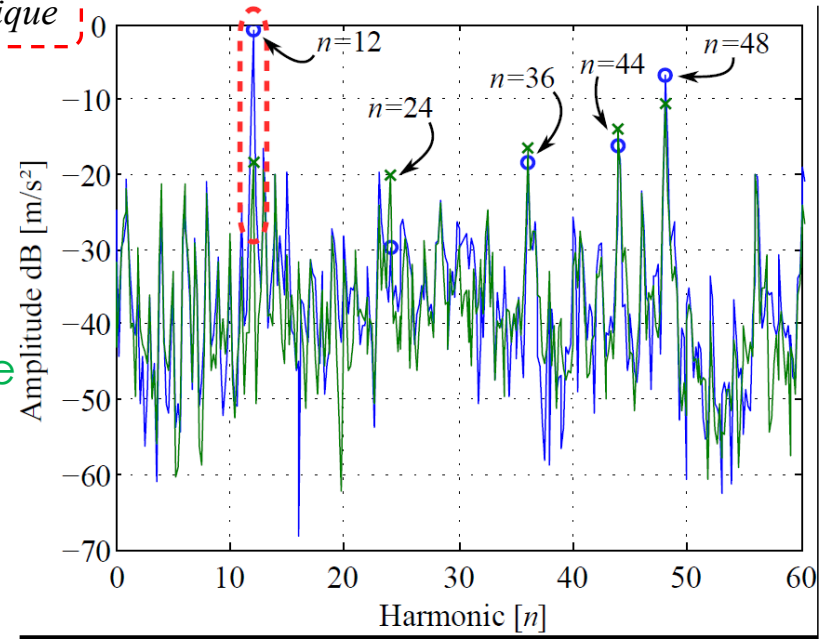




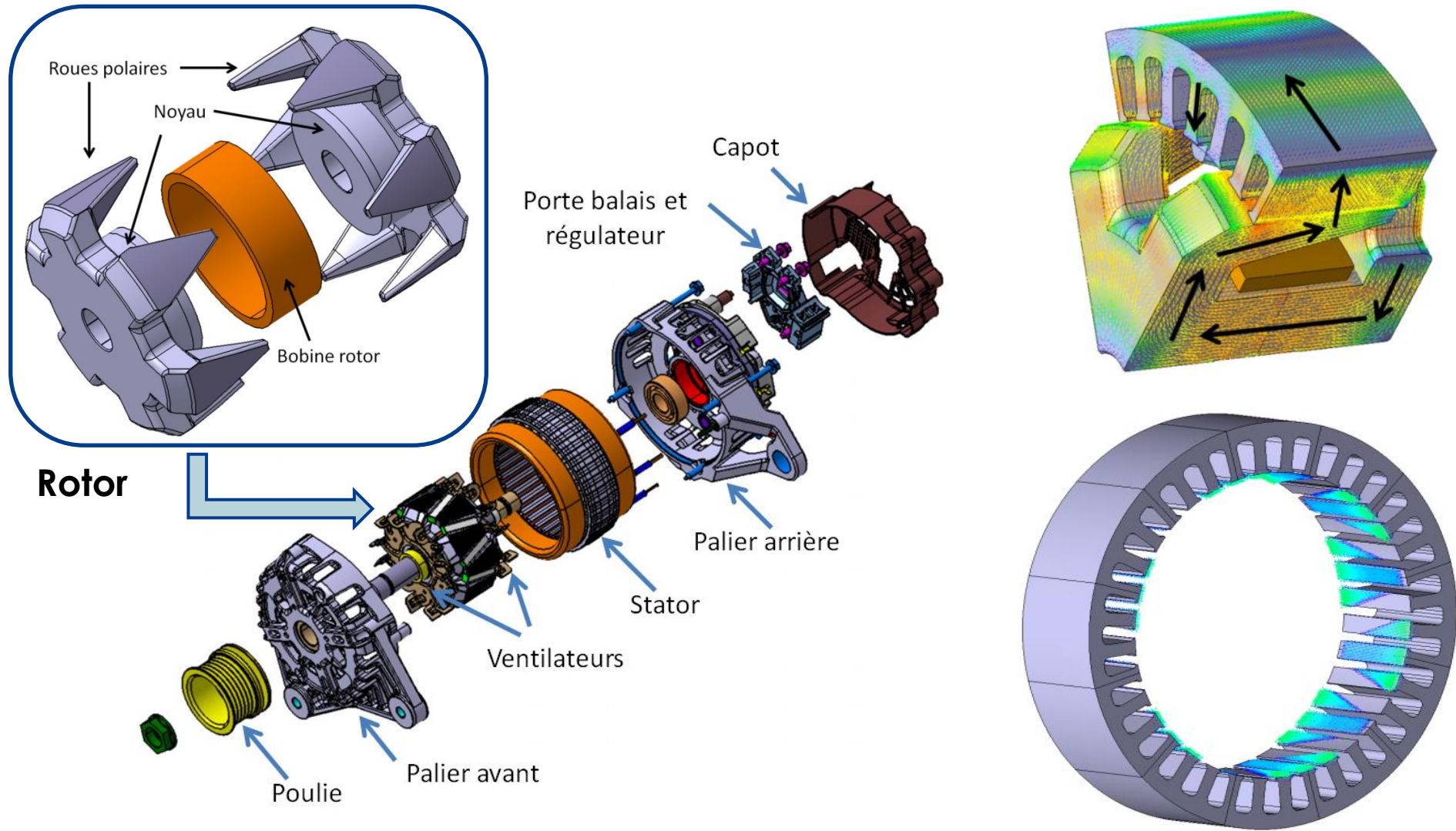
# Traitement des harmoniques basses fréquences



Sans régulation harmonique  
Avec régulation harmonique

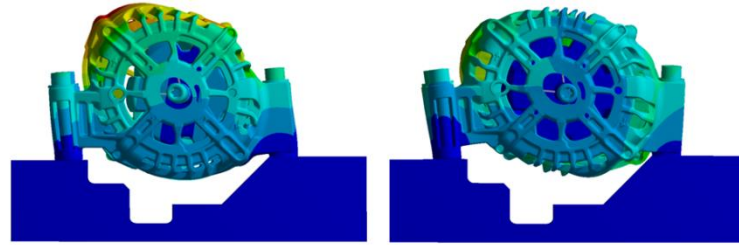


# Spécificités de l'alternateur à griffes



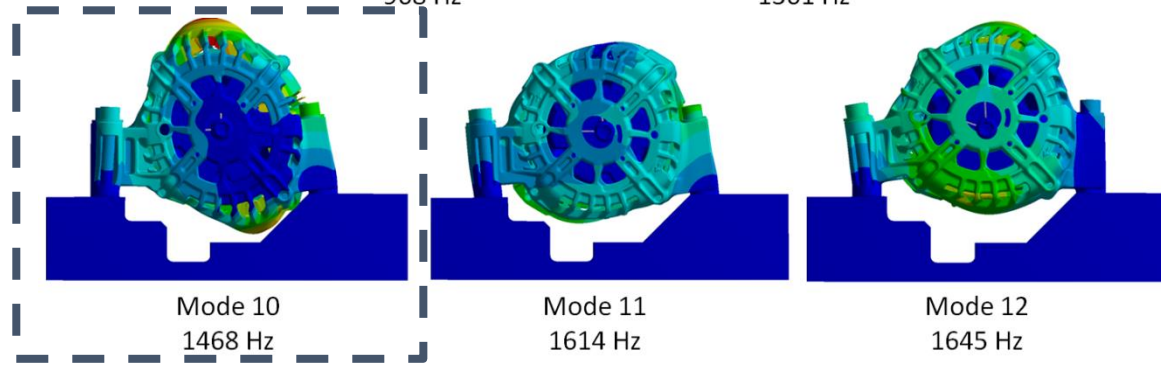
# Modèle mécanique dynamique

Modes simulés



Mode 7  
968 Hz

Mode 9  
1361 Hz



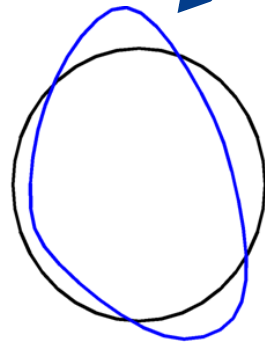
Mode 10  
1468 Hz

Mode 11  
1614 Hz

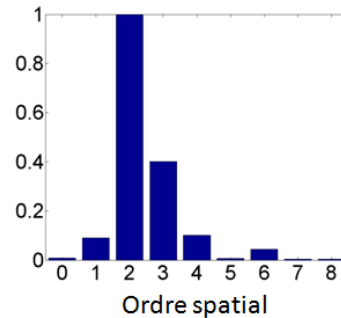
Mode 12  
1645 Hz

Alternateur complet

~ 1500 Hz

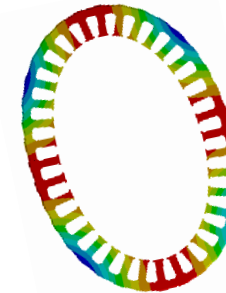


Plusieurs ordres spatiaux

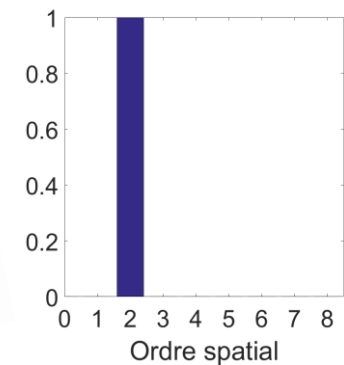


Stator seul (libre-libre)

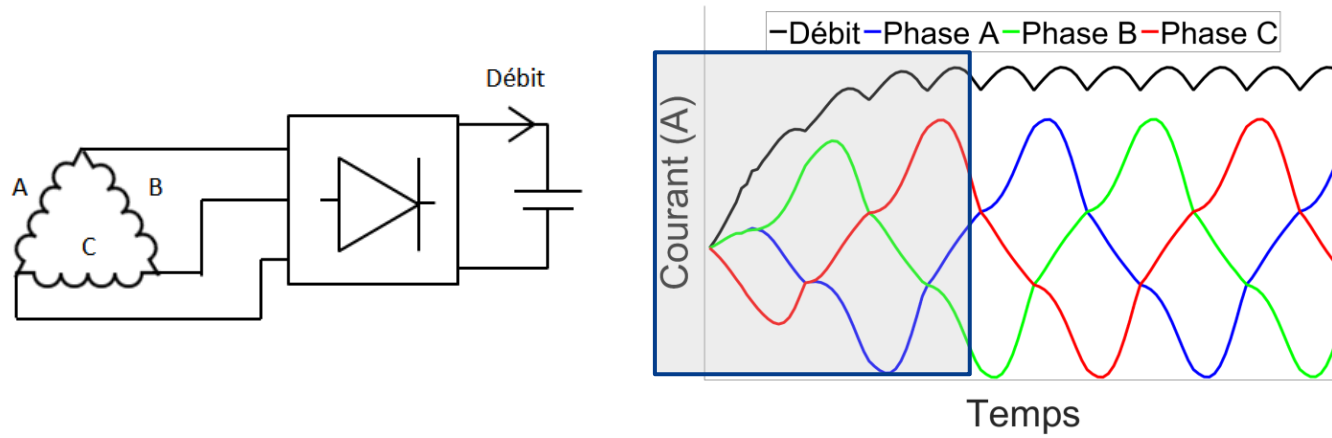
~ 500 Hz



1 ordre spatial



# Couplage étoile / triangle sur alternateur avec redressement

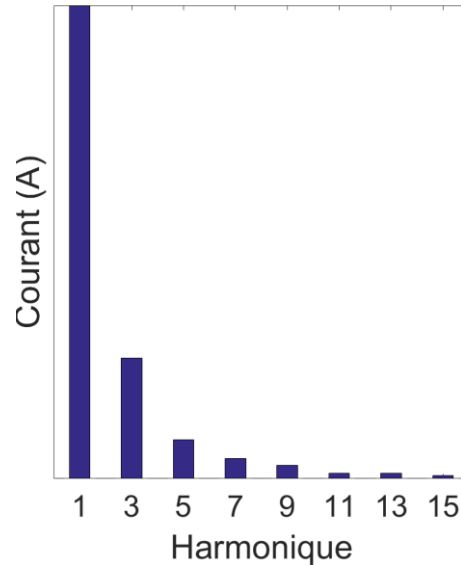
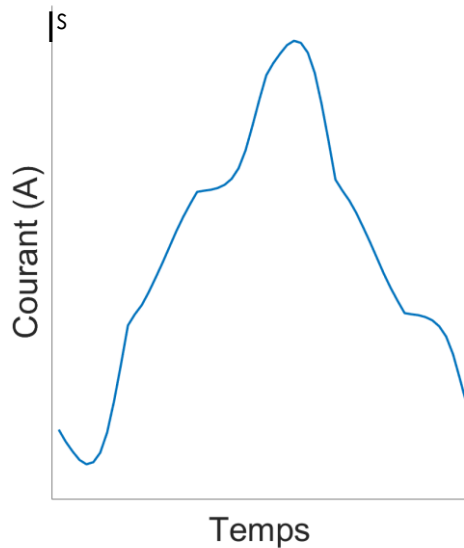


**Couplage triangle**  
Courant circulant : harmonique 3

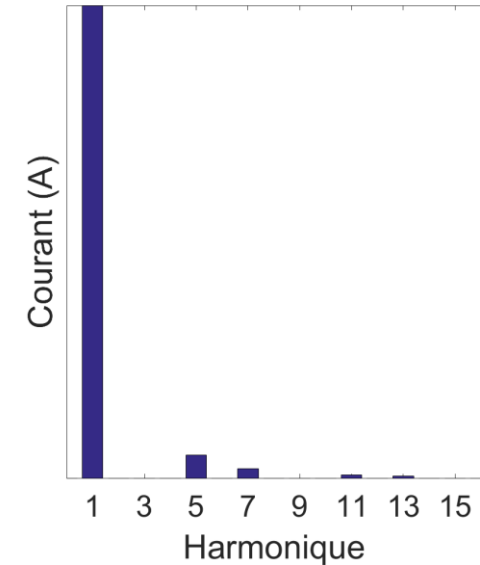
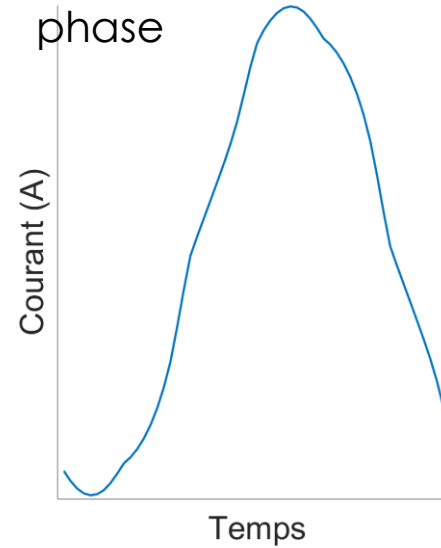


**Couplage étoile**  
Harmoniques multiples de 3 nuls

Courant dans une phase



Courant dans une phase



# Vincent Lanfranchi

## Enseignant-Chercheur au laboratoire Roberval

### Université de Technologie de Compiègne

[vincent.lanfranchi@utc.fr](mailto:vincent.lanfranchi@utc.fr)

[roberval.utc.fr](http://roberval.utc.fr)

[utc.fr](http://utc.fr)

**C'est à vous : Posez vos questions !**

# Partie 2 - Les apports de la vibro-acoustique : monitoring et maintenance des systèmes électriques

## Surveillance non invasive d'un parc de machines de production d'électricité

### Outil ARMONIC : Analyse Rapide des Mesures Non Invasives Couplées

## ➤ Poblématique

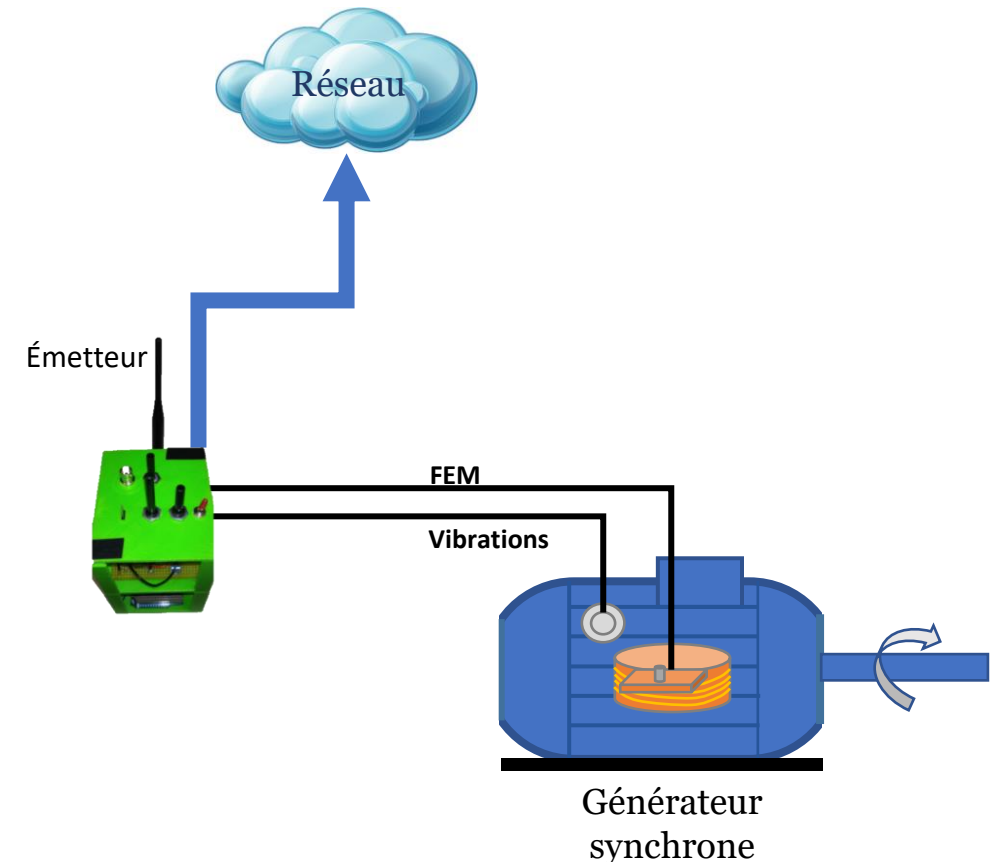
- Les machines du parc hydraulique d'EDF ne sont pas suffisamment instrumentées
- Puissance des machines 30 à 80MW
- Certaines machines tournent avec des défauts internes (court-circuit au rotor)
- Les défaut peuvent causer des disfonctionnement, ou des limitations de production.

## ➤ Solution

- Equiper les centrales d'un outil de surveillance non invasif

## ➤ Collaboration LSEE – EDF R&D pour:

- Définir les spécifications d'une cellule de surveillance
- Définir les paramètres à surveiller sur les grandeurs mesurées
  - ✓ **Vibrations** sur la carcasse
  - ✓ **Champ magnétique** extérieur.



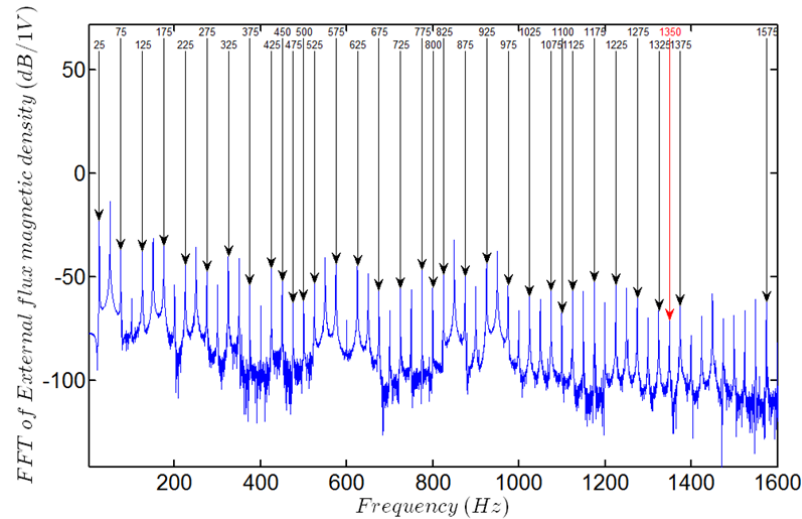


# Résultats sur une petite machine de laboratoire

✓ Cas d'un défaut rotorique

## FFT

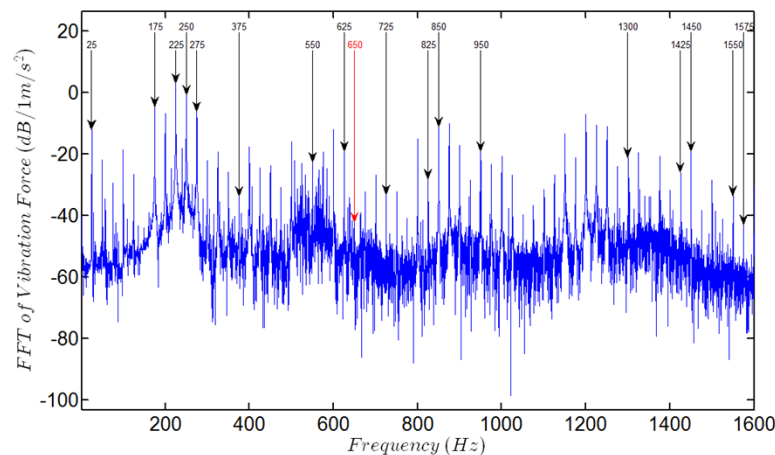
**FEM  
(Champ-B)**



## Classement

#	Frequency(Hz)	Differential(dB)
1	325	33.6
2	775	33.5
3	525	32.6
4	425	31.3
5	225	28.7
6	275	26.1
7	825	25.2
8	1375	24.7
9	675	24.6
10	1100	24.2
11	1125	23.9
12	1225	23.5
13	125	23.4
14	1025	22.8
15	1175	21.7
16	1325	21.7
17	25	21.2
18	450	20.4
19	625	20.3
20	75	19.9

**Vibration**

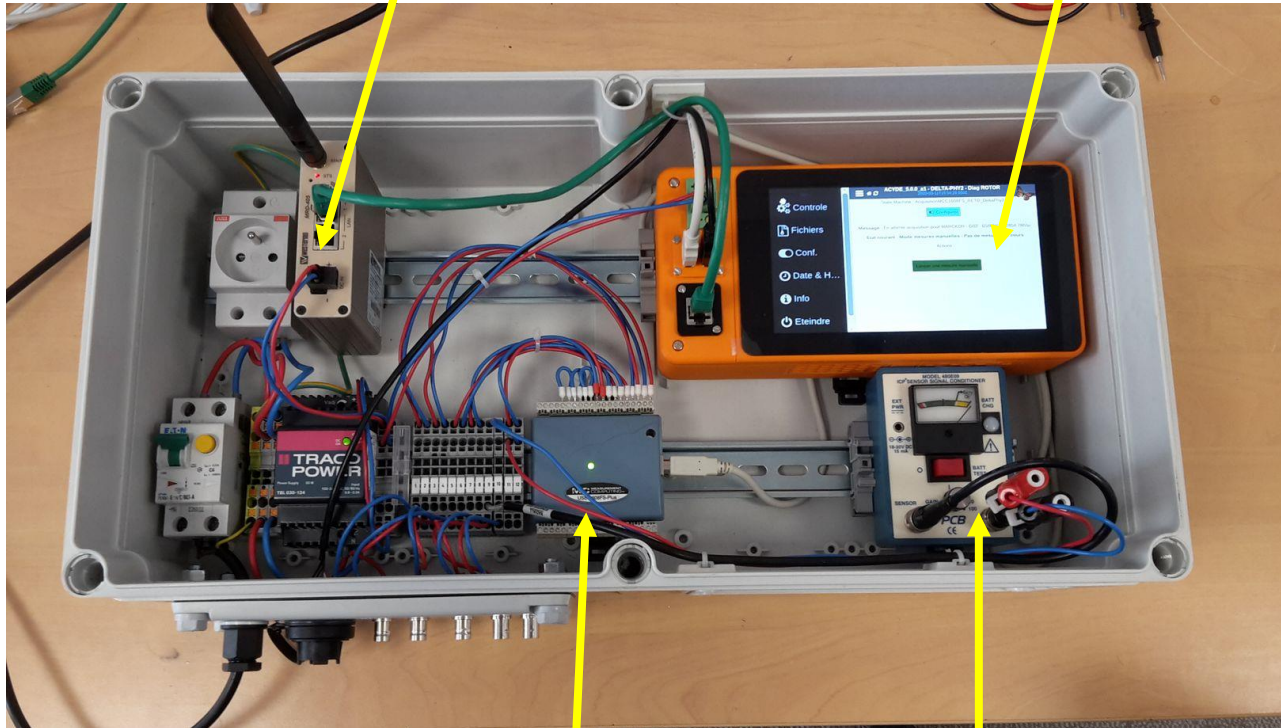


#	Frequency(Hz)	Differential(dB)
1	225	27.7
2	850	23.9
3	1450	22.9
4	275	20.3
5	250	18.8
6	625	18.5
7	25	16.2
8	175	15.0
9	825	14.9
10	1425	14.7
11	375	14.6
12	950	12.6
13	650	-11.8
14	725	11.7
15	1575	11.5
16	1300	11.1
17	550	10.9
18	1550	10.5
19	325	9.9
20	150	-9.4

# Boitier de surveillance

Module communication

Raspberry



**Module communication** : transmission GSM ou sortie internet filaire. Joue le rôle de passerelle informatique entre le coffret et les serveurs informatiques EDF tout en garantissant la sécurité informatique.

**Carte d'acquisition** : 16 bits, échantillonnage à 4kHz

**Raspberry** : 4Go de mémoire. Programme des acquisition sur 100s, à des moments prédéterminés et envoie directement les données au module de communication

Carte d'acquisition

Conditionneur de signal

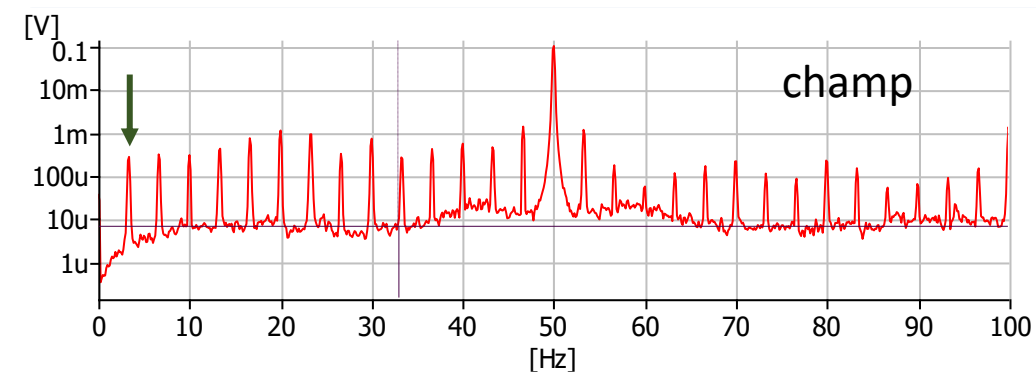
## Phase de test : mesure sur site EDF – centrale hydraulique



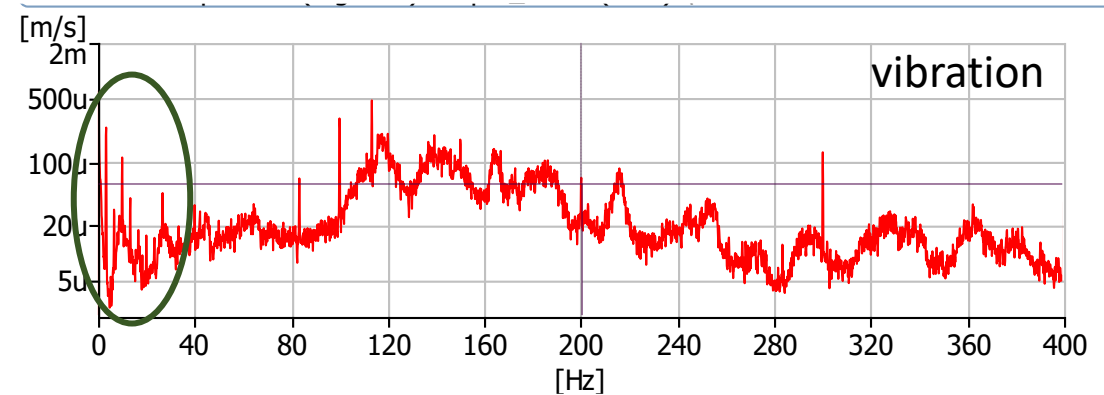
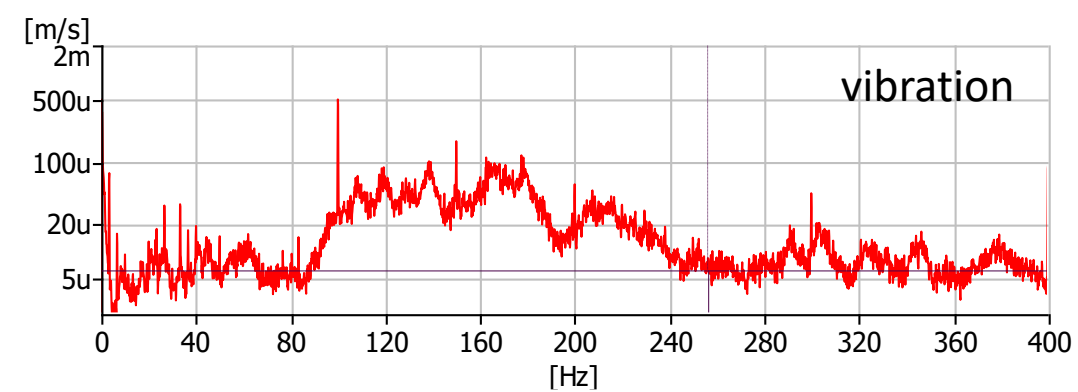
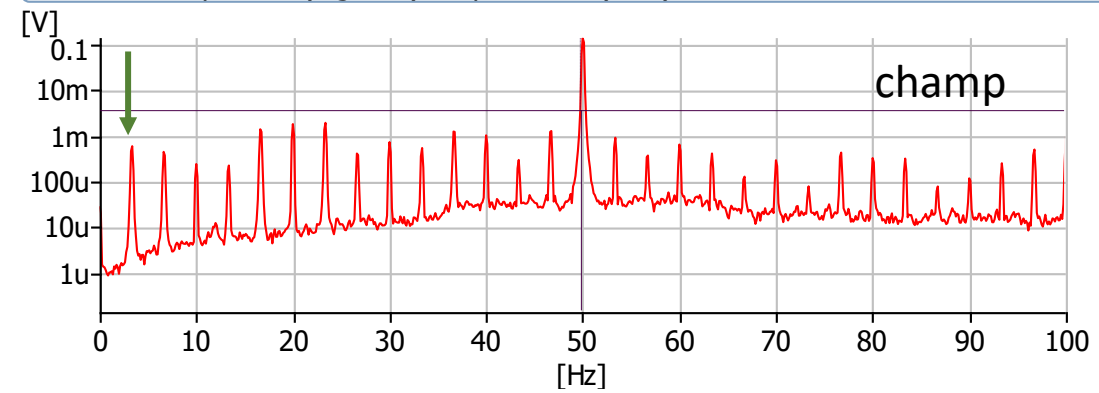
- Le site comprend 3 groupes de 60MW, 30 pôles, 200trs/min
- Un des groupes présente un défaut de court circuit au rotor.

# Résultats pour un point de fonctionnement donné

## Groupe sain



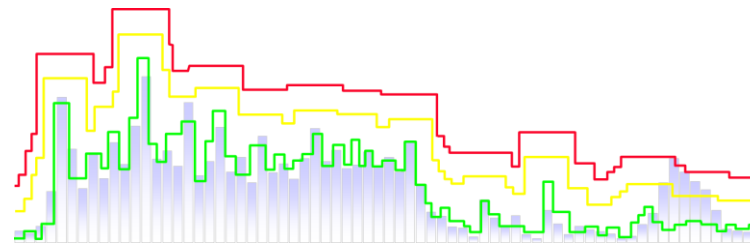
## Groupe en défaut



→ Les analyses de vibration et de champ peuvent être fusionnées

## ❑ Installation ponctuelle

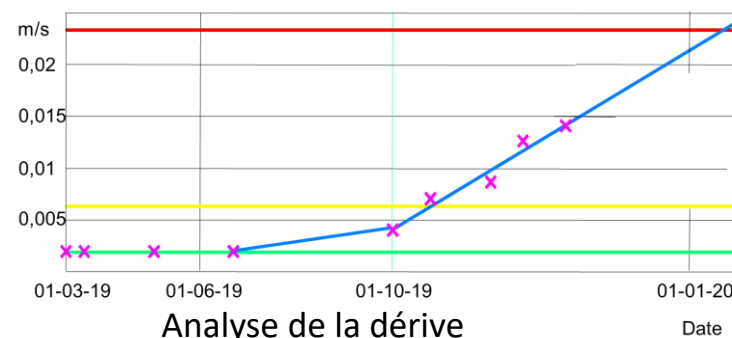
- Le boitier est installé sur une durée déterminée
- Lors de la surveillance, il faut couvrir un ensemble de points de fonctionnement (P,Q)
- On compare les spectres avec un référence saine.



Analyse par gabarit

## ❑ Installation en permanence

- A terme le boitier est installé en permanence et suit la dérive d'une raie sensible
- Avantage : indépendant de la position du capteur



Analyse de la dérive

**Raphaël Romary**  
**Enseignant-Chercheur au laboratoire LSEE**  
**Université d'Artois**

[raphael.romary@univ-artois.fr](mailto:raphael.romary@univ-artois.fr)

[lsee.univ-artois.fr](http://lsee.univ-artois.fr)  
[univ-artois.fr](http://univ-artois.fr)

# Partie 2 - Les apports de la vibro-acoustique : monitoring et maintenance des systèmes électriques

## Capteurs connectés pour le suivi d'équipements électriques



Nicolas Côté, Cofondateur de Wavely



# Nicolas Côté

## Cofondateur de Wavely

nicolas.cote@wavely.fr  
+33 (0)6.28.65.56.41

wavely.fr  
wavelypredict.com



**C'est à vous : Posez vos questions !**

**Michel Hecquet**  
Professeur au Laboratoire L2EP  
Centrale Lille

[michel.hecquet@centralelille.fr](mailto:michel.hecquet@centralelille.fr)

[l2ep.univ-lille.fr](http://l2ep.univ-lille.fr)  
[centralelille.fr](http://centralelille.fr)

**Laura Burgaud**  
Chargée de mission au pôle MEDEE

[lburgaud@pole-medee.com](mailto:lburgaud@pole-medee.com)

[pole-medee.com](http://pole-medee.com)