

Thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées

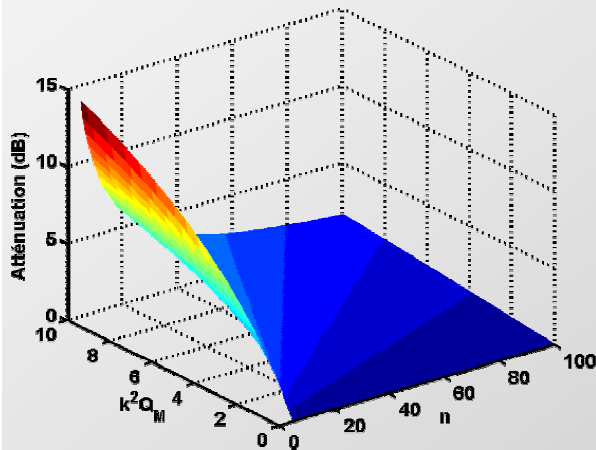
Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie

Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté

Mickaël Lallart

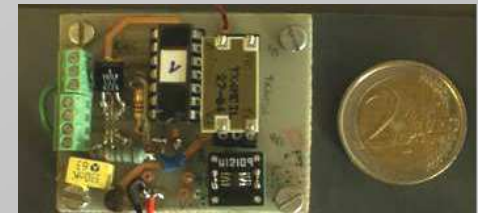
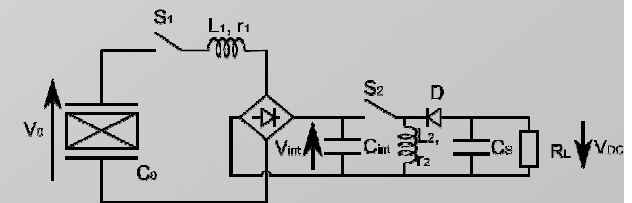
*Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF)
MATERiaux : Ingénierie et Sciences (MATEIS)
INSA Lyon*

Directeur : **Prof. Daniel Guyomar**
Co-directeur : **Dr. Thomas Monnier**



Ces travaux ont été financés par l'Union Européenne via le projet STREP ADVICE (contrat AST5 - CT - 2006 - 030971)

20 Novembre 2008



Vue d'Ensemble

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS

Introduction

- **Contexte** : structures intelligentes, enjeux
- **Technique NL** : principes, amélioration de la conversion

Application de la conversion

- **Contrôle de vibrations** : techniques NL pour :
 - la dissipation
 - le contrôle de raideur
- **Récupération d'énergie** : amélioration par approche NL, nouvelles architectures
- **Contrôle de santé structurale** : suivi de l'évolution structurale par Indice d'Endommagement, nouvelles définitions

Système auto-alimenté

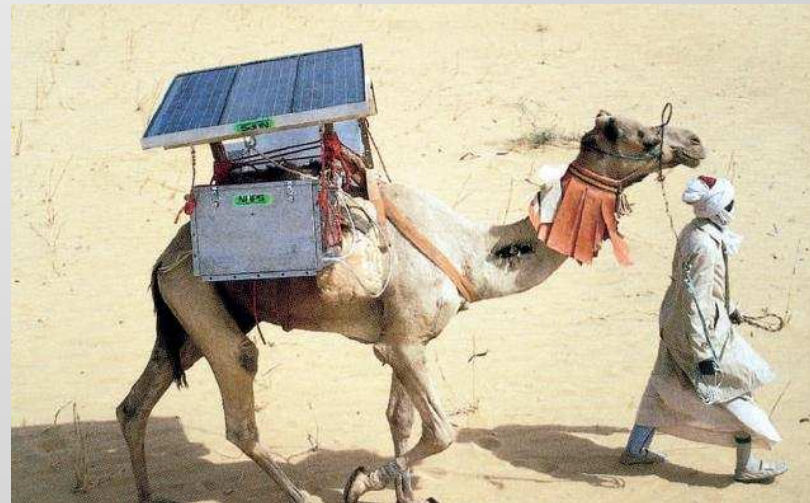
- **Dispositifs autonomes de contrôle de santé structurale** : stratégies, modules d'émission/réception, projet ADVICE

Conclusion

- **Synthèse** : perspectives sur la récupération d'énergie par piézo/pyroélectricité, futur des réseaux de systèmes autonomes

Contexte

Technique NL
Contrôle de vibrations
Récupération d'énergie
Contrôle de santé structurale
Vers des dispositifs autonomes
Synthèse



J. Krikke, 2005.

Contexte

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

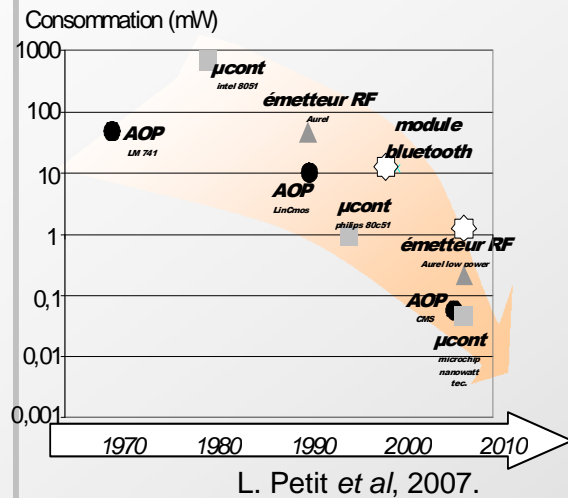
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Progrès de la microélectronique

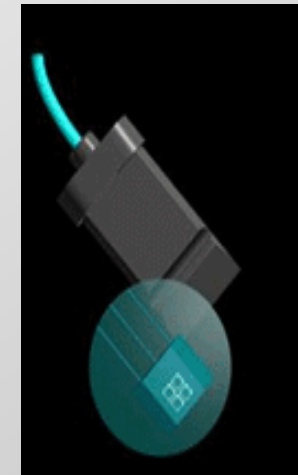


Forte demande industrielle en terme de capteurs autonomes

Progrès de la conversion d'énergie (matériaux et techniques)



A. Hajjaji, 2007.



www.snr-bearings.com

Rupture technologique imminente
Mais nécessité d'améliorer encore la conversion

Contexte

Contexte

Technique NL

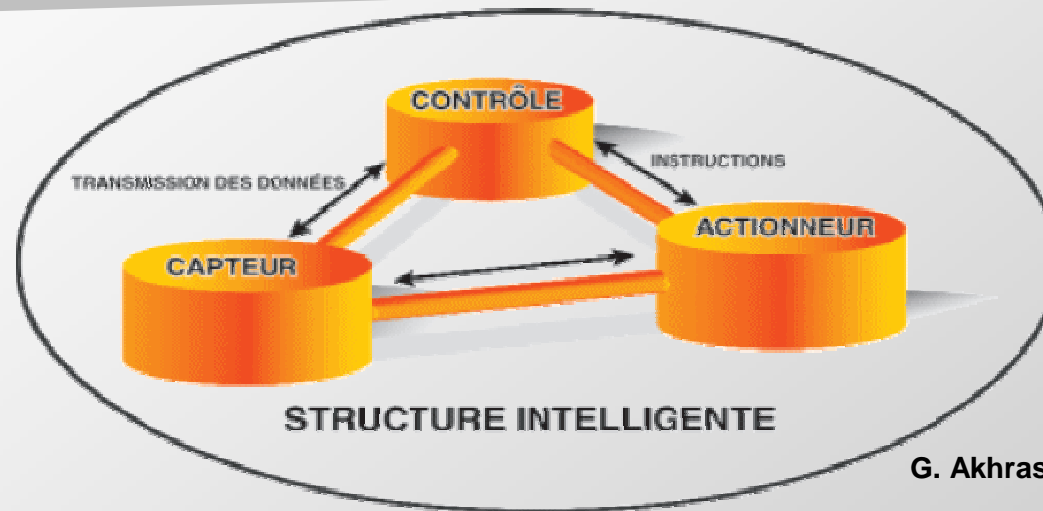
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

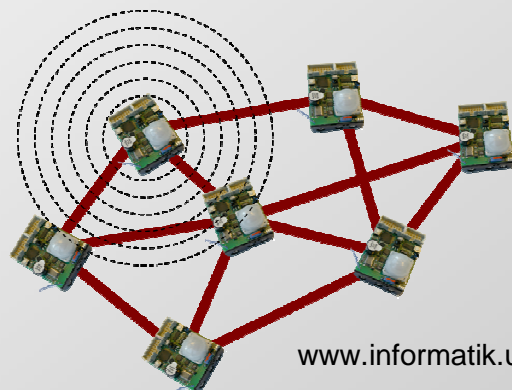
Dispositifs autonomes

Synthèse

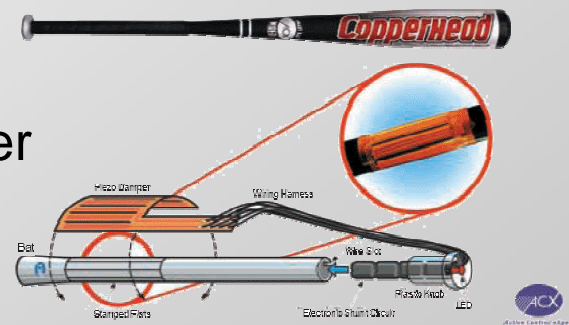


G. Akhras, 2000.

Un même matériau peut effectuer différentes fonctions...



www.informatik.uni-mannheim.de



G. Akhras, 2000.

... qui peuvent être intégrées dans un réseau pour l'accomplissement d'une tâche complexe

Contexte

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

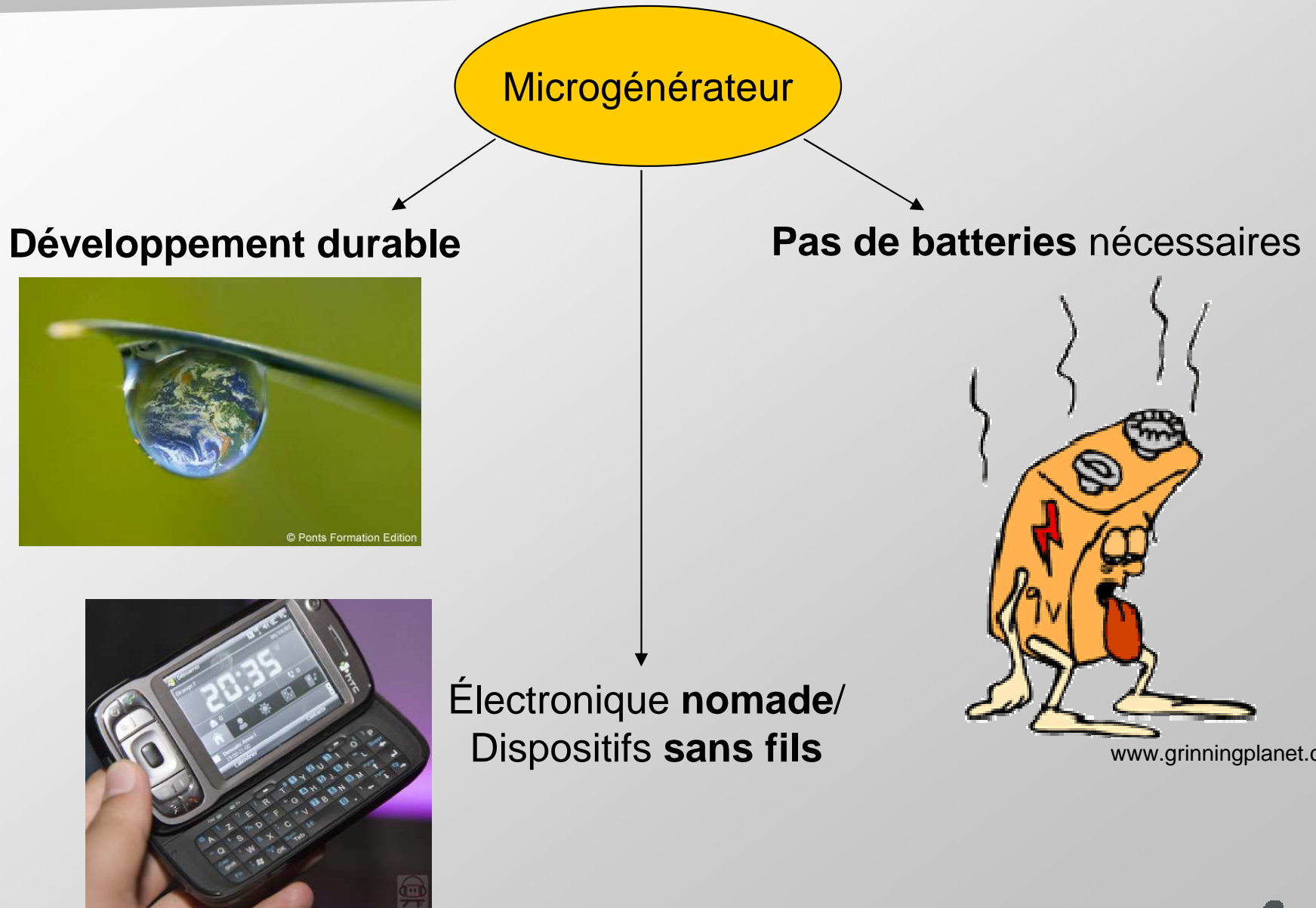
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS



Contexte

Contexte

Technique NL

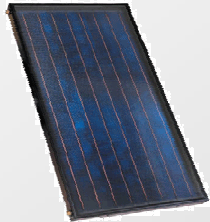
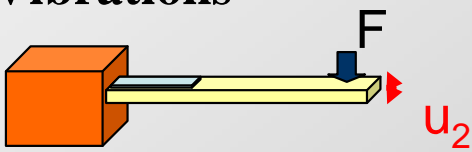
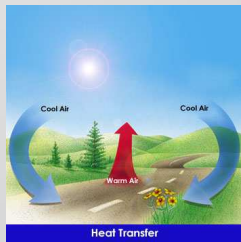
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

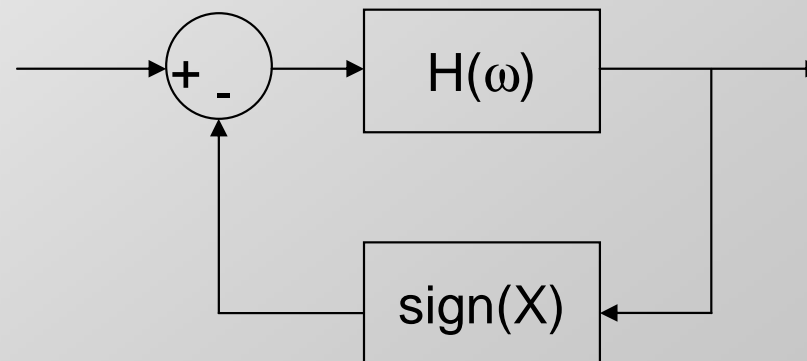
Synthèse

Gisement	Couplage (ou effet) associé	Densité
Solaire 	Photovoltaïque	20mW/cm ³
Vibrations 	Piézoélectrique Electromagnétique Electrostatique	0.2 mW/cm³ 0.001 mW/cm ³ 0.1 mW/cm ³
Thermique 	Thermoélectrique	0.015 mW/cm ³

Antes

Technique non-linéaire

*Contrôle de vibrations
Récupération d'énergie
Contrôle de santé structurale
Vers des dispositifs autonomes
Synthèse*



Technique Non-Linéaire SSD/SSH

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

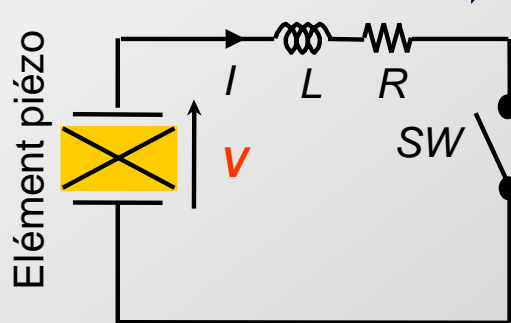
Tension : image de l'énergie d'un élément piézoélectrique (effet capacitif)

➡ **Augmentation de la tension**

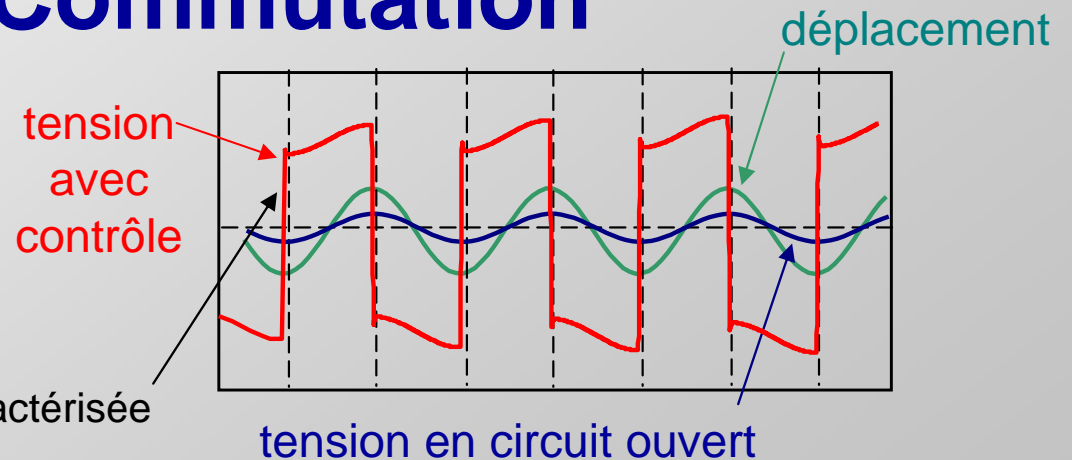
⬇ $E_{el} = \frac{1}{2} C_0 V^2$

Augmentation du couplage

➡ **Commutation**



L'inversion n'est pas parfaite et caractérisée par le **coefficient γ**



- ➔ **Décalage/augmentation de la tension : meilleure conversion**
- ➔ **Commutation brève : changement des conditions initiales**
- ➔ **Pas d'apport d'énergie extérieure !**
- ➔ **Méthode adaptative**

*Contexte
Technique*

Contrôle de

Vibrations

*Récupération d'énergie
Contrôle de santé structurale
Vers des dispositifs autonomes
Synthèse*



Catastrophe du Pont suspendu, actuellement Pont de la Basse chaîne en l'année 1850 (le 11^{ème} Leger)

Contrôle de vibrations

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

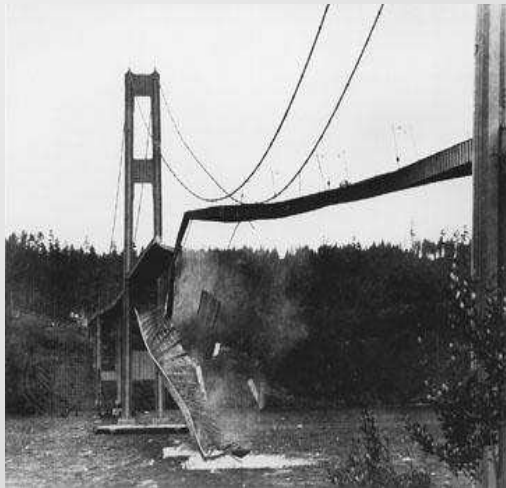
Synthèse

Contrôle de vibrations



Réduction des nuisances sonores

Préservation de l'intégrité structurale



Contrôle de vibrations



Contexte

Technique NL

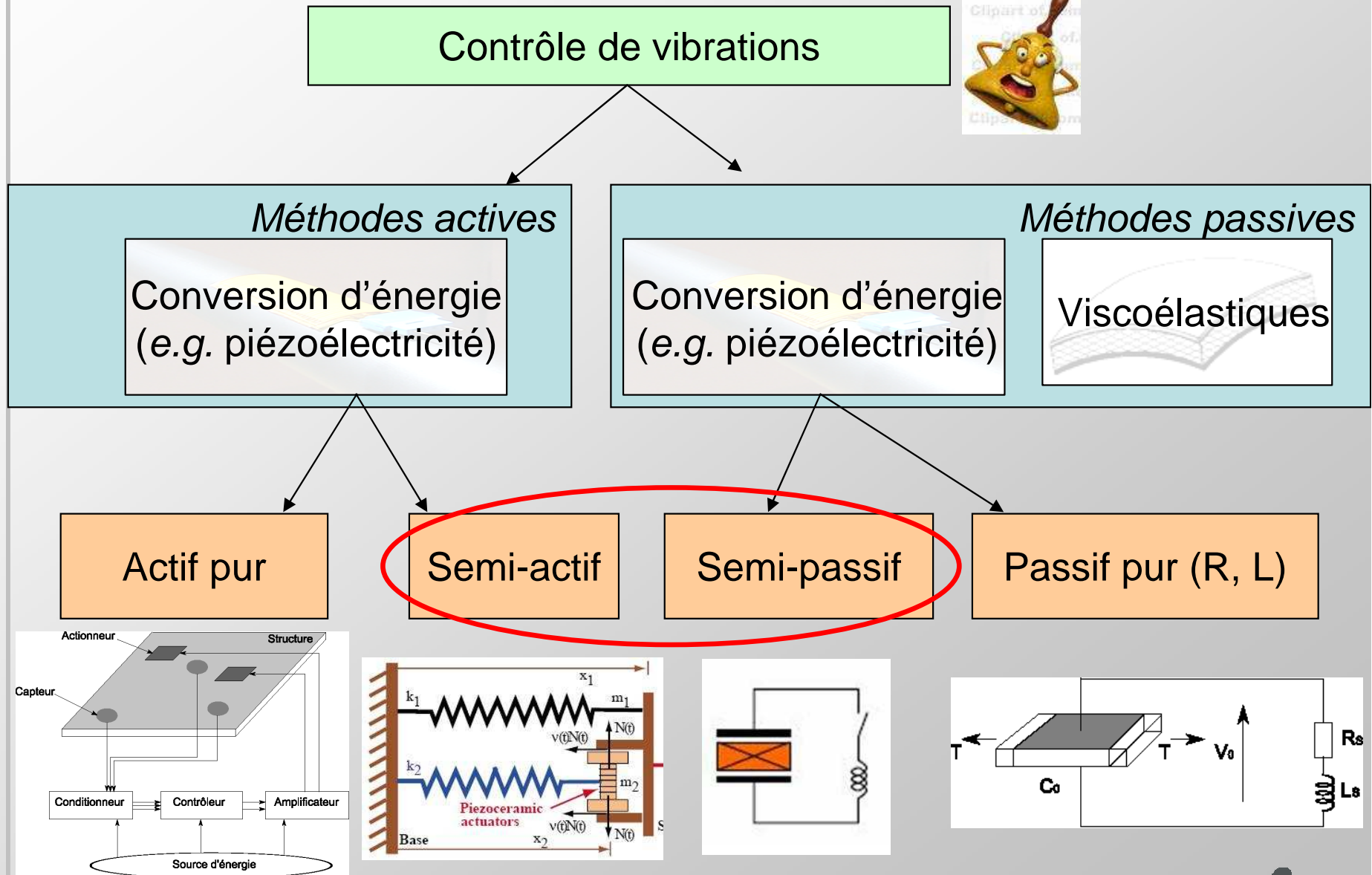
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Contrôle de vibrations

Contexte

Technique NL

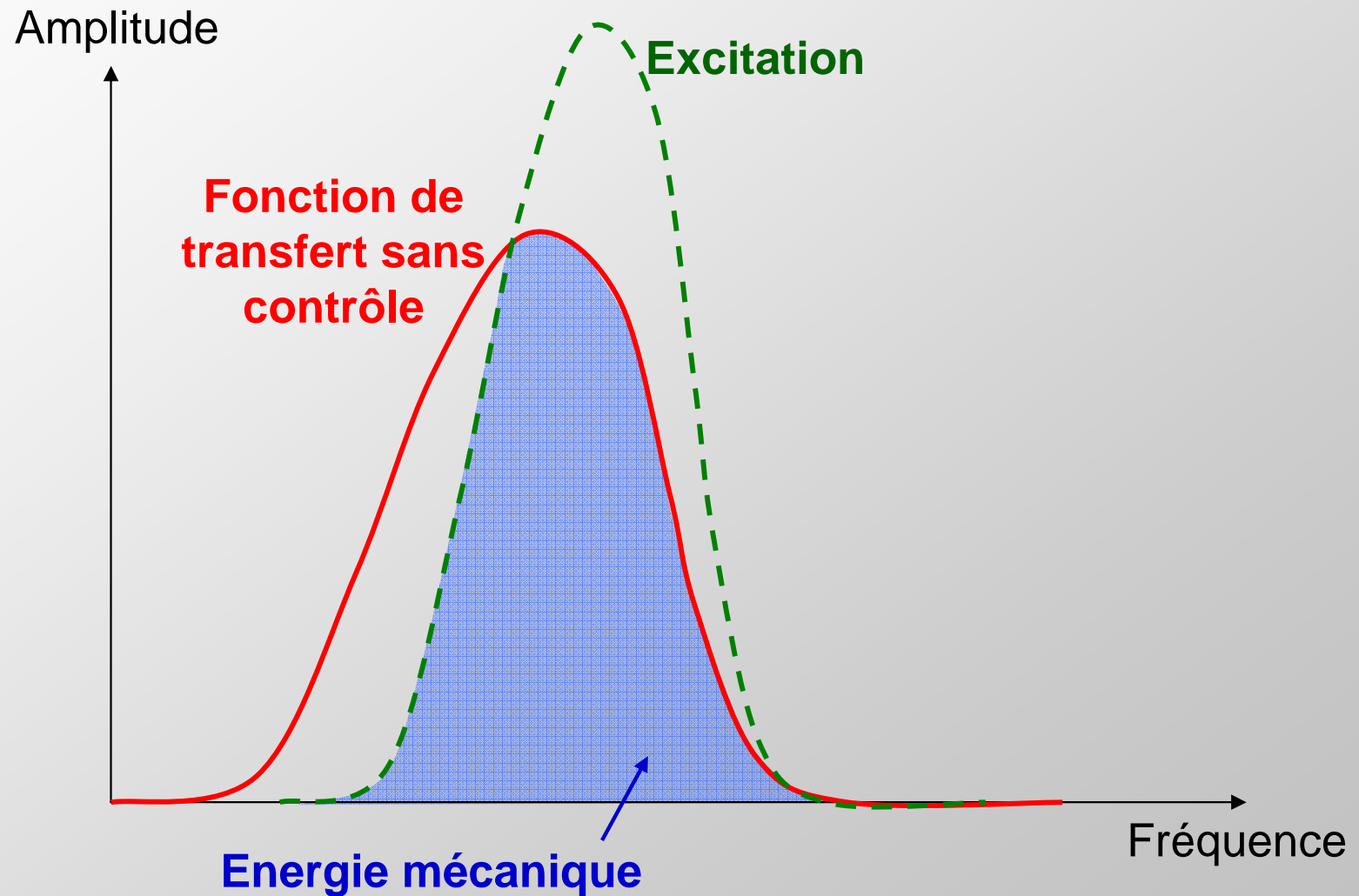
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Contrôle de vibrations

Contexte

Technique NL

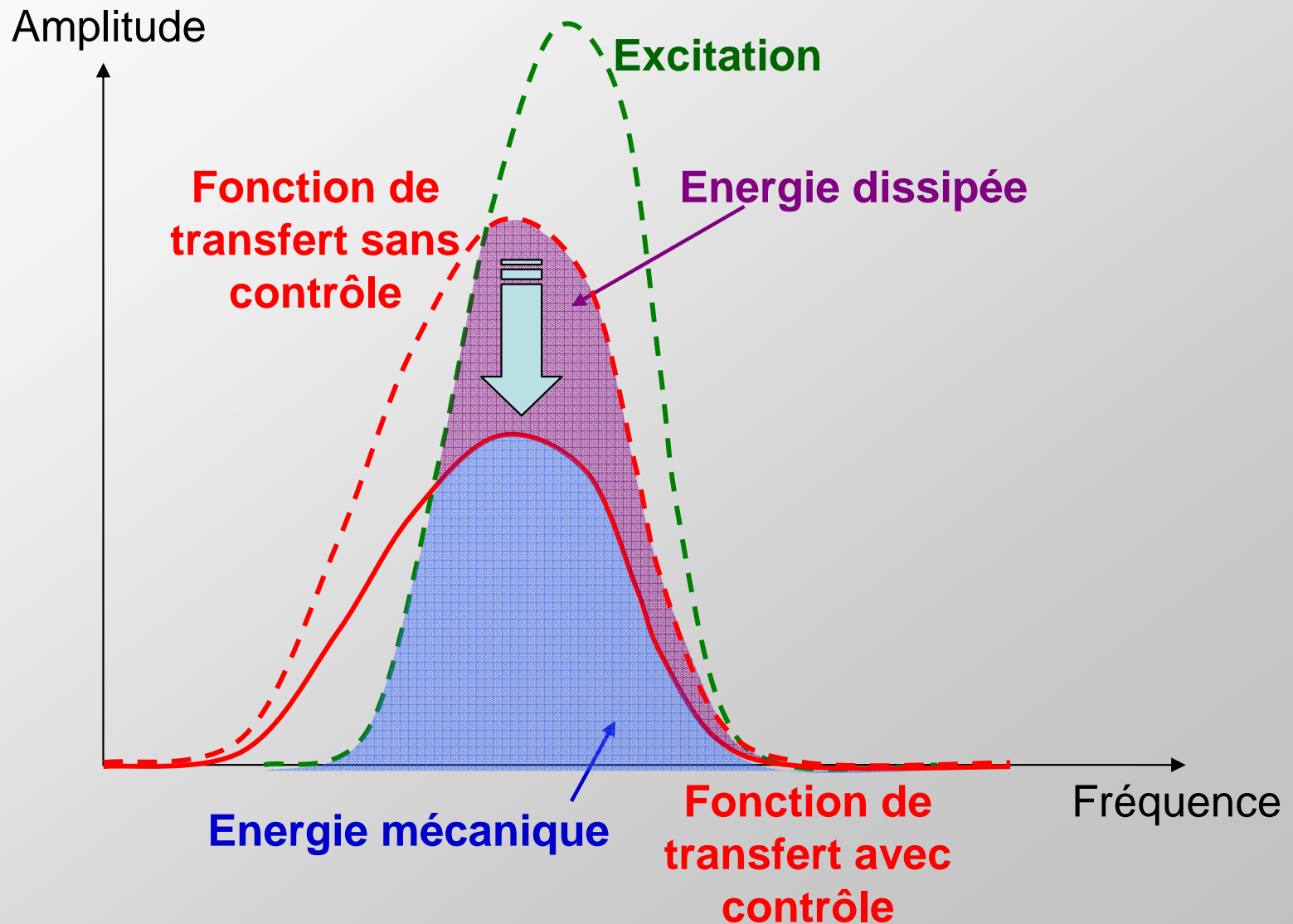
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Contrôle de vibrations

Contexte

Technique NL

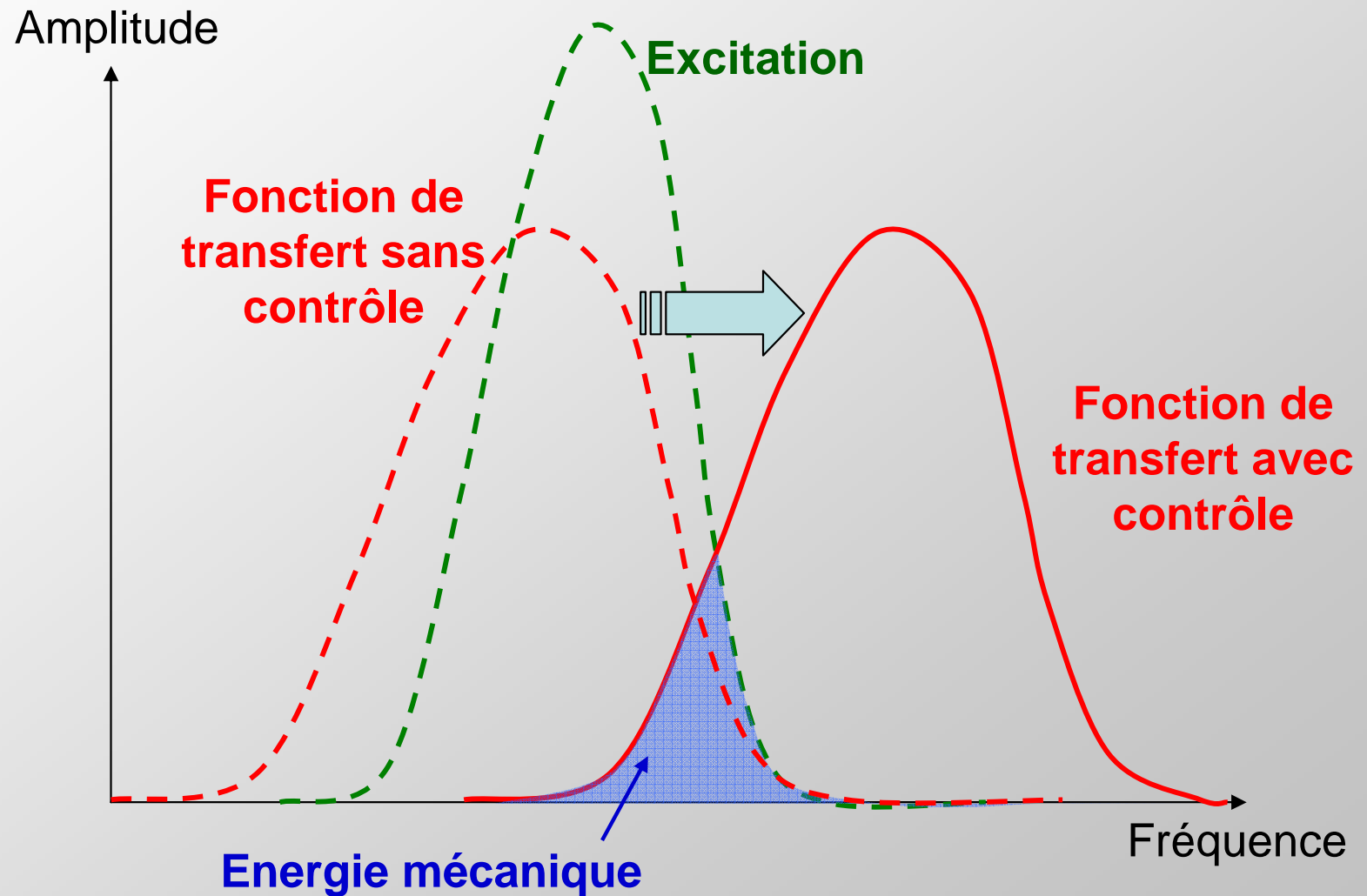
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Amortissement SSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

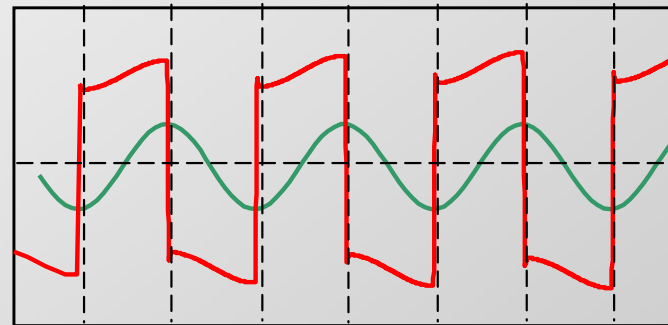
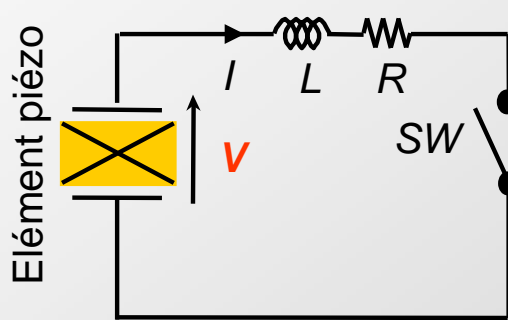
Synthèse

$$\int_0^T F u dt = \frac{1}{2} M [\dot{u}^2]_0^T + \frac{1}{2} K_E [u^2]_0^T + C \int_0^T \dot{u}^2 dt + \alpha \int_0^T V \dot{u} dt$$

Énergie échangée avec le circuit de contrôle

$$\frac{1}{2} \alpha C_0 [V^2]_0^T + \alpha \int_0^T V \dot{u} dt$$

Énergie convertie

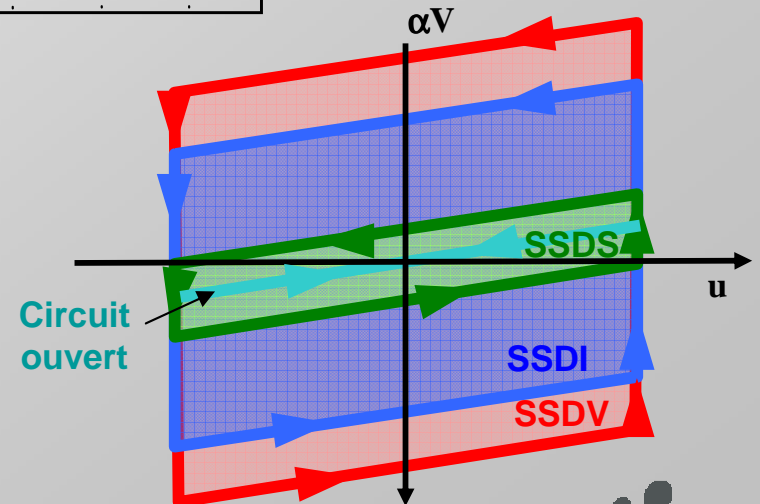


Énergie électrostatique

→ Tension en phase avec la vitesse
 → Frottement sec
 → Plus d'énergie convertie sous forme électrique



Amortissement



Amortissement SSD large bande

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

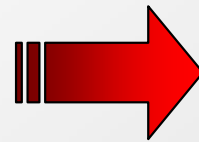
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

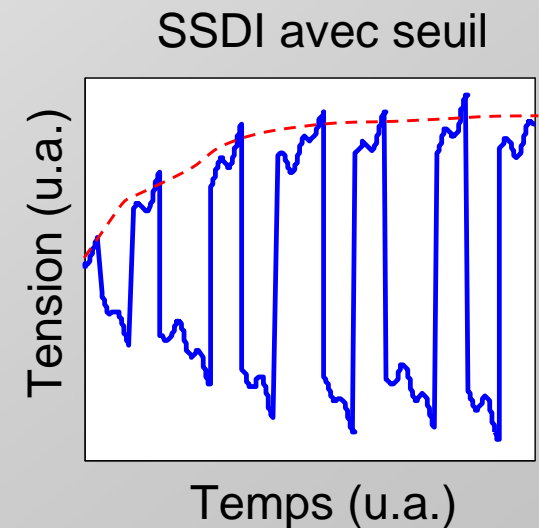
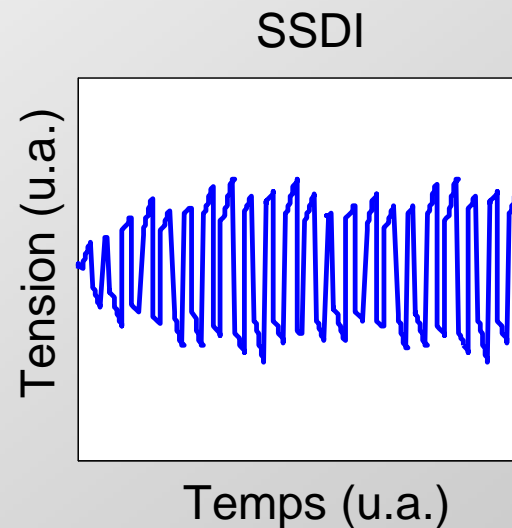
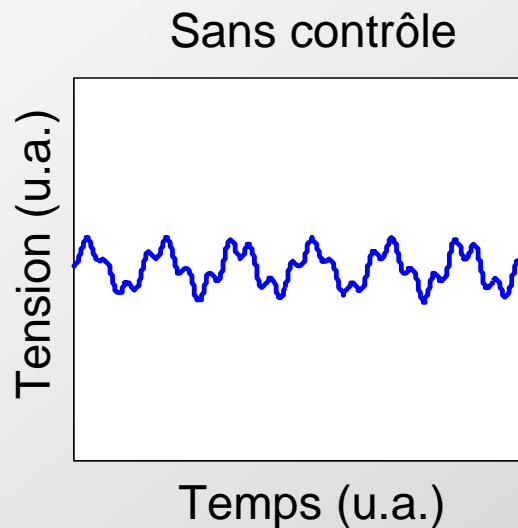
Dispositifs autonomes

Synthèse

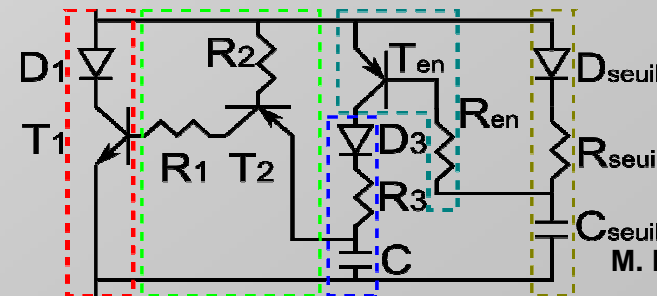
Compromis **extraction / augmentation de la tension** $E \propto \sum_k V_k^2$



Sélection des instants de commutation



Auto-alimentation
toujours réalisable 😊



M. Lallart et al., 2008.

Amortissement BSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

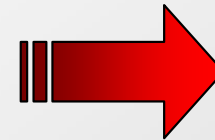
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Commutation sur extrema

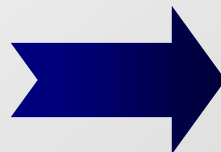
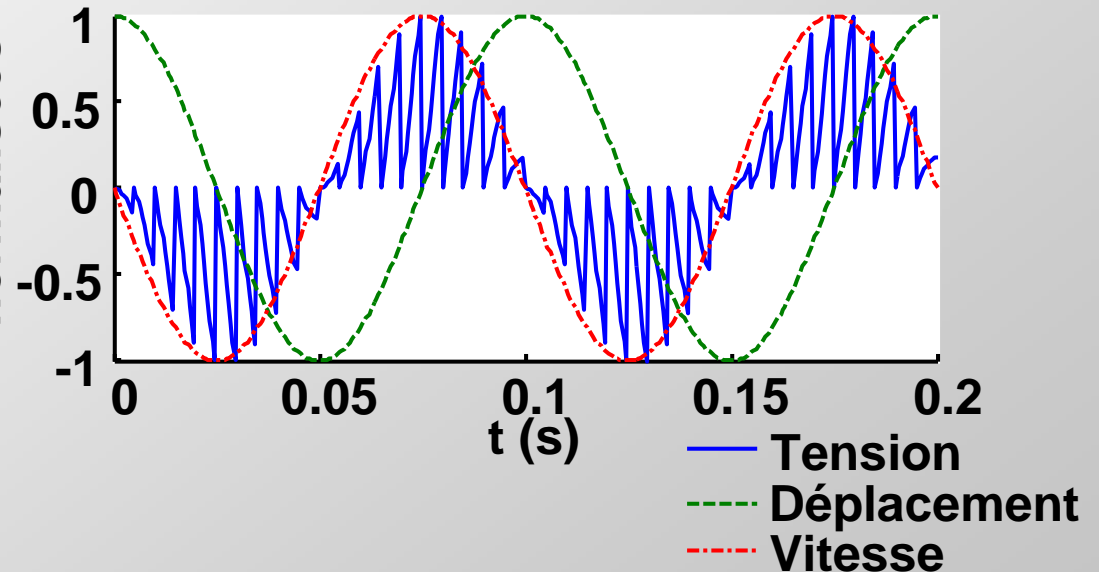


Moyen de synchronisation

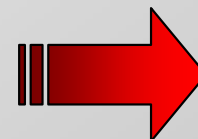


Hachage de la tension
à $f_h = n f_0$ ($n \gg 1$)

Valeurs normalisées



Différentiation à moindre coût



Amortissement Technique BSDS

$$1^{\text{er}} \text{ harmonique : } V_{BSDS}(t) \approx \frac{\alpha T_0}{C_0 n} \dot{u}(t) \quad \Rightarrow \quad A_{BSDS} = \frac{1}{1 + \frac{2}{n} k^2 Q_M}$$

Amortissement BSD

BSDS : amortissement limité



**Nécessité d'accroître la tension
pour améliorer artificiellement le couplage**

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

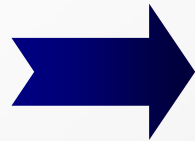
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

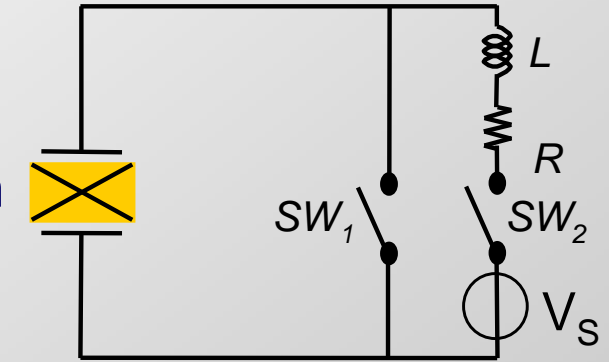
Synthèse

Amortissement BSD

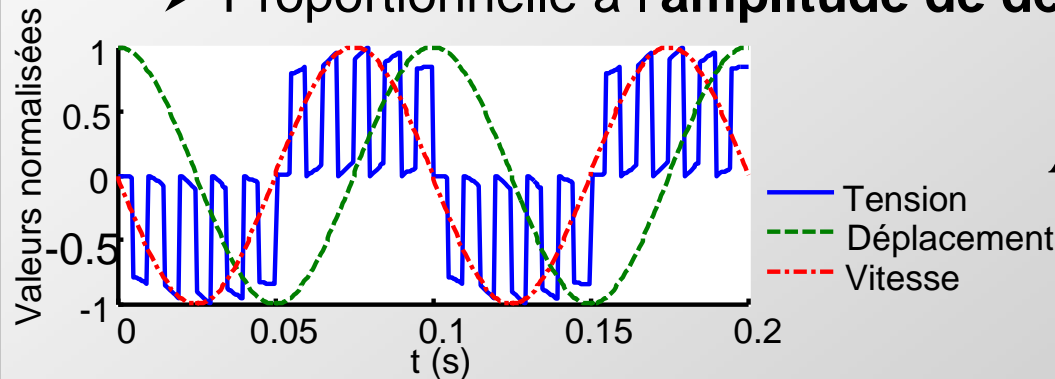
BSDS : amortissement limité



Ajout d'une branche de commutation sur source de tension

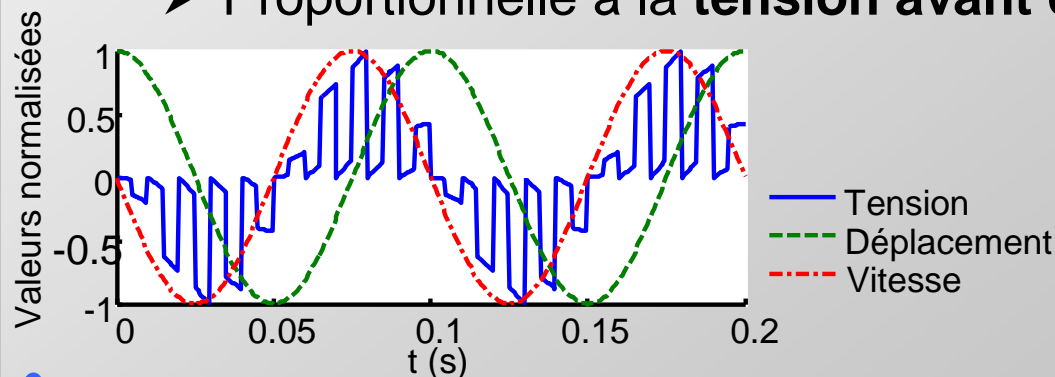


➤ Proportionnelle à l'amplitude de déplacement (BSDV_p)



$$A_{BSDVp} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\pi} (1 + \gamma) \beta k^2 Q_M}$$

➤ Proportionnelle à la tension avant commutation (BSDV_a)



$$A_{BSDVa} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\pi} \beta (1 + \gamma) k^2 Q_M}$$

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Amortissement BSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

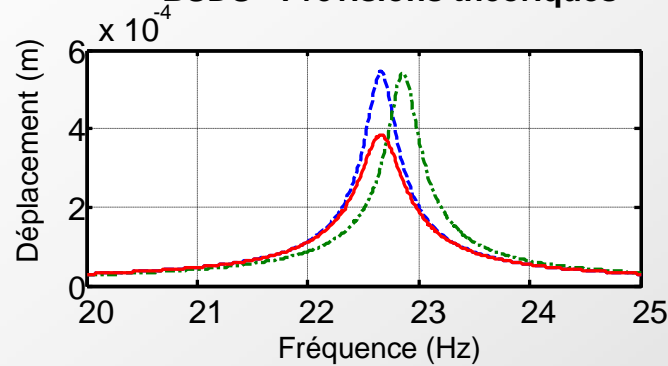
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

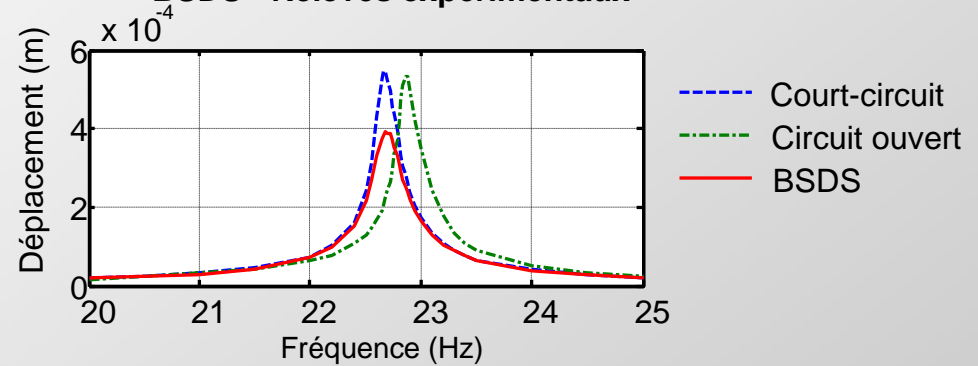
Dispositifs autonomes

Synthèse

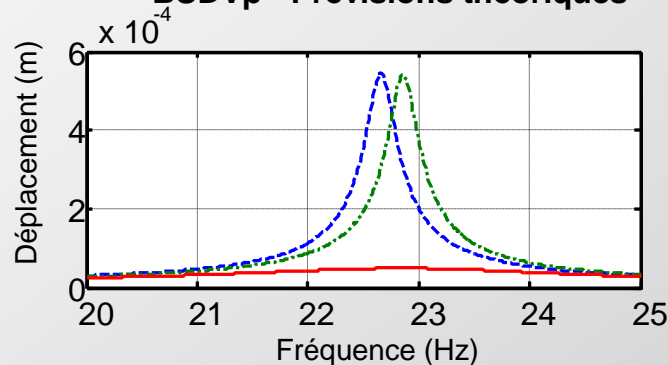
BSDS - Prévisions théoriques



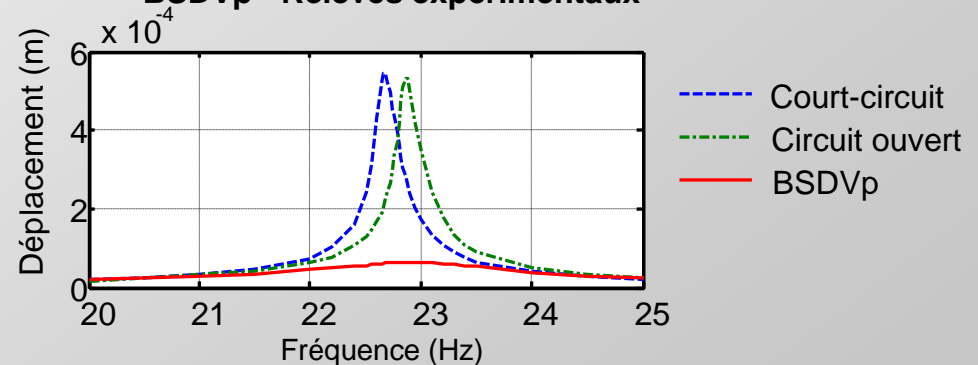
BSDS - Relevés expérimentaux



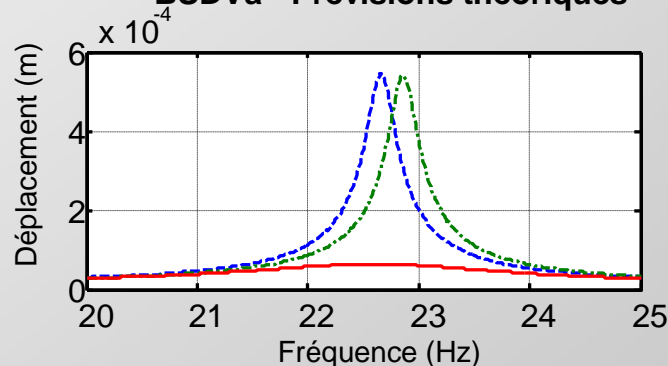
BSDVp - Prévisions théoriques



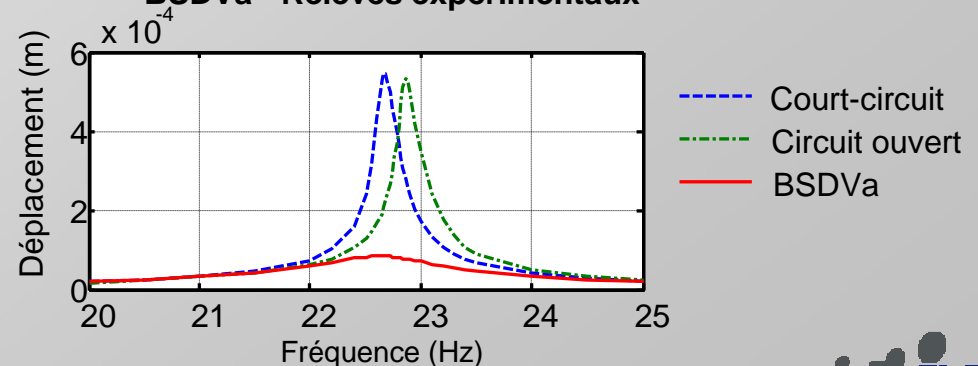
BSDVp - Relevés expérimentaux



BSDVa - Prévisions théoriques



BSDVa - Relevés expérimentaux



Amortissement BSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

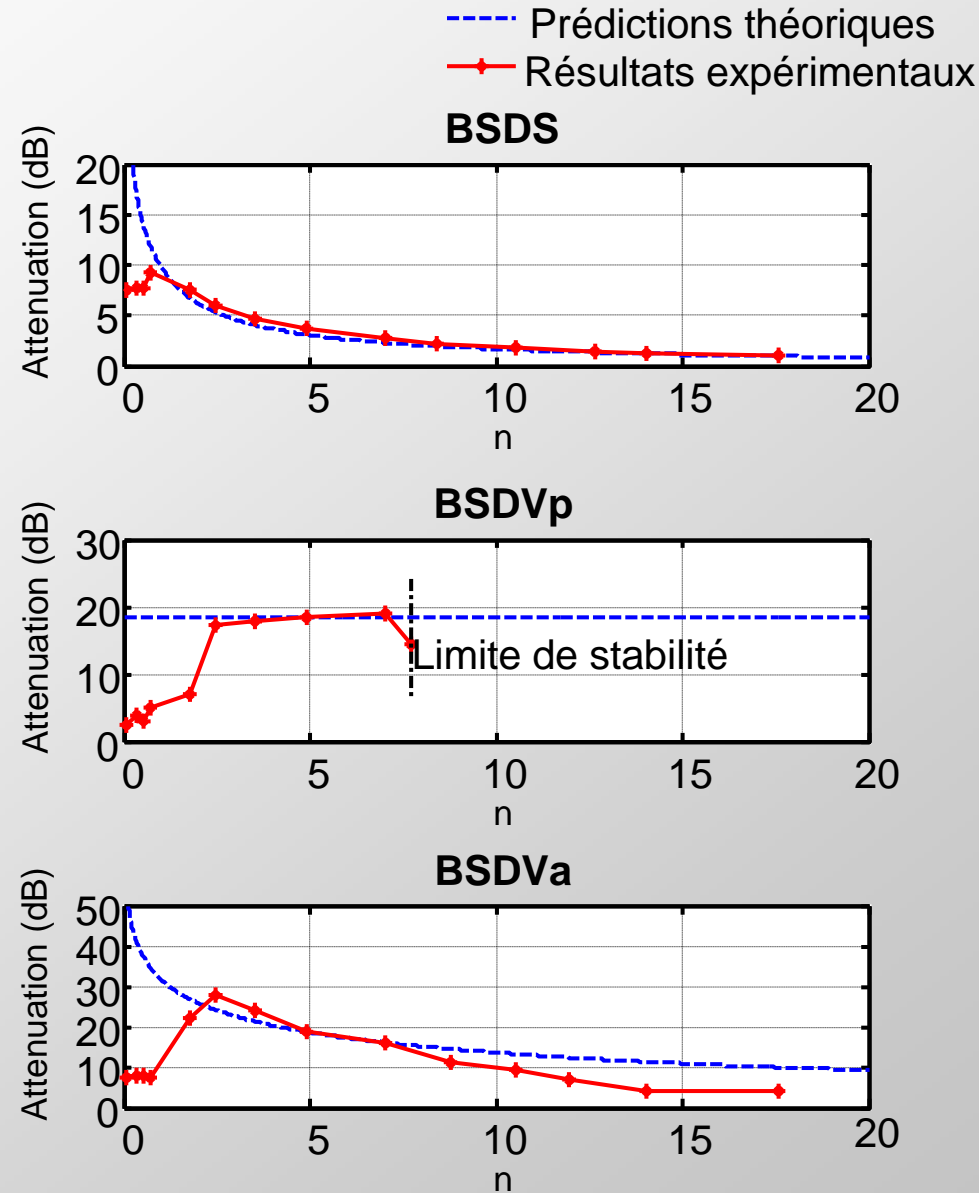
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS



Amortissement BSD large bande

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

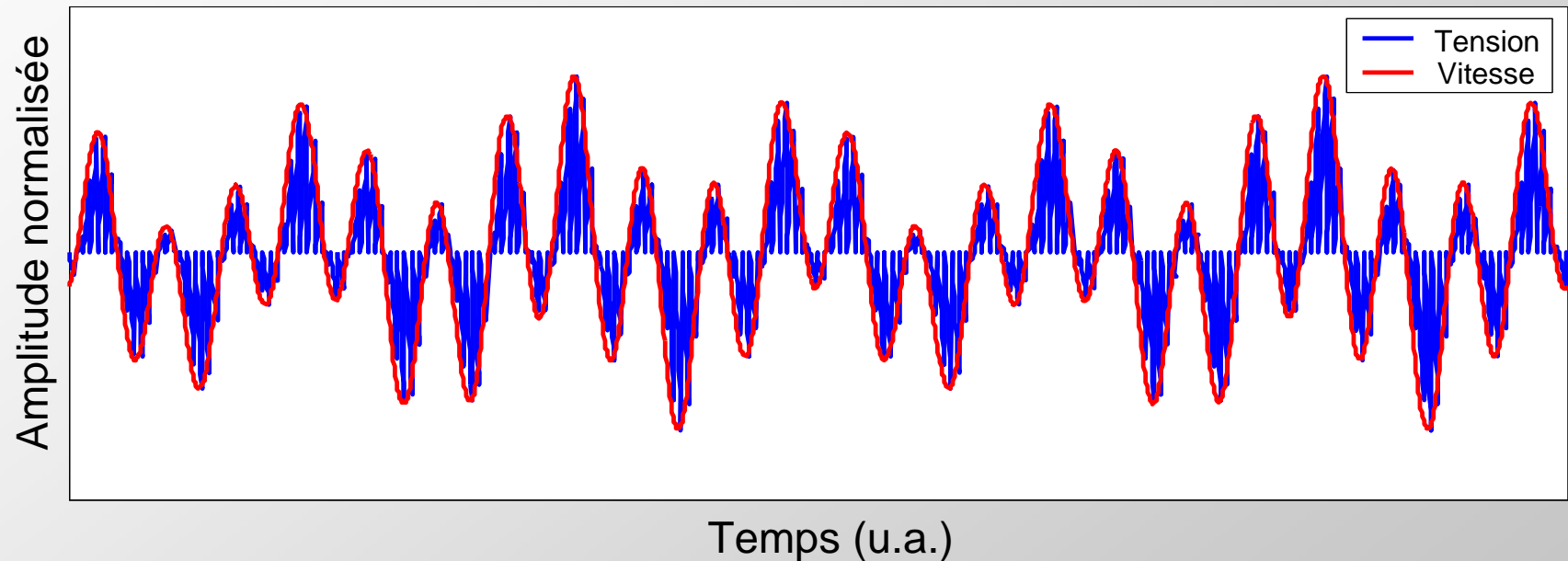
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Large bande → Vitesse toujours bien **reconstruite** par **BSDS** et **BSDVa**

BSDS



BSDVp → notion d'amplitude ?

Contrôle de raideur SSSC

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

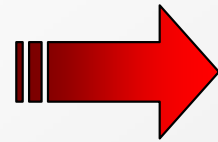
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

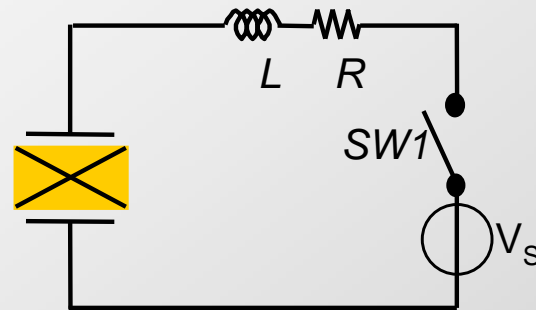
Dispositifs autonomes

Synthèse

- Détection d'extrema: assez délicat (bruit...)



Contrôle de vibration par détection de zéros

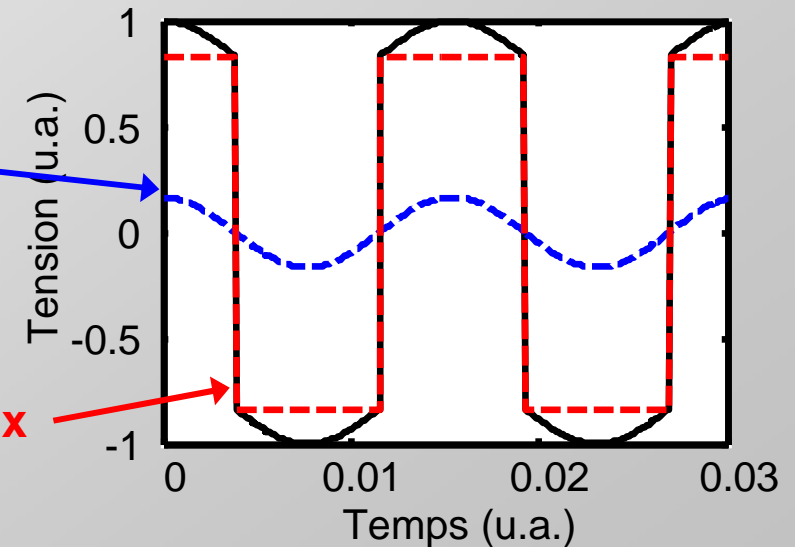


$$V_S = \pm \beta \frac{\alpha}{C_0} u_M$$

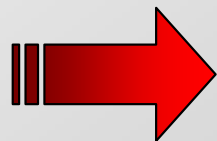
Tension proportionnelle au déplacement

$$V = \frac{\alpha}{C_0} u + V_M \operatorname{sgn}(u)$$

Tension constante par morceaux en phase avec le déplacement



D. Guyomar et al., 2008.



Précontrainte



Contrôle de raideur

Contrôle de raideur SSSC

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

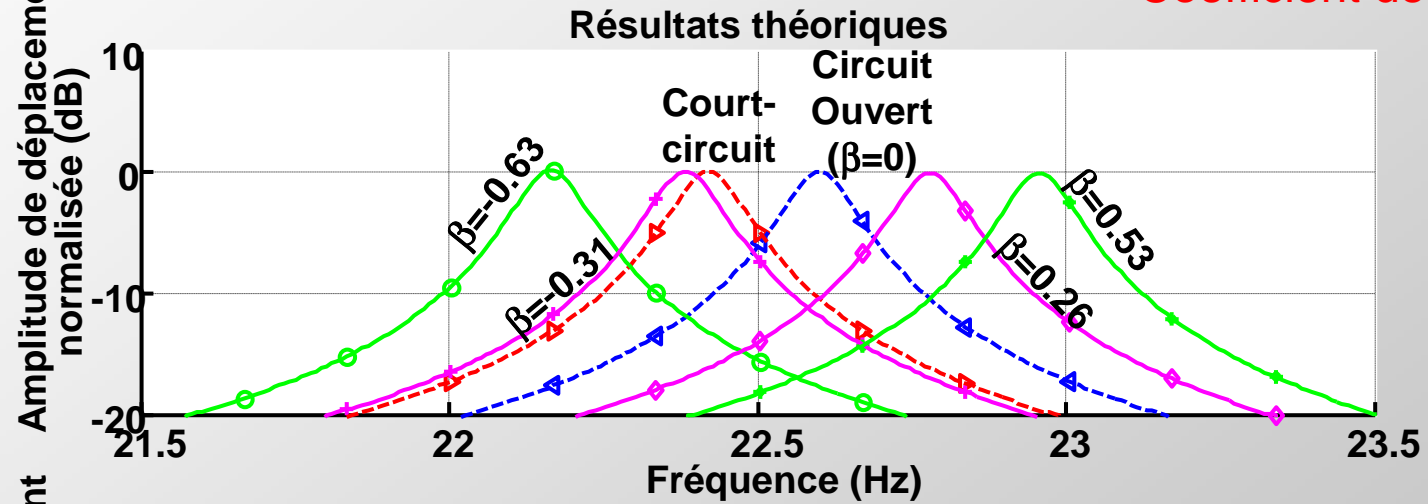
Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS

- Approximation du 1^{er} harmonique : $K_{SSSC} = K_D \left(1 + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \beta k^2 \right)$

Raideur en circuit ouvert \nearrow Coefficient de couplage



Contrôle de raideur SSSC

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

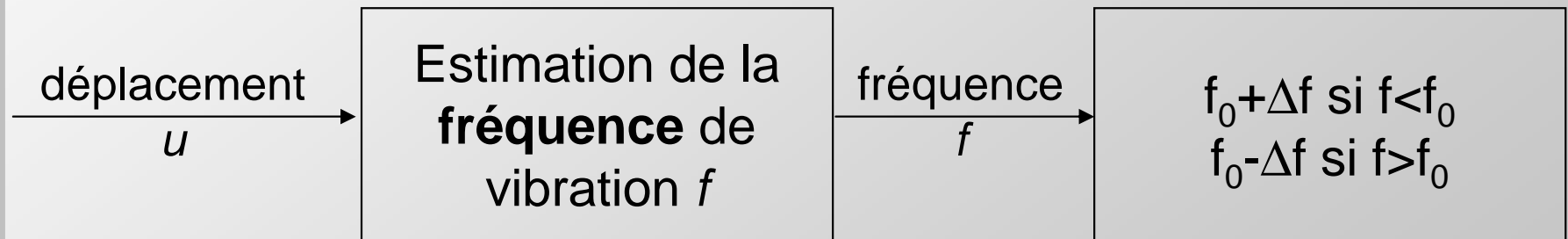
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

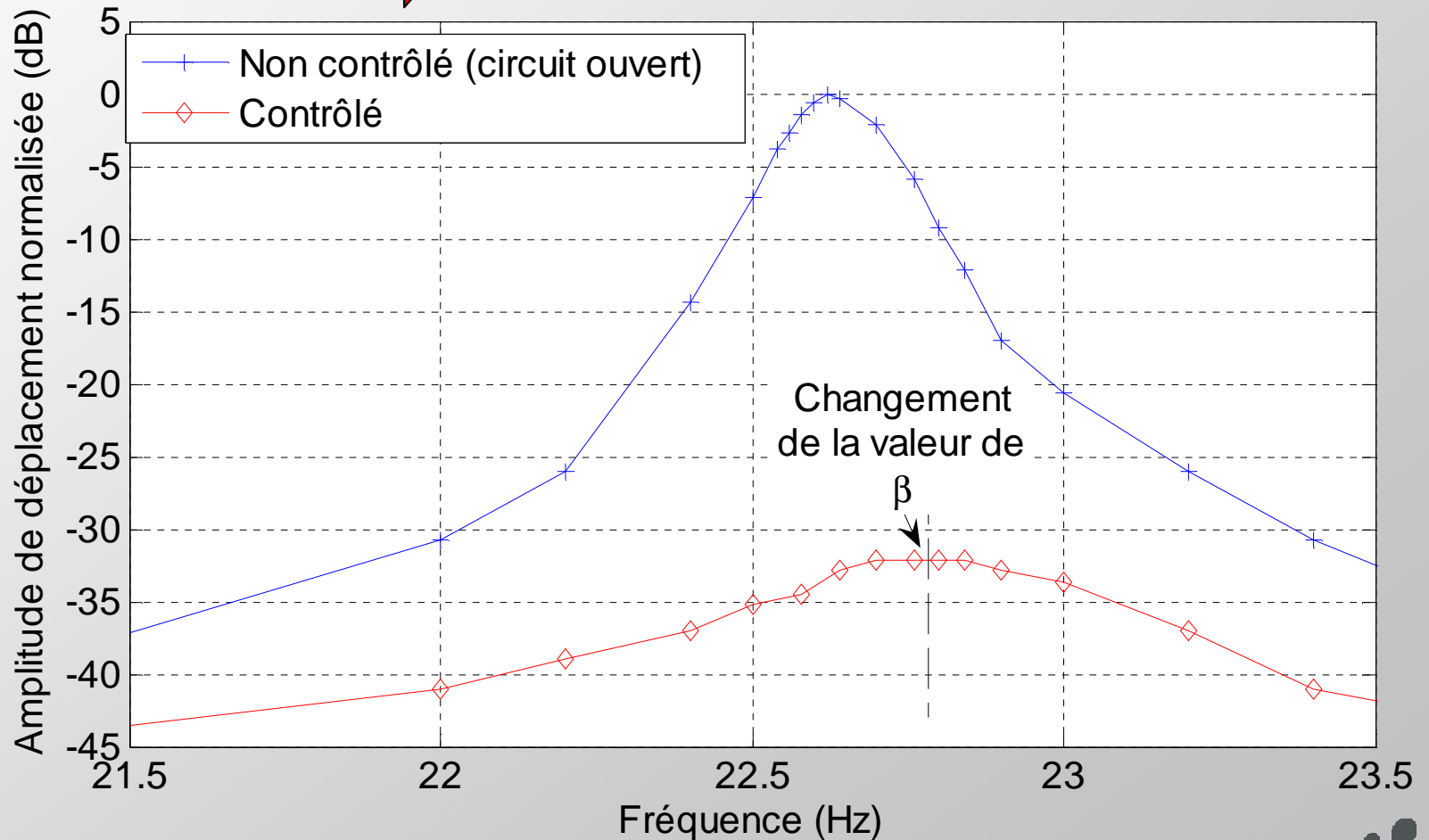
Synthèse

- Sélection de la fréquence de résonance



Contrôle de raideur SSSC

- Sélection de la fréquence de résonance



Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Conclusion

- Contrôle de vibrations semi-passif et semi-actif



Conversion efficace



Peu (voire pas) consommateur d'énergie extérieure

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Technique (<i>Type</i>)	Efficacité	Adaptabilité	Robustesse	Coût énergétique ^{2.20}	Complexité d'implémentation
SSDS (semi-passif)	☹️	😊	😊	😊	😊
SSDI (semi-passif)	😊	😊	😊	😊	😊
SSDI avec détection de seuil (semi-passif)	😊	😊	😊	😊	😊
SSDV (semi-actif)	😊	😊	☹️	😊	😊
SSDVa (semi-actif)	😊	😊	😊	😊	😊
SSSC (semi-actif)	😊	😊	😊	😊	😊
BSDS (semi-passif)	☹️	😊	😊	😊	😊
BSDVp (semi-actif)	😊	😊	😊	😊	😊
BSDVa (semi-actif)	😊	😊	😊	😊	😊

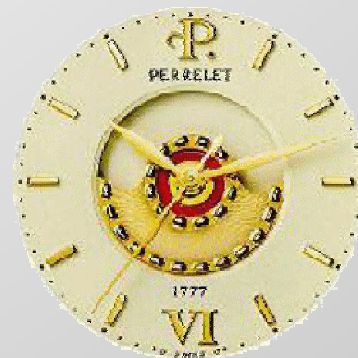
2.20. 😊 signifie que la technique peut être auto-alimentée

*Contexte
Technique NL
Contrôle de vibrations*

Récupération

d'énergie

*Contrôle de santé structurale
avec des dispositifs autonomes
Synthèse*



<http://www.greenwichmeantime.com>

Récupération d'énergie

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

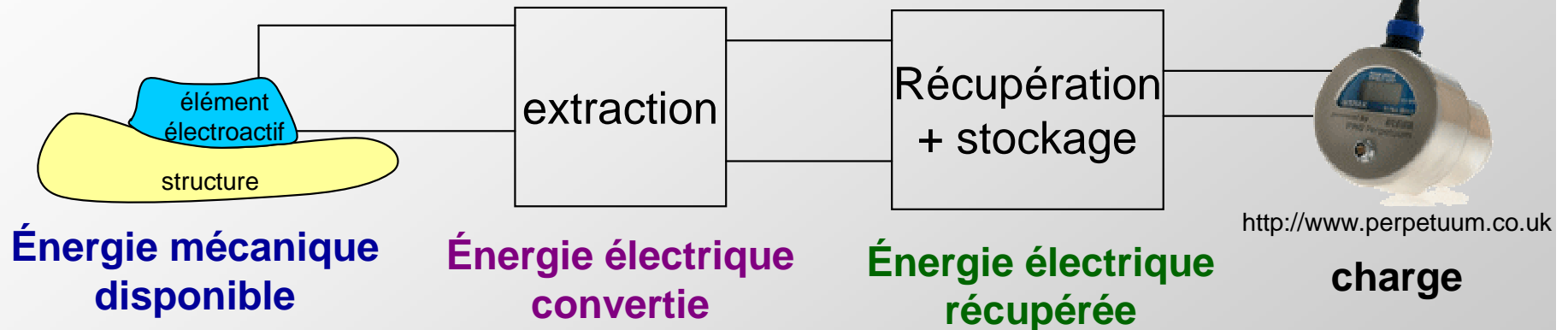
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

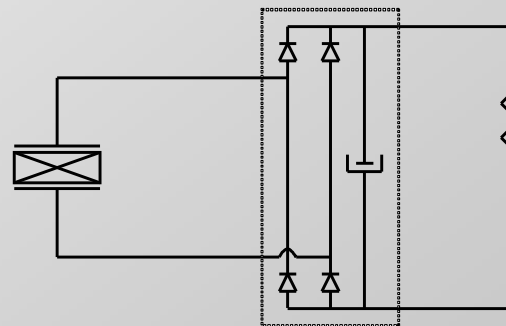
Synthèse

- Principes : récupérer l'énergie convertie



Comment : → optimiser la conversion ?
→ optimiser l'interface entre extraction et récupération ?

- Architecture d'un microgénérateur piézoélectrique **standard** :



Technique standard

Techniques SSH

Contexte

Technique NL


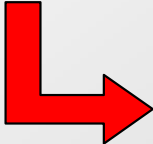
Contrôle de vibrations

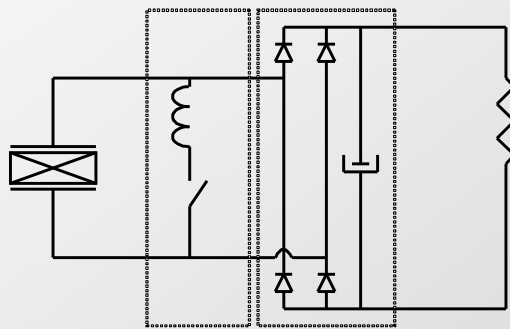
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

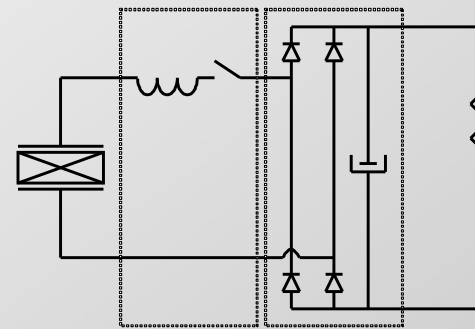
Dispositifs autonomes

Synthèse

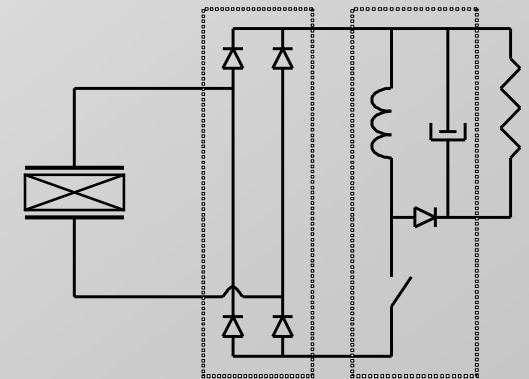
Commutation  **Augmentation de la tension**
 **Augmentation de l'énergie convertie**



SSHI parallèle



SSHI série



SECE

Techniques SSH

Contexte

Technique NL

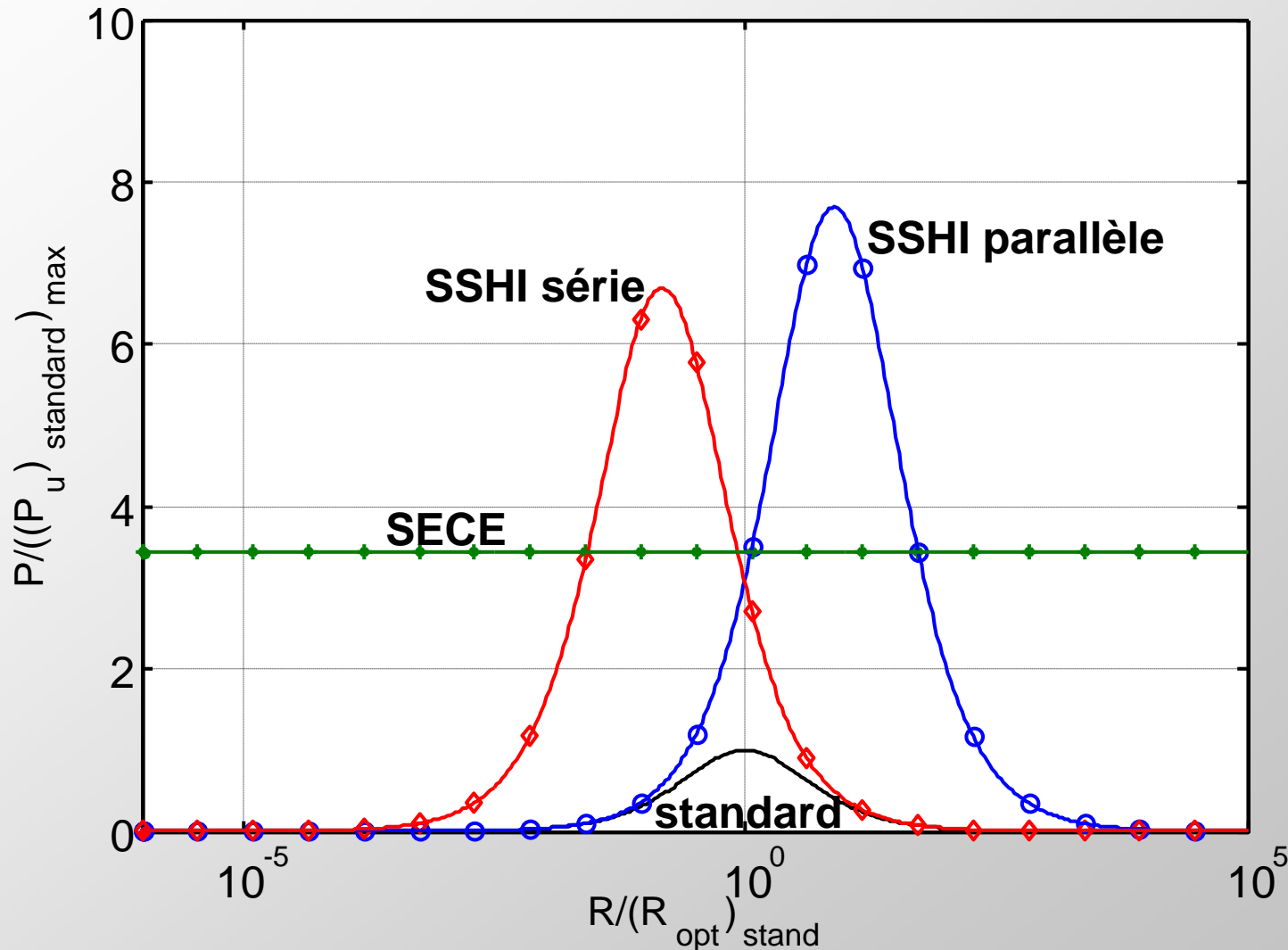
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



- Rapport énergie récupérée/énergie extraite en défaveur du SSHI
- SECE bien adapté au large bande

Généralisation

Source	Piézo	Pyro
Variations	$10 \mu m.m^{-1}$	$1 K$
Energie	$1.4 \mu J.cm^{-3}$	$2.7 \mu J.cm^{-3}$

Contexte

Technique NL

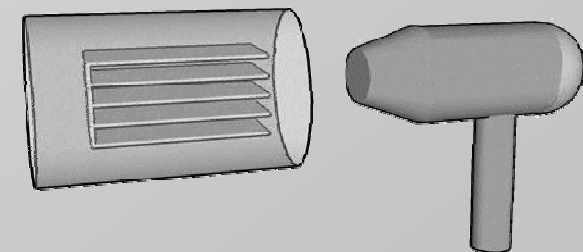
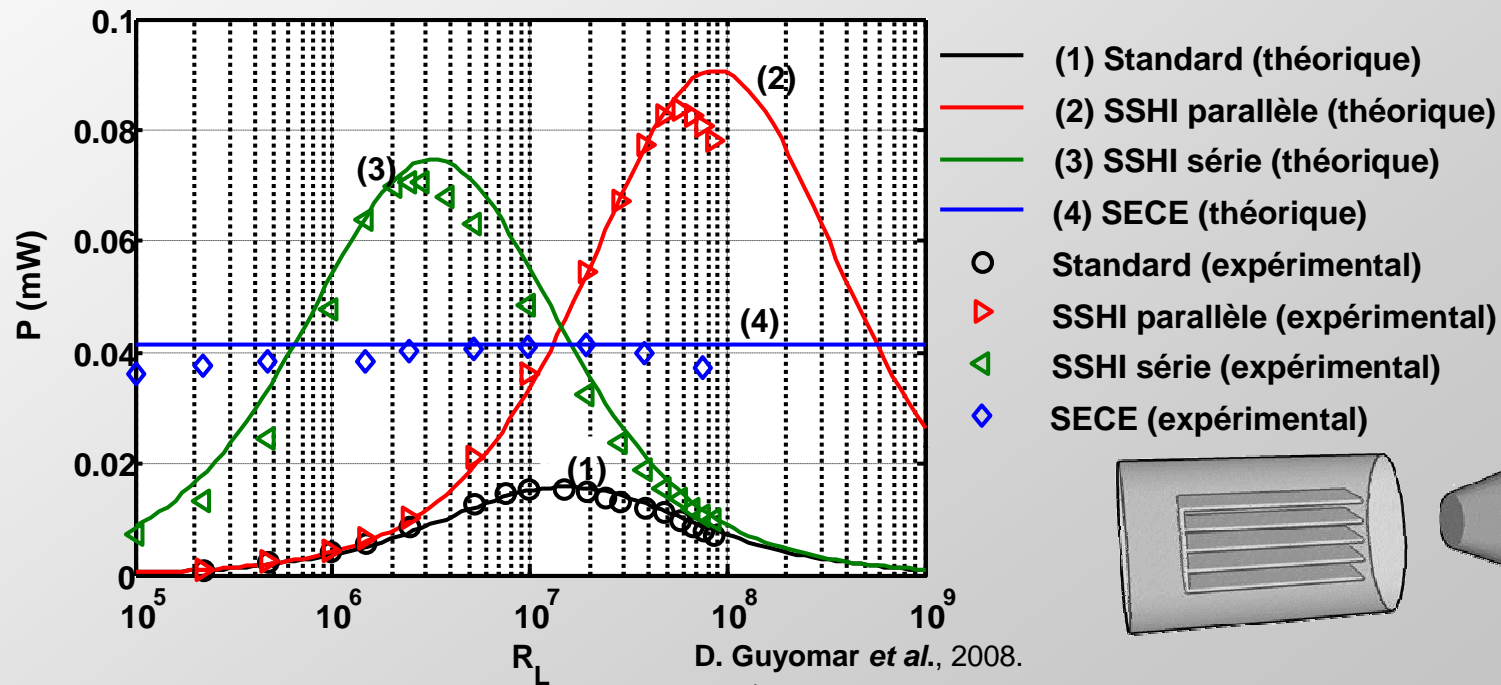
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



- Résistances élevées
- Système non résonant

➔ Intérêt du SECE

Evolutions

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

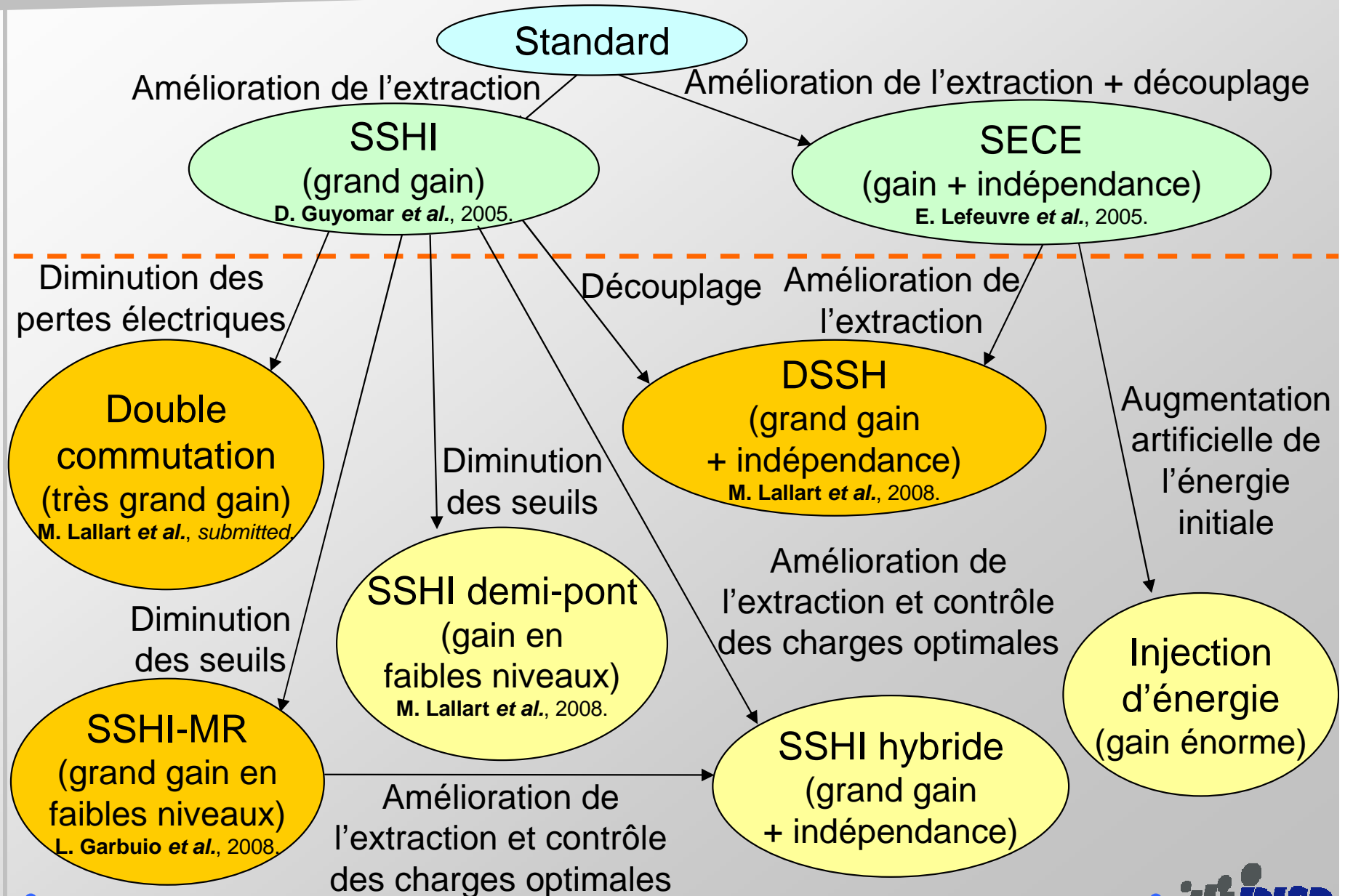
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS



Double Commutation

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

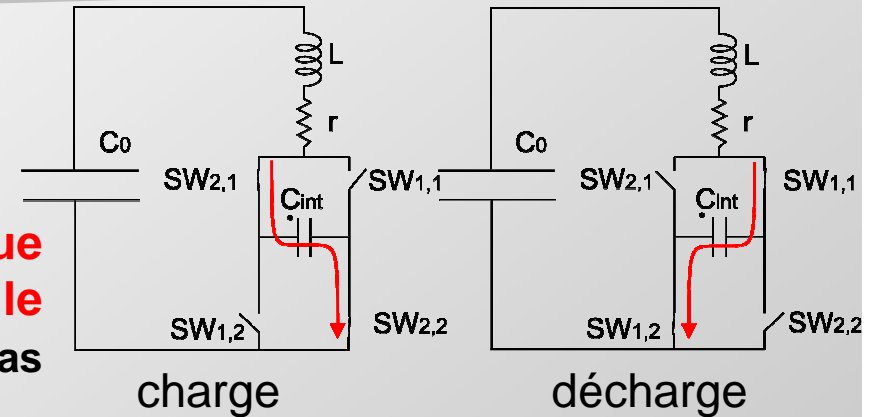
Dispositifs autonomes

Synthèse

Commutation ➡ Pertes

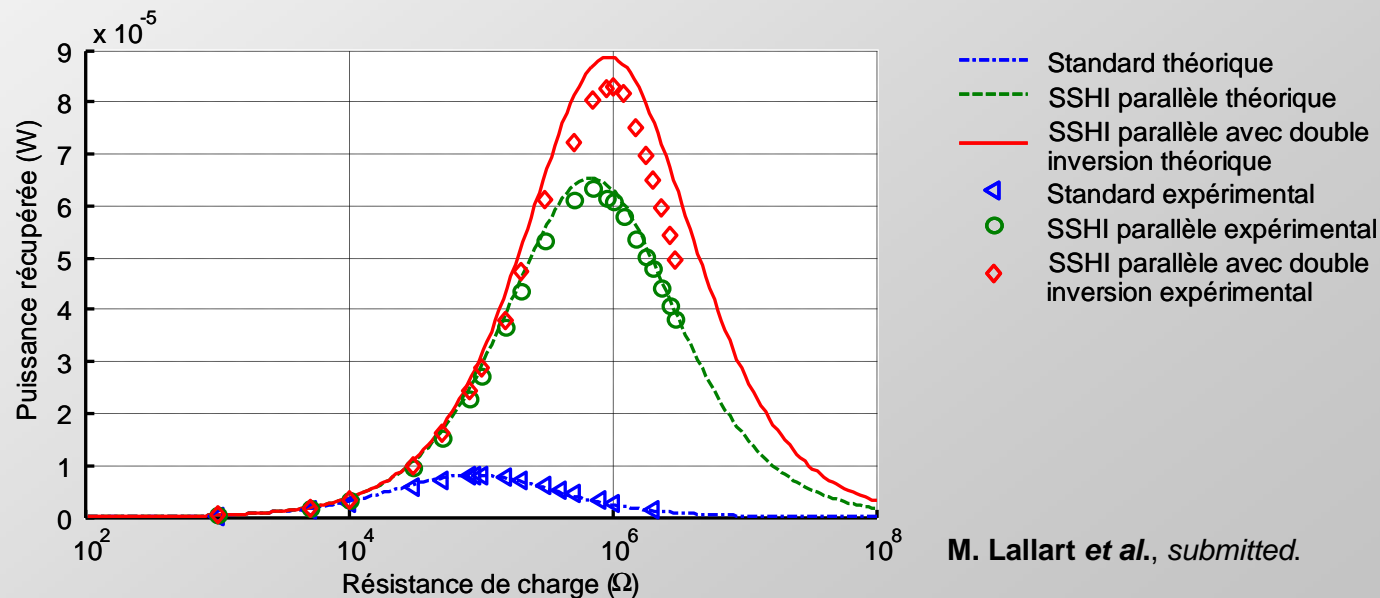


Augmenter le facteur de qualité électrique par diminution artificielle de la capacité le temps de la commutation (pour ne pas compromettre le couplage)



➔ **Utilisation comme réservoir d'énergie intermédiaire**

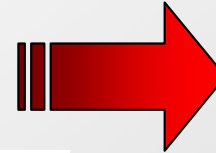
➡ **Augmentation du gain d'énergie récupérée de 40 %**



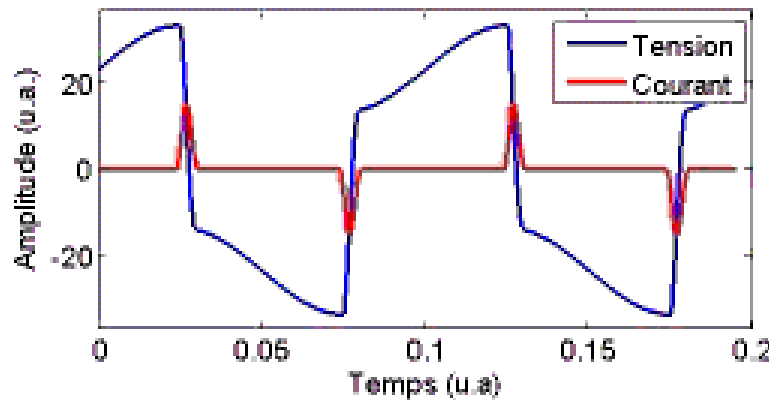
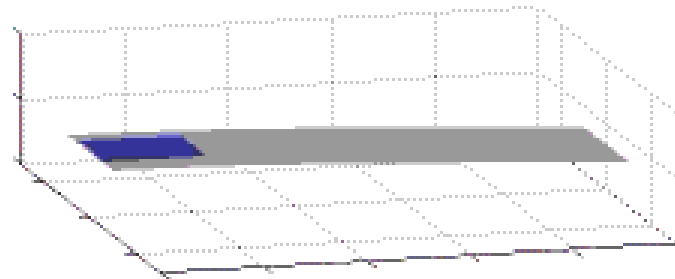
M. Lallart et al., submitted.

DSSH

Elément de stockage supplémentaire



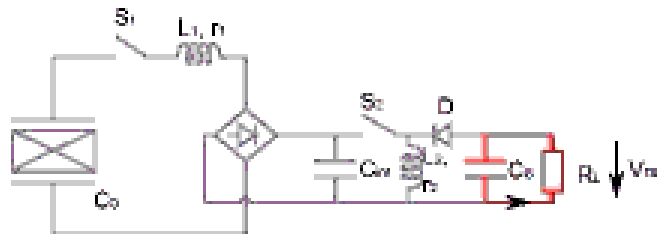
Peut être placé dans l'étage de stockage



- Permet de **découpler l'étage d'extraction de l'étage de stockage**
- Permet **d'optimiser la récupération par cycle**
- **Adapté au large bande**



Concept du DSSH



M. Lallart *et al.*, 2008.

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

DSSH

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

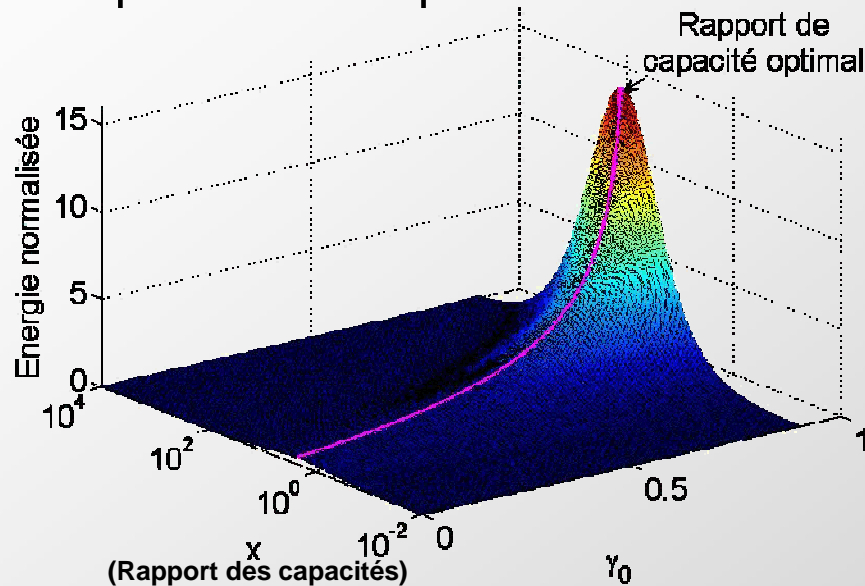
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

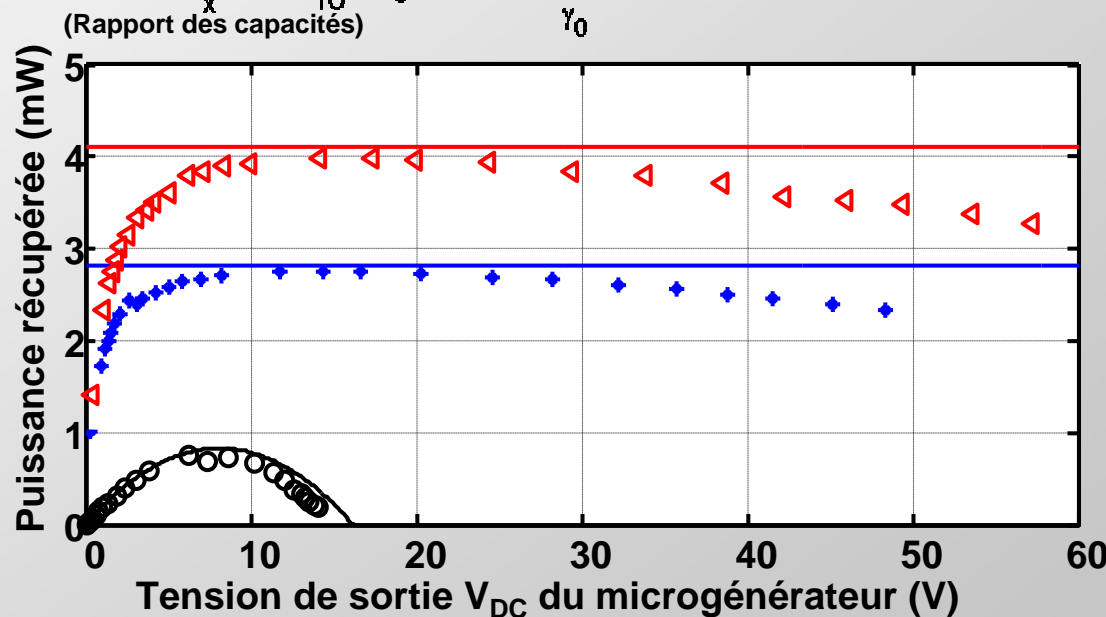
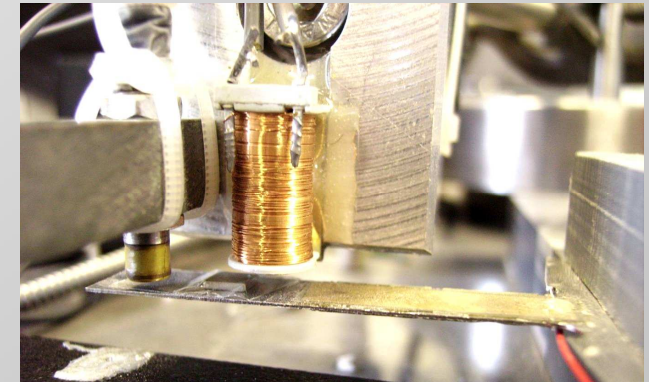
Dispositifs autonomes

Synthèse

A amplitude de déplacement **constante**: **maîtrise de l'augmentation de la tension vs. énergie récupérée**



$$(P_{DSSH})_{(C_{int})_{opt}} = \frac{1}{2} f_0 \gamma_C \frac{(1 + \gamma_0)^2}{1 - \gamma_0} \frac{\alpha^2}{C_0} u_M$$



- Standard (théorique)
- SECE (théorique)
- DSSH (théorique)
- Standard (expérimental)
- ◆ SECE (expérimental)
- ◀ DSSH (expérimental)

DSSH

A amplitude d'excitation **constante** : **maîtrise de l'amortissement vs. énergie extraite**

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

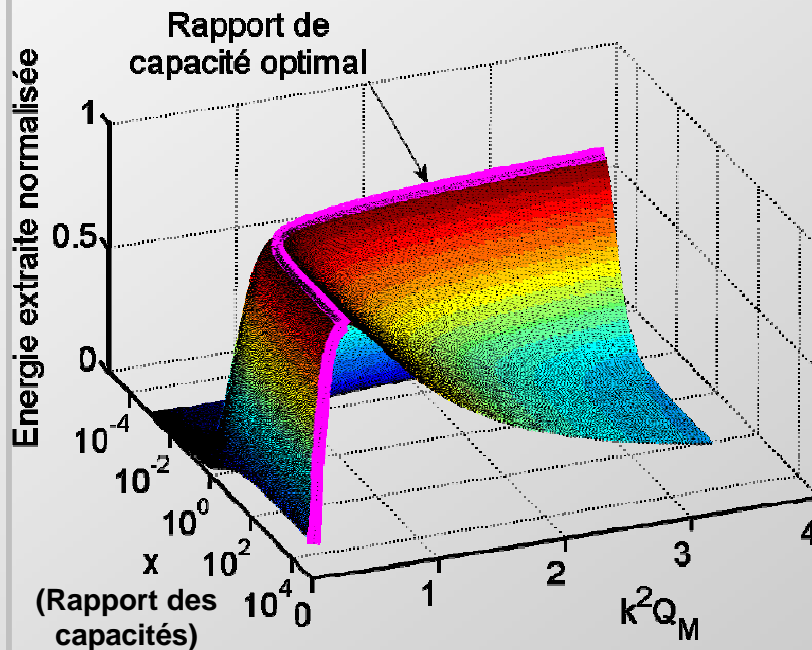
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

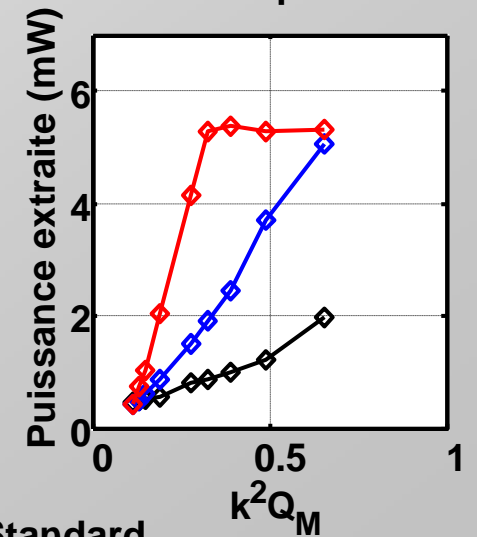
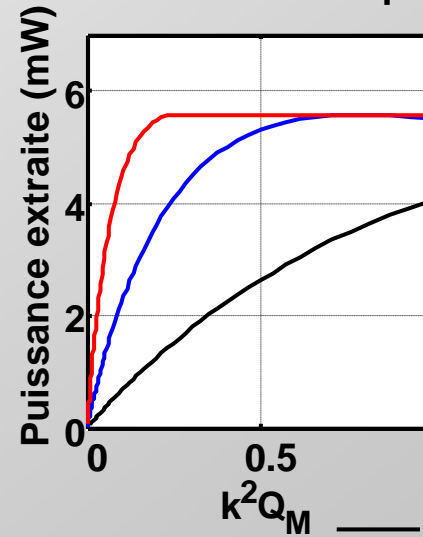
Dispositifs autonomes

Synthèse

$$(P_{DSSH})_{(C_{int})_{opt}} = \begin{cases} \frac{2\pi k^2 Q_M (1-\gamma_0^2)}{(\pi(1-\gamma_0) + 4k^2 Q_M (1+\gamma_0))^2} \frac{F_M^2}{C} & \text{pour } k^2 Q_M \leq \frac{4}{\pi} \frac{1-\gamma_0}{1+\gamma_0} \\ \frac{F_M^2}{8C} & \text{pour } k^2 Q_M > \frac{4}{\pi} \frac{1-\gamma_0}{1+\gamma_0} \end{cases}$$



Résultats théoriques Résultats expérimentaux



— Standard
— SECE
— DSSH

Faibles niveaux

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

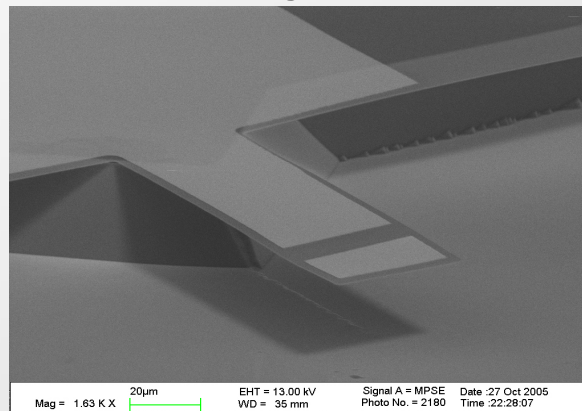
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Microgénérateurs MEMS
Hautes fréquences mécaniques } → **Faibles niveaux de tension**

www.eng.umd.edu



- ↓
1. **Problème avec les tensions de seuils**
 2. **Détection d'extrema auto-alimentée plus difficile**

→ **Nécessité de diminuer artificiellement les tensions de seuil vues par l'élément actif**

Faibles niveaux

SSHI-MR \rightarrow **Divise les tensions de seuils par le rapport de transformation**

Contexte

Technique NL

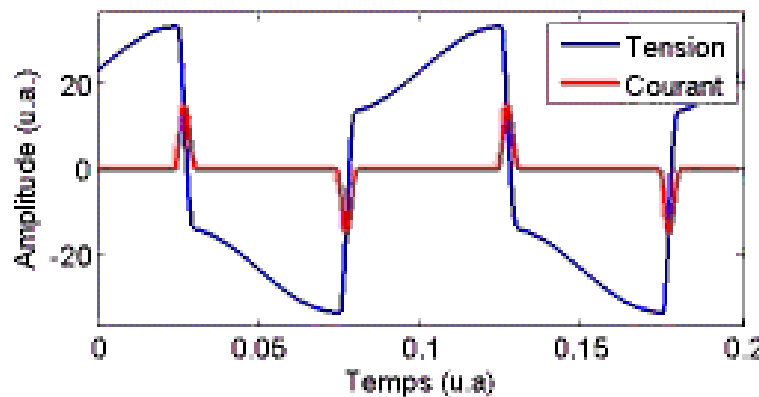
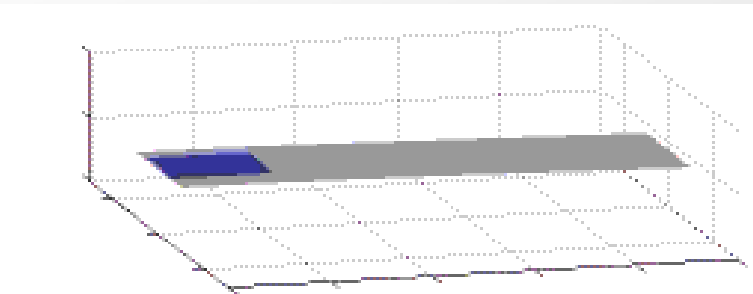
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

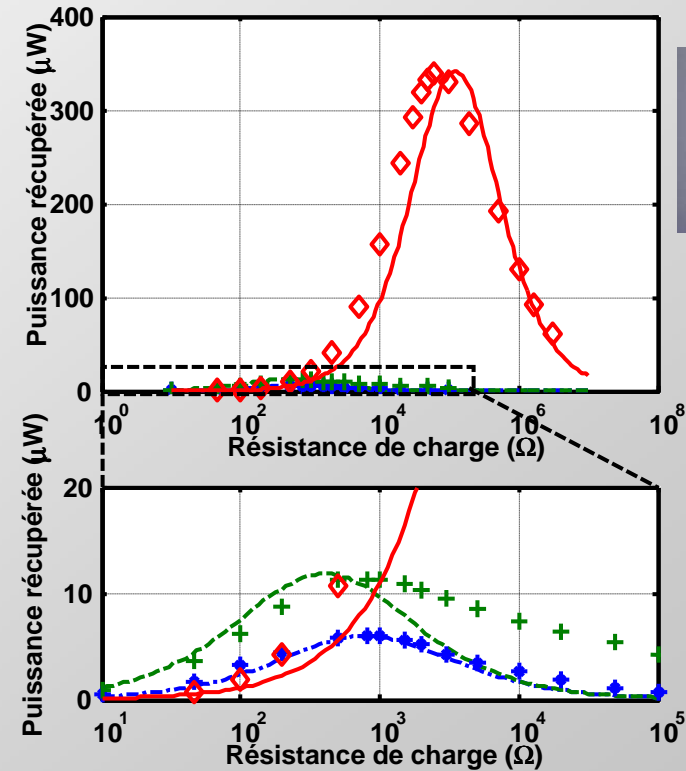
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



L. Garbuio *et al.*, 2008.



- Standard (théorique)
- SSHI série classique (théorique)
- SSHI MR (théorique)
- ◆ Standard (expérimental)
- + SSHI série classique (expérimental)
- ◇ SSHI-MR (expérimental)

Conclusion

- **Traitement non-linéaire** appliqué à la récupération d'énergie



Améliore grandement l'extraction d'énergie



« Auto-alimentable » dans la plupart des cas

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS

Technique	Énergie récupérée				
	Amplitude de déplacement constante	Amplitude d'excitation constante	Récupération à faible niveau	Indépendance à la charge	Facilité d'implémentation
Standard					
SSHI parallèle					
SSHI série (structure demi-pont)					
SSHI-MR					
SSHI hybride					
SECE					
DSSH					
Injection d'énergie					

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de

Santé Structurale

avec des dispositifs autoréparés

Synthèse

www.ndt.net



Contrôle de santé structurale

Contexte

Technique NL

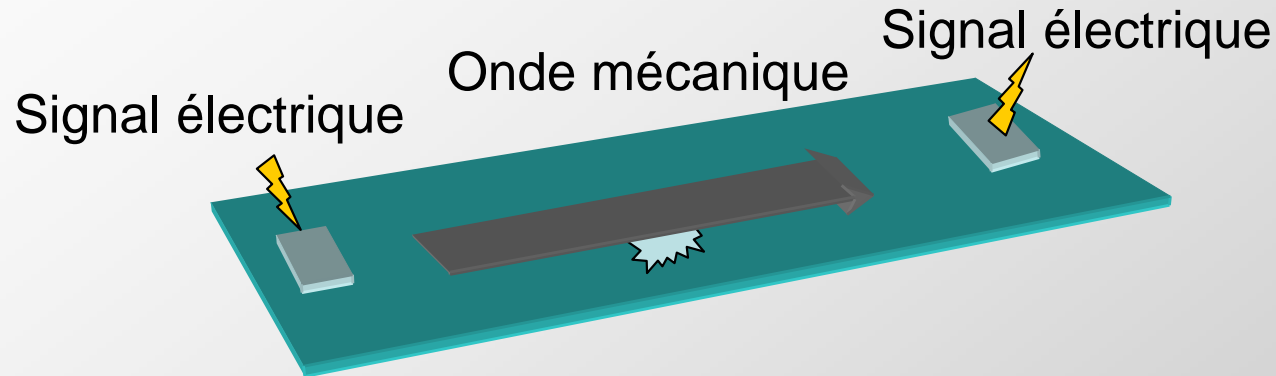
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



- **Plusieurs méthodes** (renversement temporel, réseau de neurones...)



Algorithmes consommateurs d'énergie

➡ Nécessité d'un traitement simple

Indice d'Endommagement

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

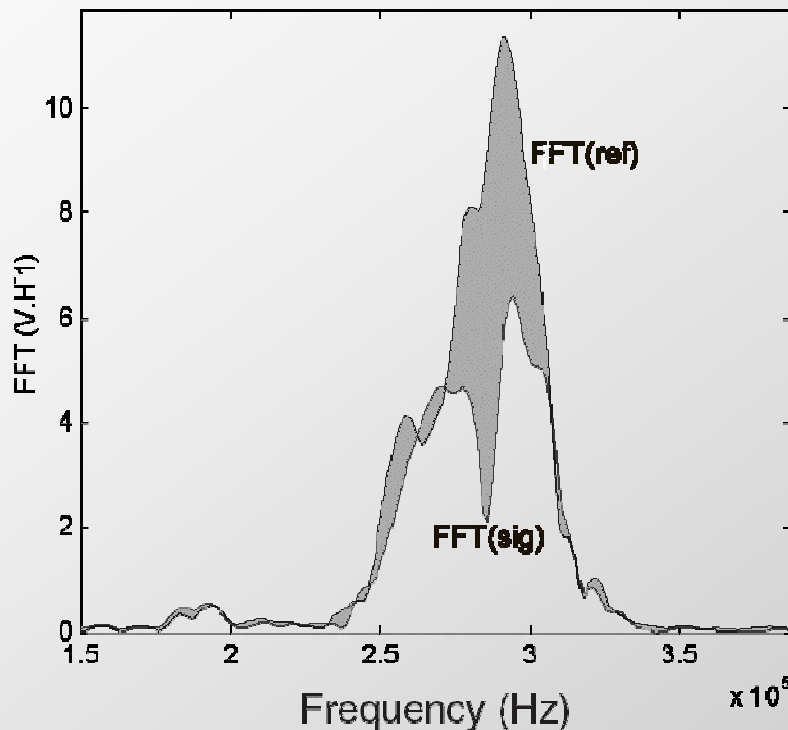
Traitement **simple** de la **signature** d'une onde de **Lamb**



Energie limitée

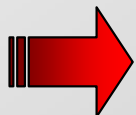


Notion d'Indice d'Endommagement



T. Monnier, 2006.

$$DI = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} |FFT(ref)_i - FFT(sig)_i|}{\sum_{i=n_1}^{n_2} |FFT(ref)_i|}$$



Relate l'évolution de l'état structural (caractère relatif)

Généralisation du DI

$$DI = f(g(ref), g(sig))$$

T. Monnier *et al.*, 2008.

Opérateur de distance **Opérateur de transformation**

Contexte

Technique NL

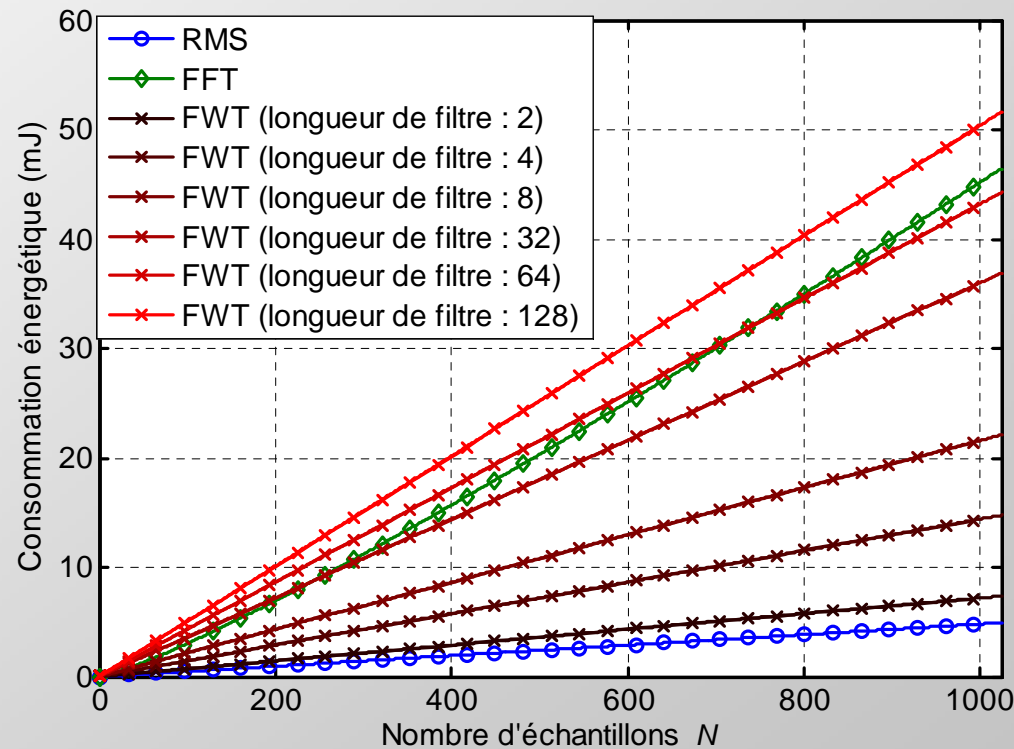
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Résultats simulés/expérimentaux

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

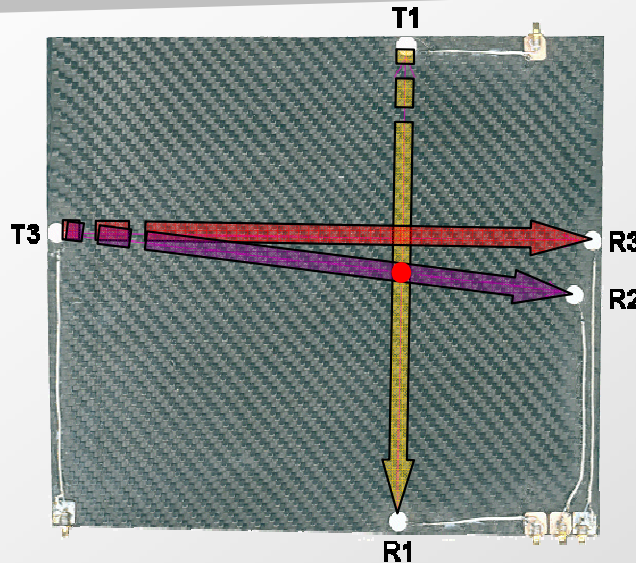
Récupération d'énergie




Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

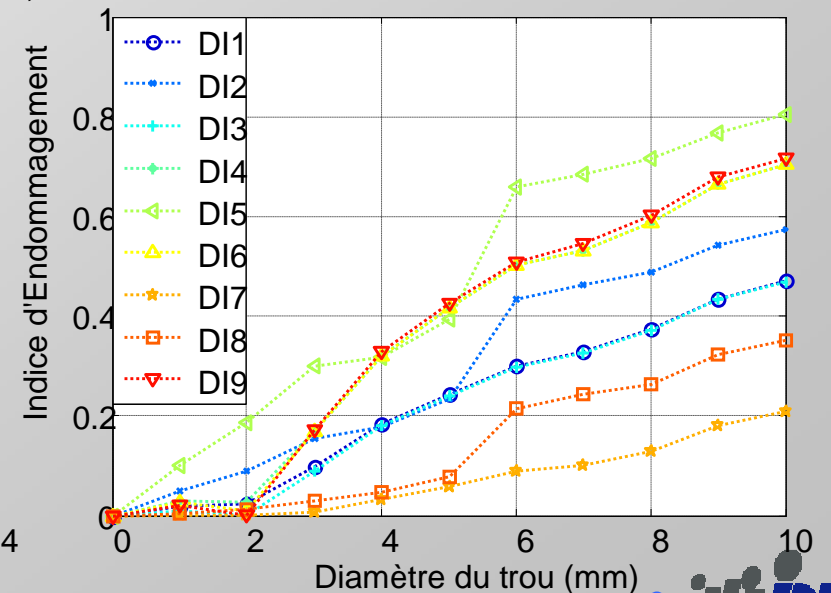
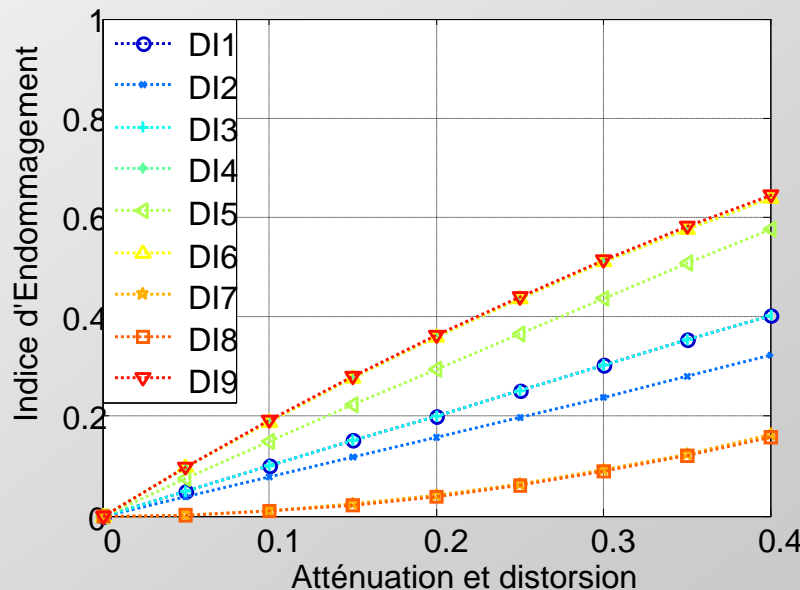
LGEF/
MATEIS



-  Sur trajet direct / dans l'axe
→ Atténuation pure
-  Sur trajet direct / hors axe
→ Atténuation pure et distorsion
-  Hors trajet direct
→ Contribution supplémentaire et distorsion

Sur le chemin, hors axe

FFT



DI non linéaire

Contexte

Technique NL

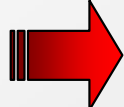
Contrôle de vibrations

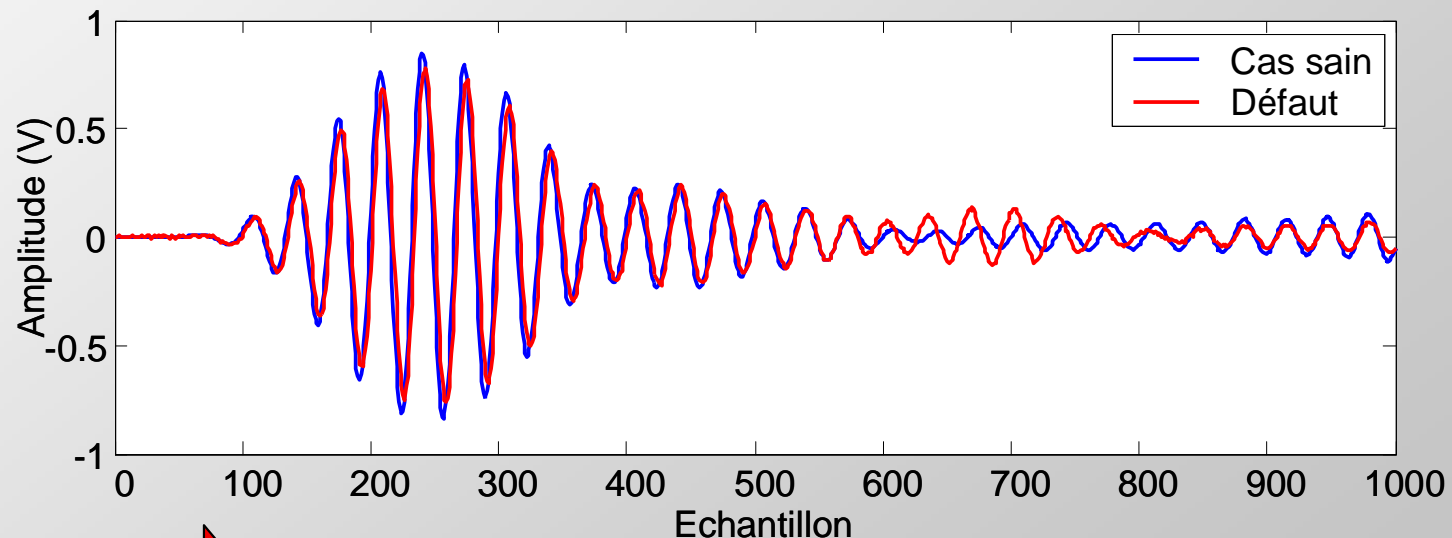
Récupération d'énergie

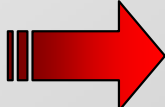
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Transformation linéaire  **Calculateur et informations inutiles**
(les changements sont plus visibles au niveau des faibles valeurs)

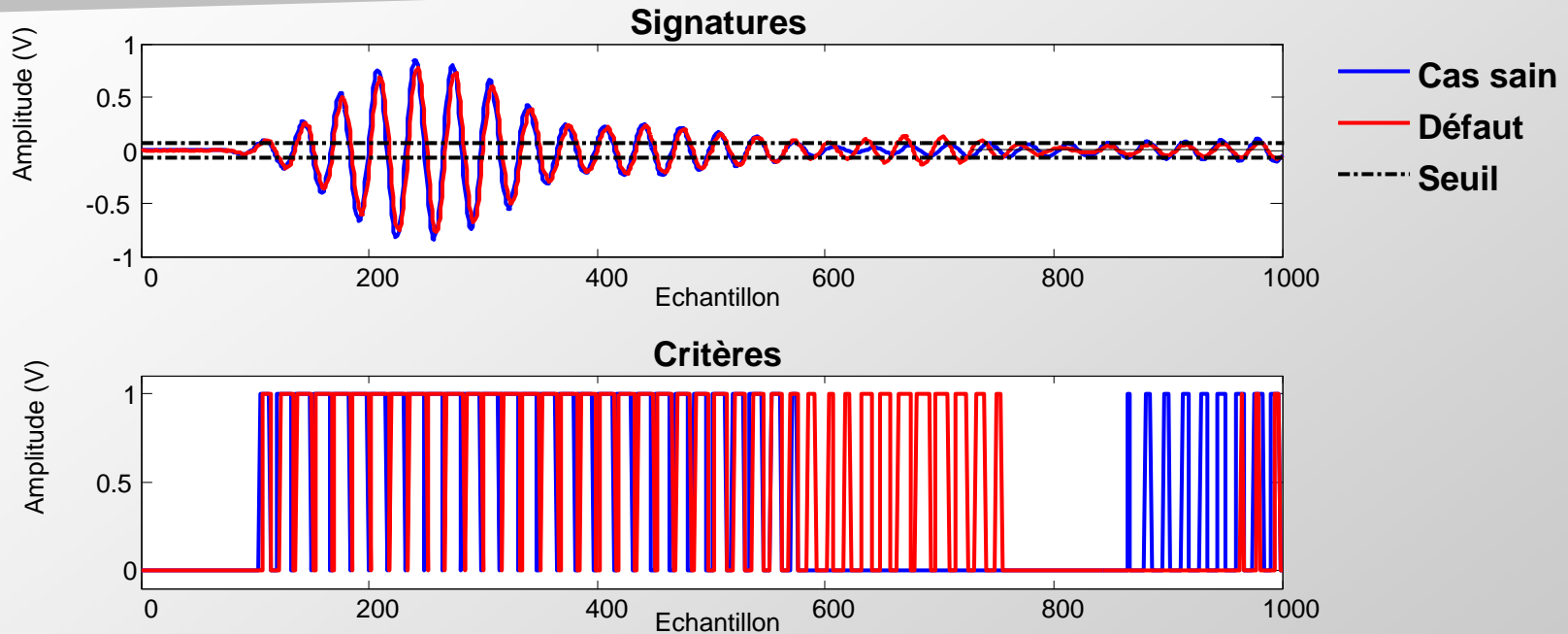


 **Approche par détection de seuil**

➤ Cas particulier : détection de **zéros** → indépendant de l'amplitude

DI non linéaire

- Contexte
- Technique NL
- Contrôle de vibrations
- Récupération d'énergie
- Contrôle de santé structurale**
- Dispositifs autonomes
- Synthèse



Opérateur booléen simple

Calcul du temps où la signature est supérieure

$$DI = \frac{\sum_k (|ref_k| > seuil) - \sum_k (|sig_k| > seuil)}{\sum_k (|ref_k| > seuil)}$$

M. Lallart et al., submitted.

Comparaison des instants d'intersections

$$DI = \frac{\sum_k (t_{ref_k} - t_{sig_k})}{\sum_k t_{ref_k}}$$

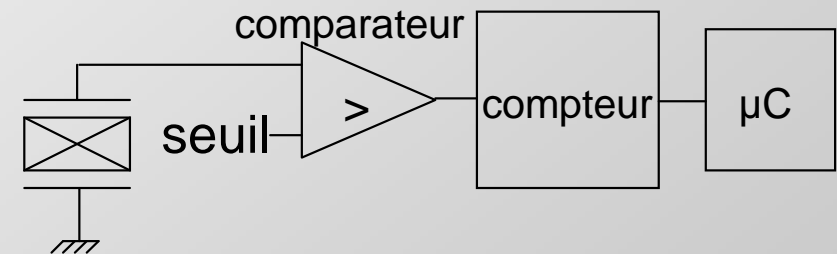
DI non linéaire

Calcul du temps où la signature est supérieure

$$DI = \frac{\sum_k (|ref_k| > seuil) - \sum_k (|sig_k| > seuil)}{\sum_k (|ref_k| > seuil)}$$

M. Lallart et al., submitted.

Réduction drastique de la consommation:
 ~50 μJ pour 1024 échantillons
 (contre 61 mJ en FFT)



Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

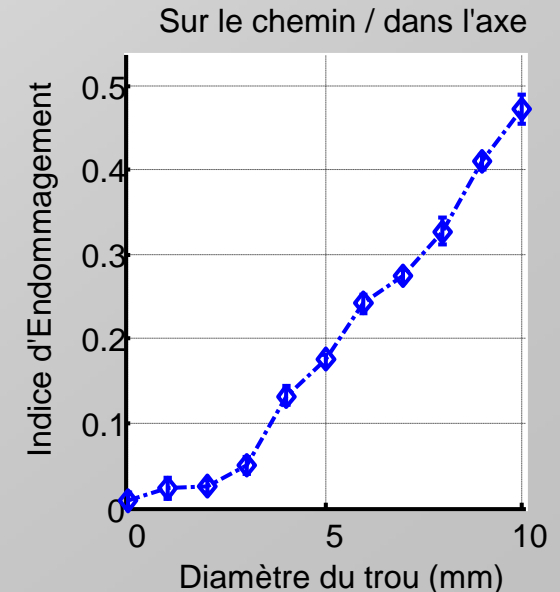
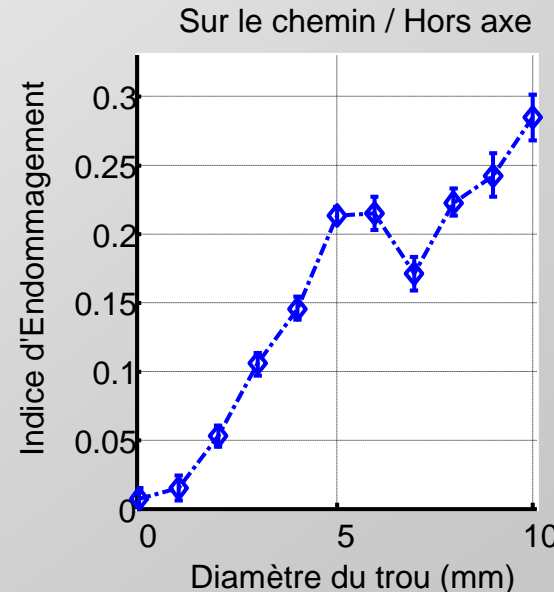
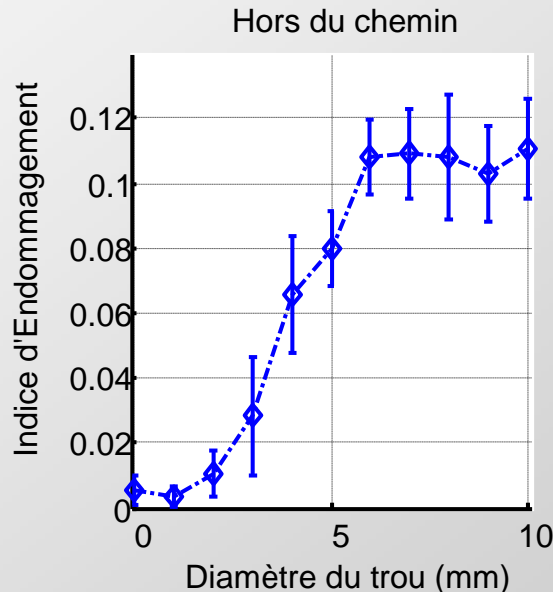
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS



Le seuil permet également une auto-synchronisation

Conclusion

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- Indice d'Endommagement → requiert **peu d'énergie** pour un **contrôle correct**
- Caractère **relatif** :
 - applicable à **tout type de structure**
 - donne **l'évolution** de l'état de santé structurale
- Extension : **distance** entre deux signatures dans un **espace particulier**
- Une approche **non linéaire** permet un très **bon contrôle** avec un **économie d'énergie** importante
- Certaines approches permettent une bonne détection de **l'apparition** d'un défaut tout en étant économe en termes de **place mémoire** et **d'énergie**

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

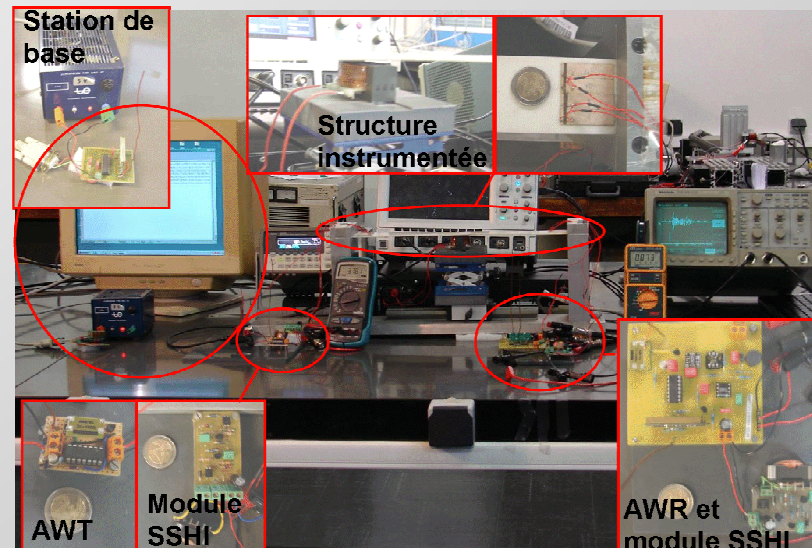
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Vers des Dispositifs de Contrôle de

Santé Structurale Auto-alimentés

Synthèse



Vers des dispositifs autonomes

Contexte

Technique NL

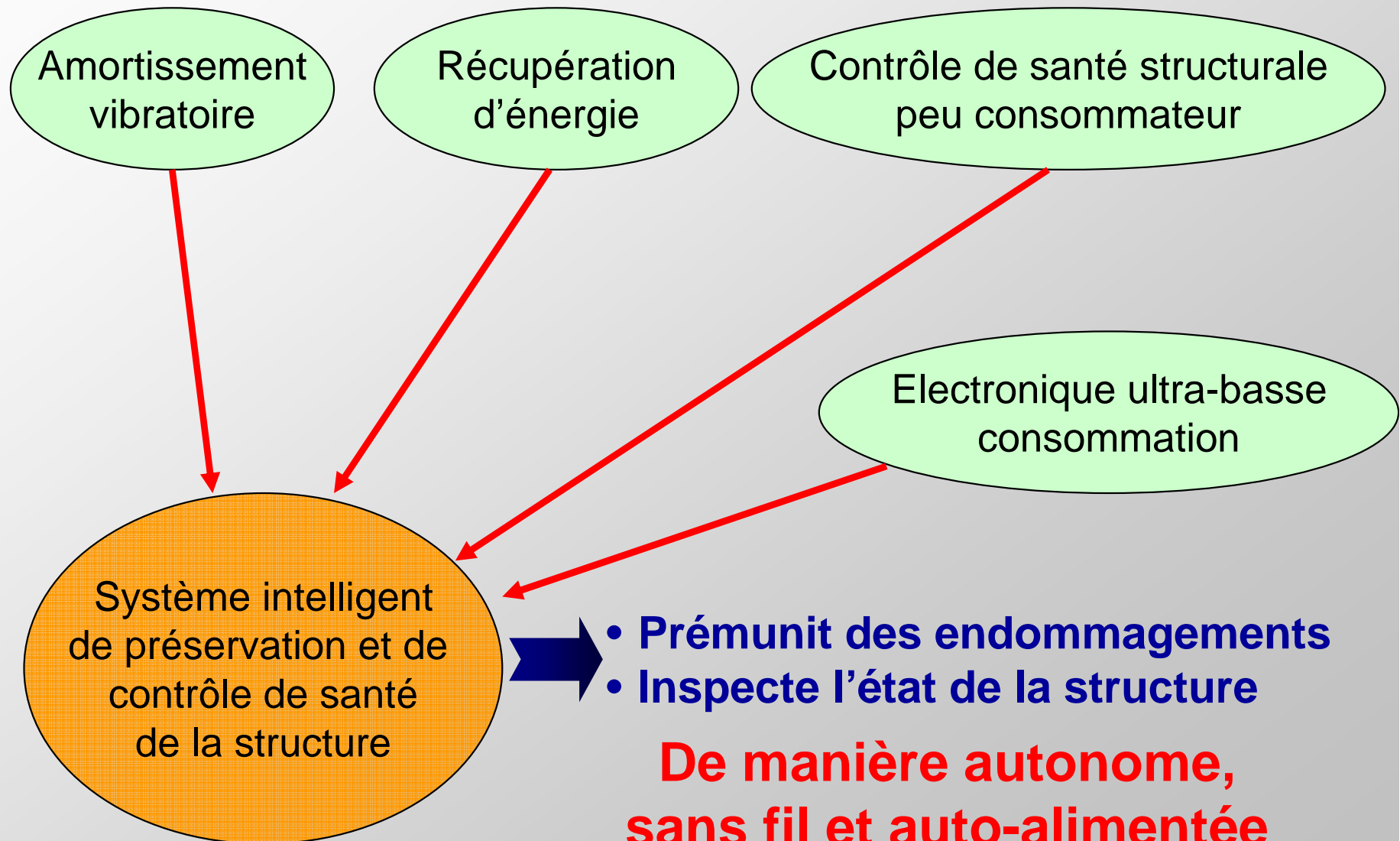
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



Composants

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

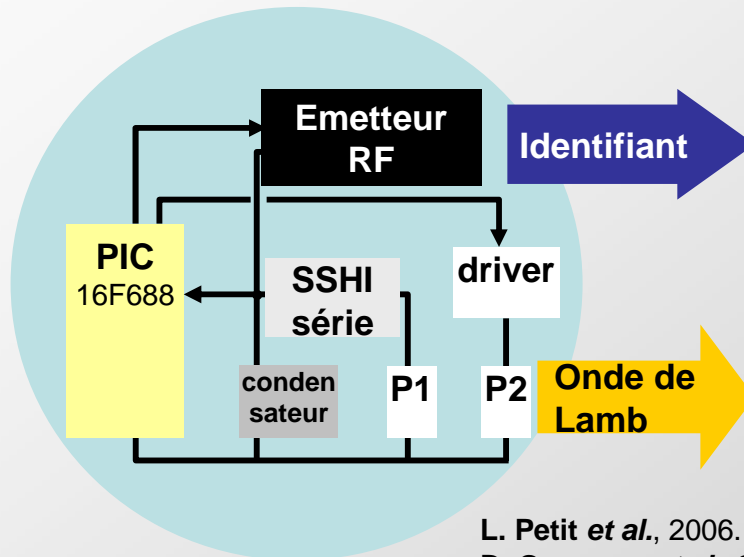
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS

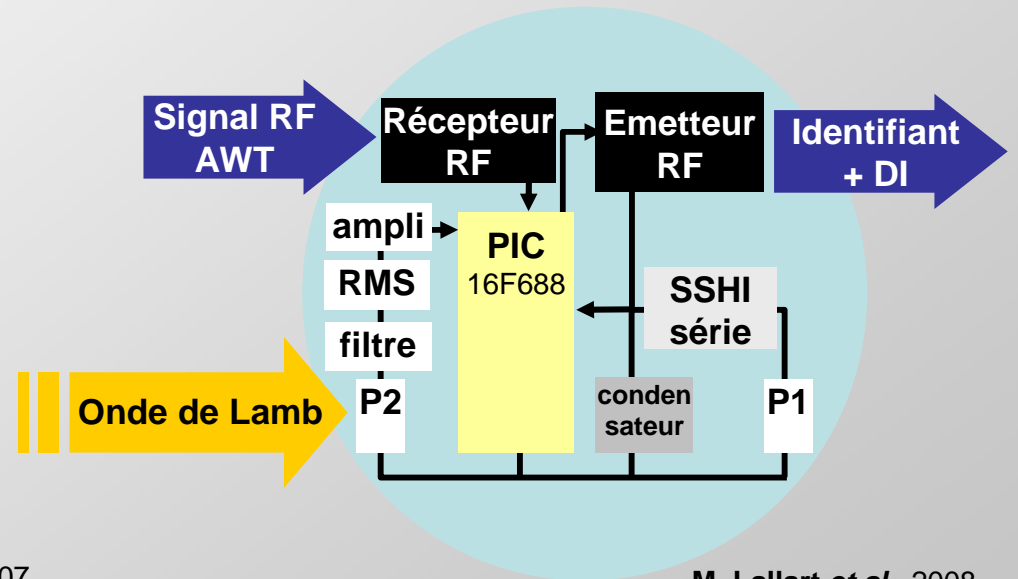
AWT (Autonomous Wireless Transmitter)



L. Petit *et al.*, 2006.
D. Guyomar *et al.*, 2007.

- Envoi de l'onde de Lamb
- Envoi de l'identifiant

AWR (Autonomous Wireless Receiver)



M. Lallart *et al.*, 2008.

- Réception de l'onde de Lamb
- Pré-traitement de la signature
- Envoi du résultat et de l'identifiant

Station de base : → récolte les informations

Stratégie

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

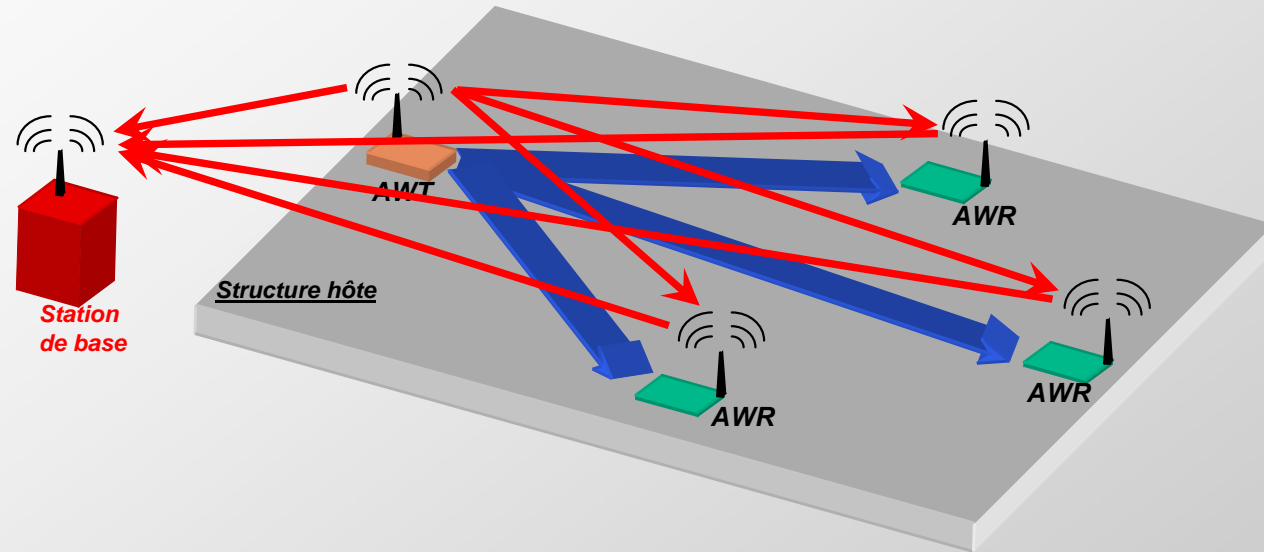
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS



AWT

- Réveil et envoi de l'identifiant
- Envoi de l'onde de Lamb et mise en veille

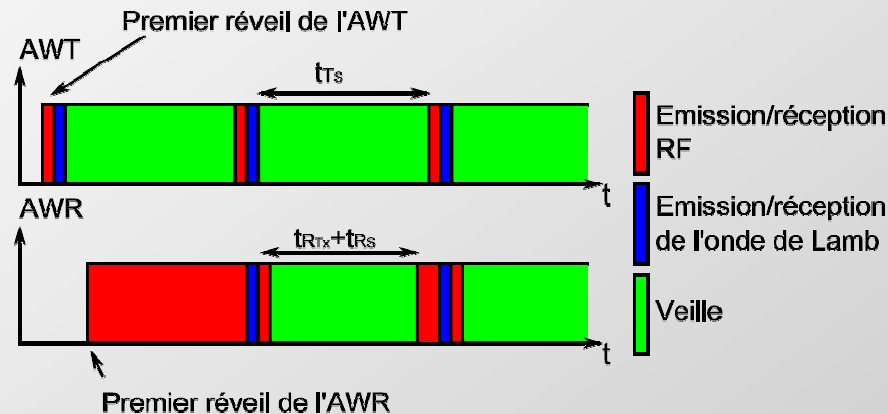
AWR

- Ecoute RF
- Réveil
- Extinction de la RF + réception de l'onde de Lamb
- Traitement de la signature + envoi de l'identifiant et du résultat
- Veille totale
- Ecoute RF

Stratégie

Nécessité d'économiser l'énergie

- Utilisation des fonctions de **veille**



- Un **soin** particulier doit être apporté aux composants dont le **rapport cyclique est important** (raisonnement énergétique – pas en puissance !)
- Indice d'Endommagement** basé sur une valeur de la **RMS** fenêtrée à un instant donné

$$DI = \left| \frac{RMS(ref) - RMS(sig)}{RMS(ref)} \right|$$

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Validation 1D

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

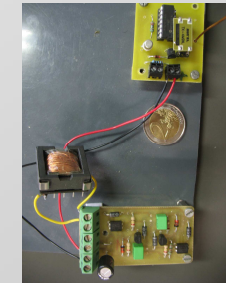
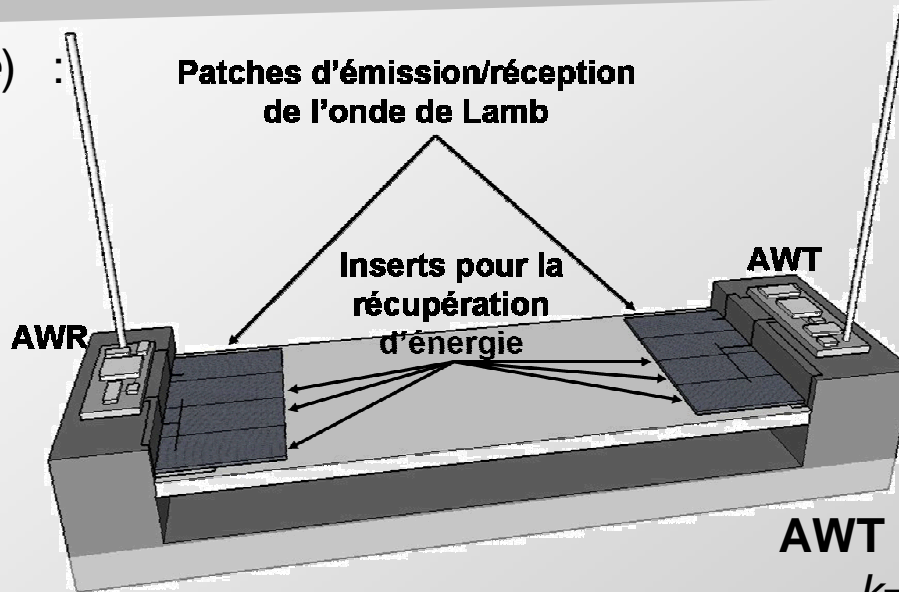
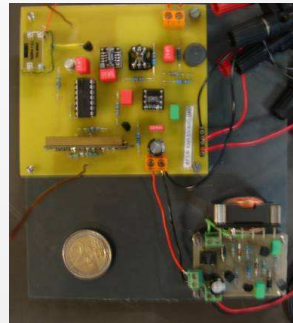
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

AWR (1.68 mJ/cycle) :
k=4.98 %



AWT (1.2 mJ/cycle) :
k= 4.07 %

Contrainte (MPa)	1.5	1.75	2	2.25	2.5	3	3.5
Dispo AWT (mJ)	0.77	1.05	1.36	1.72	2.13	3.06	4.17
Dispo AWR (mJ)	1.1	1.5	1.96	2.48	3.06	4.41	6.00
Balance AWR (mJ)	-0.43	-0.15	0.16	0.52	0.93	1.86	2.97
Balance AWT (mJ)	-0.58	-0.18	0.28	0.80	1.38	2.73	4.32

Validation 1D

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

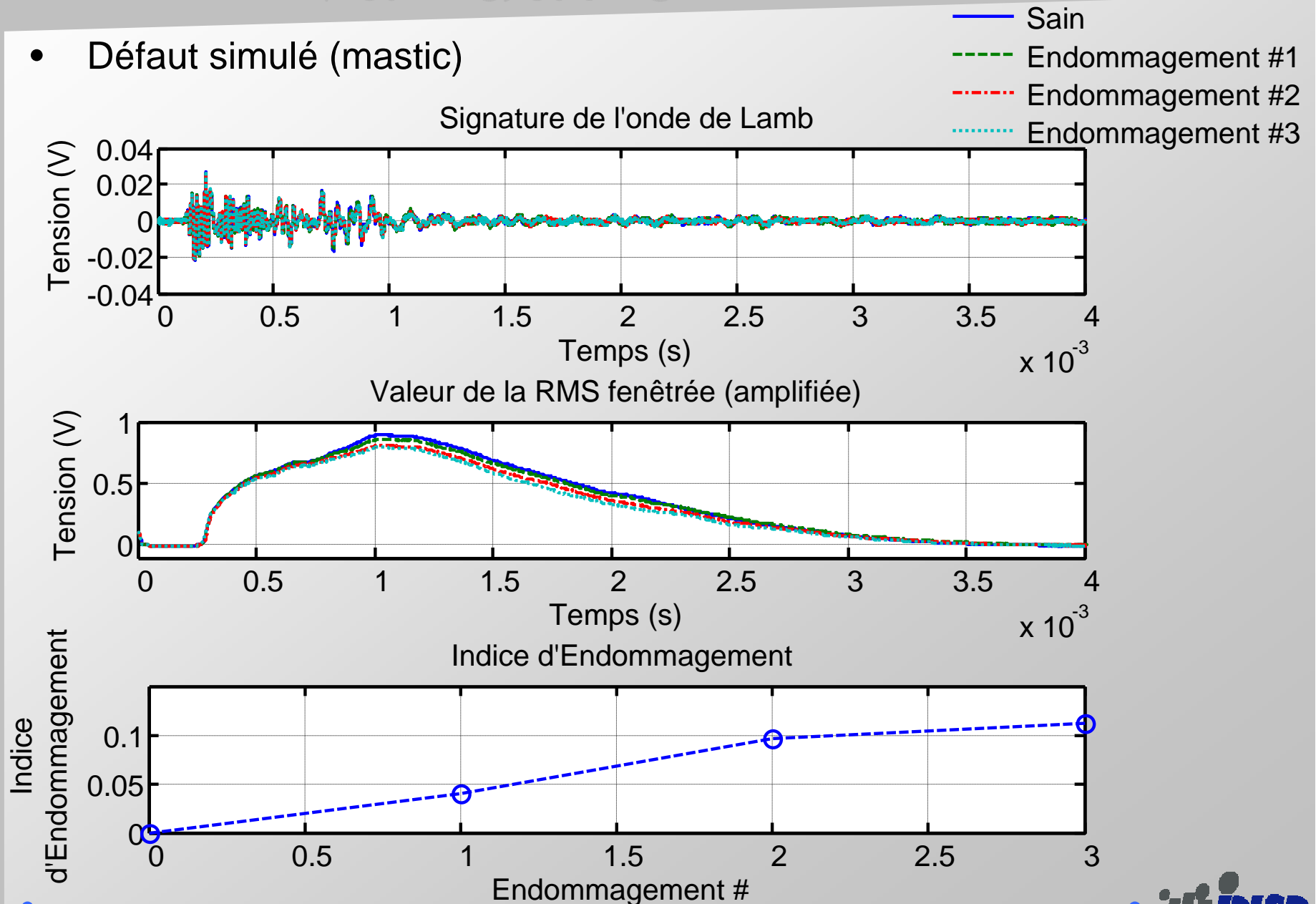
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

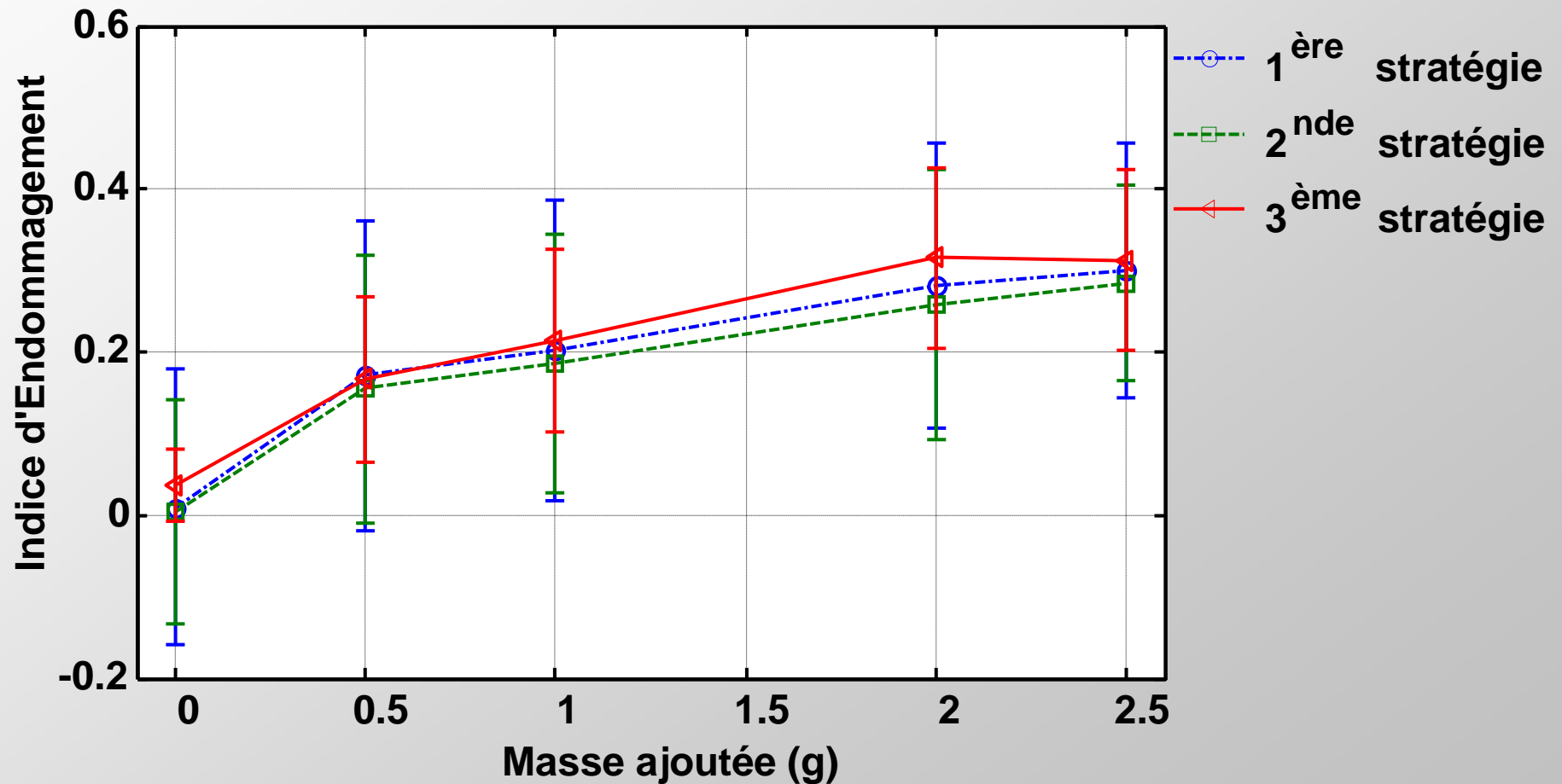
LGEF/
MATEIS

- Défaut simulé (mastic)



Validation 1D

- Défaut simulé (mastic)



Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Intégration et test (projet ADVICE)

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

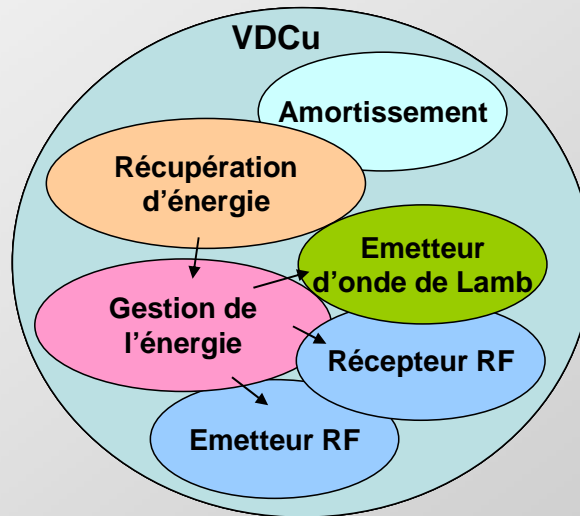
Dispositifs autonomes

Synthèse

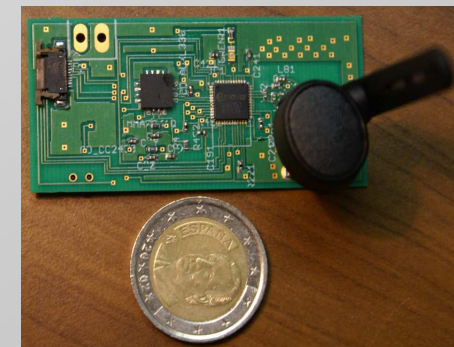


- Projet **ADVICE** : *Autonomous Damage detection and Vibration Control systEms*
- **Objectif** : créer un système de **contrôle de santé autonome** pour des structures **aéronautiques**

AWT → VDCu



AWR → End-node
(alimentée de manière externe)



(reproduit avec l'aimable autorisation d'UCL)

- **Indice d'Endommagement : FFT**

Conclusion

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

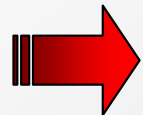
Dispositifs autonomes

Synthèse

- Récupération d'énergie efficace + fonctions peu consommatrices



Systeme autonome, sans fil et auto-alimenté



Points sensibles :

- **fonctions de veille**
- **composants dont le temps de fonctionnement est relativement important**



Critère pertinent : énergie nécessaire / cycle



Compromis énergie disponible vs. temps de répétition

Contexte

Technique NL

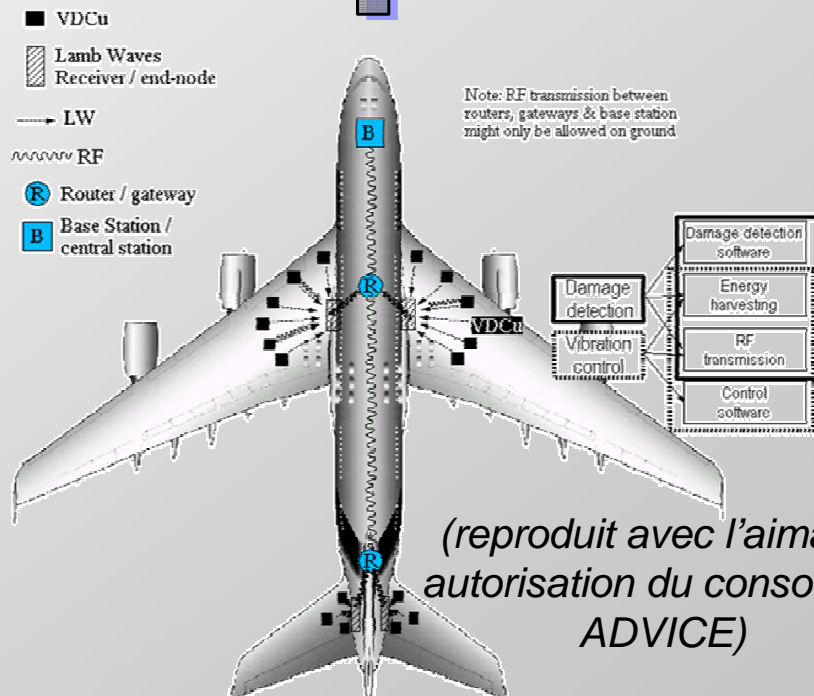
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Vers des dispositifs autonomes

Synthèse Générale et Perspectives



(reproduit avec l'aimable autorisation du consortium ADVICE)

Synthèse générale et Perspectives

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Contrôle de vibrations

- **Traitement non-linéaire** → augmentation de la conversion - **indépendant** du phénomène (e.g. magnétique (M. Lallart et al., 2008))
- Possibilité de contrôler **plusieurs paramètres** (**-30 dB en contrôle de raideur**)
- **Cas multimodal** → seuil (« auto-alimentable »)
- BSD : **indépendance à la structure** (large bande, **-20 dB**)



Récupération d'énergie

- **Traitement NL** → augmentation des **performances**
- **Réservoirs intermédiaires** → **grande amélioration** (e.g. gain de 11 / **indépendance à la charge** et gain de 6)
- **Intégration** : faibles niveaux de tension (MR : gain de 56)
- Implémentation **réaliste** (auto-alimentation)



Synthèse générale et Perspectives

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

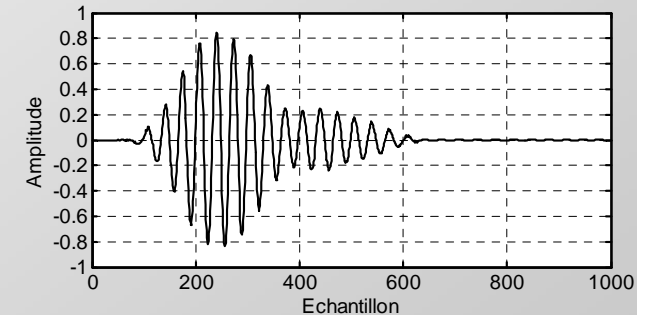
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

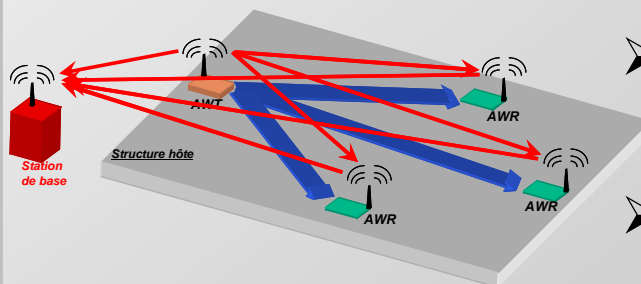
Contrôle de santé structurale

- Utilisation d'un **Indice d'Endommagement généralisé**
- Un opérateur **non linéaire** permet **d'économiser** encore plus **l'énergie** (*consommation 1000 fois moindre et performances quasiment identiques*)



Dispositifs autonomes

- Utilisation maximale des fonctions de **veille**
- Attention particulière sur les **composants fonctionnant relativement longtemps**
- Système expérimental **viable** (pas en récupération standard)



Synthèse générale et Perspectives

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

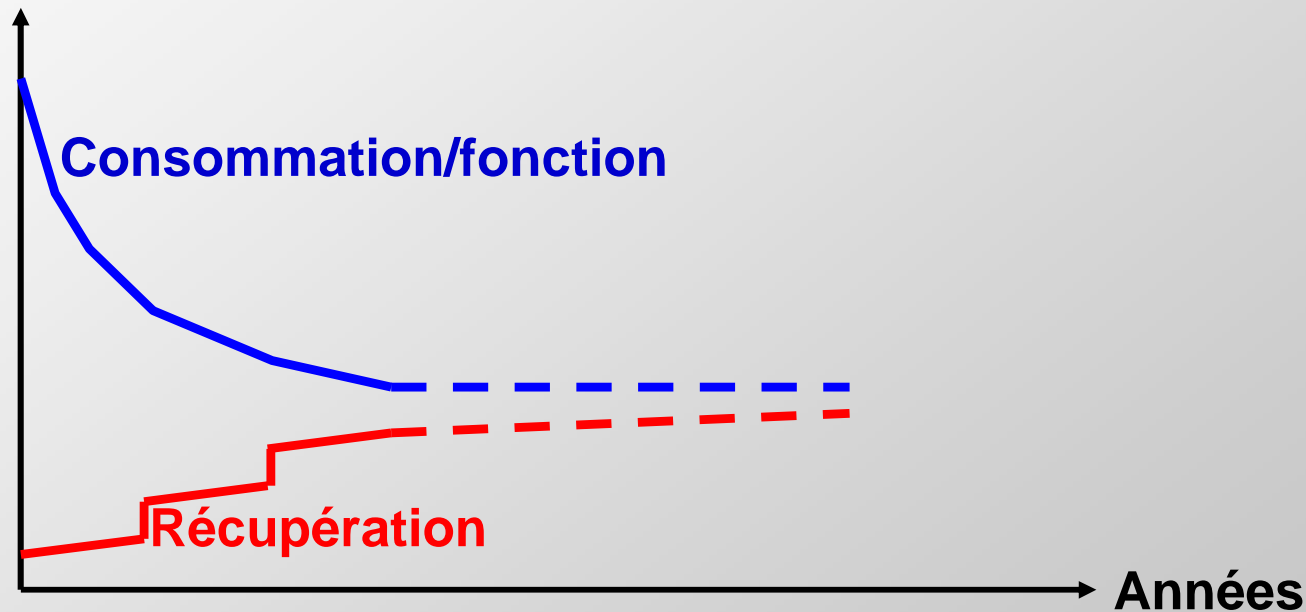
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

➔ Evolutions futures ?

Energie



➔ Fonctions limitées

Synthèse générale et Perspectives

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

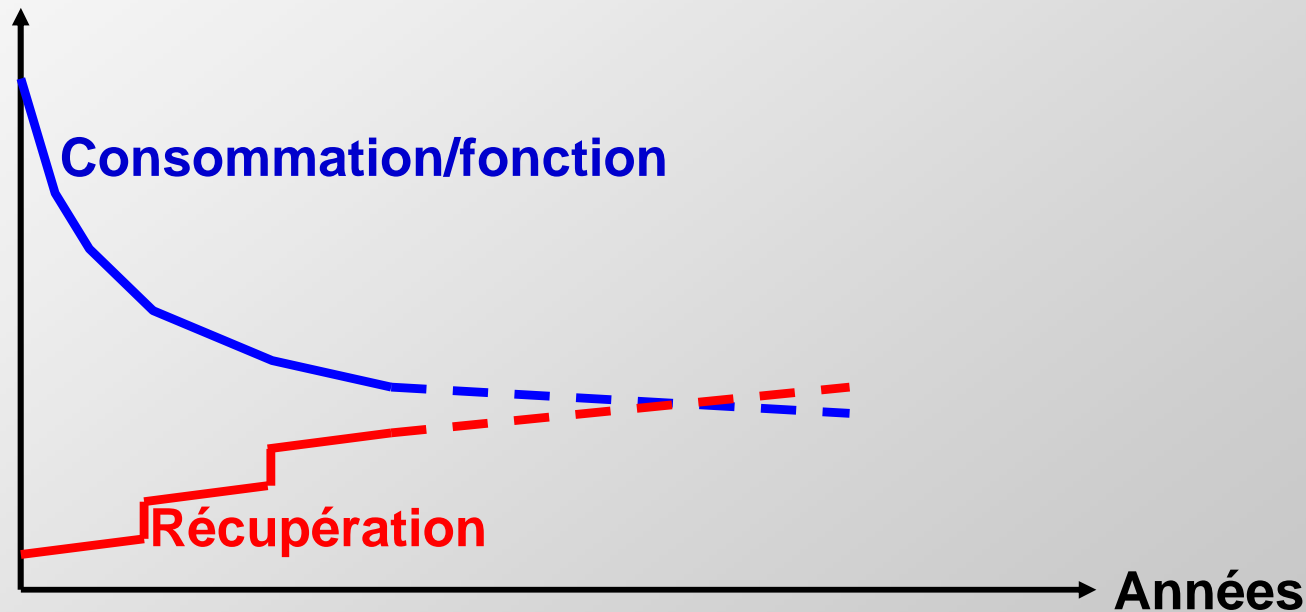
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

➔ Evolutions futures ?

Energie



➔ Balance énergétique OK

Synthèse générale et Perspectives

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

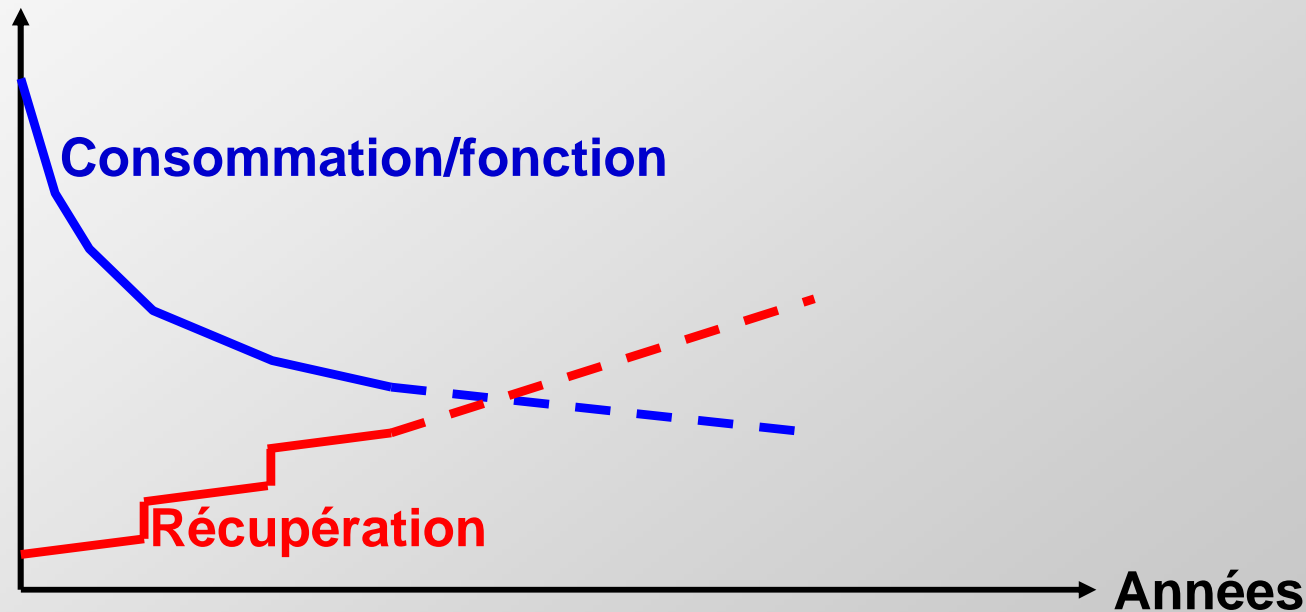
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

➔ Evolutions futures ?

Energie



➔ Intérêt de l'amélioration de la récupération ? → plus de fonctions / moins de place

Apports scientifiques

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- **13** publications (**6** en 1^{er} auteur) dans des Revues à Comité de Lecture (SHM, SNA, JIMSS, SMS, JASA, Electroceramics, IEEE/ASME Mechatronics, IEEE UFFC)
- **14** conférences (**13** avec actes)
- **2** sections d'ouvrages
- **4** publications soumises (**2** en 1^{er} auteur)

Soit un total de 33 communications (12 en 1^{er} auteur)

Thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées

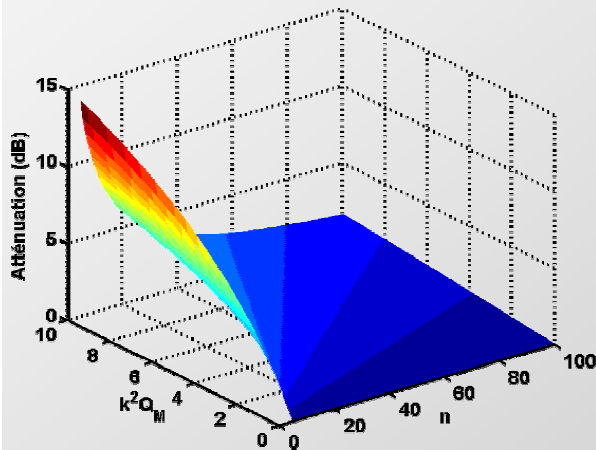
Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie

Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté

Mickaël Lallart

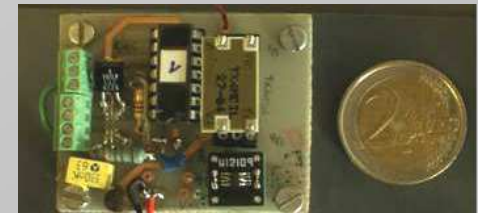
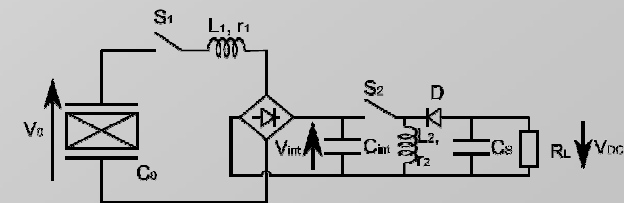
*Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF)
MATERiaux : Ingénierie et Sciences (MATEIS)
INSA Lyon*

Directeur : **Prof. Daniel Guyomar**
Co-directeur : **Dr. Thomas Monnier**



Ces travaux ont été financés par l'Union Européenne via le projet STREP ADVICE (contrat AST5 - CT - 2006 - 030971)

20 Novembre 2008



Techniques SSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

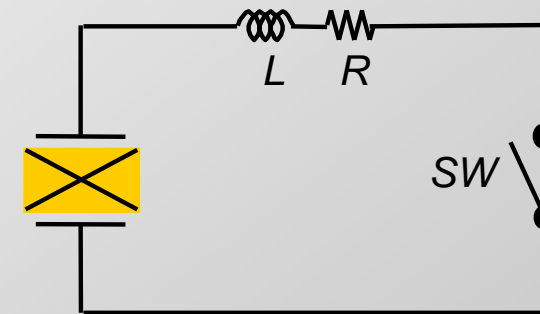
Dispositifs autonomes

Synthèse

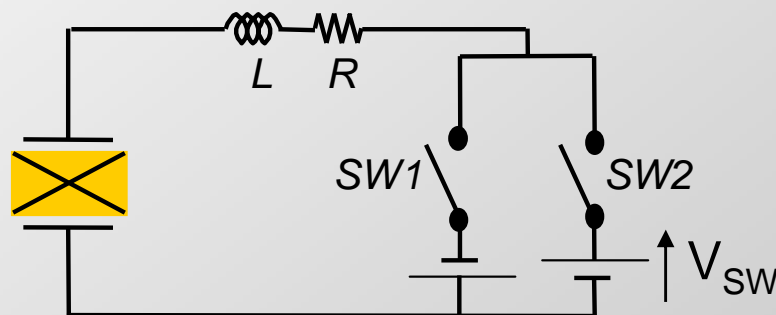
- Concept du **Synchronized Switch Damping** (SSD)



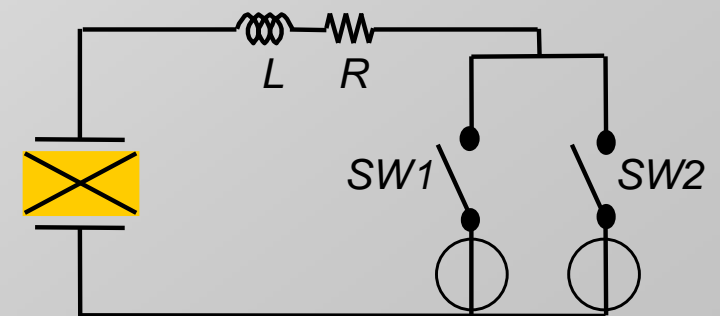
SSDS



SSDI



SSDV



SSDVa

A. Badel et al, 2006

Techniques SSD

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

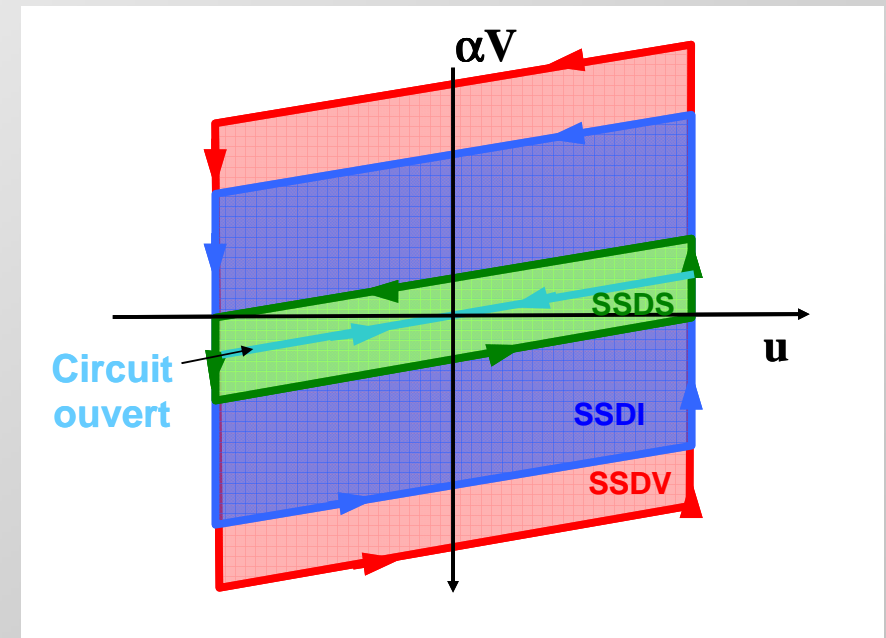
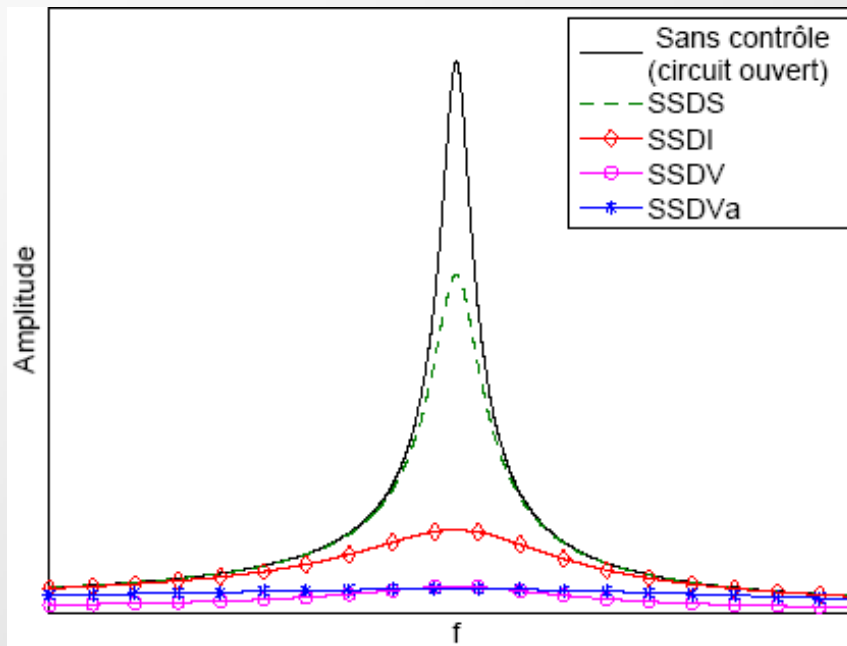
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- Les techniques SSD sont particulièrement **efficaces en régime établi**



Commutation avec seuil auto-alimentée

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

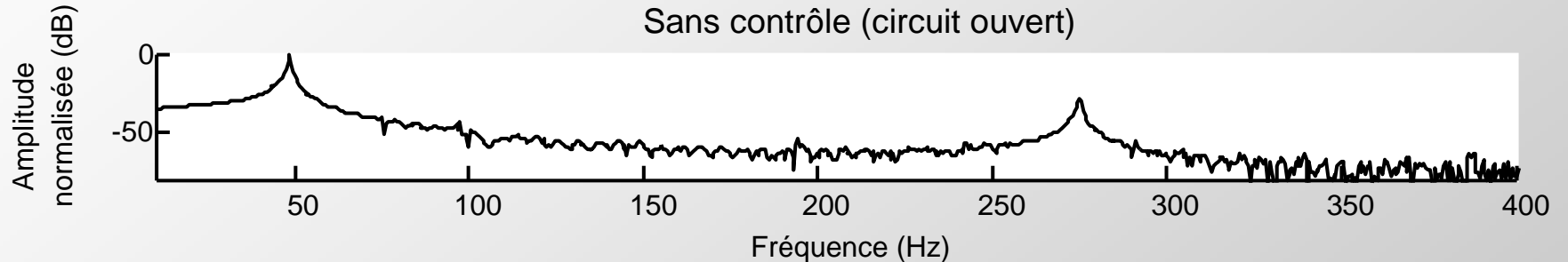
Synthèse

2 modes en impulsionnel

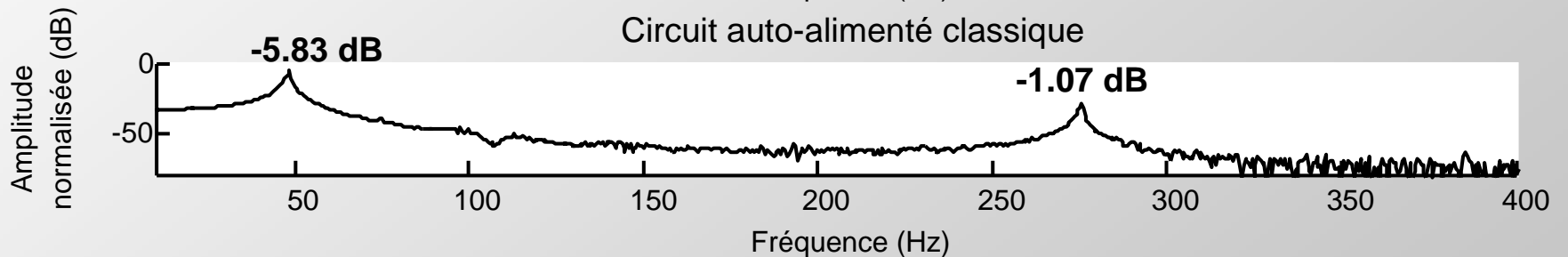


Gain d'amortissement de **10%** sur chaque mode

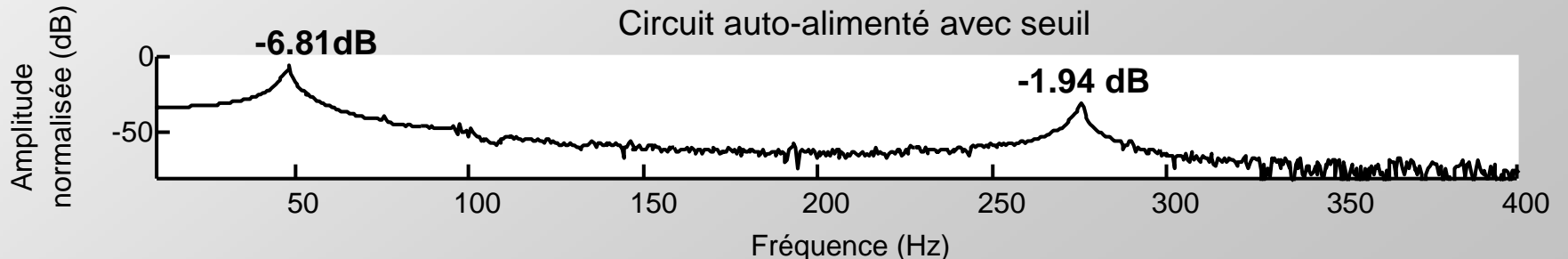
Sans contrôle (circuit ouvert)



Circuit auto-alimenté classique



Circuit auto-alimenté avec seuil



- Méthode d'autant plus **efficace** que le **contenu harmonique** est riche
- Applicable à la **récupération d'énergie en mode large bande**

Commutation avec Seuil auto-alimentée

Contexte

Technique NL

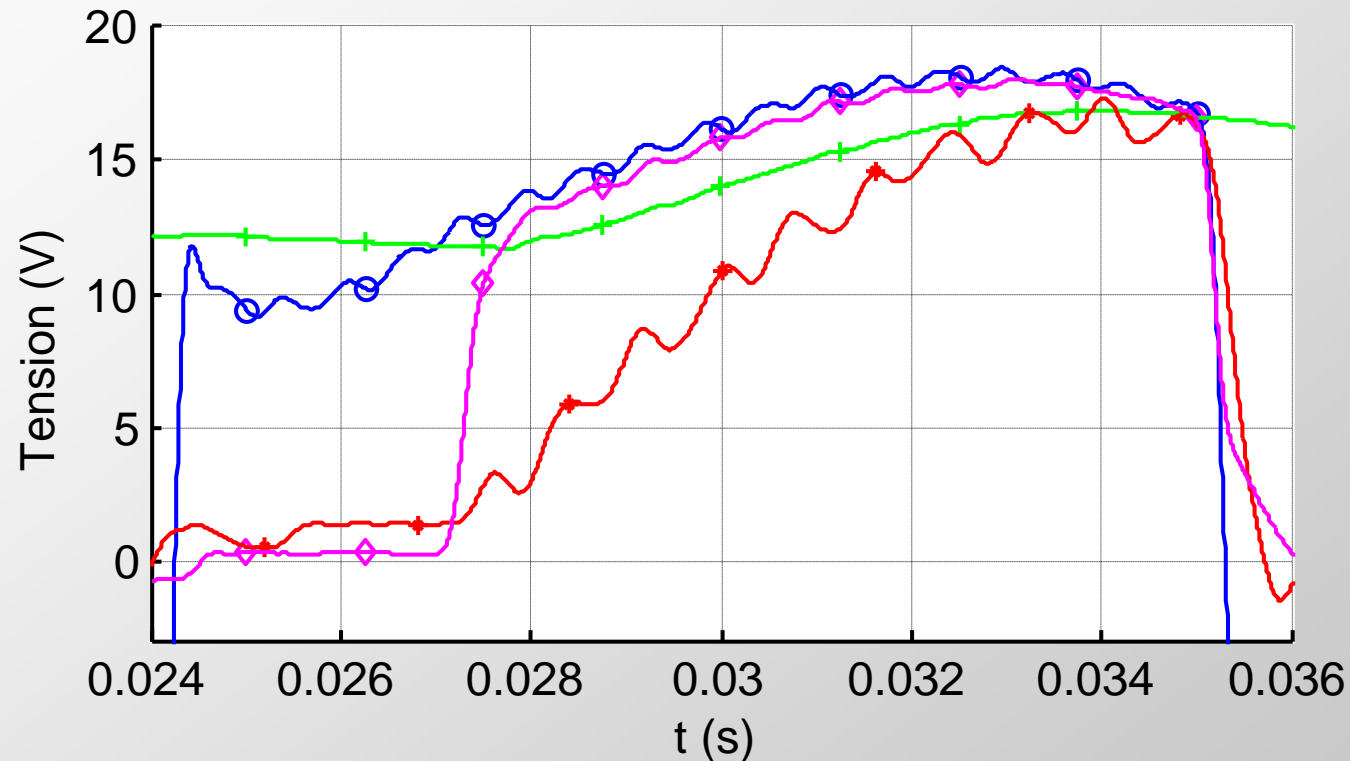
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



—○— Tension de l'élément actif

—+— Seuil

—♦— Activation

—◇— Tension du comparateur (détecté d'extrema)

Commutation avec Seuil auto-alimentée

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

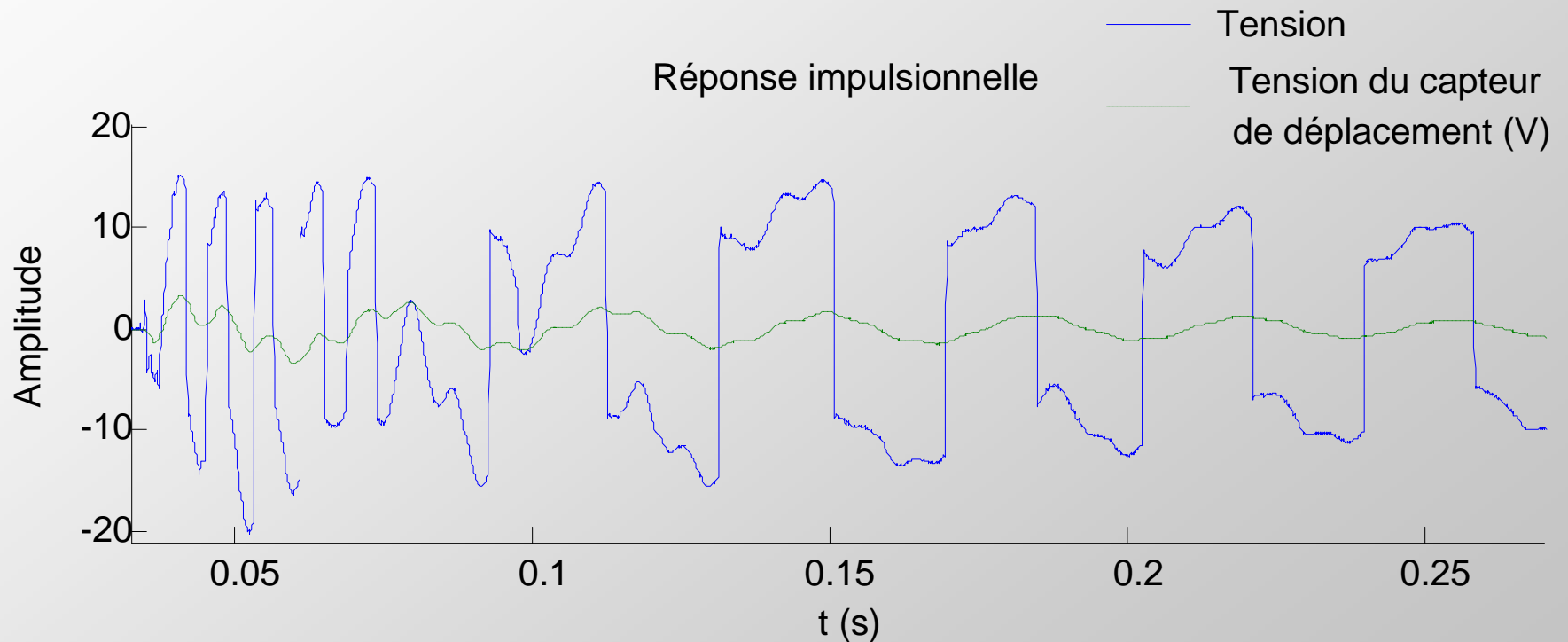
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Adaptation à chaque instant



Contrôle de raideur (SSSC)

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

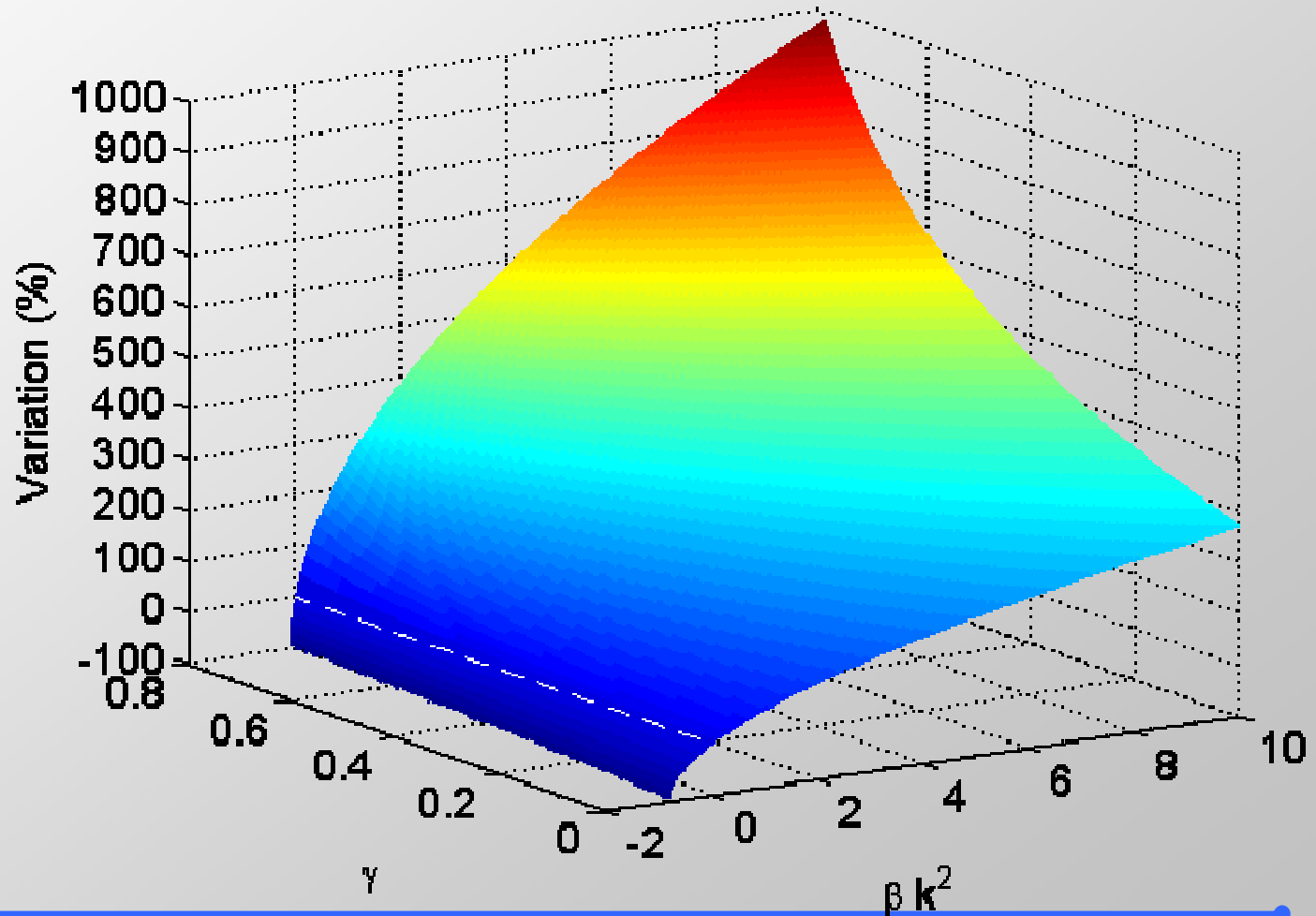
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- Contrôle de la **fréquence de résonance** et du **facteur de qualité mécanique**



Techniques SSH

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

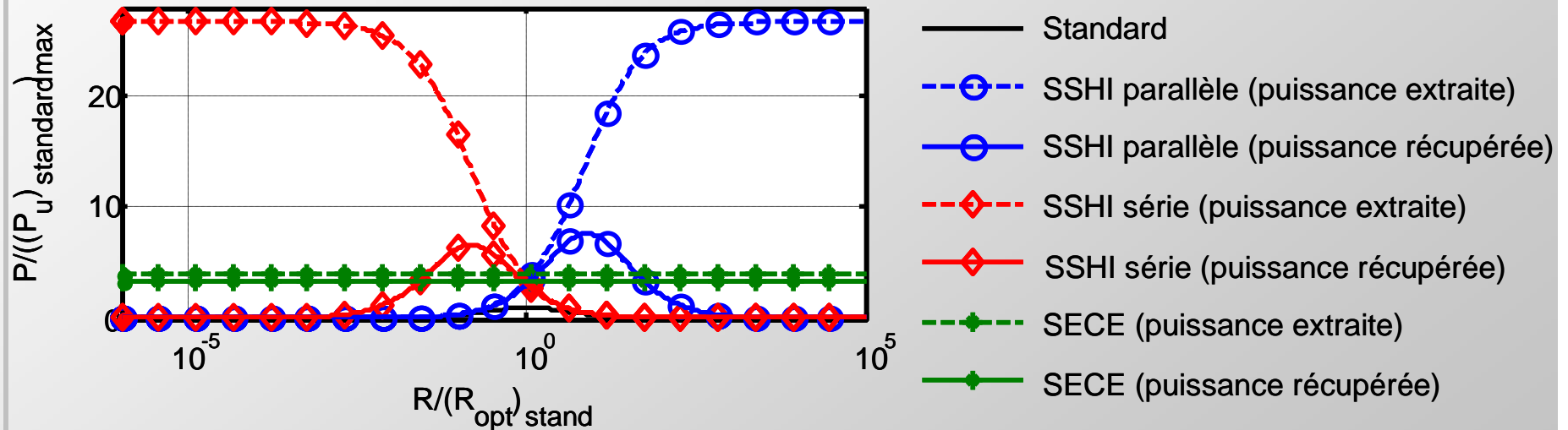
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- Amplitude de **déplacement** constante



Techniques SSHI

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

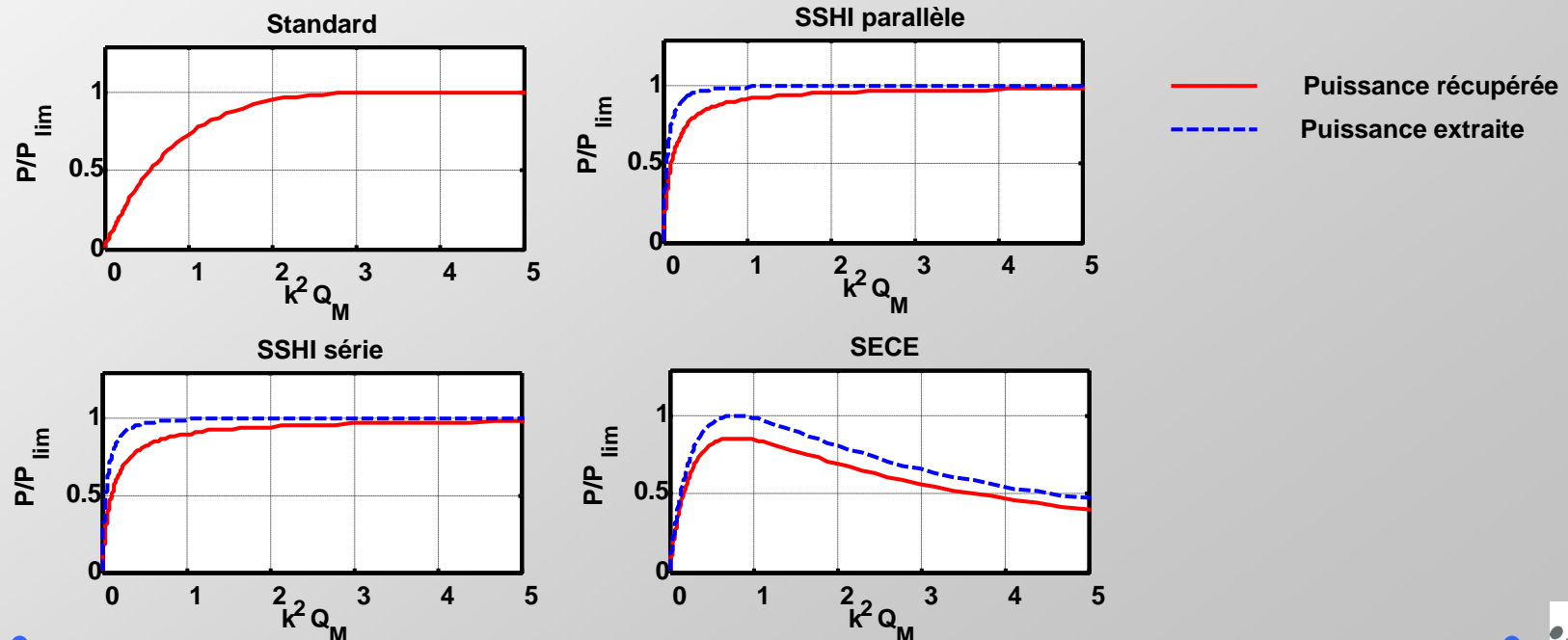
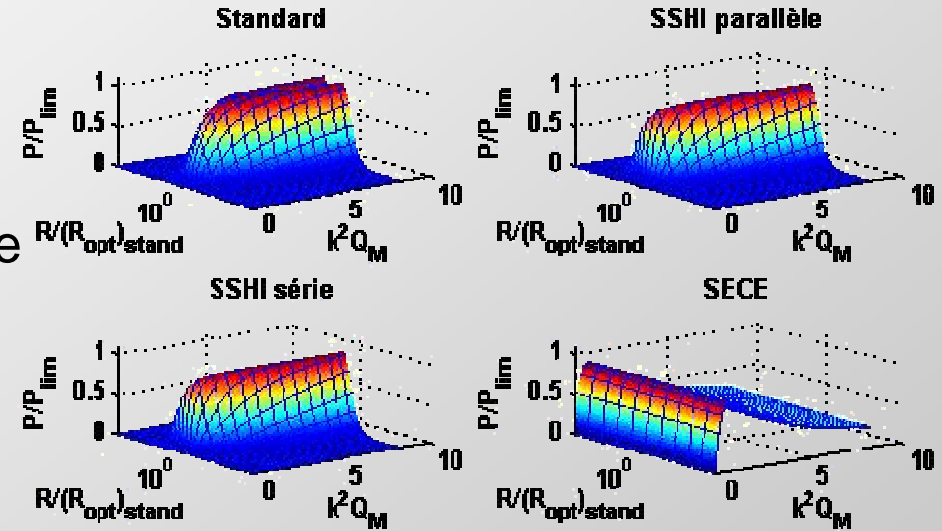
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- Amplitude d'excitation constante



Récupération d'énergie

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

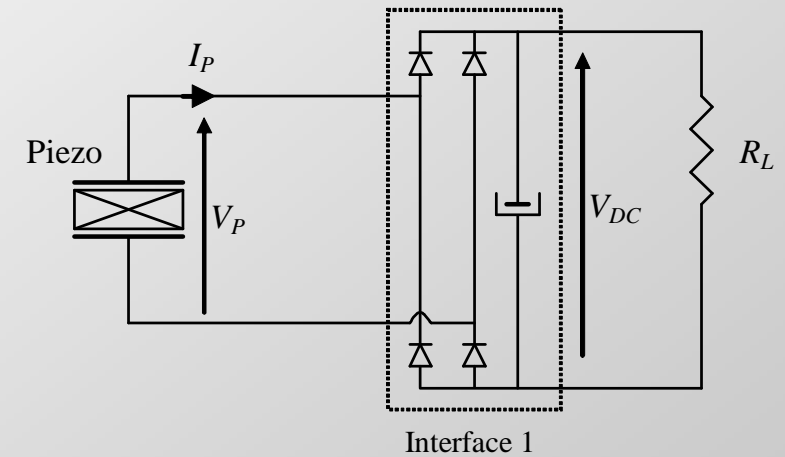
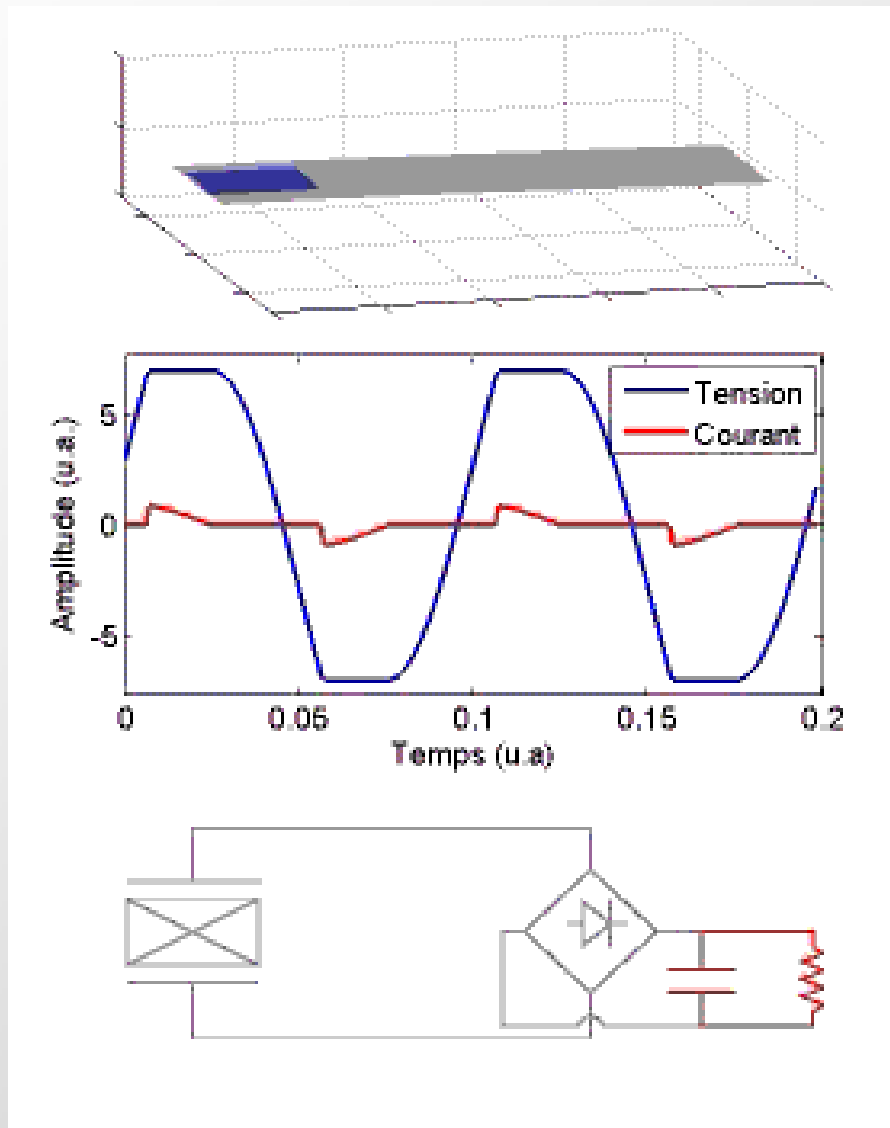
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- **Interface standard :**



$$P_{\text{stand}} = \frac{R_L \alpha^2}{\left(R_L C_0 \omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \omega^2 u_M^2$$

$$(P_{\text{stand}})_{\text{max}} = \frac{\alpha^2}{2\pi C_0} \omega u_M^2$$

A. Badel, 2005.

Récupération d'énergie

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

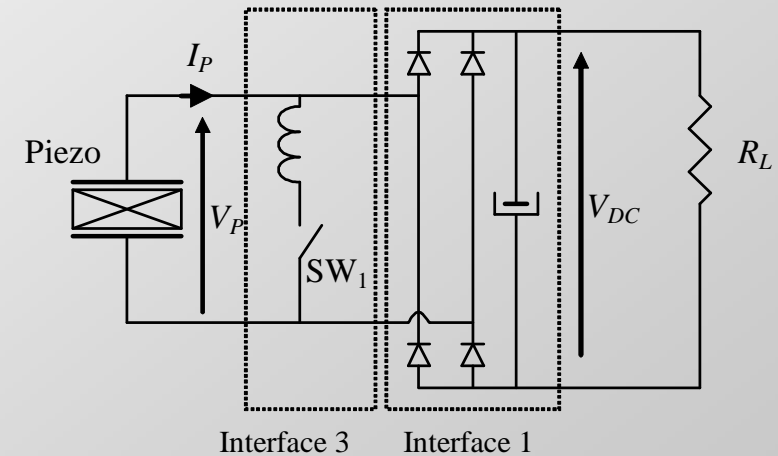
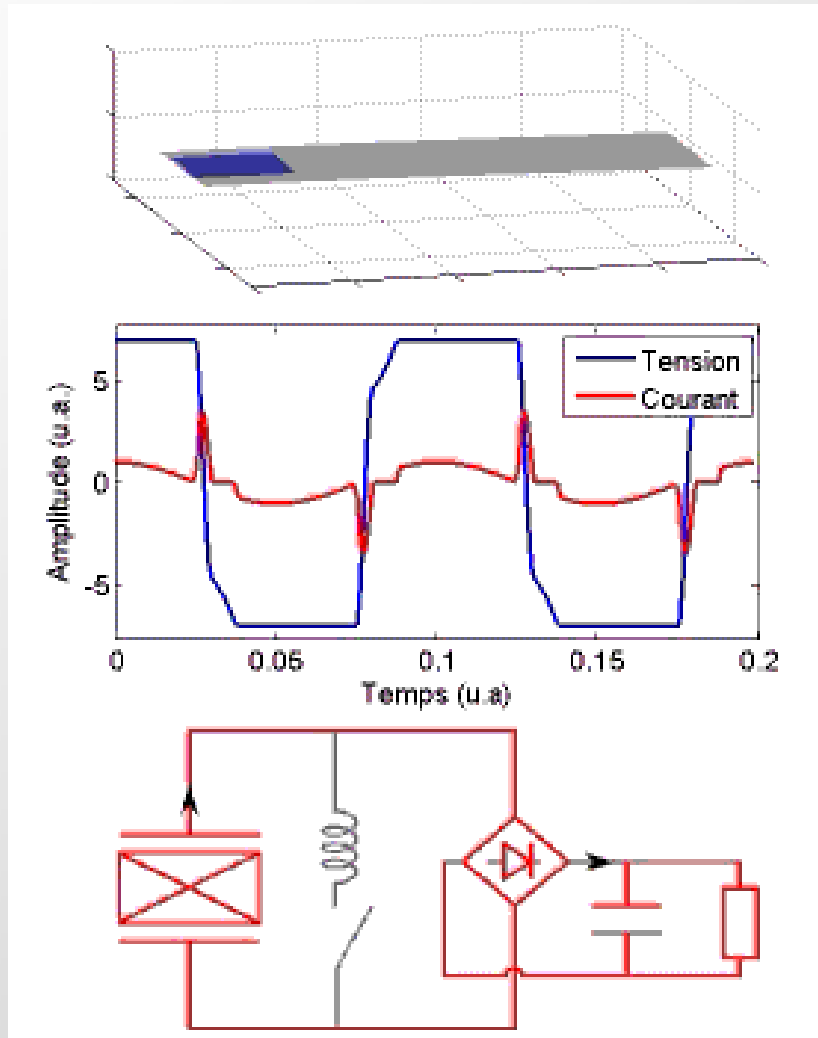
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

- SSHI parallèle



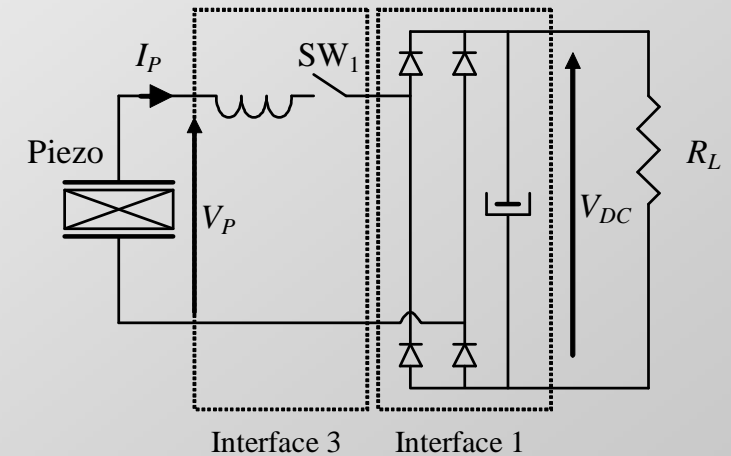
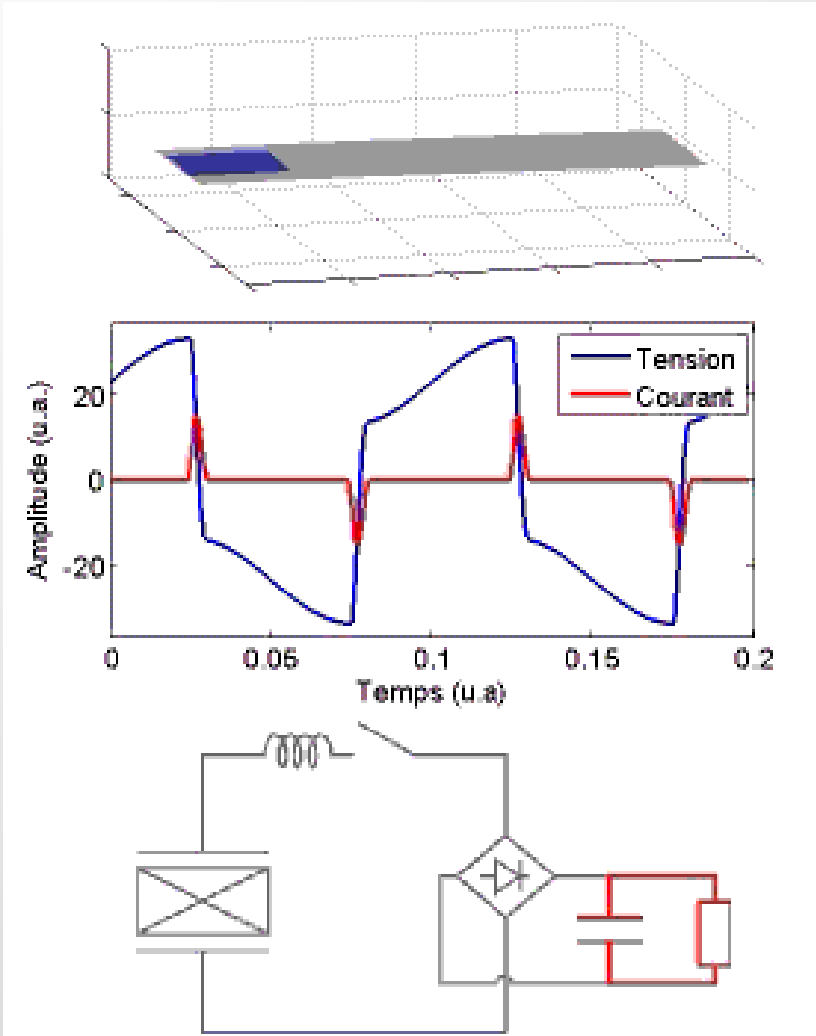
$$P_{\text{para}} = \frac{4R_L \alpha^2}{(R_L C_0 (1-\gamma)\omega + \pi)^2} \omega^2 u_M^2$$

$$(P_{\text{para}})_{\text{max}} = \frac{2}{(1-\gamma)} (P_{\text{stand}})_{\text{max}}$$

Guyomar *et al.*, 2005.

Récupération d'énergie

- SSHI série



$$P_{\text{ser}} = \frac{4R_L \alpha^2 (1 + \gamma)^2}{(2R_L C_0 (1 + \gamma) \omega + \pi(1 - \gamma))^2} \omega^2 u_M^2$$

$$(P_{\text{ser}})_{\text{max}} = \left(\frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \right) (P_{\text{stand}})_{\text{max}}$$

Taylor et al., 2001.

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

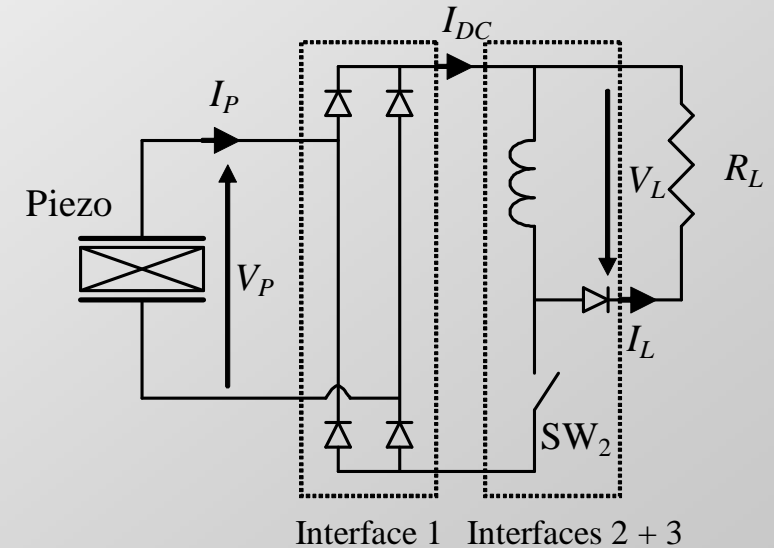
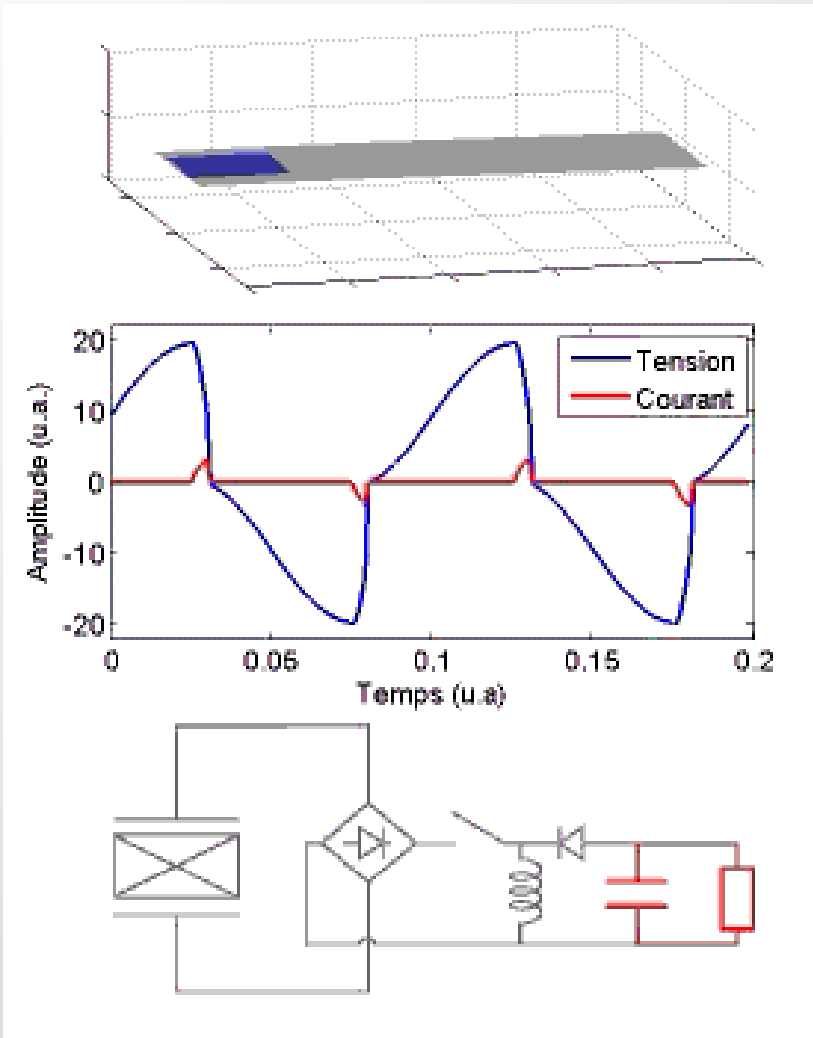
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Récupération d'énergie

- SECE



$$P_{SECE} = 4\gamma_c (P_{stand})_{max}$$

Lefevre et al., 2005.

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

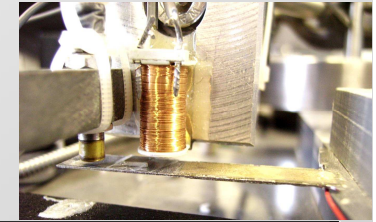
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

Faibles niveaux

Structure demi-pont ➔ Enlève une diode



Contexte

Technique NL

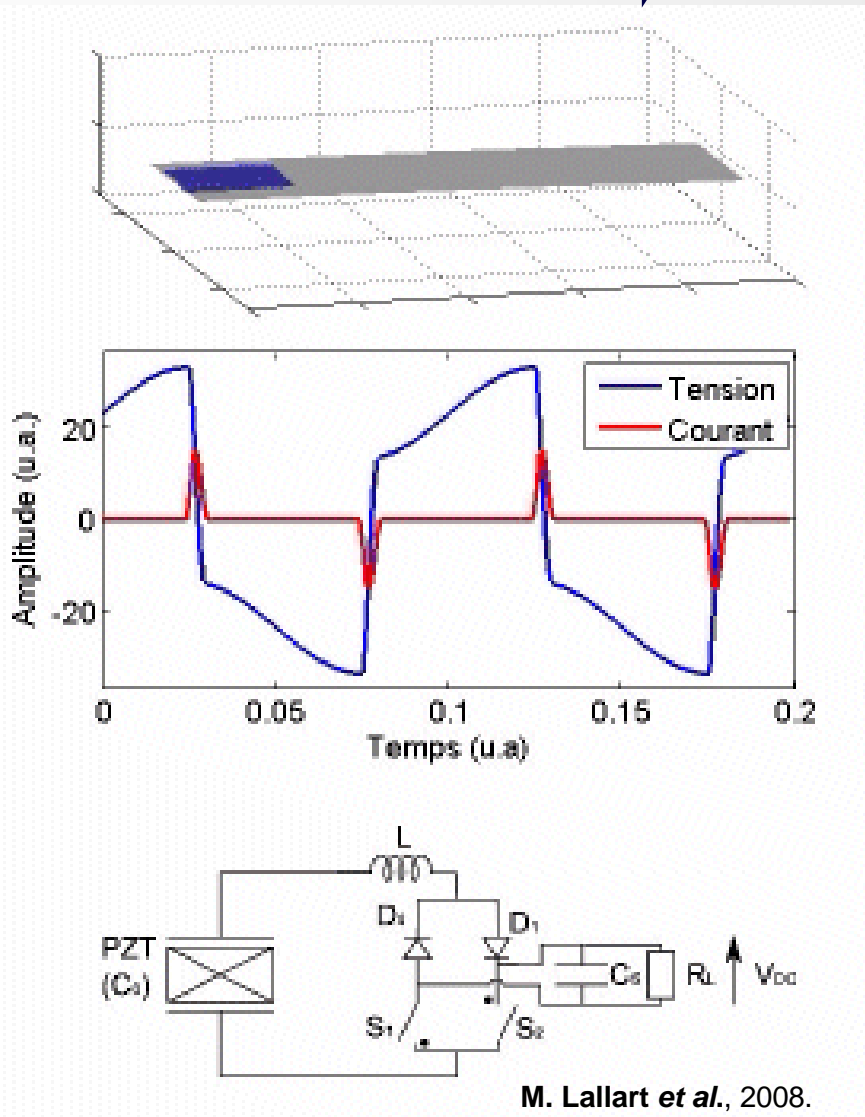
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

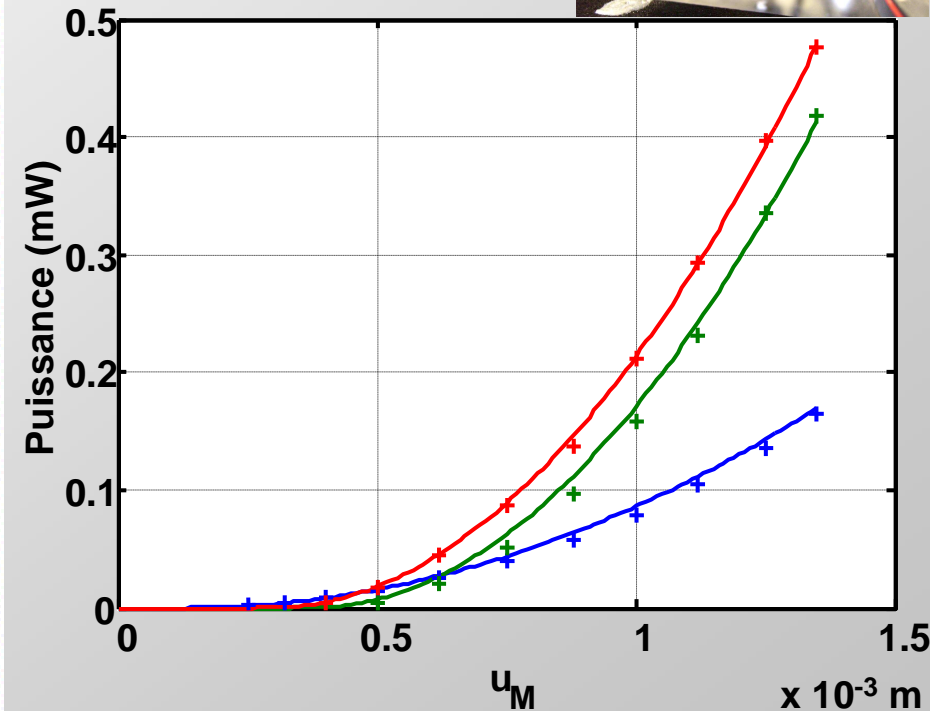
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



M. Lallart *et al.*, 2008.



- Standard (théorique)
- SSHI série classique (théorique)
- SSHI série demi-pont (théorique)
- + Standard (expérimental)
- + SSHI série classique (expérimental)
- + SSHI série demi-pont (expérimental)

Faibles niveaux

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

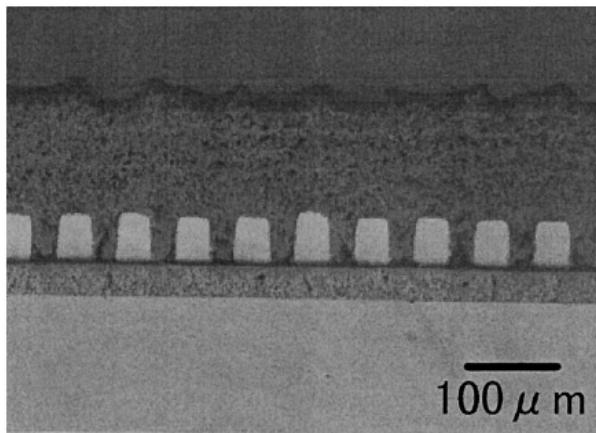
Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

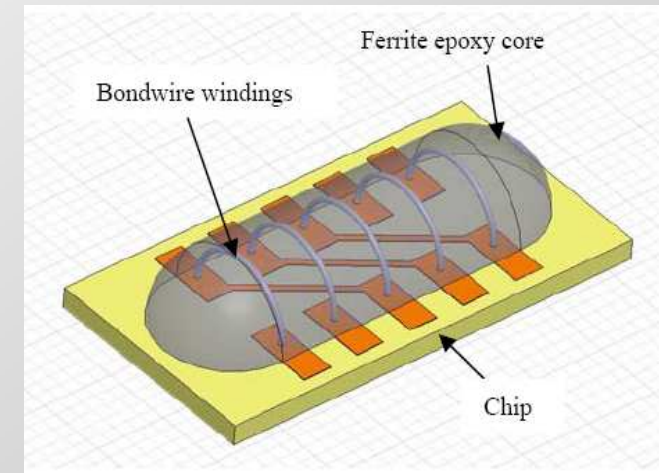
Synthèse

Intégration du SSHI-MR



Sectional view of a planar inductor with 50-μm-thick conductor line.

Y. Fukuda, T. Inoue, T. Mizoguchi, S. Yatabe and Y. Tachi, "Planar Inductor With Ferrite Layers for DC-DC Converter", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 39(4), 2003



J. Lu, H. Jia, A. Arias, X. Gong and Z. John Shen, "On-Chip Bondwire Transformers for Power SOC Applications", APEC 2008

$$\begin{cases} \frac{1}{2} C_0 V_M^2 = \frac{1}{2} L I_M^2 \\ B_M S = L I_M \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L = 0.9 \mu H \\ S = 1.8 mm^2 \end{cases}$$

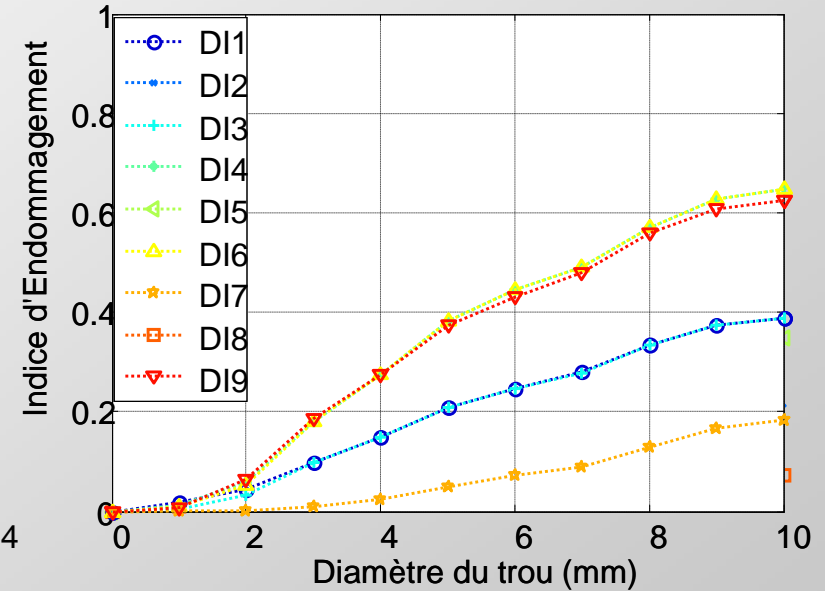
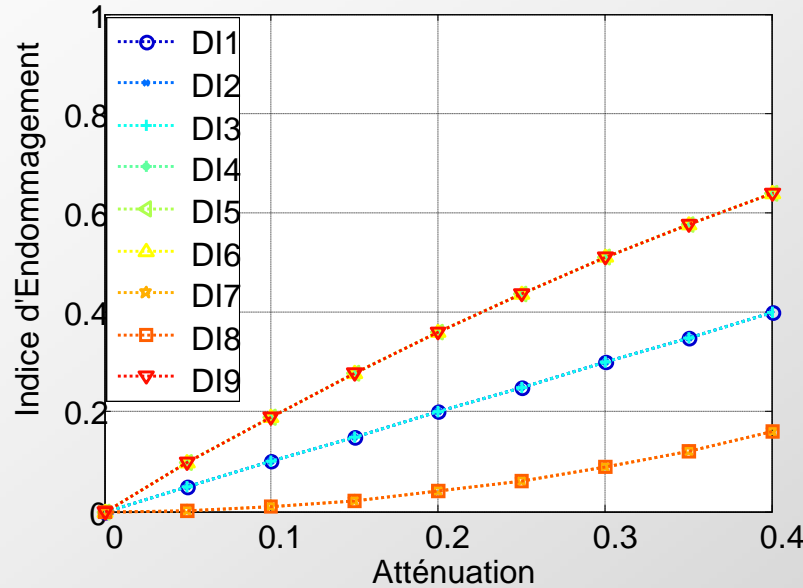
$B_{\max} = 0.5 T$
 $I_{\max} = 1 A$
 $V_M = 1.7 V$
 $C_0 = 312 nF$

Résultats simulés/expérimentaux

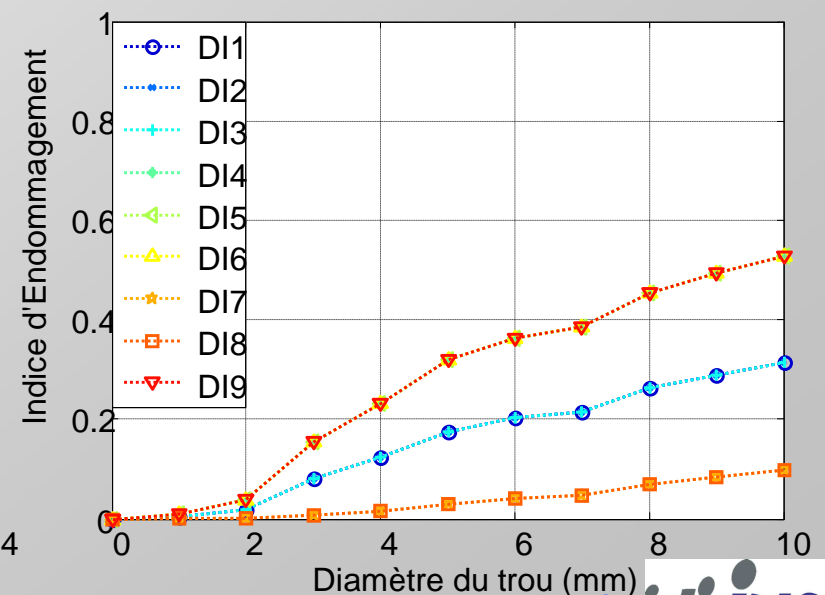
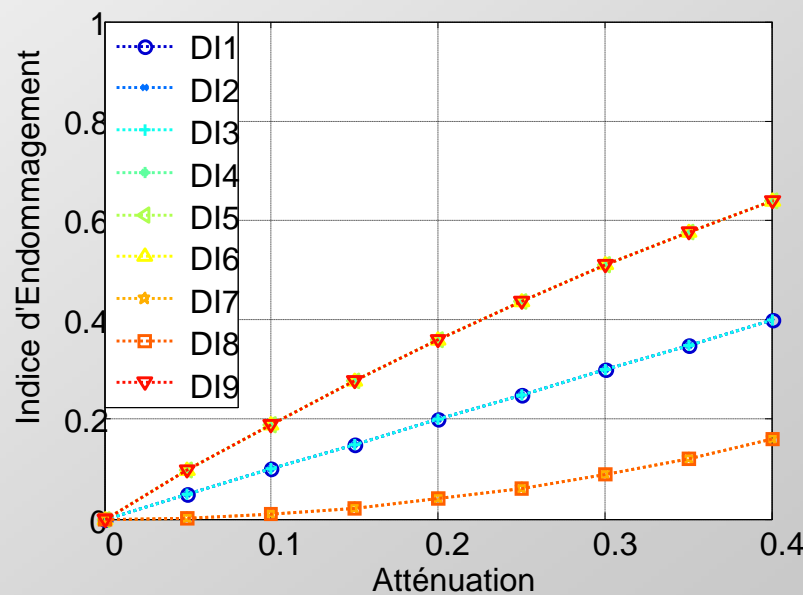
- Contexte
- Technique NL
- Contrôle de vibrations
- Récupération d'énergie
- Contrôle de santé structurale**
- Dispositifs autonomes
- Synthèse

Sur le chemin, dans l'axe

FFT



RMS



Résultats simulés/expérimentaux

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

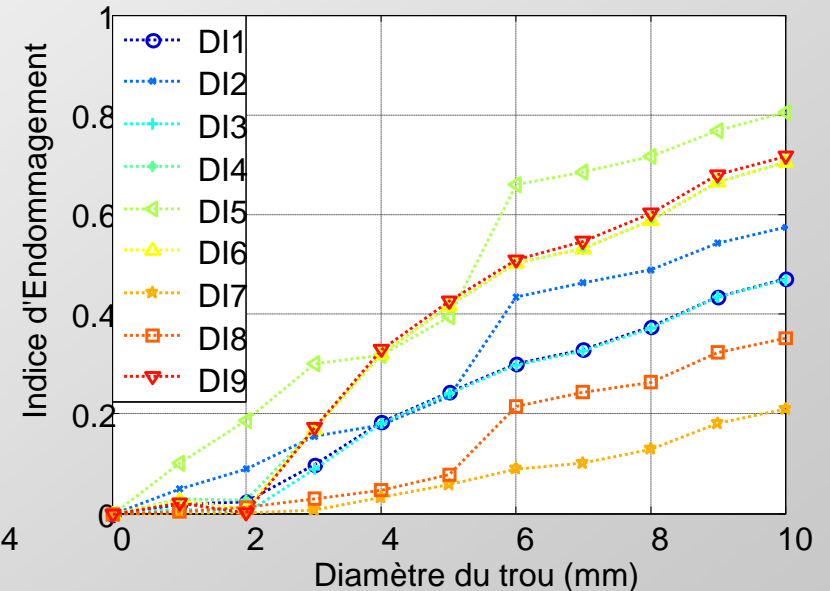
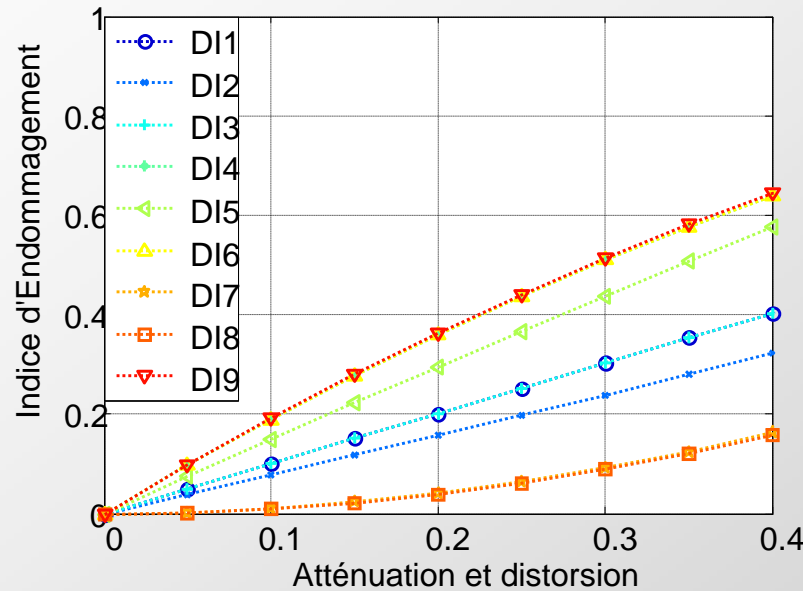
Dispositifs autonomes

Synthèse

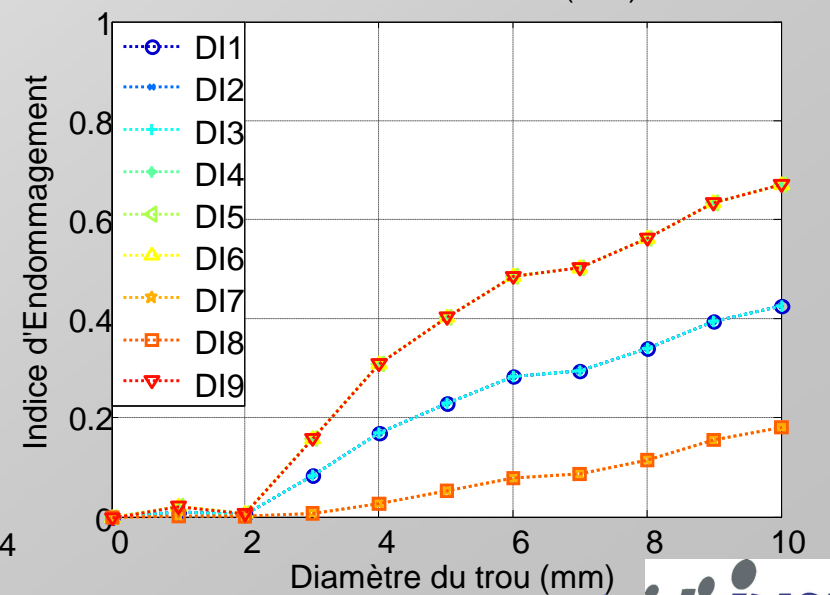
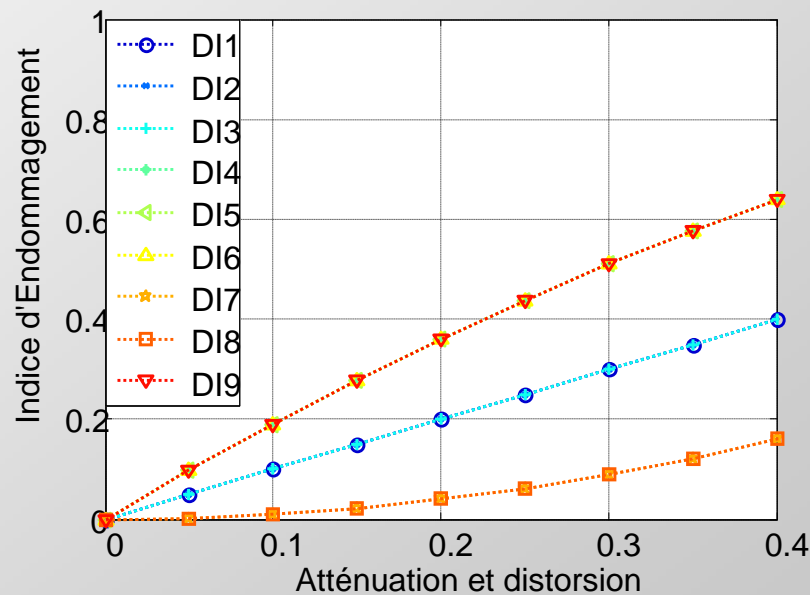
LGEF/
MATEIS

Sur le chemin, hors axe

FFT



RMS



Résultats simulés/expérimentaux

Contexte

Technique NL

Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

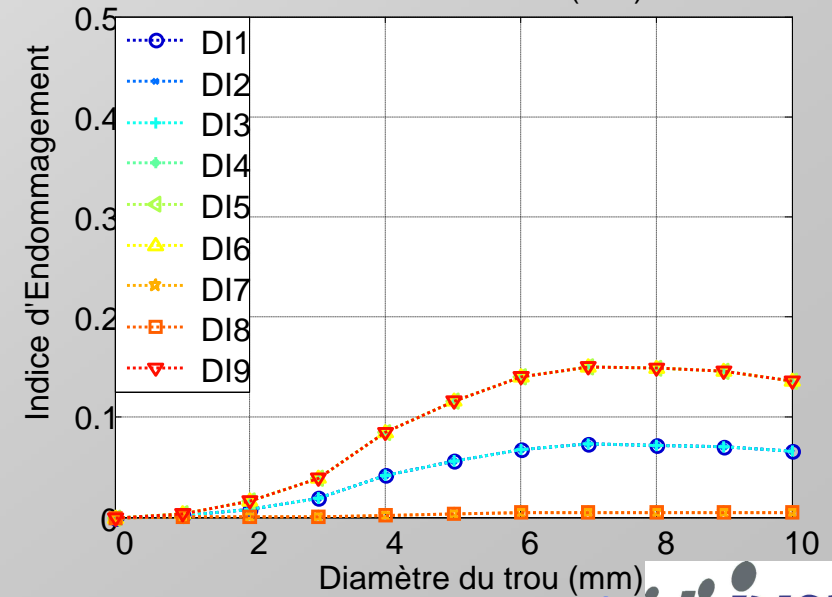
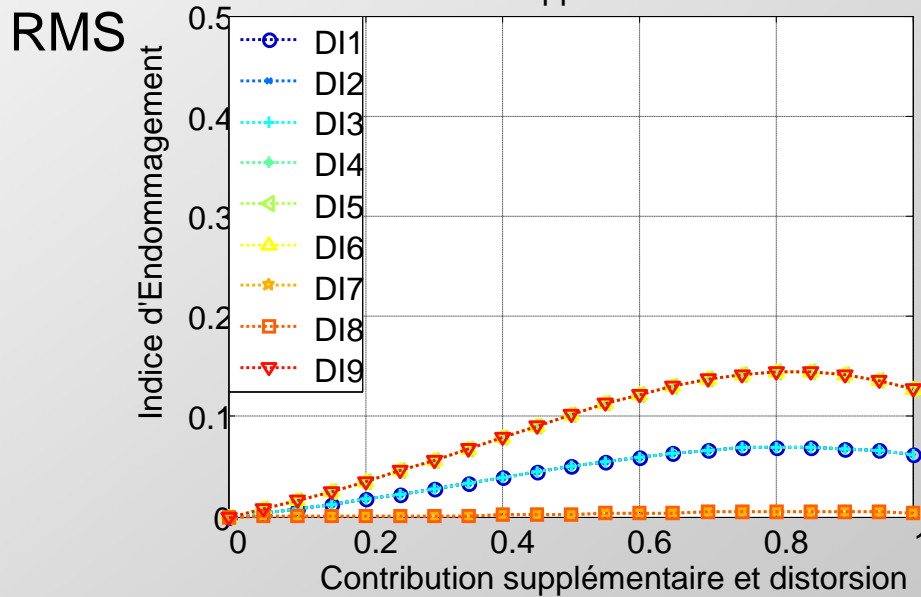
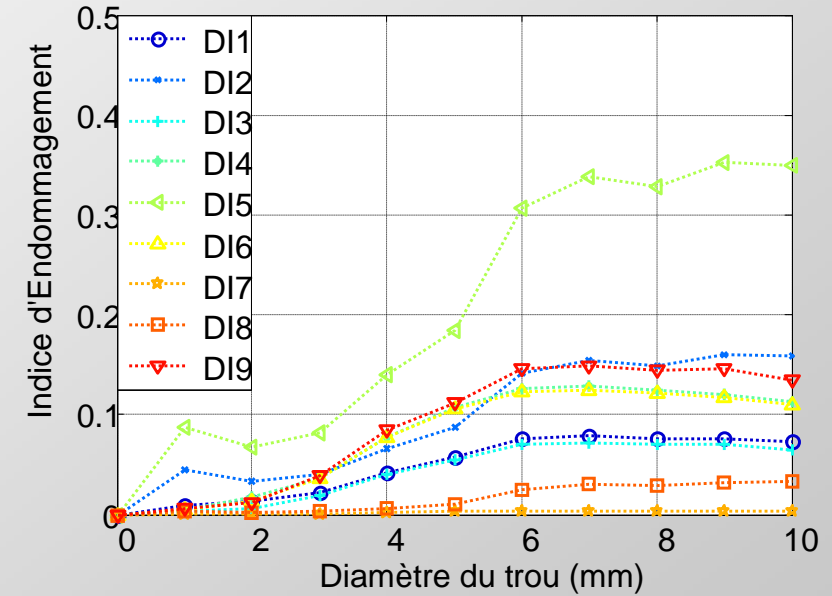
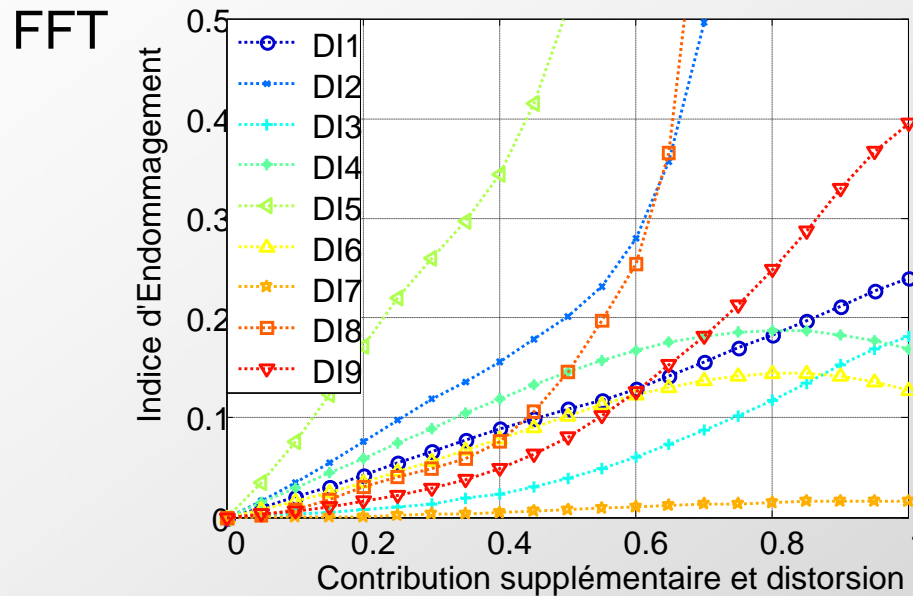
Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse

LGEF/
MATEIS

Hors chemin



DI non linéaire

Opérateur non linéaire

Contexte

Technique NL

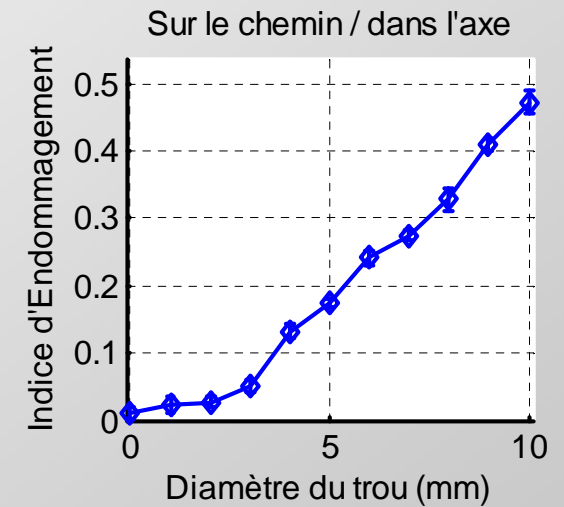
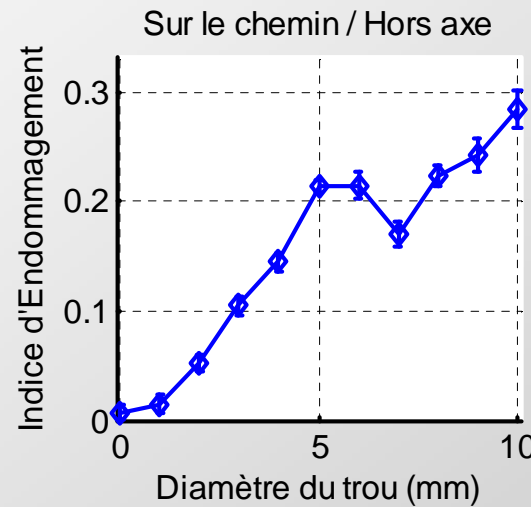
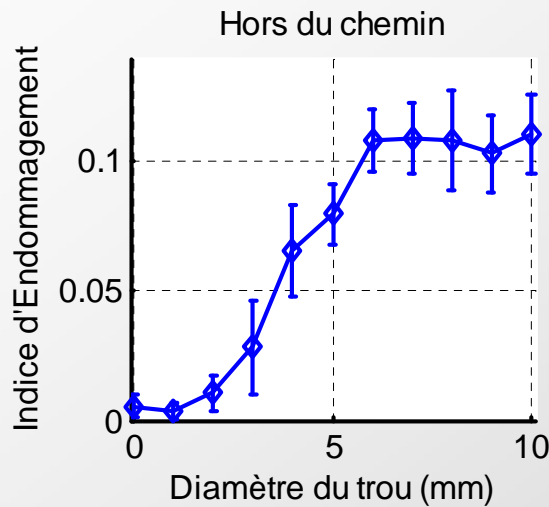
Contrôle de vibrations

Récupération d'énergie

Contrôle de santé structurale

Dispositifs autonomes

Synthèse



FFT

