

# De la conception d'un capteur intégré, à la simulation du comportement dynamique macroscopique de son environnement

Une approche de la mécatronique dans les systèmes mettant en œuvre  
une électronique de puissance

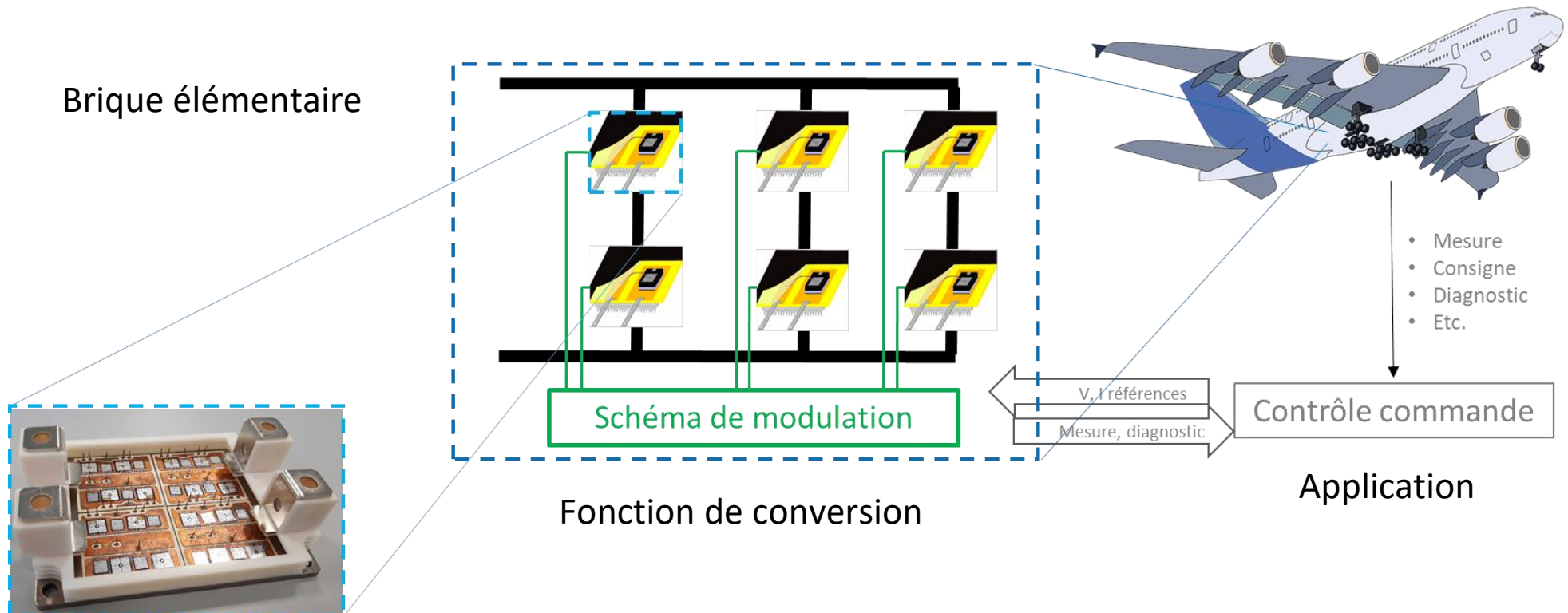
Par Baptiste Trajin et Paul-Etienne Vidal  
LGP, ENIT-INP-UFTMP

e-ACE<sup>2</sup>: Design an electrical energy conversion chain for its all life cycle: from its materials, its management, its diagnosis, its experimental characterization and its digital twin, to its end of life.

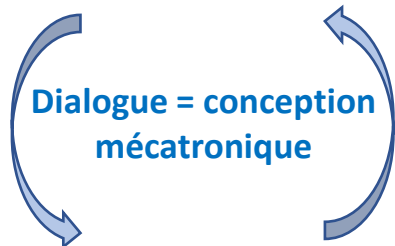
Module de puissance

Convertisseur

Système



e-ACE<sup>2</sup>: Design an electrical energy conversion chain for its all life cycle: from its materials, its management, its diagnosis, its experimental characterization and its digital twin, to its end of life.



- Conception d'un capteur intégré et de sa chaîne de mesure
  - Projet AM:PM (MM) DGA RAPID: 
- Utilisation de la mesure à des fins de surveillance au sein d'un environnement complexe
  - Compilation de résultats de plusieurs projets, PIA, Région, CIFRE-ANRT et internes.

# Additive Manufactured high voltage high current diode-less SiC smart Power Module

**LGP ENIT**

Etude et conception d'un capteur de courant intégré

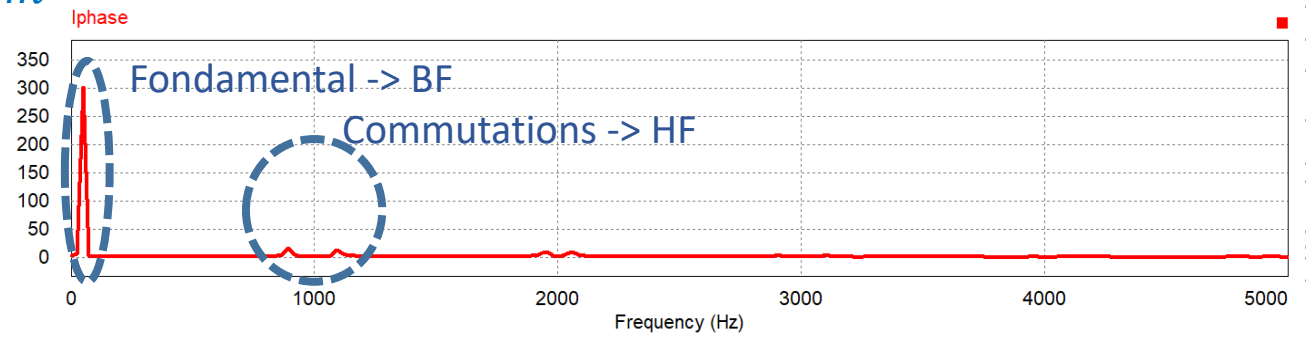
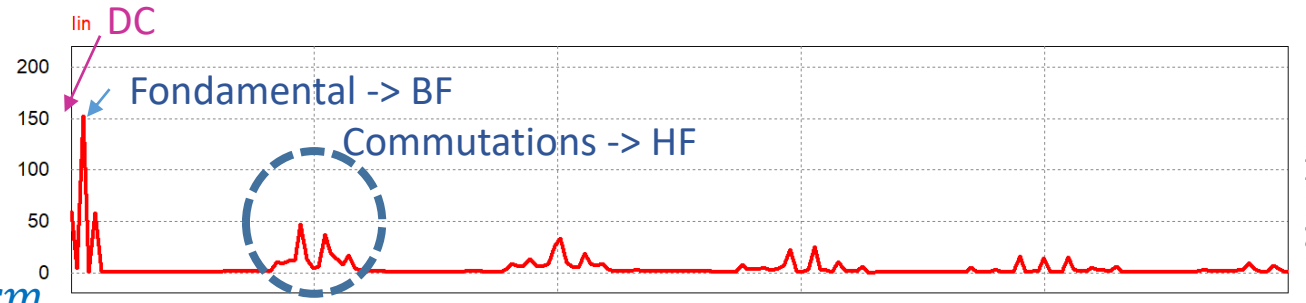
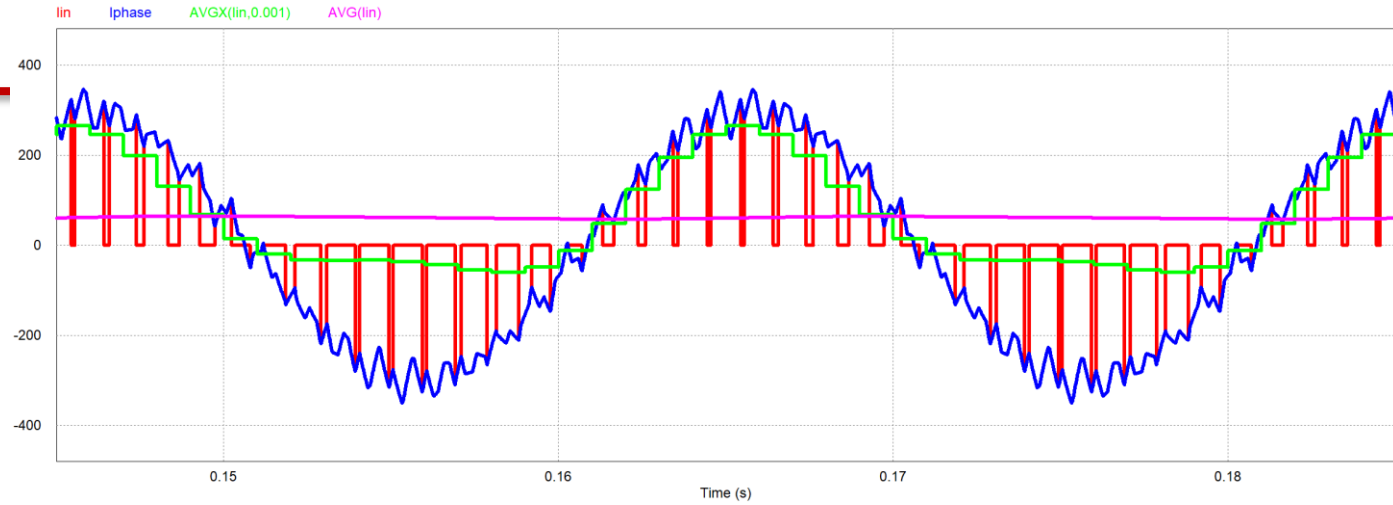
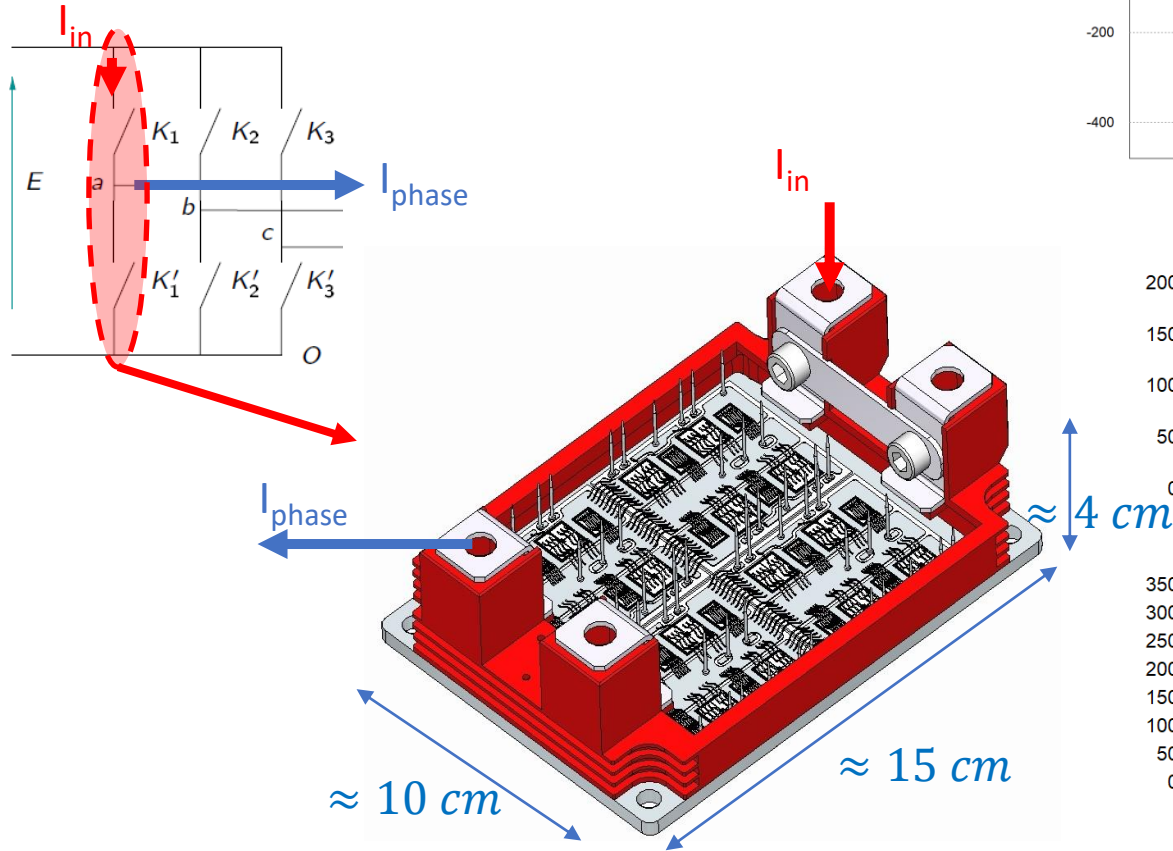
*Mise en œuvre et caractérisations préliminaires*

14/04/2022

Veronika GAVRILENKO & Khamis YOUSOUF (Post-docs) et Paul-Etienne VIDAL (PU)

# Les courants à mesurer

- Illustration de la fonction onduleur
  - 1 kHz – 800 V – 300 A – PWM (50 Hz)
- Courants macros (mode différentiel) :  $I_{in}$  et  $I_{phase}$



# Les objectifs et verrous pour un capteur de courant intégré

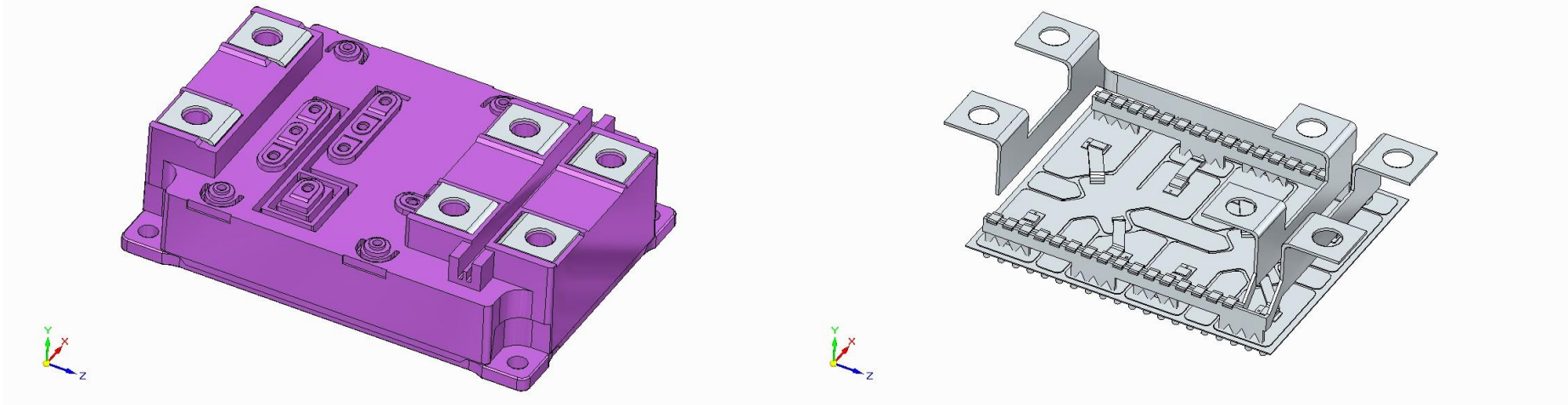
## ■ Problèmes

- Bande passante BF et HF
- Sensibilité
- Intégration

- En lien avec le CDC : 3,3 kV – 500A –  $f > 5$  kHz

## ■ Compromis

- Géométrie et matériaux
- Circuit de conditionnement
- Courant mesuré :  $I_{in}$  et/ou  $I_{phase}$



Exemple de vues d'un boîtier « type » du module de puissance envisagé

## Dimensionnement

### Analyse de l'état de l'art

- Analyse de performances
- Géométries et Dimensions
- Intégration

### Simulation de champs 3D

## Fabrication

### CAO 3D

### Impression 3D(tore)

### Bobinage Cuivre

## Modélisation et caractérisation

### Mise en place modèle

### Extraction paramètres

### Performances capteur

### Comparaison simulation / expérimentation

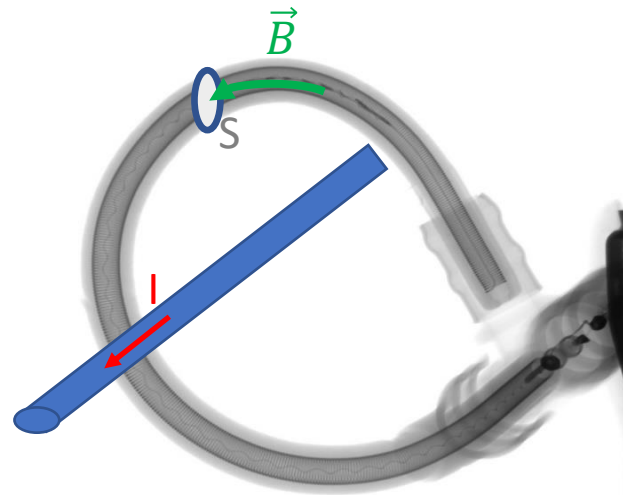
# Boucle de Rogowski

Cahier de charge  
Sensibilité 1 mV/A  
Bande passante  $\approx 1 \text{ Hz}$  à  $\approx 10 \text{ MHz}$

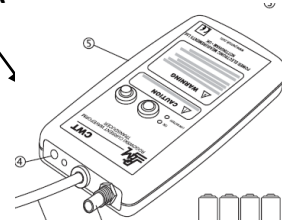


Référence : CWT6R (PEM)  
Sensibilité 5 mV/A  
Bande passante 1 Hz à 16 MHz

Vue et principe de mesure d'une sonde de Rogowski



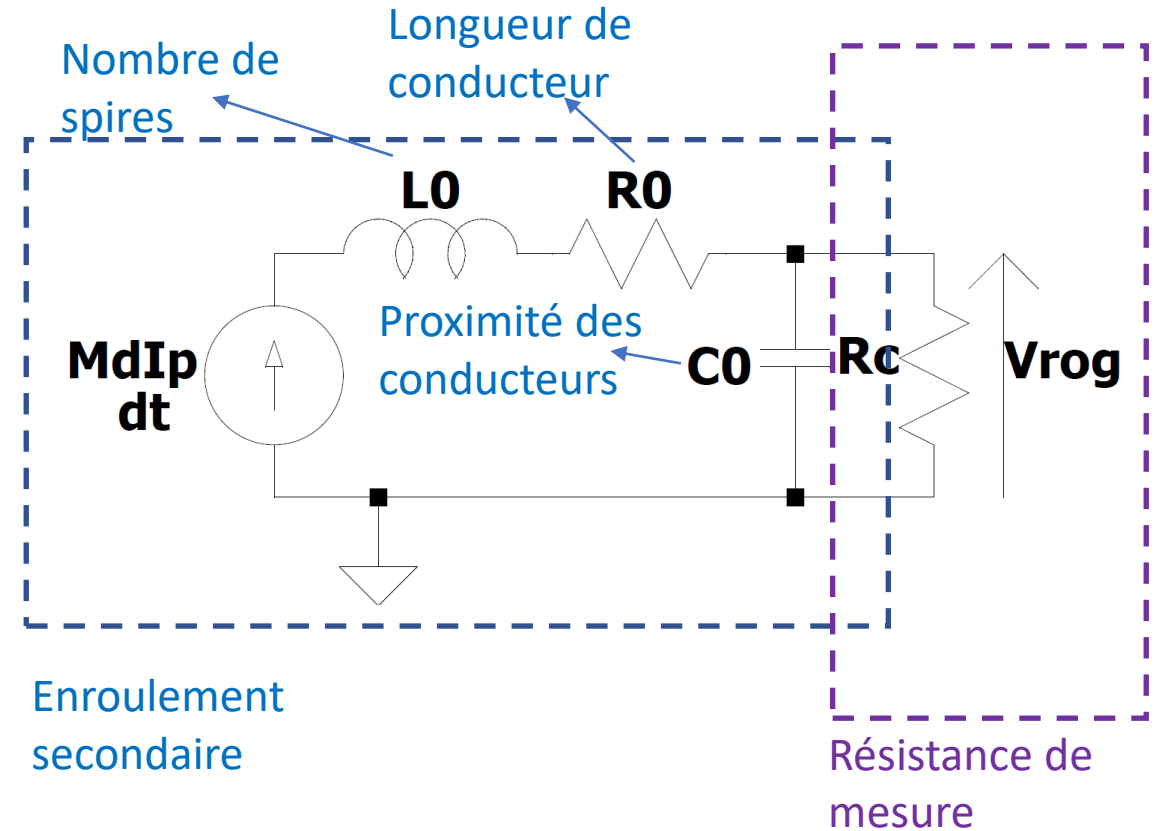
Vue d'une boucle de Rogowski CWT3R aux rayons X (réalisée à Primes)



INTEGRATOR BOX DIMENSIONS

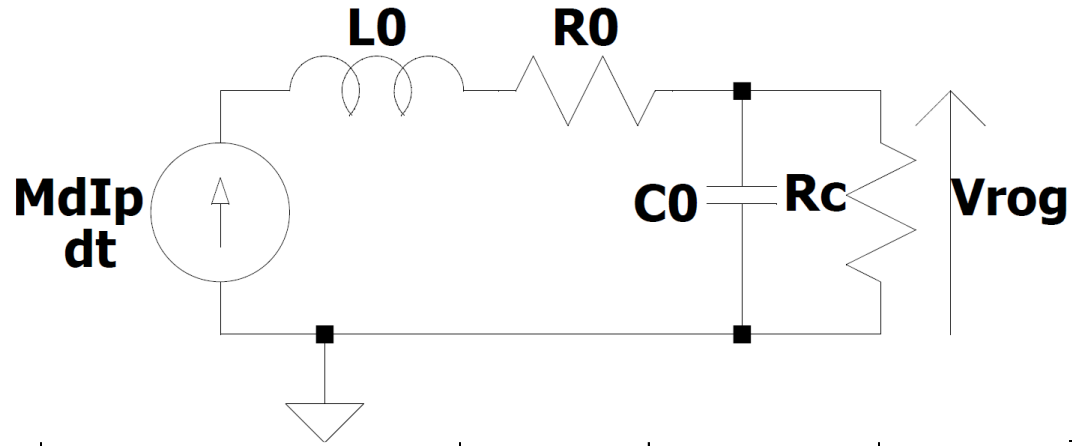
H = 183mm, W = 93mm, D = 32mm

Modèle de comportement de l'enroulement secondaire



# Analyse de performances [1-3]

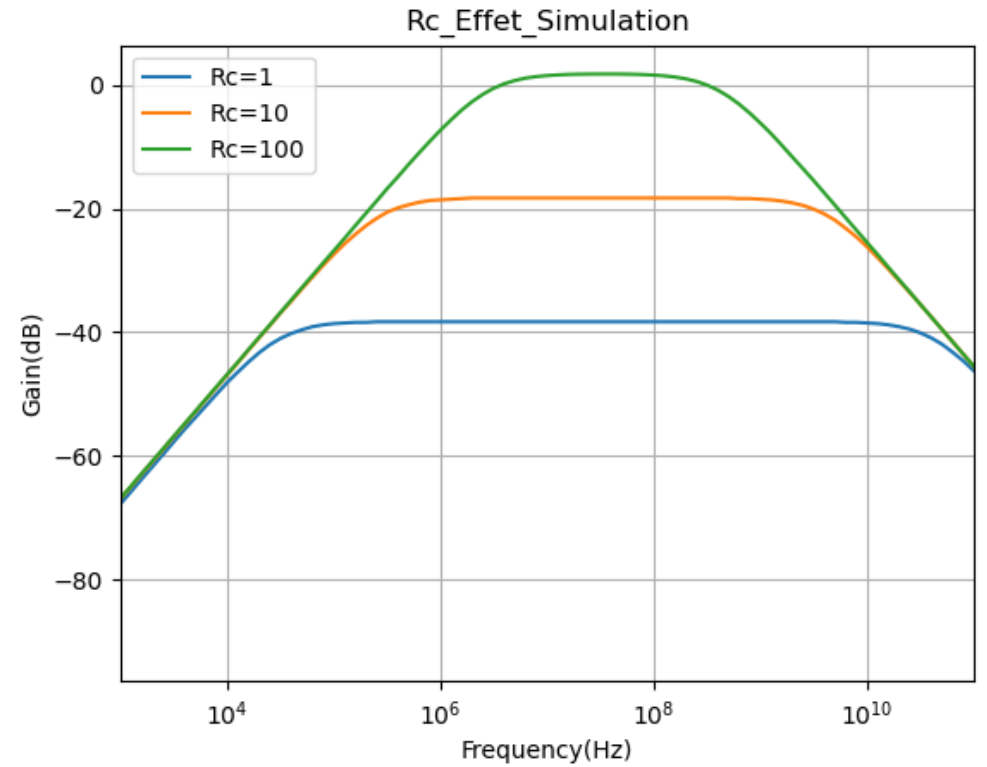
$$T(s) = \frac{Ms}{L_0 C_0 s^2 + \left( R_0 C_0 + \frac{L_0}{R_c} \right) s + 1 + \frac{R_0}{R_c}}$$

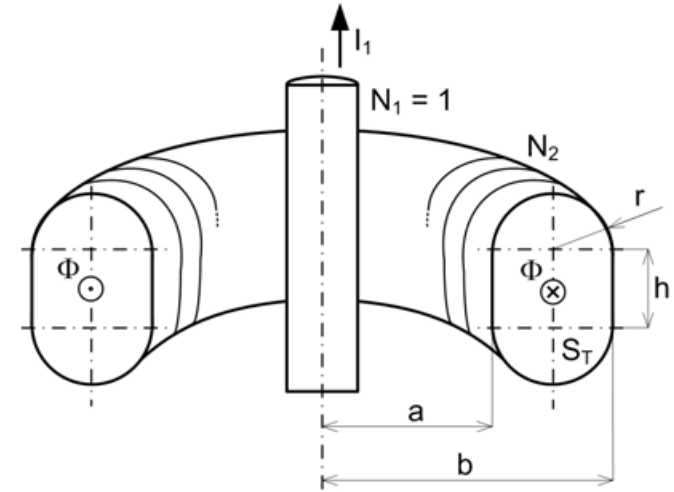
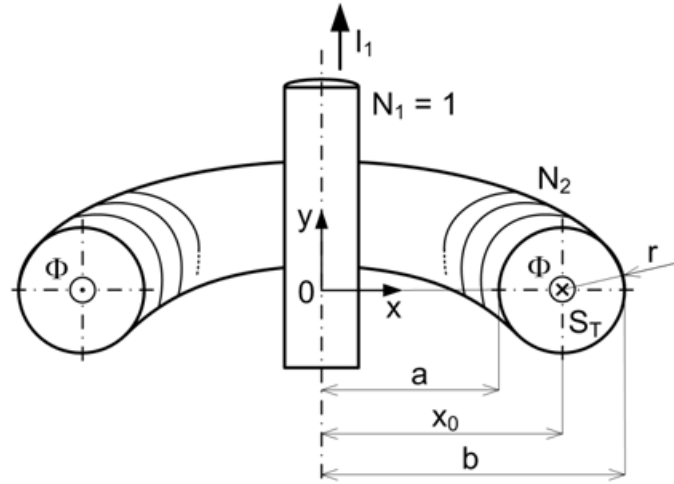
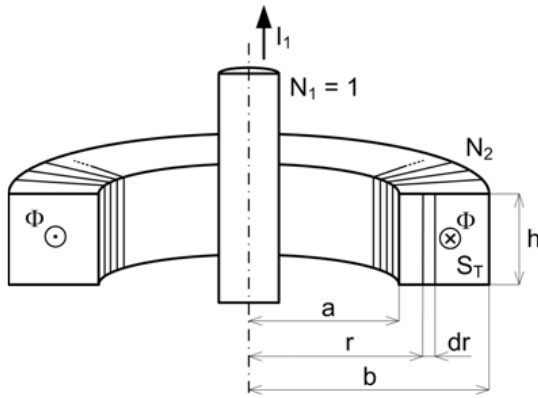


		BW	G
L0(N)	↘	↔	↗
	↗	↔	↘
Rc	↘	↔	↗
	↗	↔	↘
C0	↘	↔	-
	↗	↔	-

$$G(dB) \cong 20 * \log g \left( \frac{R_c}{N} \right)$$

$$BW = f_H - f_B = \frac{1}{2\pi R_c C_0} - \frac{1}{2\pi L_0}$$





$$M_r = \frac{\mu_0 N_2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_C = \frac{\mu_0 N_2}{2} (\sqrt{b} - \sqrt{a})^2$$

$$M_O = \frac{\mu_0 N_2}{2} \left( \frac{h}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + b + a - 2\sqrt{ab} \right)$$

$$S_r = (b - a) * h$$

$$S_C = \frac{\pi}{4} (b - a)^2$$

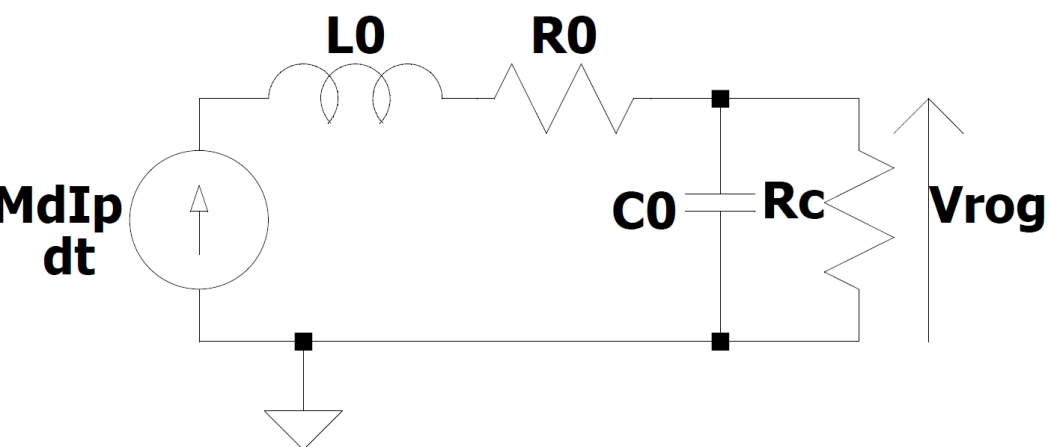
$$S_O = \frac{\pi}{4} (b - a)^2 + (b - a) * h$$

$$BW = f_H - f_B = \frac{1}{2\pi R_c C_2} - \frac{1}{2\pi L_0} R_c$$

$$\rightarrow L_0 = NM \rightarrow$$

- Si b, a fixes : géométrie ovale => M max
- Si S fixe : géométrie rectangle => M max

# Chaine de conditionnement : intégration



$$V_{rog} \cong M \frac{dI_p}{dt}$$

Pourquoi?

Comment faire?

État de l'art

+ reverse engineering CWT6 (PEM)

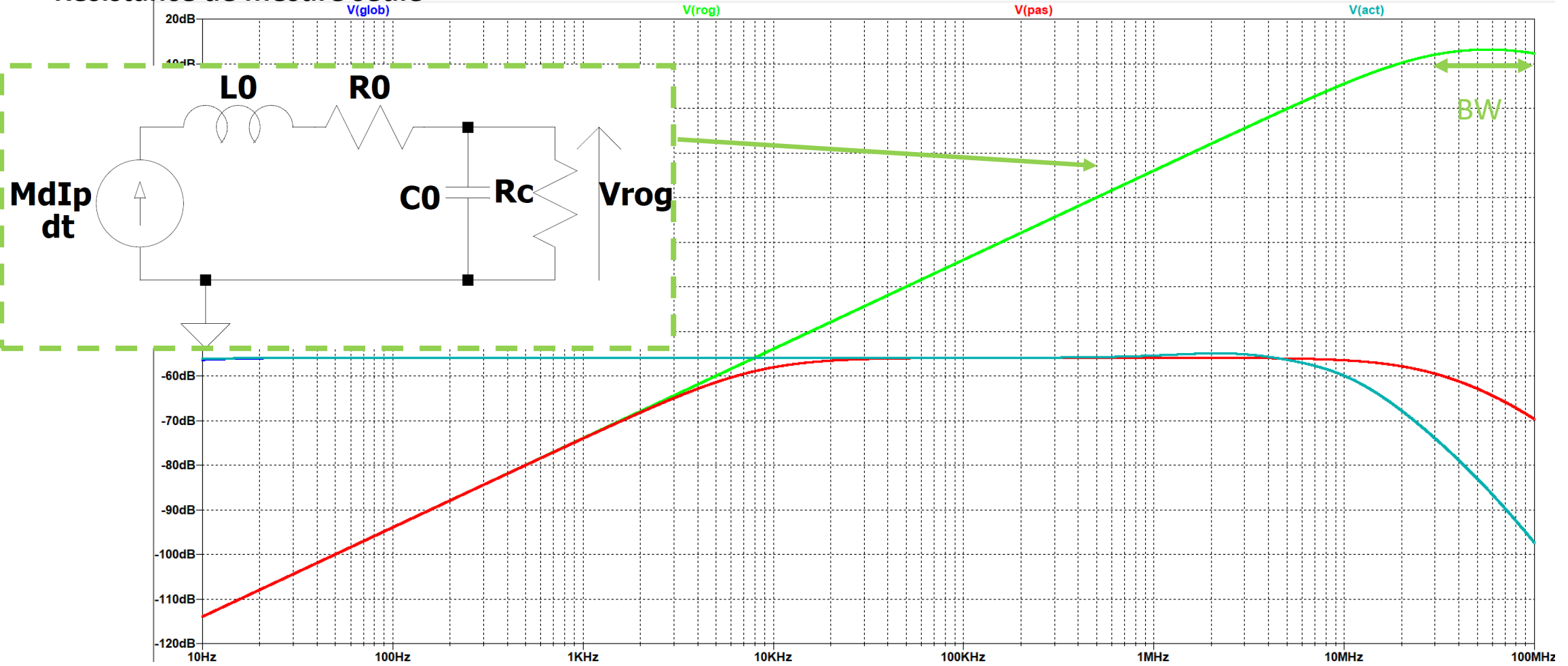
Intégrateur Passif

Intégrateur Passif et actif

Intégrateur Passif-Actif-Passif

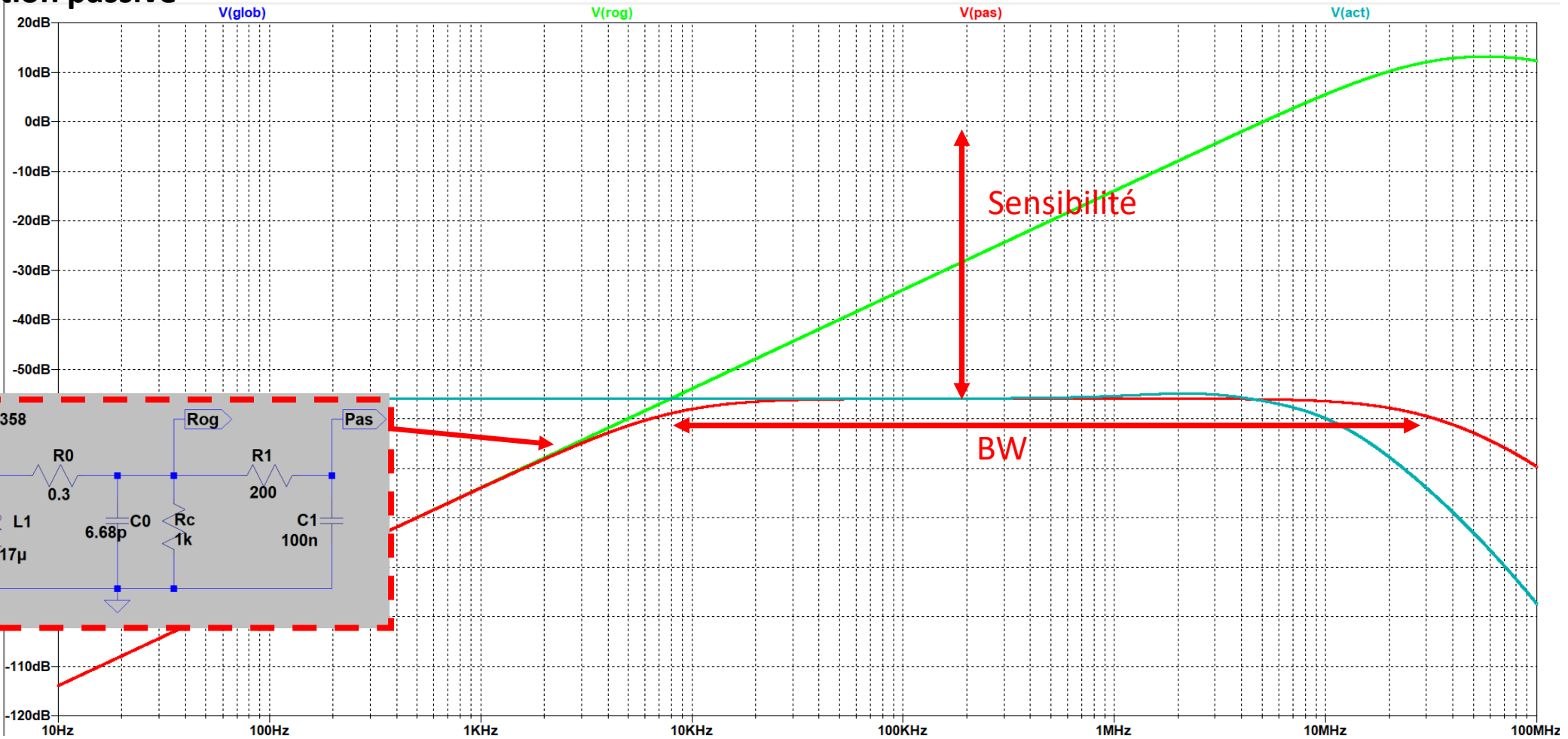
# Influence de la chaine de conditionnement

## Résistance de mesure seule

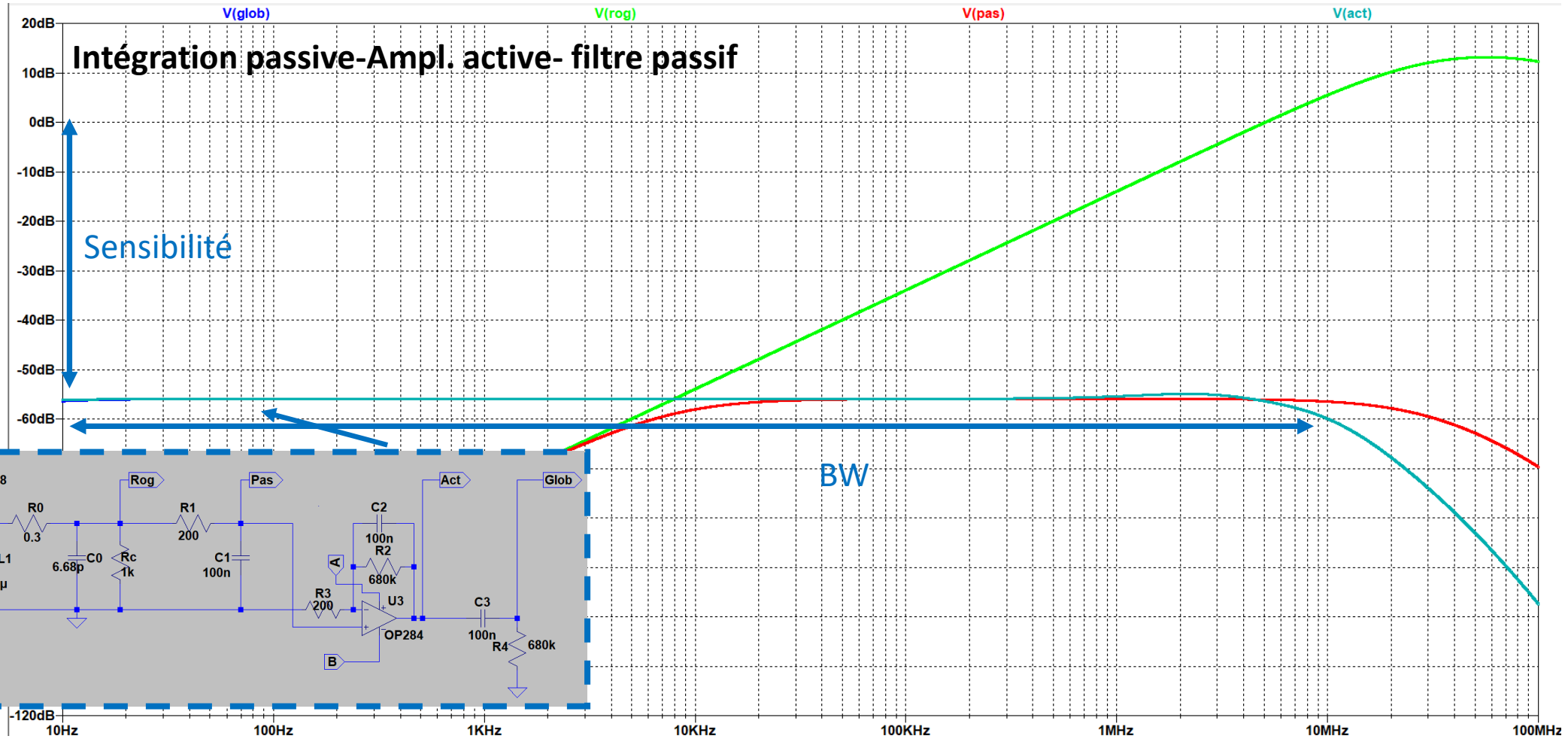


# Influence de la chaine de conditionnement

## Intégration passive



# Influence de la chaine de conditionnement



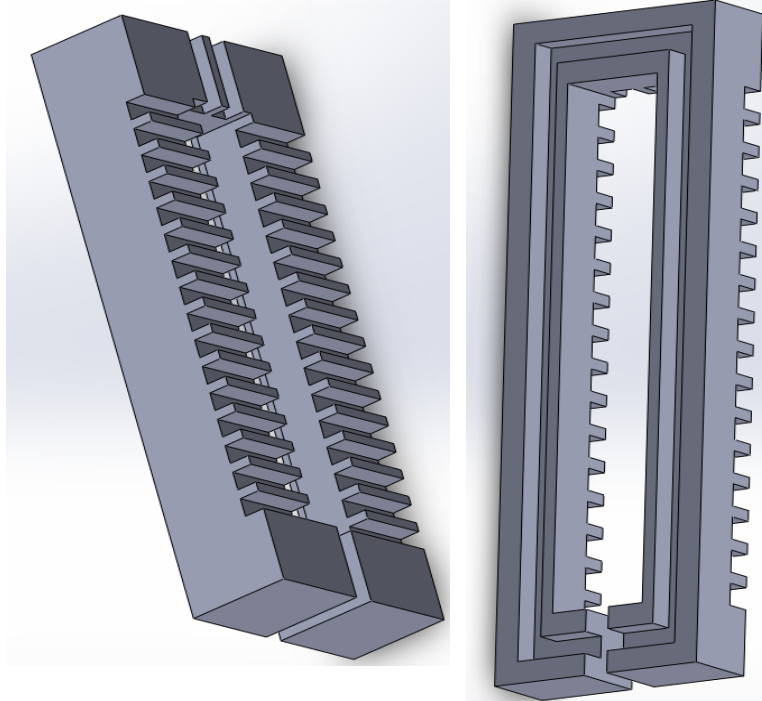
# Fabrication

## Dimensionnement

a(mm)	b(mm)	h(mm)	$N_2$	S(mm <sup>2</sup> )
4	11	5	35	44

## Design 3D

## Cavité pour conducteur central

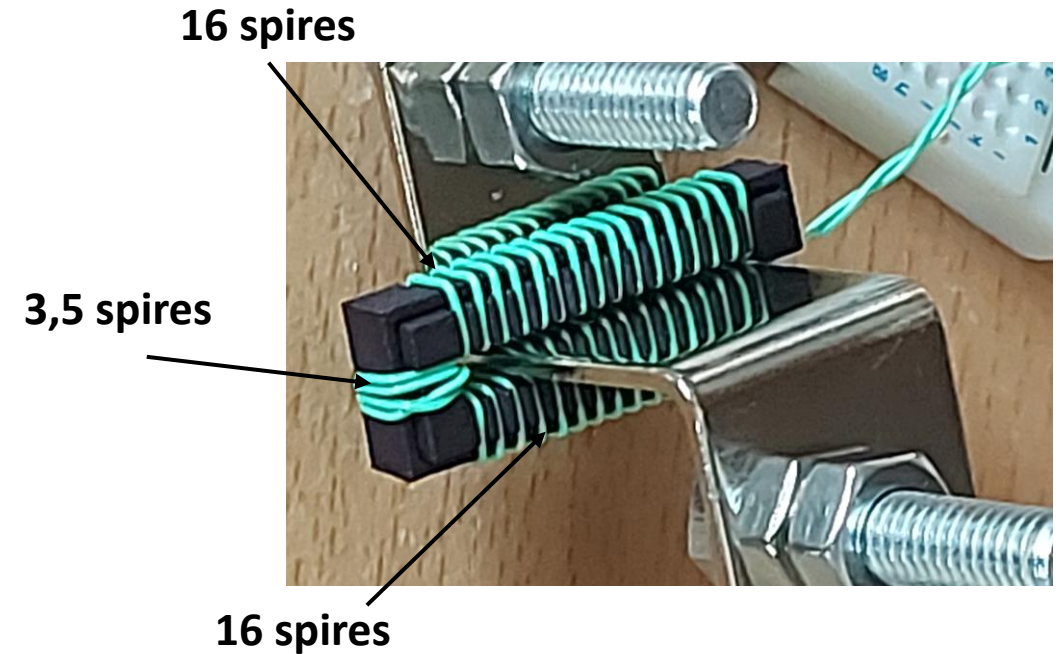


Pièce externe

Pièce interne

Rainure conducteurs extérieurs

## Impression 3D et bobinage



16 spires

3,5 spires

16 spires

Fixation par clip: bobinage et débobinage facilité

# Résultats expérimentaux - Caractérisation fréquentielle

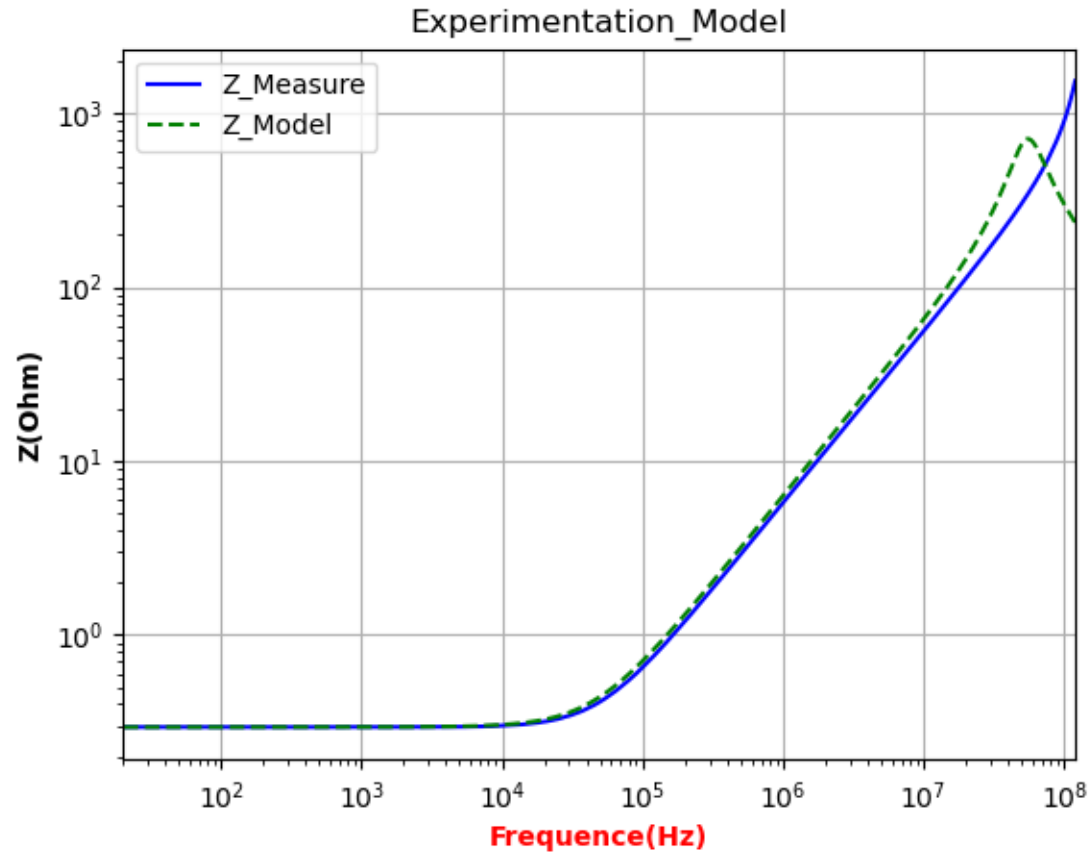
Impédance  $Z$

$C0$

$R0$

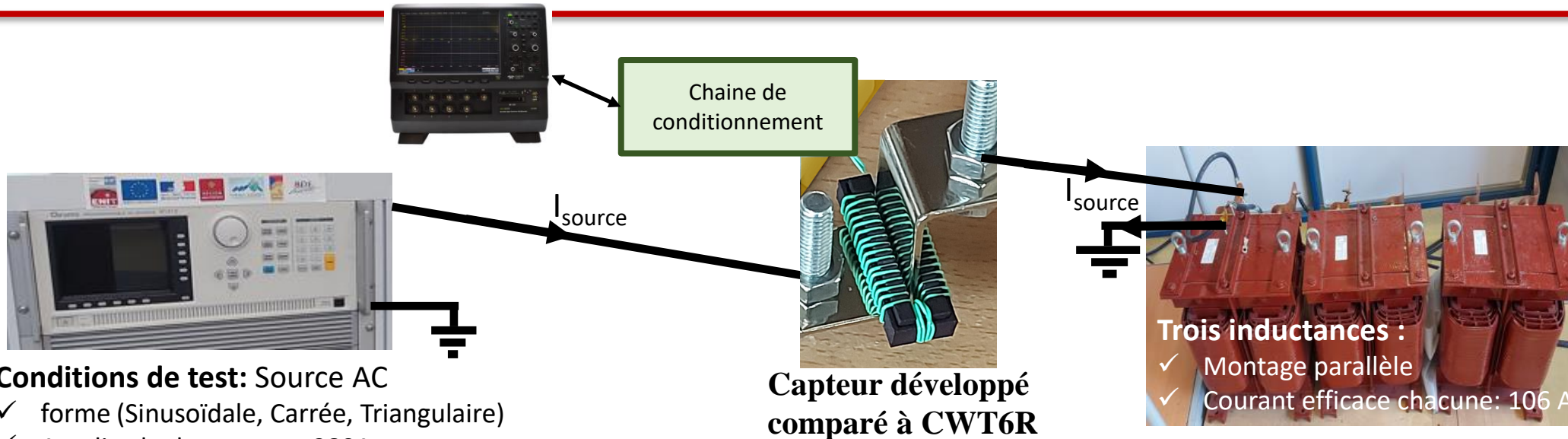
$L0$

Model parameters  
 $R0, L0, C0$



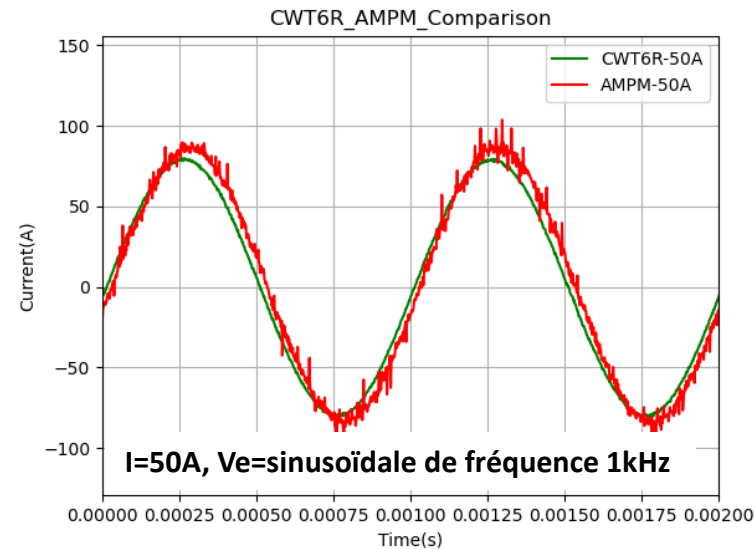
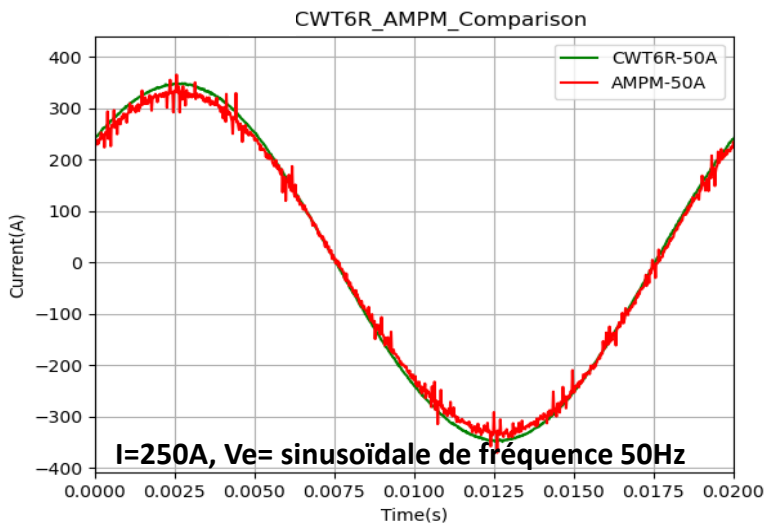
$$R0 = f(R_{dc}, f),$$
$$R_{dc} = 0,295 \Omega$$
$$C0 = 6 \text{ pF}$$
$$L0 = 1 \mu\text{H}$$

# Résultats expérimentaux - Caractérisation temporelle



## Conditions de test: Source AC

- ✓ forme (Sinusoïdale, Carrée, Triangulaire)
- ✓ Amplitude de courant : 280A
- ✓ Fréquence :15Hz-1500Hz



## **Capteur :**

- Synthèse de deux capteurs : 2 géométries
- Compatible procédé FA3D DEEPConcept

## **Caractérisation préliminaires :**

- Puissance : alimentation d'une charge R-L en courant et fréquence (50 Hz - 1500 Hz)
- Comportementale : analyseur d'impédance

## **Chaine de conditionnement :**

- Ajout d'une chaine de mesure passif-actif-passif
- Après plusieurs analyses état de l'art et tests

## **Capteur :**

- Version 3 - géométrie
- Différentes stratégies de bobinage

## **Caractérisation complémentaires :**

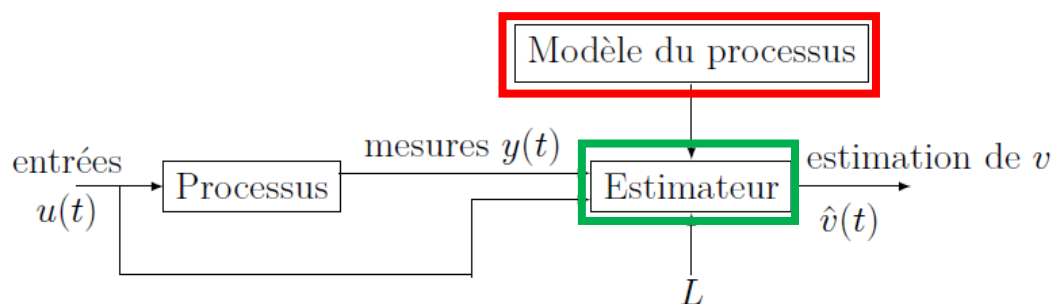
- Puissance : en double pulse, en commutation
- Comportementale : analyseur de réseau

## **Chaine de conditionnement :**

- Amélioration des problèmes de bruits basse fréquence
- Intégration avec la carte driver (solution PCB Flex),
  - ADC voire FPGA embedded

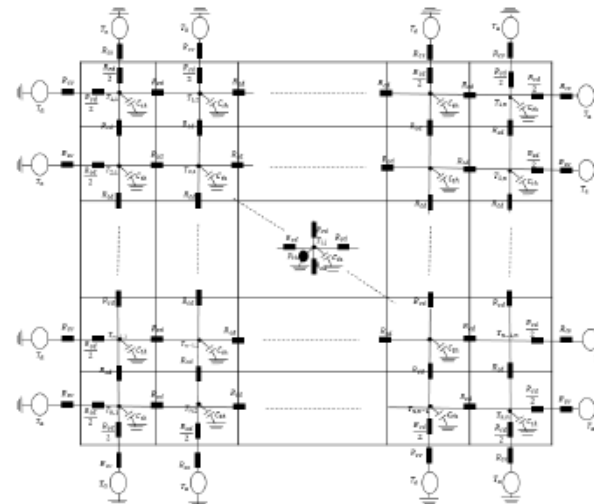
# Utilisation de la mesure de courant pour le diagnostic

- Le capteur mesure le courant de phase en sortie du module. A partir :
  - des ordres de commande,
  - et de la mesure de la tension des interrupteurs,
- On estime les pertes dans le module
- On ne peut souvent pas mesurer la température des semi-conducteurs (pour leur SoH)
  - Mesure de température dans le module et estimation de la température de puce.



## Observateur de fonctionnelle linéaire

- Le modèle de process est lui-même écrit sous forme d'états
- Toutes les entrées sont connues
- Certaines entrées sont inconnues (puissance du refroidissement)
- Discretisation spatiale de l'équation de la chaleur, la température est un état
- On cherche à minimiser le nombre d'états de l'observ



# Etablir un modèle représentatif de la complexité de l'objet

- Le modèle devra :
  - Pouvoir amener à une représentation d'état minimale,
  - Être représentatif des phénomènes complexes.
- On utilise une approche systémique Bond Graph qui permet de :
  - Représenter les différents domaines physiques et leurs interactions sous un même formalisme,
  - Conduire à une représentation d'état.
- Modélisation thermo-mécanique d'un gel encapsulant

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), u(t)) \end{aligned}$$

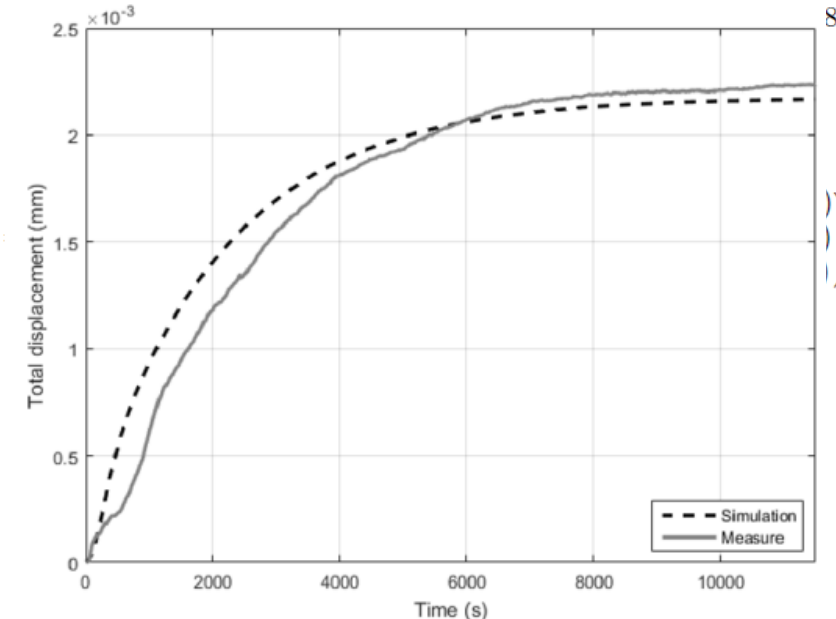
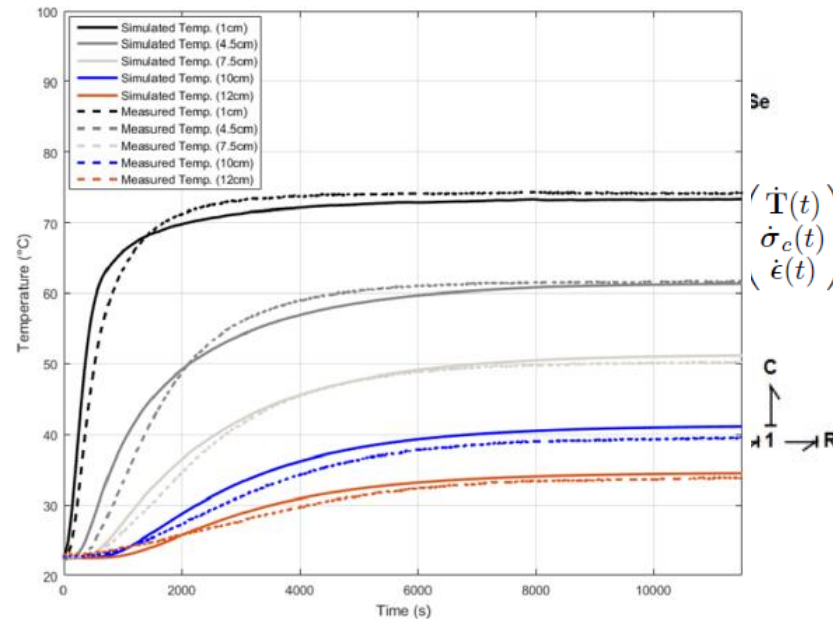
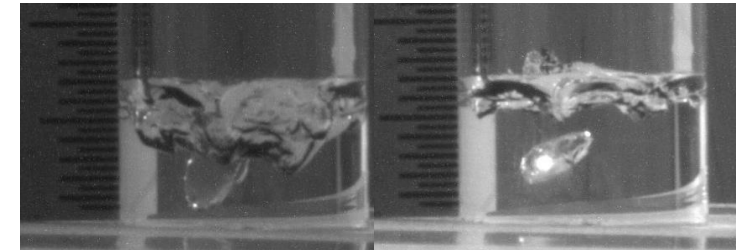
⇒ Approche par discrétisation pour passer de dimension infinie à dimension finie

⇒ Modèle RC thermique

⇒ Modèle rhéologique de Kelvin-Voigt

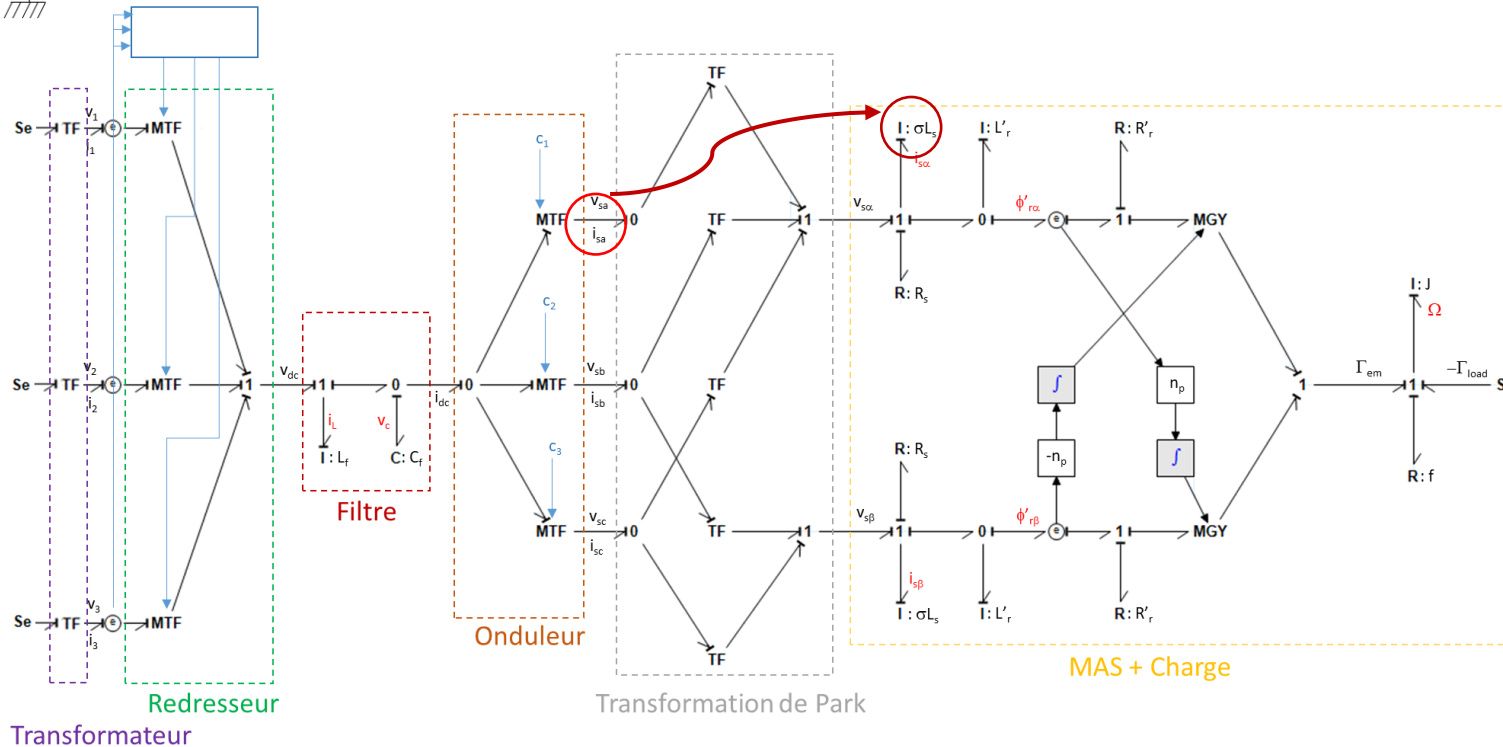
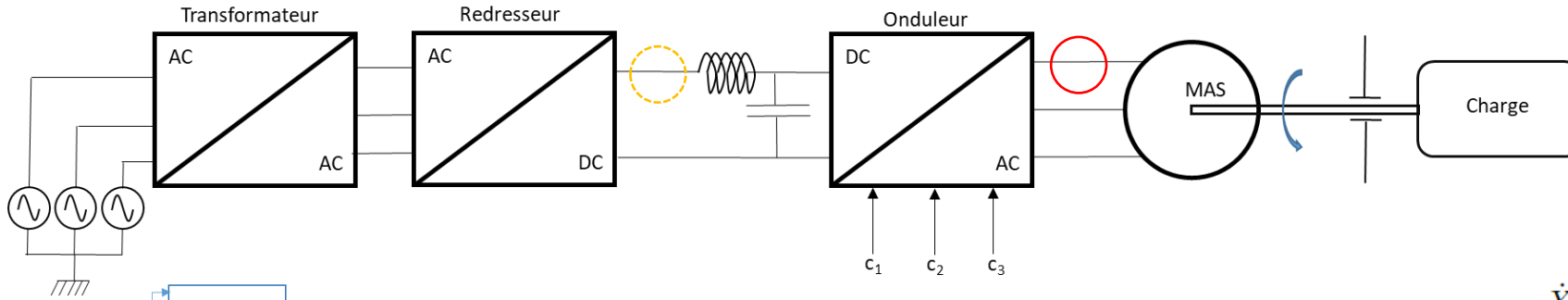
⇒ Paramètres non linéaires

⇒ Etude de convergence



# La mesure de courant dans son environnement

- Une mesure de courant local ne sert pas qu'à la surveillance d'un module
- ➔ Pilotage d'un système de conversion d'énergie électrique



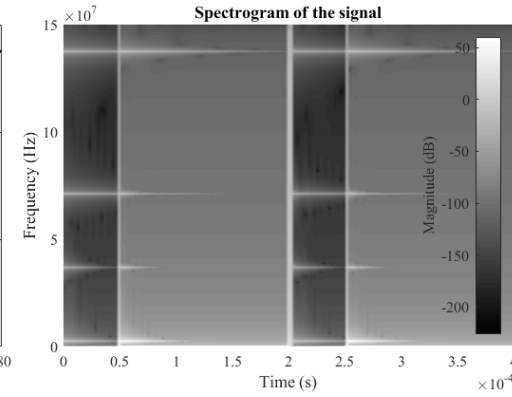
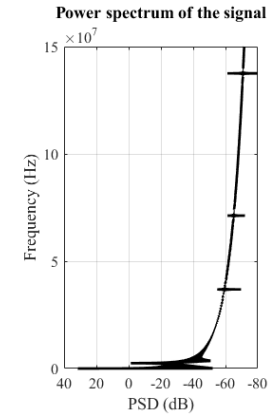
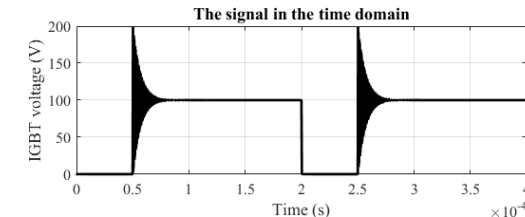
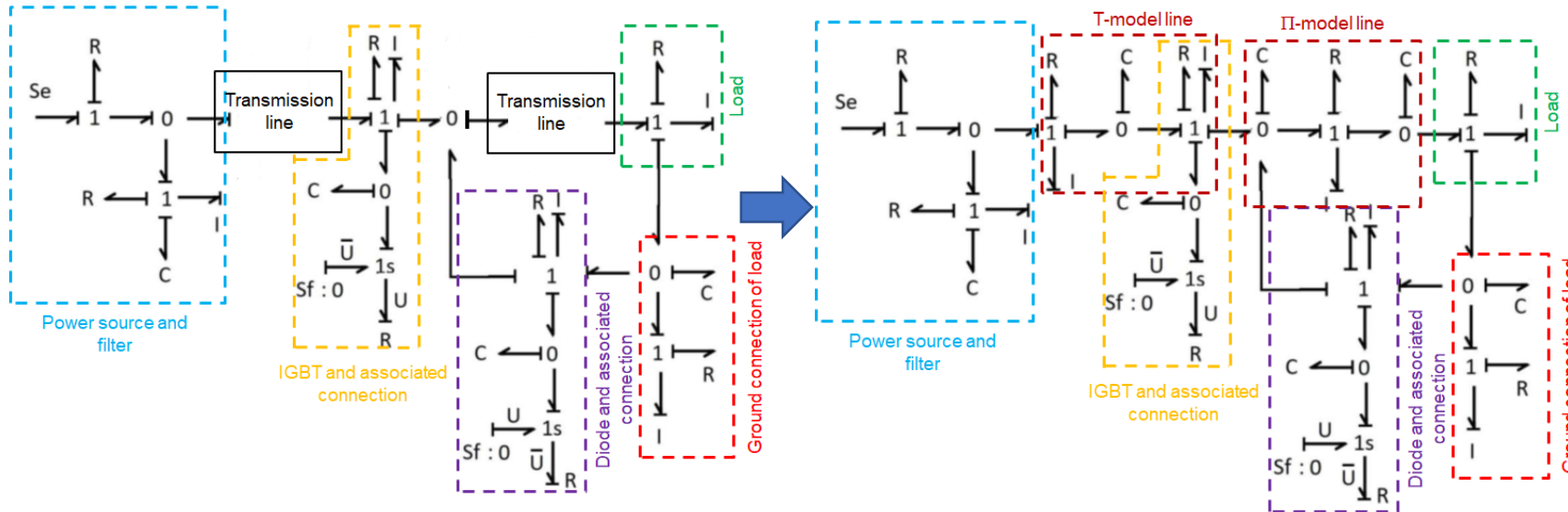
$$\dot{X}(t) = \underbrace{\begin{pmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3\omega(t) \\ 0 & a_1 & -a_3\omega(t) & a_2 \\ a_4 & 0 & a_5 & -\omega(t) \\ 0 & a_4 & \omega(t) & a_5 \end{pmatrix}}_{A(t)} \underbrace{\begin{pmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ \phi_{r\alpha}(t) \\ \phi_{r\beta}(t) \end{pmatrix}}_{X(t)} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_B \underbrace{\begin{pmatrix} v_{s\alpha}(t) \\ v_{s\beta}(t) \end{pmatrix}}_{U(t)}$$

Transformateur

paul-etienne.vidal@enit.fr - baptiste.trajain@enit.fr

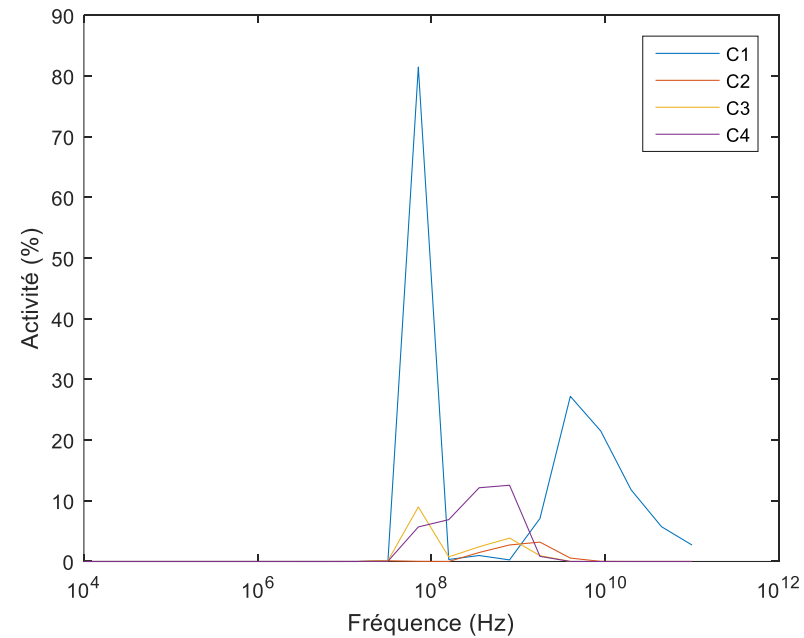
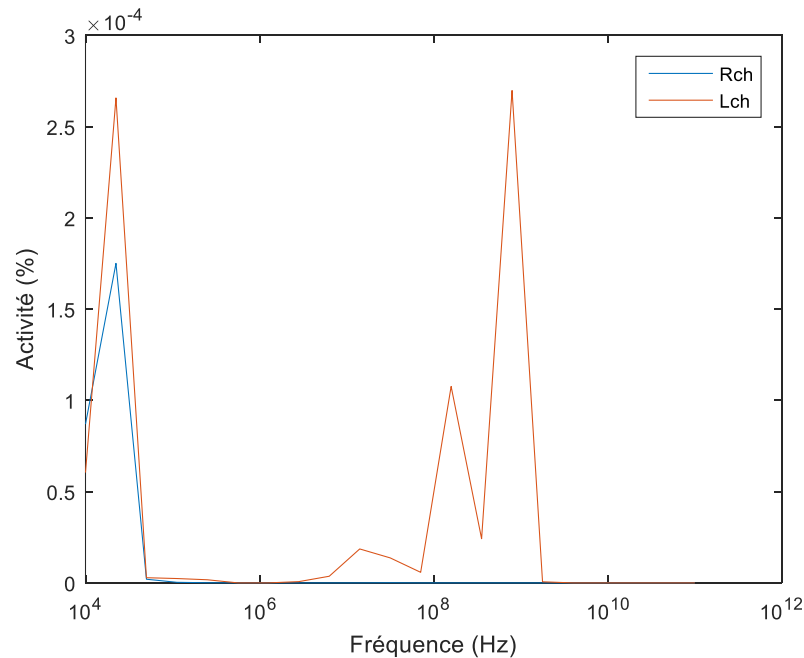
# Utilisation des mesures pour l'identification

- Le traitement des grandeurs fait apparaître des phénomènes « cachés »
- Eléments parasites à inclure dans les modèles dans un modèle de convertisseur
  - Augmentation du nombre d'états
  - Complexité d'amendement des équations



# Utilisation des mesures pour la simplification des modèles

- Les modèles sont parfois lourds à simuler ou difficilement estimables
- Comment procéder à la réduction de modèles sans dénaturer la représentativité ?
  - MORA : *Model Order Reduction Algorithm*
  - Méthode d'identification énergétique fréquentielle
  - Permet d'éliminer les éléments en fonction de la bande de fréquence
  - Excitation par *chirp* linéaire ou par bruit blanc



## **Mesure de courant :**

- Grandeur pour le diagnostic et le pilotage
- Traitement pour l'identification

## **Modélisation :**

- Modélisation multi-physique et multi-échelle de l'objet au macro-système
- Modélisation adaptative conduisant à la représentation d'état

## **Complexité :**

- Prise en compte de phénomènes minoritaires
- Simplification et réduction d'ordre

## **Modélisation :**

- Minimalité du modèle et de la représentation
- Inclusion de sous-modèles
- Représentation temporelle vs fréquentielle

## **Complexité :**

- Convergence du modèle vers la mesure
- Changement d'échelle temporelle
- Changement d'échelle physique

- [1] W. Chonpathomphikunloed, B. Paophan, A. Kunakorn, P. Yutthagowith, et M. Leelachindakrairerk, « Analyses of Rogowski coils for partial discharge measurement », in *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Toyohashi, sept. 2017, p. 378-381. doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088764.
- [2] I. A. Metwally, « Performance Improvement of Slow-Wave Rogowski Coils for High Impulse Current Measurement », *IEEE Sens. J.*, vol. 13, n° 2, p. 538-547, févr. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2012.2222372.
- [3] J. Zhu, L. Yang, J. Jia, et Q. Zhang, « The design of Rogowski coil with wide band using for partial discharge measurements », in *Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005).*, Kitakyushu, Japan, 2005, p. 518-521 Vol. 2. doi: 10.1109/ISEIM.2005.193603.
- [4] Pang Fubin, Gao Lei, Yuan Yubo, Bu Qiangsheng, et Ji Jianfei, « Effects of geometrical parameters on the performance of Rogowski coil for current measuring », in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Xi'an, China, oct. 2016, p. 232-236. doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779503.
- [5] M. N. K. H. Rohani *et al.*, « Geometrical Shapes Impact on the Performance of ABS-Based Coreless Inductive Sensors for PD Measurement in HV Power Cables », *IEEE Sens. J.*, vol. 16, n° 17, p. 6625-6632, sept. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2586302.
- [6] J. Hlavacek, R. Prochazka, K. Draxler, et V. Kvasnicka, « The Rogowski Coil Design Software », p. 7, 2008.
- [7] M. Shafiq, G. A. Hussain, L. Kütt, et M. Lehtonen, « Effect of geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements », *Measurement*, vol. 49, p. 126-137, mars 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2013.11.048.
- [8] John D. Ramboz « Machinable Rogowski coil, design, and calibration » *IEEE Trans. On Instru and Meas*, Vol n°45, n°2, April 1996, pp 511-515, DOI: [10.1109/19.492777](https://doi.org/10.1109/19.492777).

- [9] W. Borutzky, Bond graph methodology - Development and analysis of multidisciplinary dynamic system models, Springer, 2010.
- [10] C. Christopoulos, The Transmission-Line Modeling (TLM) Method in Electromagnetics, Morgan & Claypool, 2006.
- [11] A.C. Umarikar, L. Umanand, “Modelling of switched mode power converters using bond graph”, Electric Power Applications, Vol. 152, no. 1, pp. 51-60, 2005.
- [12] Borutzky W., “Bond Graph Modelling of Engineering Systems”, Springer, 2011.
- [13] S. Wen, G.-Q. Lu, Finite-element modeling of thermal and thermomechanical behavior for three-dimensional packaging of power electronics modules, in 7th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM), 2000.
- [14] F. Rotella, I. Zambettakis, Minimal single linear functional observers for linear systems, Automatica 47 (2011) 164–169.