

---

# Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire

---

Adrien Badel

Directeurs de thèse: M.C. Manuel Lagache, LOCIE, Université de Savoie  
Prof. Daniel Guyomar, LGEF, INSA de Lyon

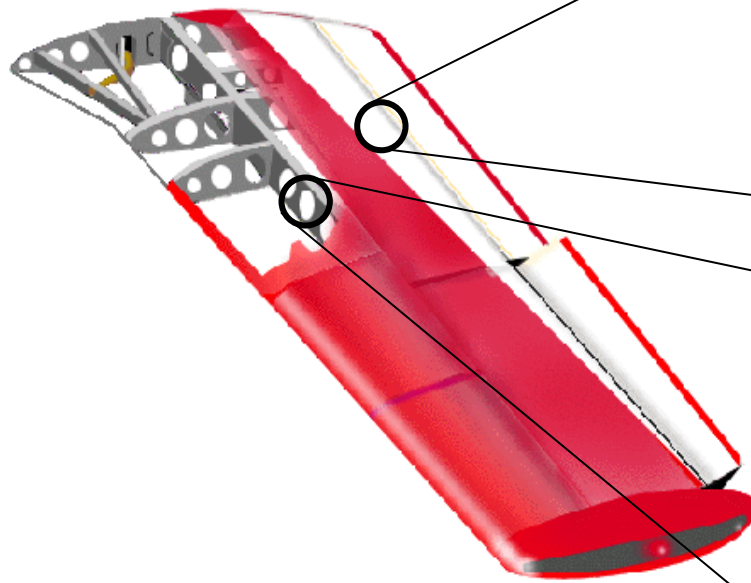
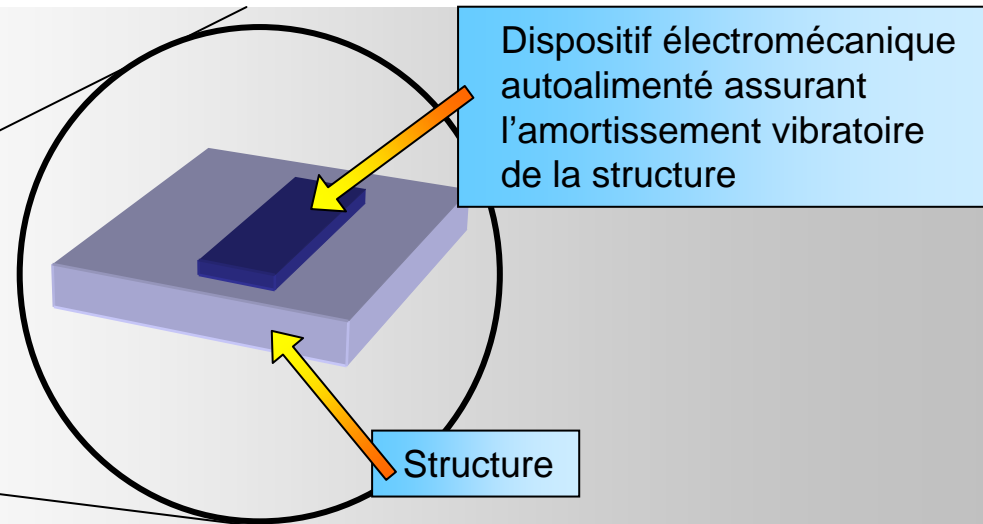


**LOCIE**

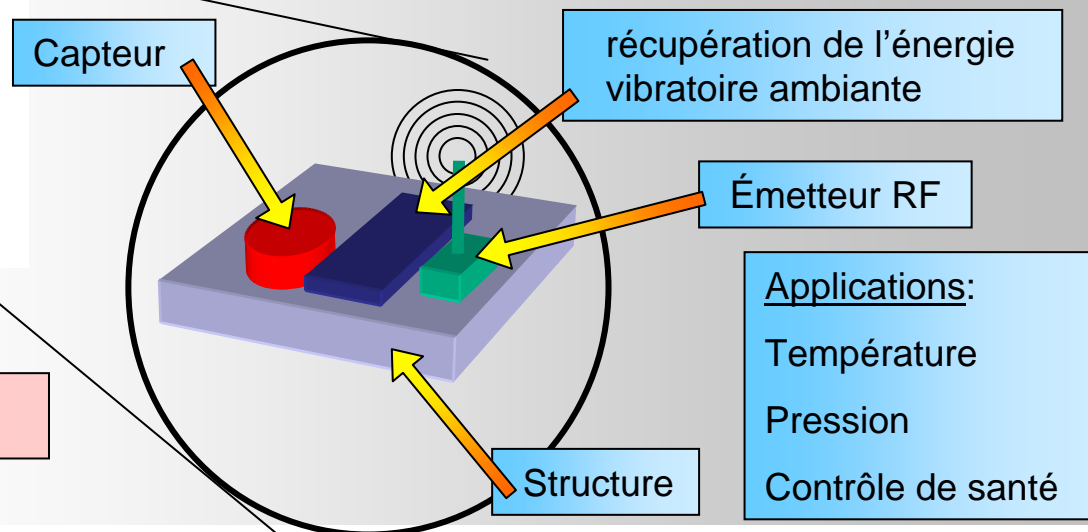


# Objectif: réalisation de matériaux intelligents

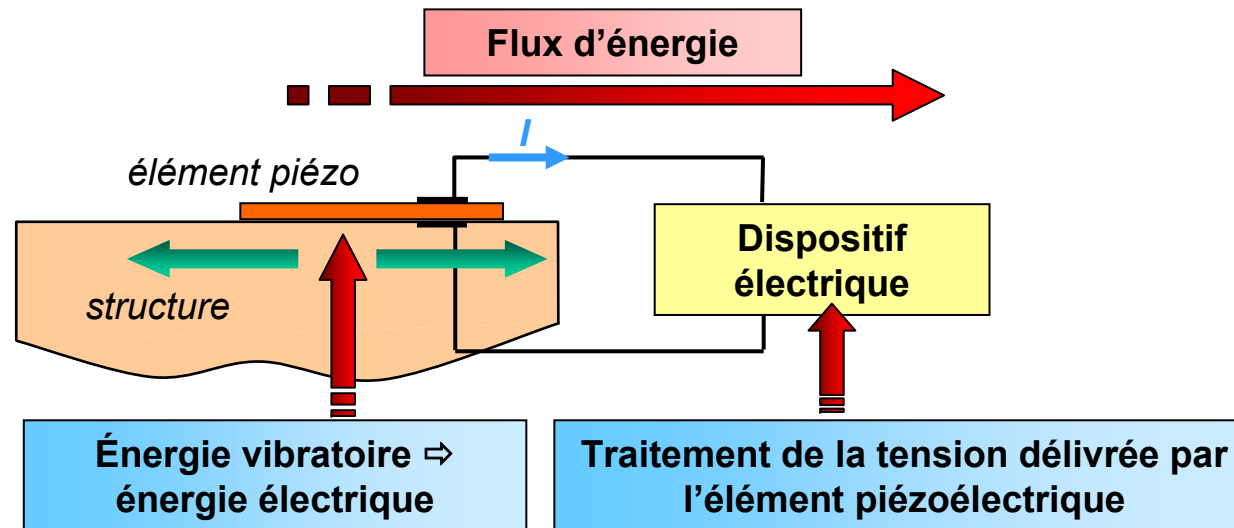
➤ Amortissement vibratoire



➤ Récupération d'énergie



# Principe



➤ Amortissement vibratoire

Minimisation de l'énergie mécanique

➤ Récupération d'énergie

Maximisation de l'énergie récupérée

Originalité de notre approche: Augmentation des cycles de conversion électromécanique

# Plan de la présentation

---

➤ Présentation des techniques non linéaires

➤ Amortissement vibratoire

➤ Récupération d'énergie

➤ Approche probabiliste pour les signaux large bande

---

# Présentation des techniques non linéaires

- Principe
- Analyse énergétique

# Modélisation

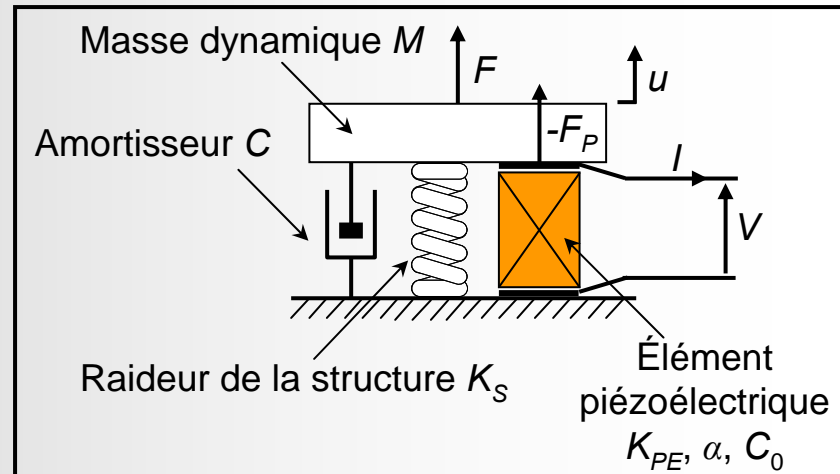
Modélisation par un second ordre

Équations piézoélectriques:

$$\begin{cases} F_P = K_{PE}u + \alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C_0 \dot{V} \end{cases}$$

Équation dynamique:

$$F = M\ddot{u} + C\dot{u} + (K_S + K_{PE})u + \alpha V$$



$$\int_0^t F u \, dt = \frac{1}{2} M \dot{u}^2 + \frac{1}{2} (K_{PE} + K_S) u^2 + C \int_0^t \dot{u}^2 \, dt + \alpha \int_0^t V \dot{u} \, dt$$

Énergie fournie

Énergie mécanique

Pertes visqueuses

Énergie transférée

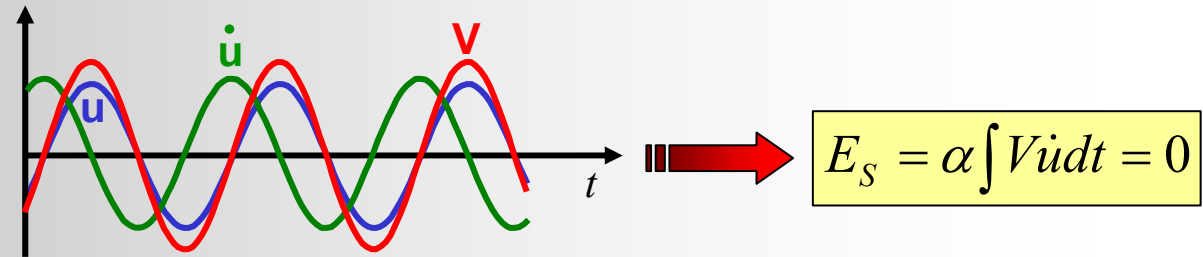
Optimisation de la conversion électromécanique



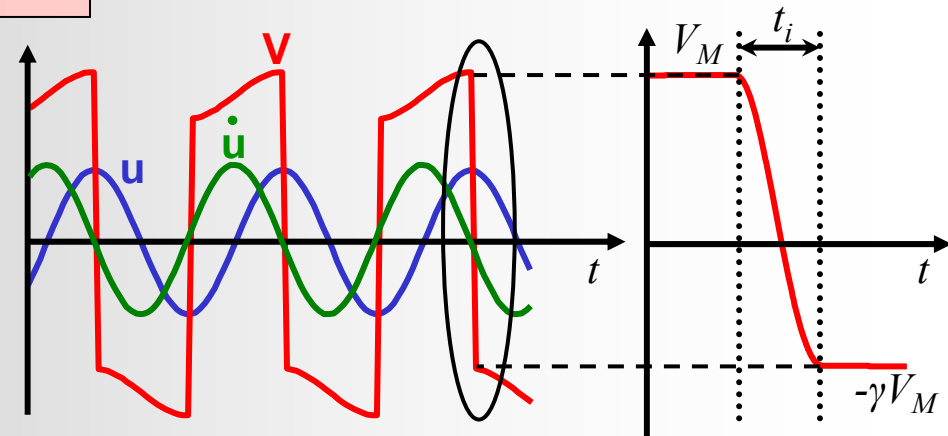
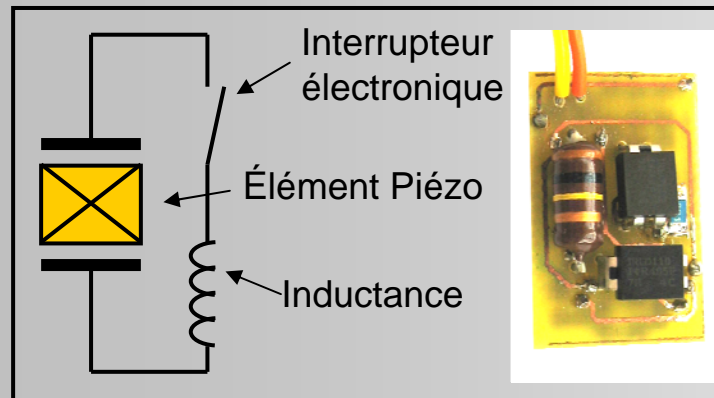
Optimisation de  $\alpha \int V \dot{u} \, dt$

# Principe des techniques non linéaires

## ➤ Circuit ouvert



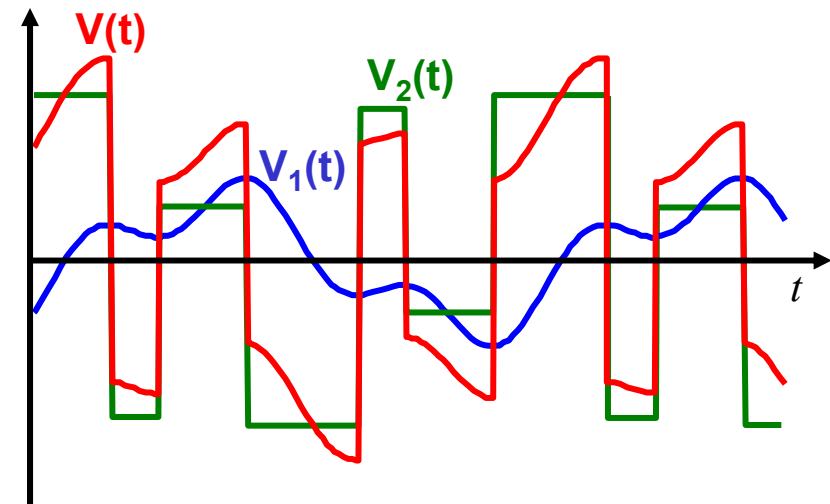
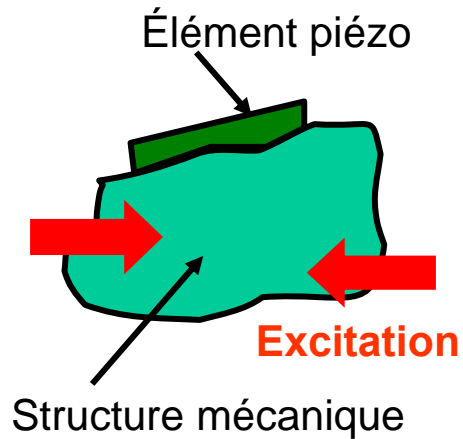
## ➤ Technique semi passive SSDI



Optimisation de l'énergie transférée

$$E_S = \alpha \int V \dot{u} dt$$

# Principe des techniques non linéaires – multi modes



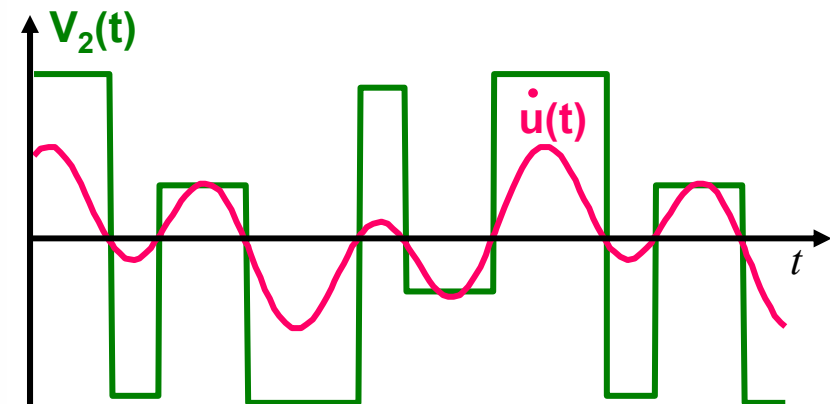
Tension  $V(t) = V_1(t) + V_2(t)$

$V_1(t)$  = Image de la déformation

$V_2(t)$  = Fonction discontinue

→  $\text{sign}(\dot{u})$

- Agit sur la structure comme un frottement sec
- Travail mécanique engendré correspond à un transfert d'énergie mécanique en énergie électrique

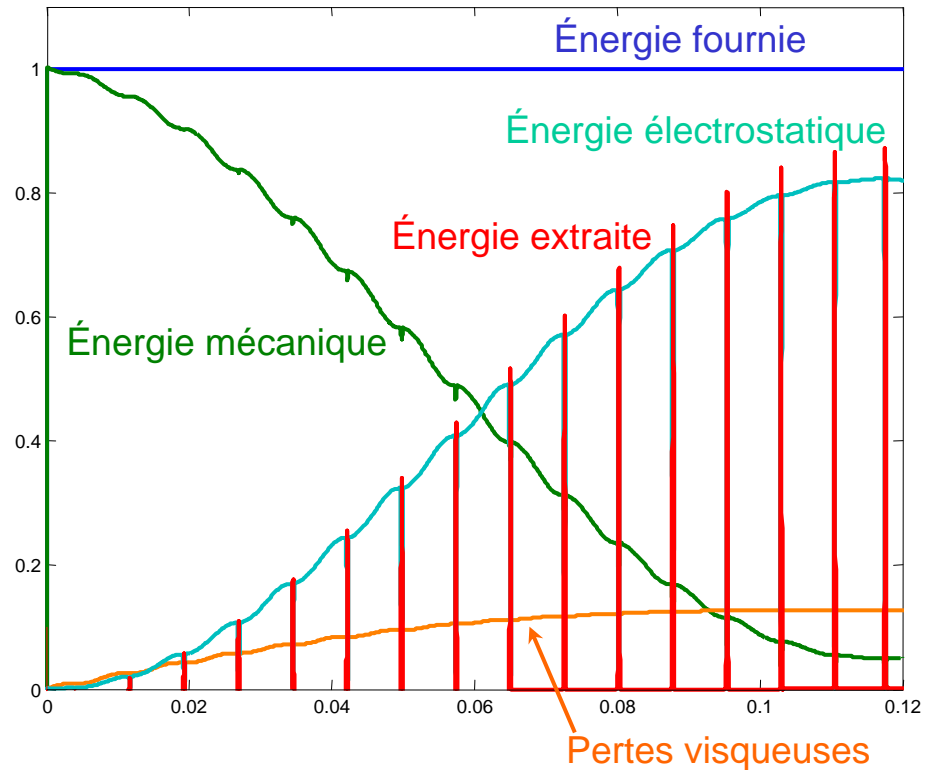
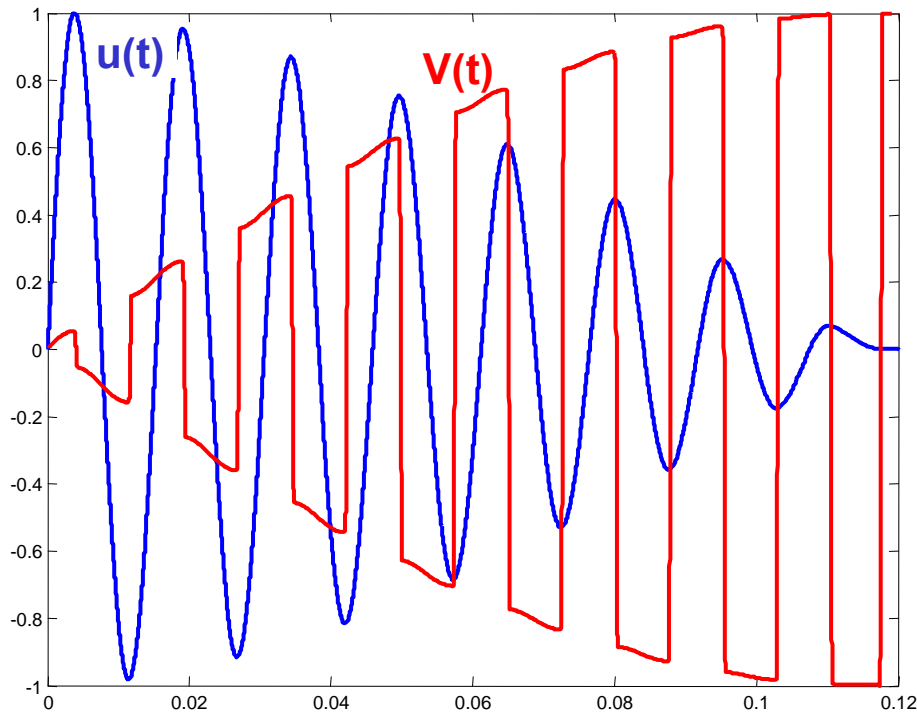


$$E_S = \alpha \int V \dot{u} dt = \alpha \int V_2 \dot{u} dt$$

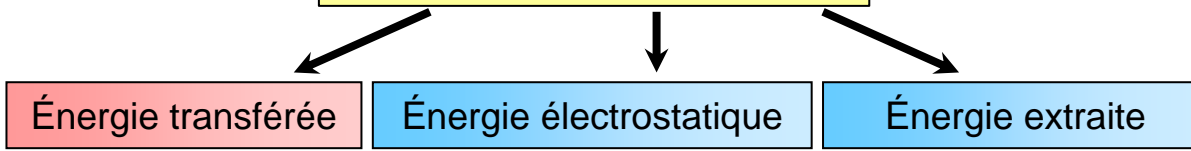


# Techniques non linéaires – Énergies (1)

➤ Cas idéal: inversion sans pertes



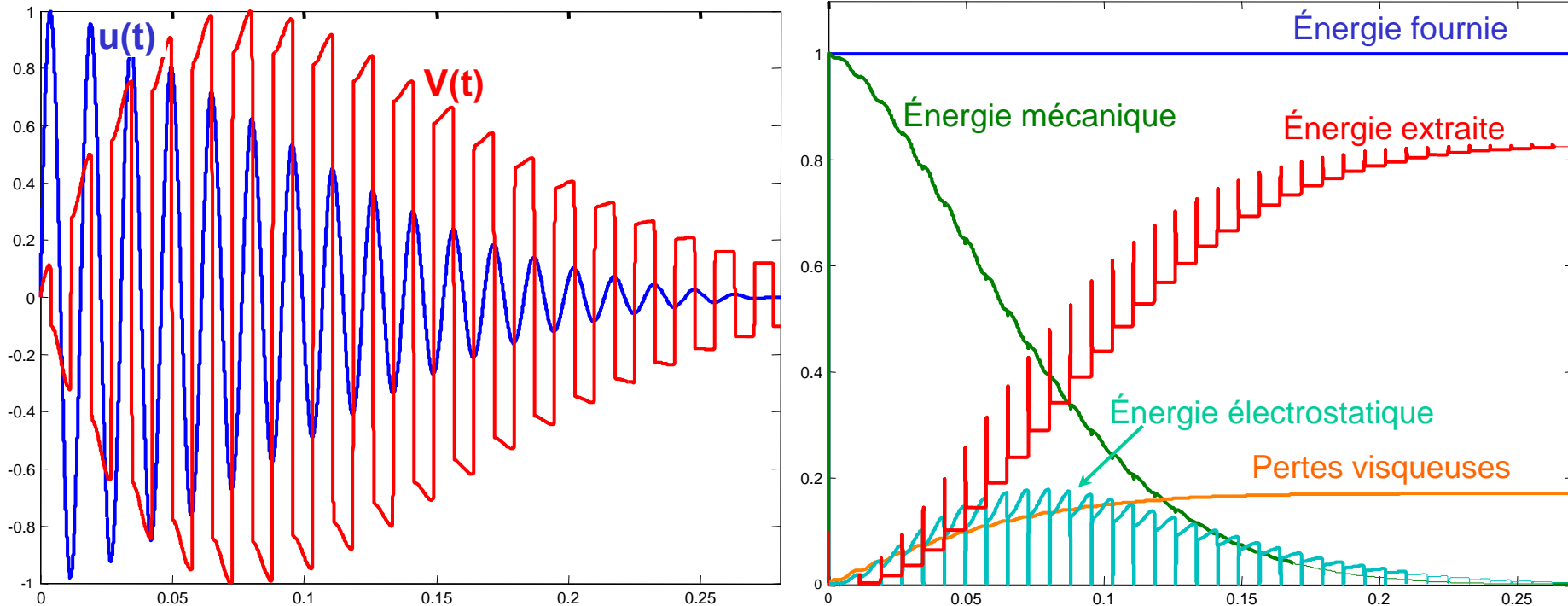
$$E_S = \alpha \int V i dt = \frac{1}{2} C_0 V^2 + \int V I dt$$



Conversion très rapide de l'énergie  
Énergie mécanique convertie en  
énergie électrostatique

# Techniques non linéaires – Énergies (2)

➤ Cas réel: pertes pendant l'inversion  $\gamma=0.85$



Conversion un peu moins rapide de l'énergie

Mais amortissement au moins 10 fois plus rapide qu'avec la résistance adapté (technique passive)

Énergie mécanique  $\rightarrow$  Énergie électrostatique  $\rightarrow$  Pertes pendant l'inversion

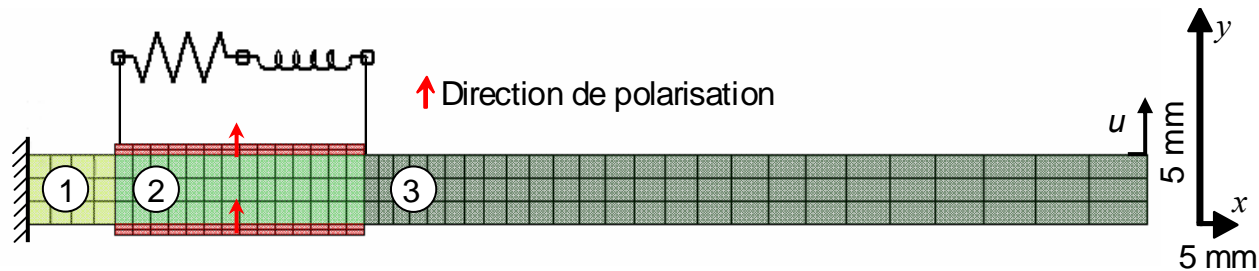
---

# Amortissement vibratoire

- Modélisation
- Flux d'énergie dans la structure électromécanique

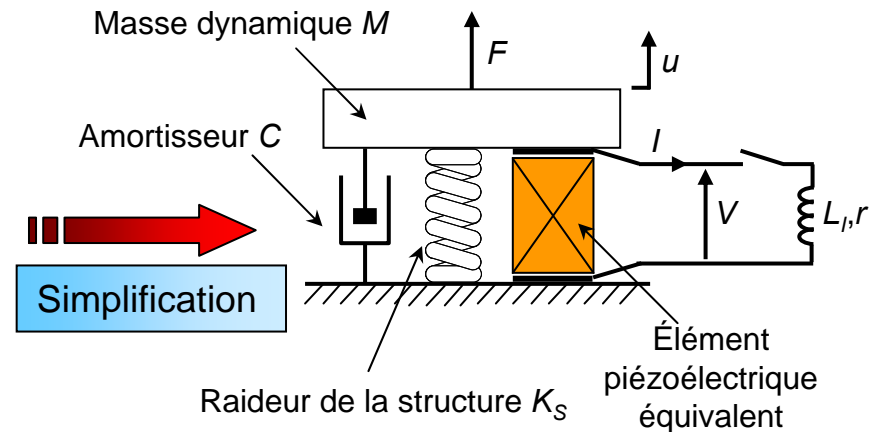
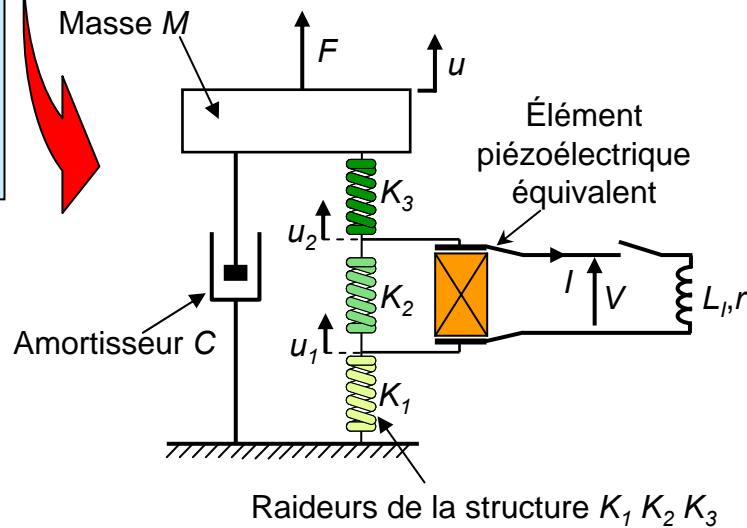
# Justification du modèle masse ressort

➤ Modélisation par éléments finis (ansys ®)



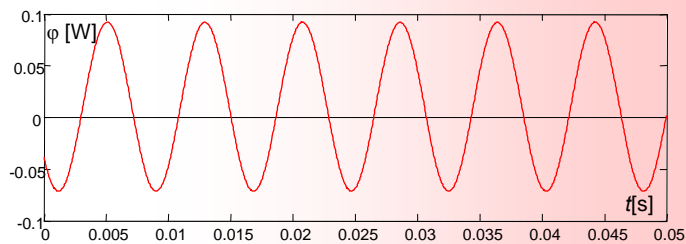
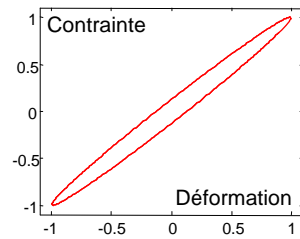
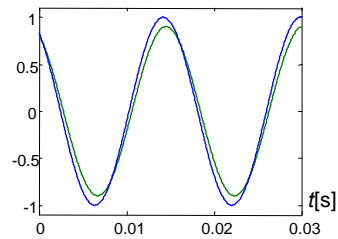
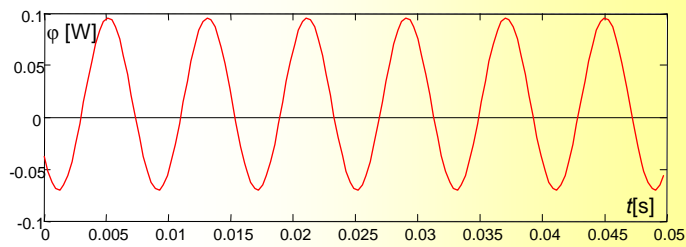
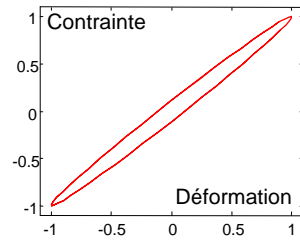
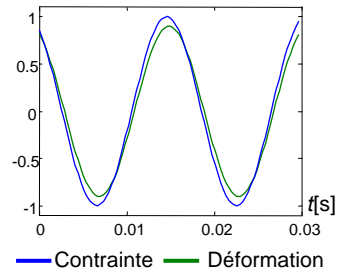
➤ Modélisation à partir d'un modèle masse ressort

Analyse énergétique



# Comparaison ANSYS ® / modèle masse ressort

Résistance adaptée  $\uparrow$  -7dB



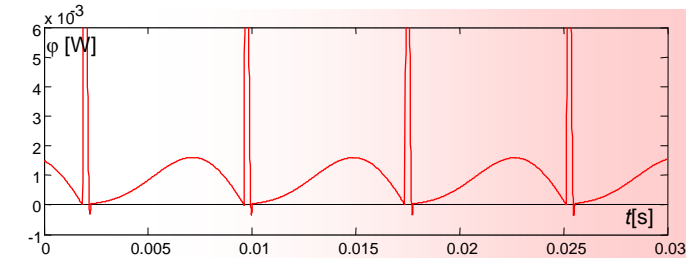
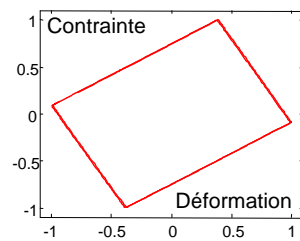
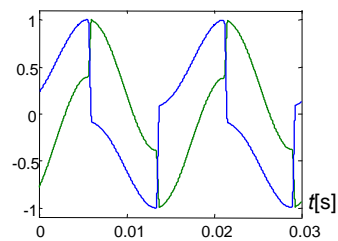
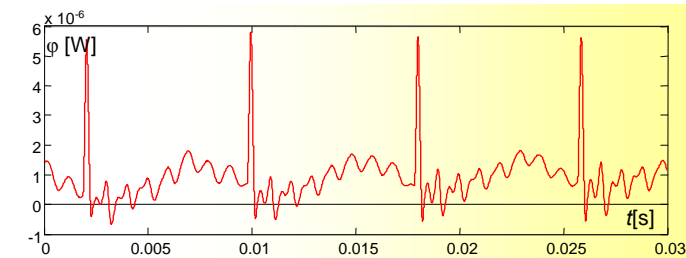
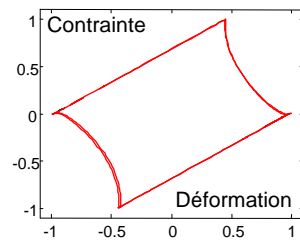
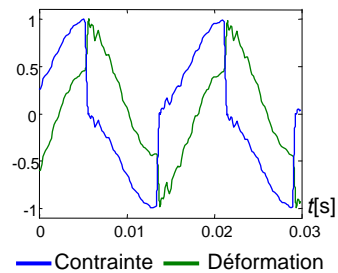
Vecteur de Poynting:

$$P_j = -T_{ij}\dot{u}_i + \Phi\dot{D}_j$$

Flux du vecteur de Poynting à l'interface piézo-structure:

$$\varphi = \iint \vec{P}d\vec{S}$$

Technique SSDI  $\uparrow$  -20dB



Flux du vecteur de Poynting toujours positif

# Validation expérimentale

Exploitation analytique du modèle:

$$A_{SSDI} = \frac{u_{SSDI}}{u_{CO}} = \frac{1}{1 + k^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}}$$

$k^2$  Carré du coefficient de couplage

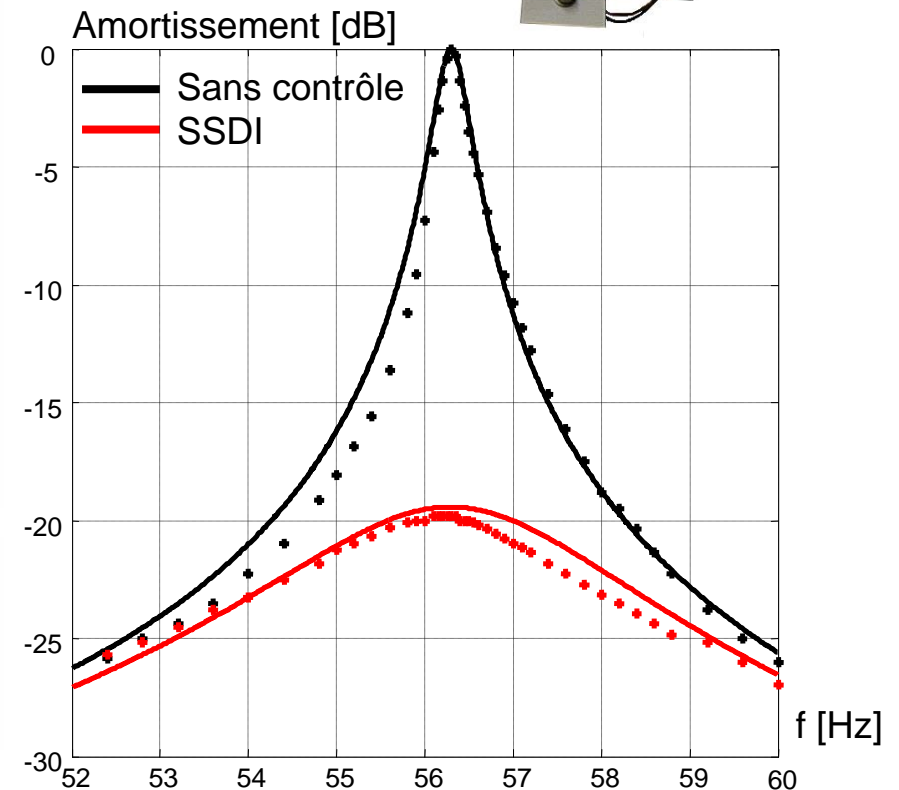
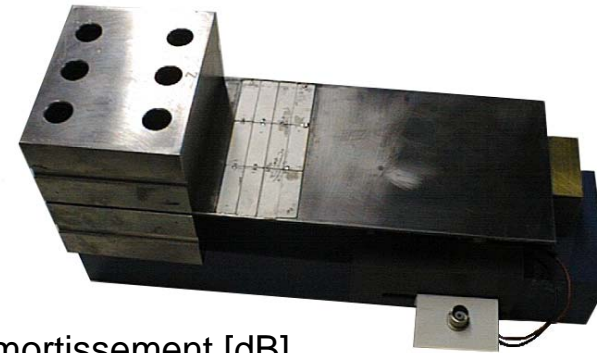
$Q_m$  Facteur de qualité mécanique

$\gamma$  Coefficient d'inversion électrique

$$\begin{cases} k^2 = 0.92\% \\ Q_m = 200 \\ \gamma = 0.7 \end{cases} \Rightarrow A_{SSDI} = -20\text{dB}$$

Importance du facteur de mérite  $k^2 Q_m$

Importance de l'inversion électrique  $\gamma$

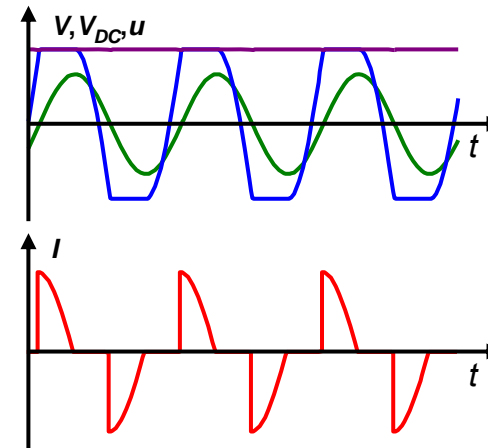
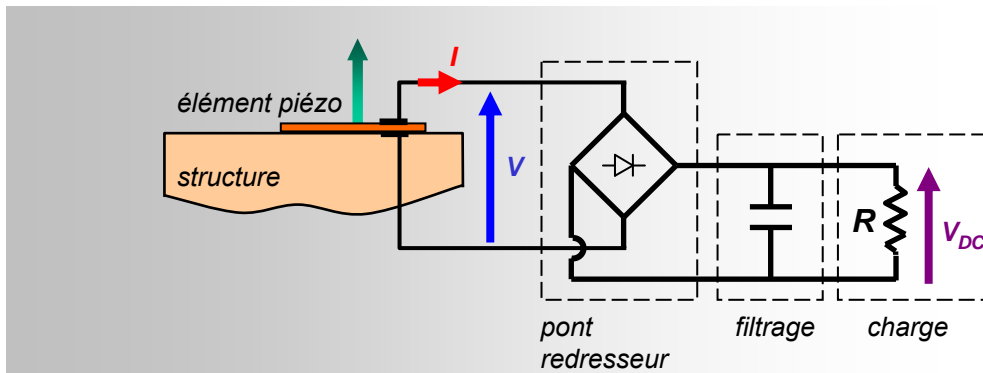


---

# Récupération d'énergie

- Vibration d'amplitude donnée
- Force excitatrice d'amplitude donnée
- Régime impulsionnel

# Vibration d'amplitude donnée – approche standard



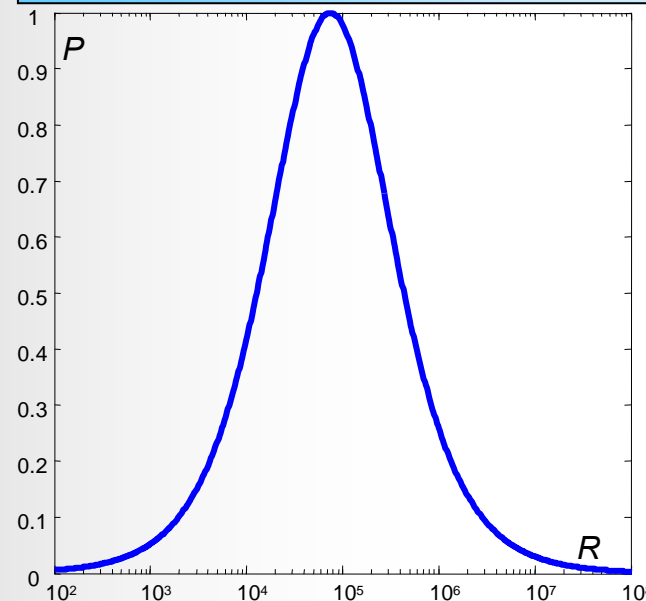
Résistance optimale:

$$R_{\text{opt}} = \frac{\pi}{2C_0\omega}$$

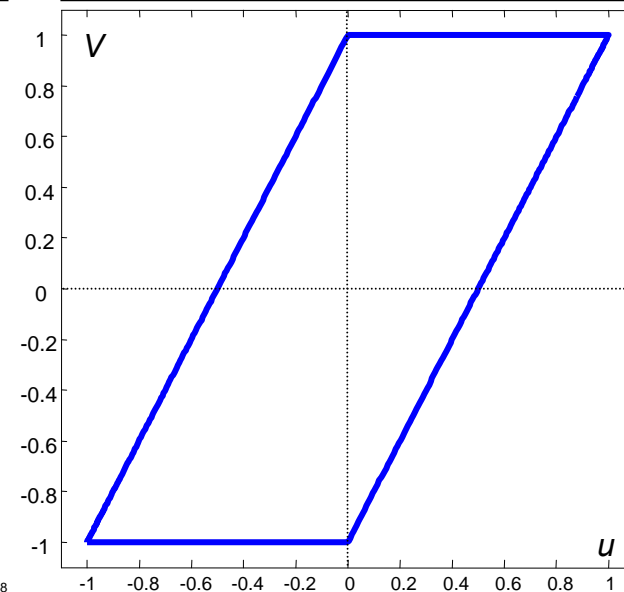
Puissance maximale:

$$P_{\text{max}} = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{E_e}{\pi} \omega$$

Puissance récupérée en fonction de R

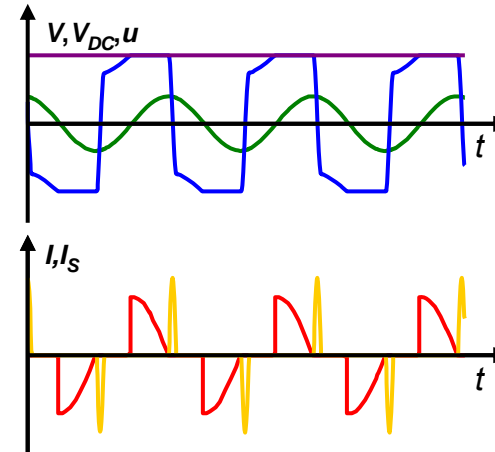
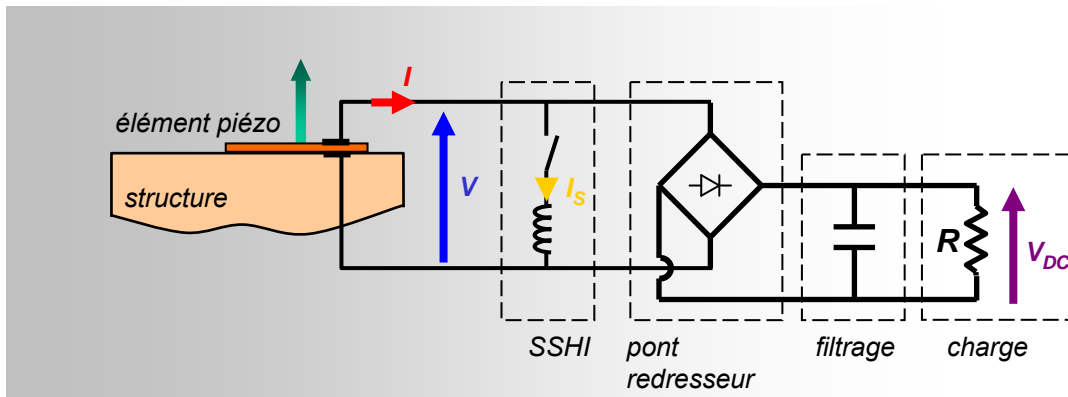


Cycle énergétique pour  $R=R_{\text{opt}}$





# Vibration d'amplitude donnée – technique SSHI



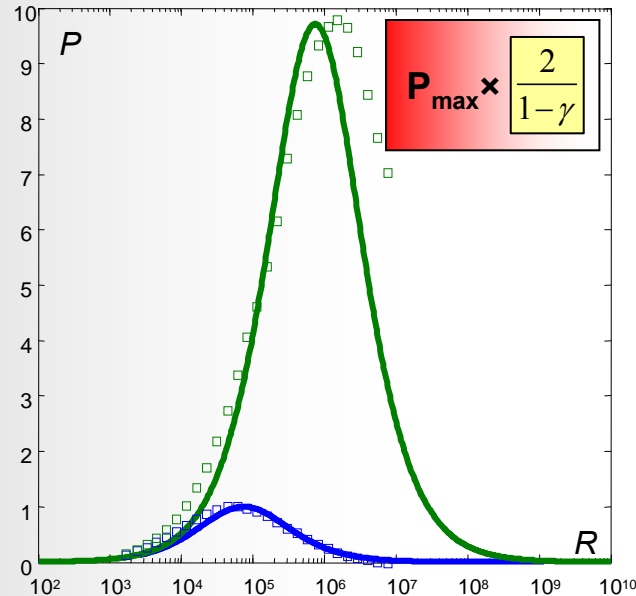
Résistance optimale:

$$R_{\text{opt}} = \frac{\pi}{C_0(1-\gamma)\omega}$$

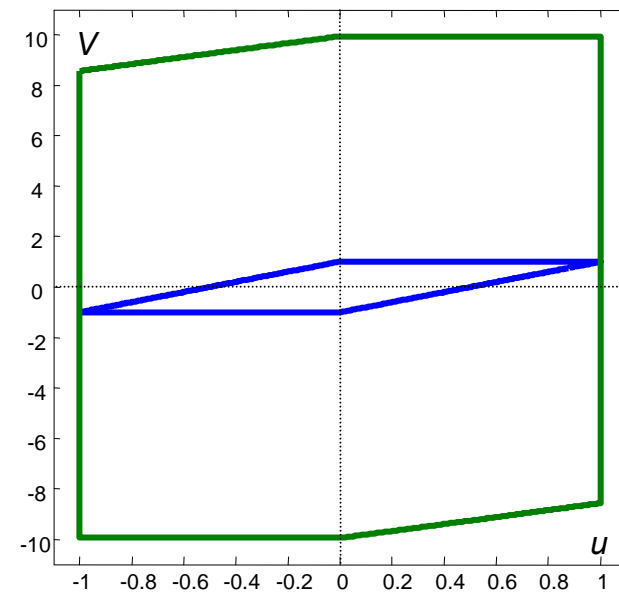
Puissance maximale:

$$P_{\text{max}} = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{2E_e}{\pi(1-\gamma)} \omega$$

Puissance récupérée en fonction de R



Cycle énergétique pour  $R=R_{\text{opt}}$



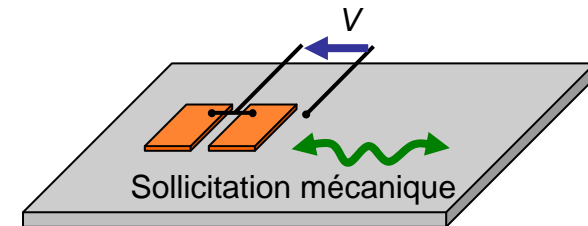
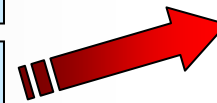
# Prise en compte de l'amortissement induit

Vibration d'amplitude donnée

Système dont le déplacement est imposé

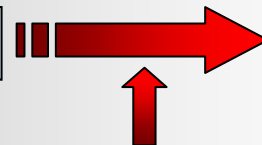
Système excité hors résonance

Système très faiblement couplé



Force excitatrice d'amplitude donnée

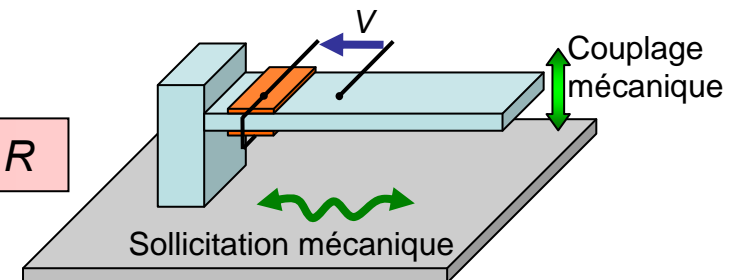
Récupération d'énergie



Amortissement vibratoire

Facteur de mérite  $k^2Q_m$

Puissance récupérée en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$



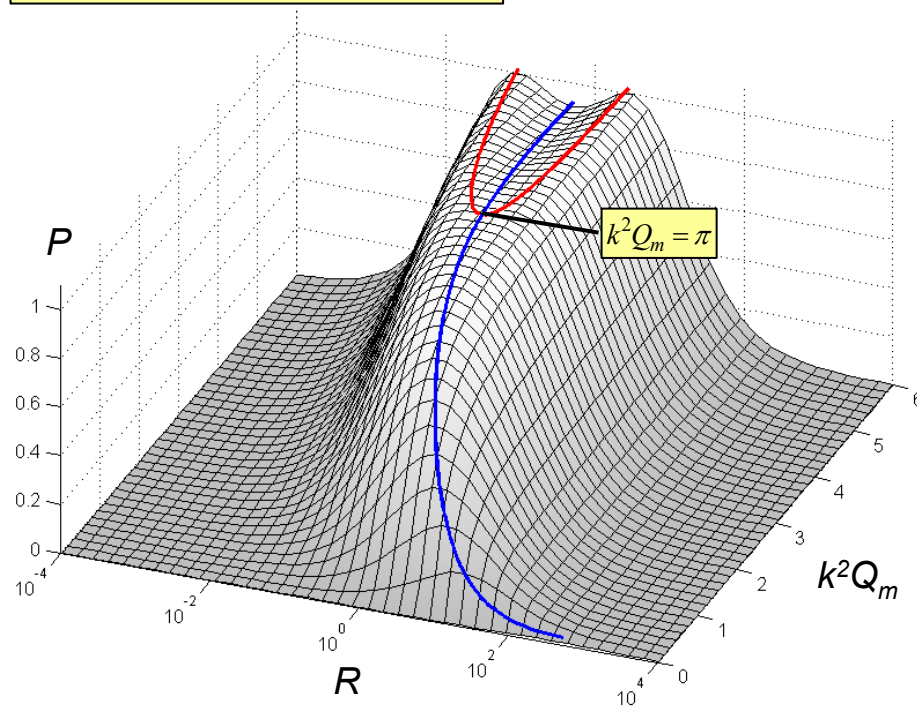
# Prise en compte de l'amortissement – Puissance

Puissance récupérée en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$

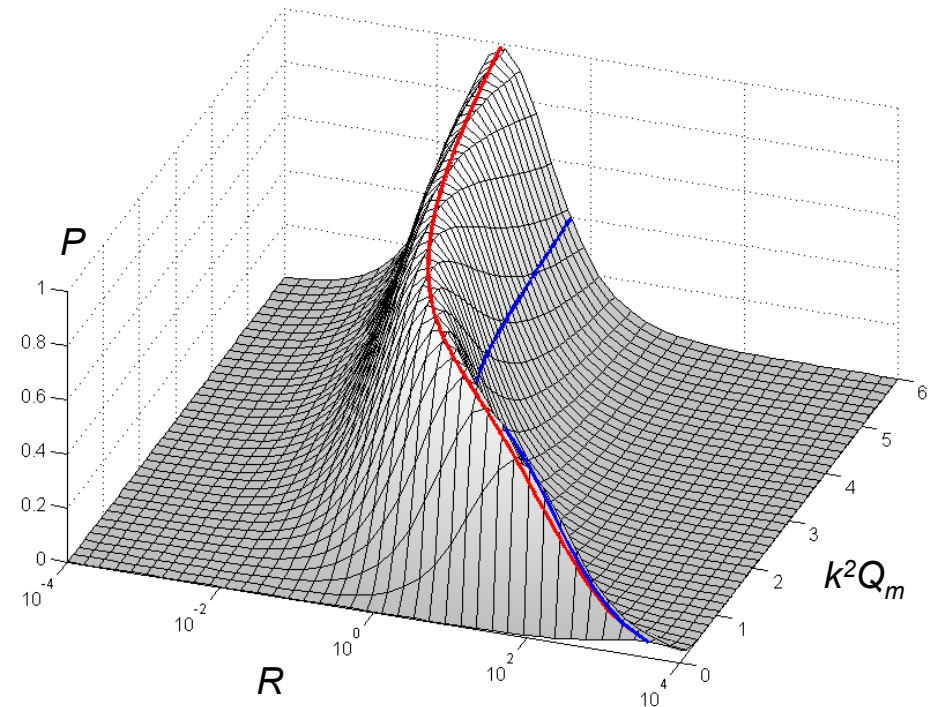
$$P = \frac{R\alpha^2}{\left(RC_0\omega_r + \frac{\pi}{2}\right)^2} \frac{F_M^2}{\left(C + \frac{2R\alpha^2}{\left(RC_0\omega_r + \frac{\pi}{2}\right)^2}\right)^2}$$

— Puissance max  
— Rendement max

$$P = \frac{4R\alpha^2}{\left(RC_0(1-\gamma)\omega_r + \pi\right)^2} \frac{F_M^2}{\left(C + \frac{4R\alpha^2}{\left(RC_0(1-\gamma)\omega_r + \pi\right)^2} \frac{RC_0(1-\gamma^2)\omega_r + 2\pi}{\pi}\right)^2}$$



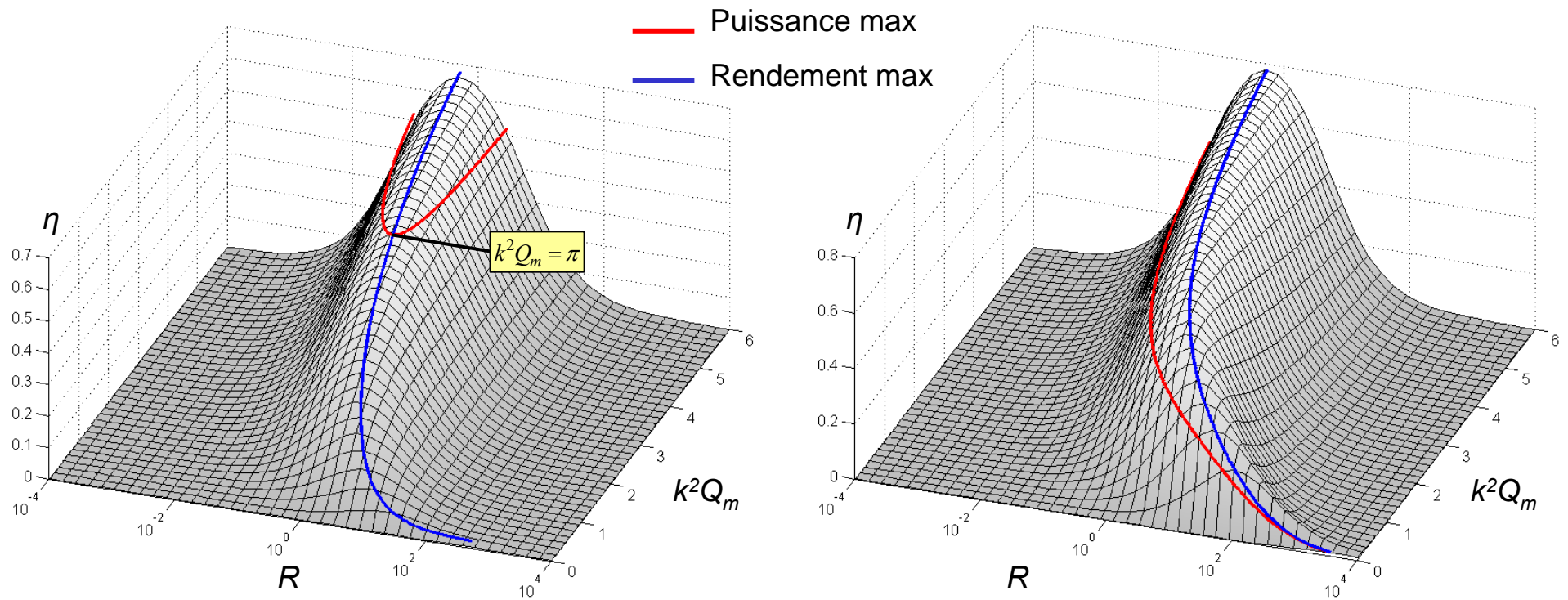
Technique classique



Technique SSHI

# Prise en compte de l'amortissement – Rendement

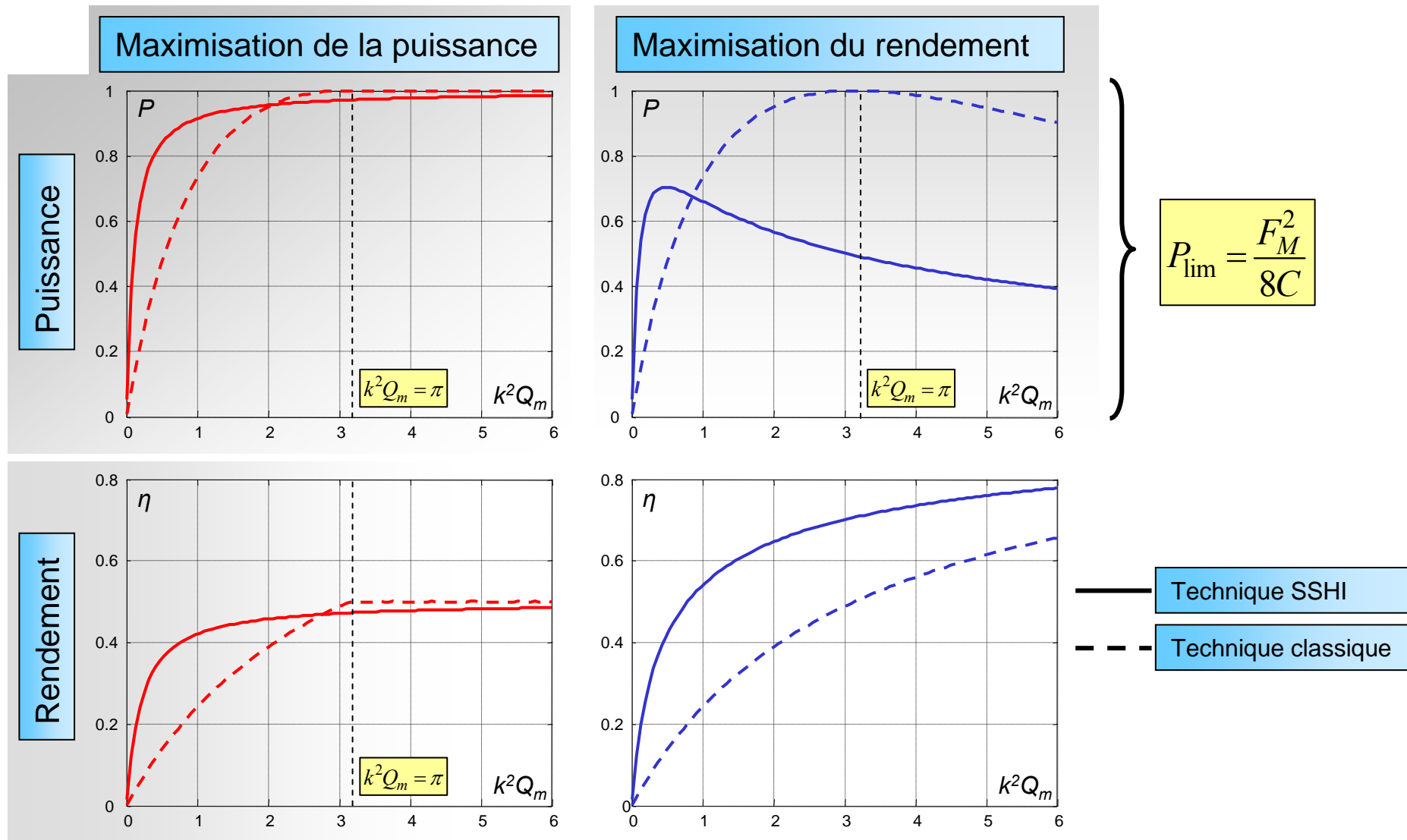
Rendement en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$



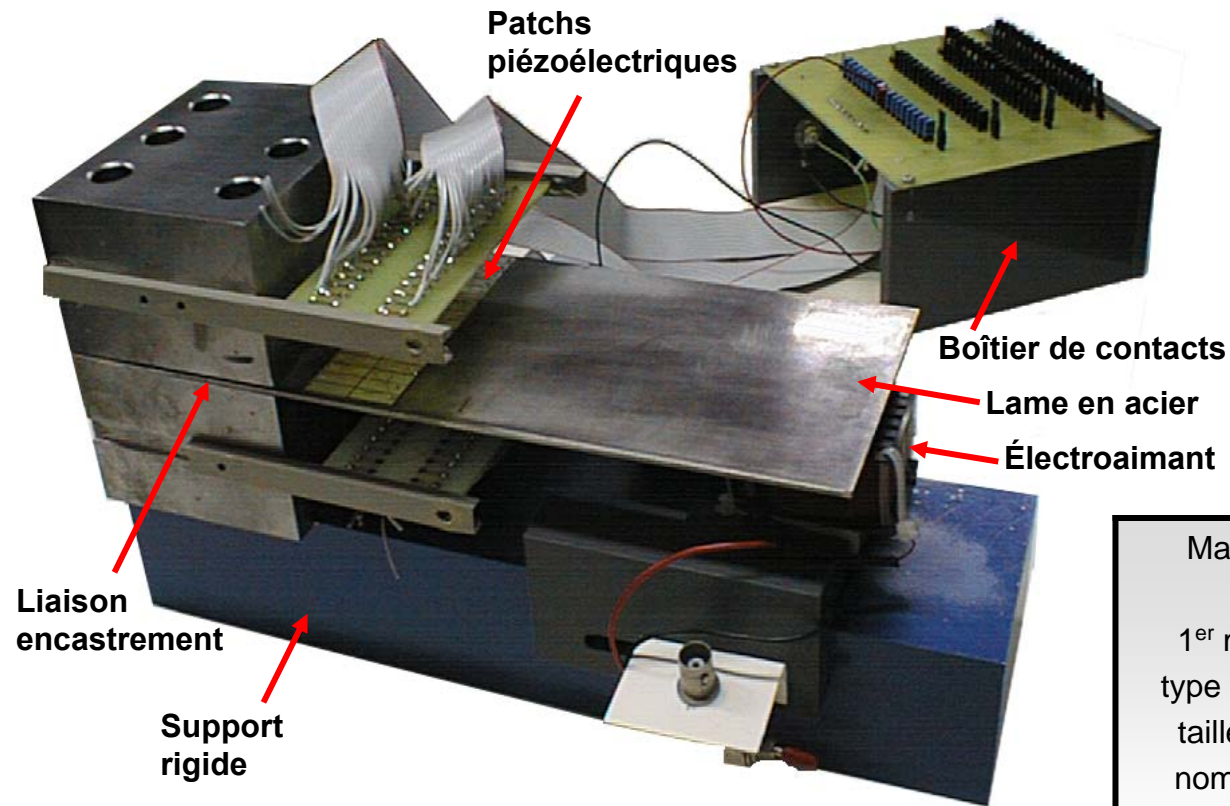
Technique classique

Technique SSHI

# Comparaison des puissances et rendements max.

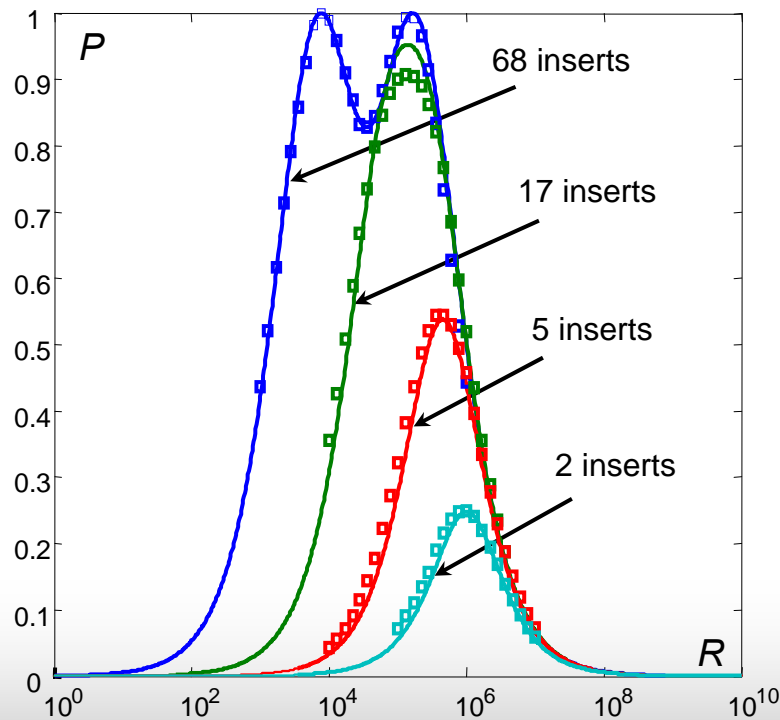
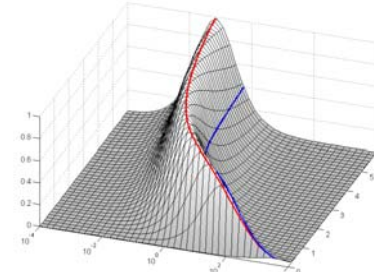
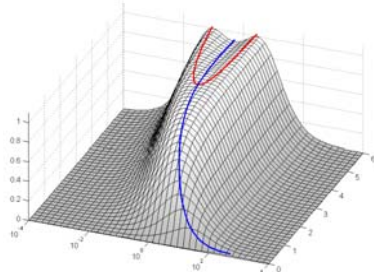


# Validation expérimentale – dispositif

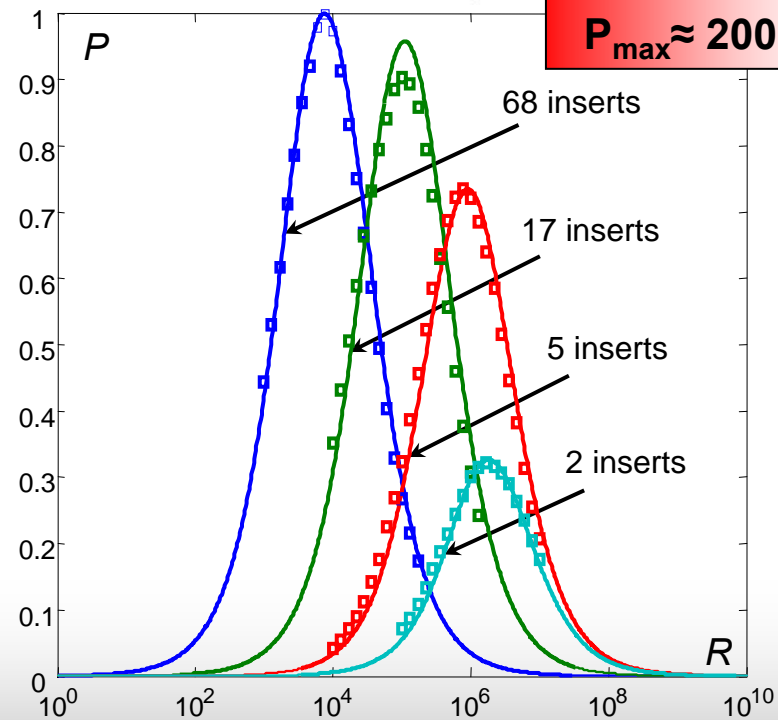


Matériau de la lame	XC65 (acier bleu)
L x l x h	180 x 95 x 2 mm <sup>3</sup>
1 <sup>er</sup> mode de vibration	60 Hz
type de céramique PZT	P189 (QS-France)
taille des inserts PZT	15 x 5 x 0.5 mm <sup>3</sup>
nombre d'inserts PZT	68
surface des inserts PZT	5100 mm <sup>2</sup>
montage des inserts PZT	collés sur la poutre

# Validation expérimentale – résultats



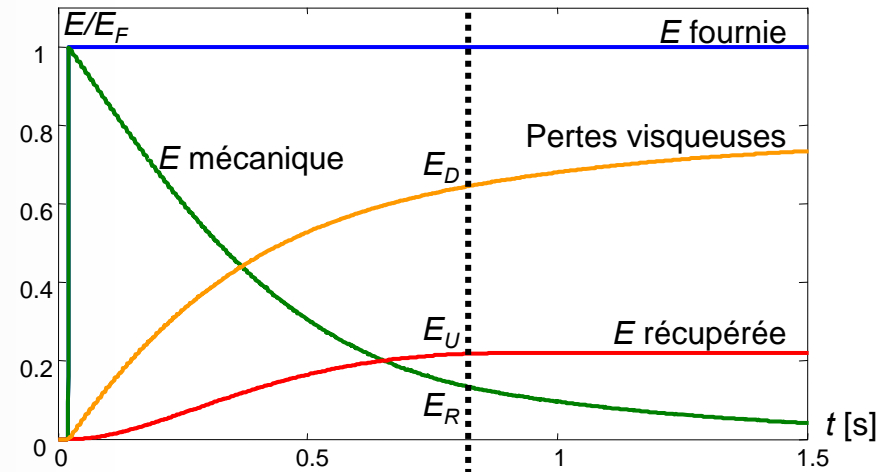
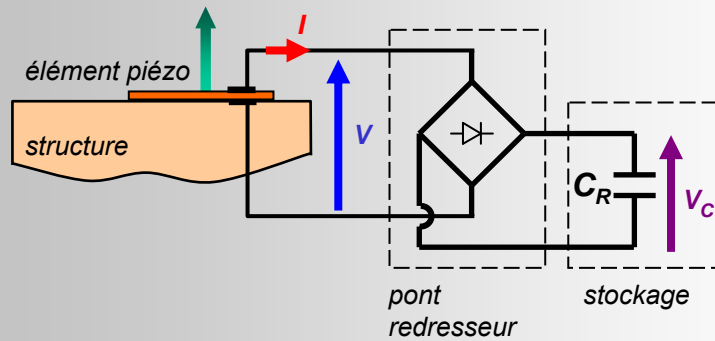
Technique classique



Technique SSHI

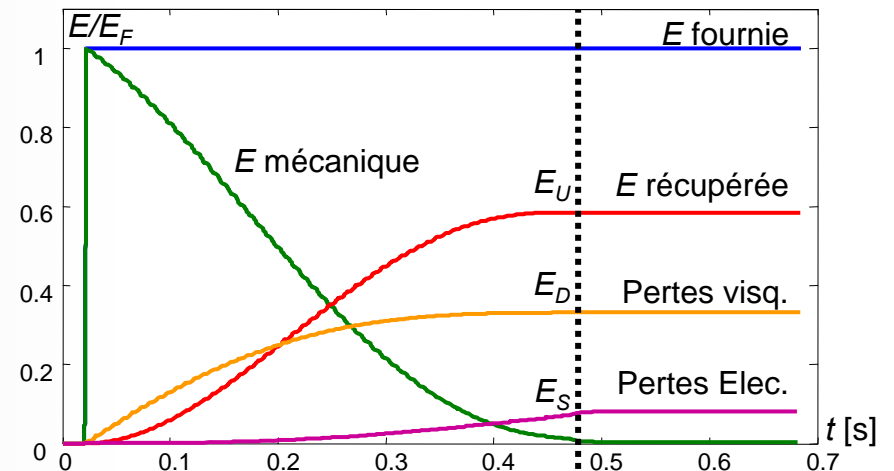
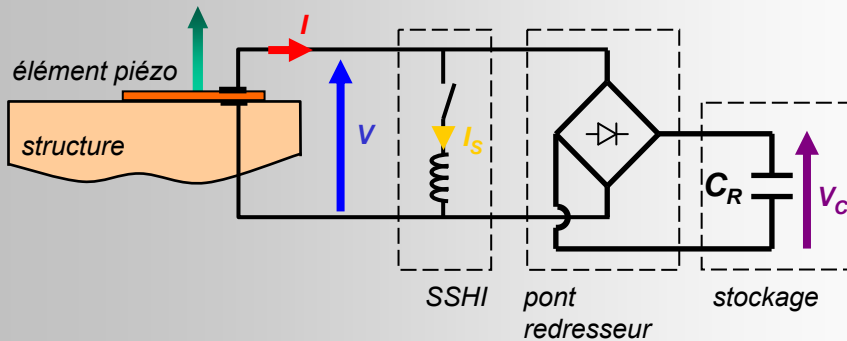
# Régime pulsé

## Technique classique



Fin de la récup

## Technique SSHI



Fin de la récup



# Réalisation d'un prototype

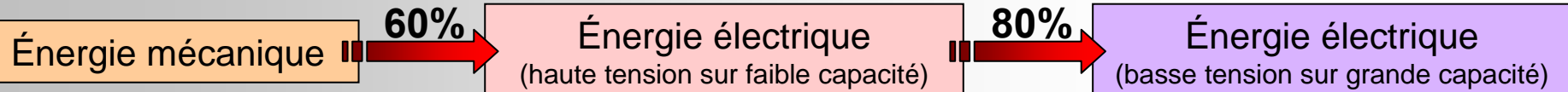
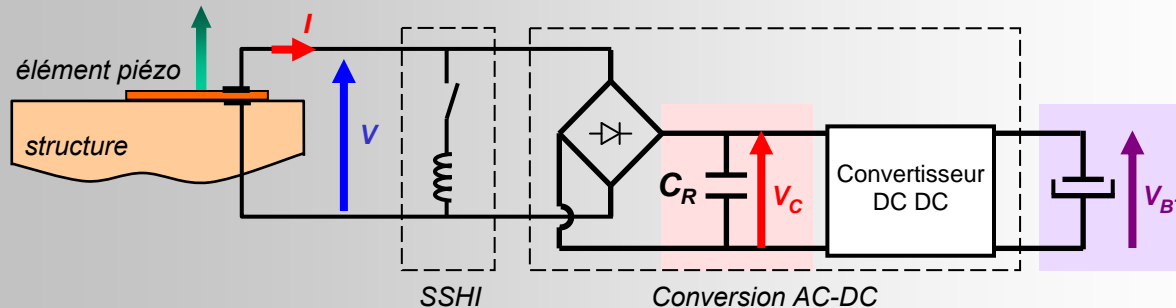
Dans le cadre d'un contrat avec un industriel

Cahier des charges

Régime impulsionnel

Suffisamment d'énergie pour alimenter un petit appareil électroménager

Dispositif utilisé



Rendement globale de la conversion:  $\eta=48\%$

**3 fois plus qu'avec la technique classique**

---

# Approche probabiliste pour les signaux large bande

- Nouvelle loi de contrôle probabiliste
- Application à l'amortissement vibratoire
- Application à la récupération d'énergie

# Autres lois de contrôle pour la technique SSDI

Lois de contrôle adaptées à l'amortissement vibratoire semi passif

Loi de contrôle proposée par Corr et Clark (USA)

Loi de contrôle par sélection de modes (LCSM)

Les instants de commutation sont choisis de façon à ce que le transfert d'énergie mécanique vers électrique soit toujours positif pour l'ensemble des modes sélectionnés

Nécessite de connaître les fréquences de résonances et d'utiliser des filtres

Loi de contrôle proposée par Makihara et Onoda (Japon)

Loi de contrôle basée sur une théorie de contrôle actif

Les instants de commutation sont déterminés de façon à ce que le signe de la tension piézoélectrique corresponde au signe de la tension de contrôle optimale fournie par l'algorithme de contrôle actif

Nécessite la mise en œuvre d'algorithmes complexes (filtre de Kalman + LQR)

# Modèle électromécanique multimodal

## En général

Équation mécanique

$$[M] \cdot \{\ddot{r}\} + [K] \cdot \{r\} + [C] \cdot \{\dot{r}\} + [\alpha] \cdot \{V\} = [\beta] \cdot \{F\}$$

Équation électrique

$$\{I\} = [\alpha]^t \cdot \{\dot{r}\} - C_0 \cdot \{\dot{V}\}$$

## Séparation des modes

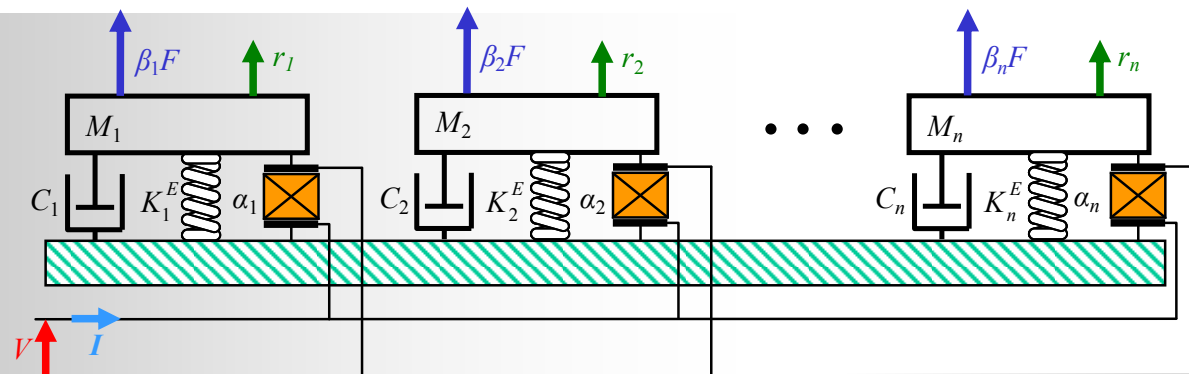
Équation mécanique

$$\forall j = 1..n \quad M_j \ddot{r}_j + K_j^E r_j + C_j \dot{r}_j + \alpha_j V = \beta_j F$$

Équation électrique

$$I = \sum_{j=1}^n \alpha_j \dot{r}_j - C_0 \dot{V}$$

## Modèle associé



# Analyse énergétique

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \int_0^t F \dot{r}_j dt = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n M_j \dot{r}_j^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n K_{Ej} r_j^2 + \sum_{j=1}^n C_j \int_0^t \dot{r}_j^2 dt + \sum_{j=1}^n \alpha_j \int_0^t \dot{r}_j V dt$$

Énergie fournie

Énergie mécanique

Pertes visqueuses

Énergie transférée

Analyse de l'énergie transférée en SSDI

$V_k$  tension sur les éléments piézoélectriques avant la  $k^{\text{ème}}$  commutation

$$\begin{aligned} E_S &= \sum_{j=1}^n \alpha_j \int_0^t \dot{r}_j V dt \\ &= \frac{1}{2} C_0 V^2 + \int_0^t V I dt \\ &= \frac{1}{2} C_0 V^2 + \frac{1}{2} C_0 \sum_{k=1}^N V_k^2 (1 - \gamma^2) \end{aligned}$$

➡ Objectif:

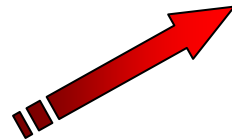
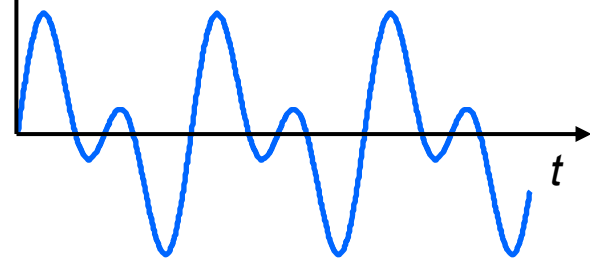
Trouver la séquence de commutation optimale qui maximise  $\sum_{k=1}^N V_k^2$

# Problématique dans le cas de signaux complexes

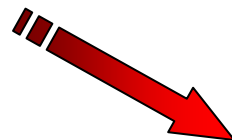
Les  $V_k$  dépendent:

- ✓ de la déformation
- ✓ de la stratégie de commutation

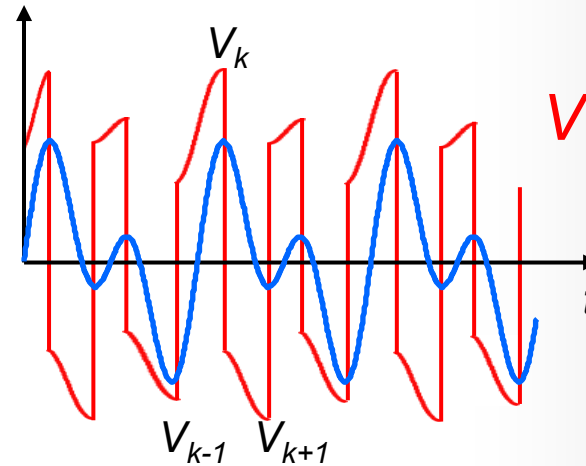
$$\sum_{j=1}^n \alpha_j r_j \text{ (déformation)}$$



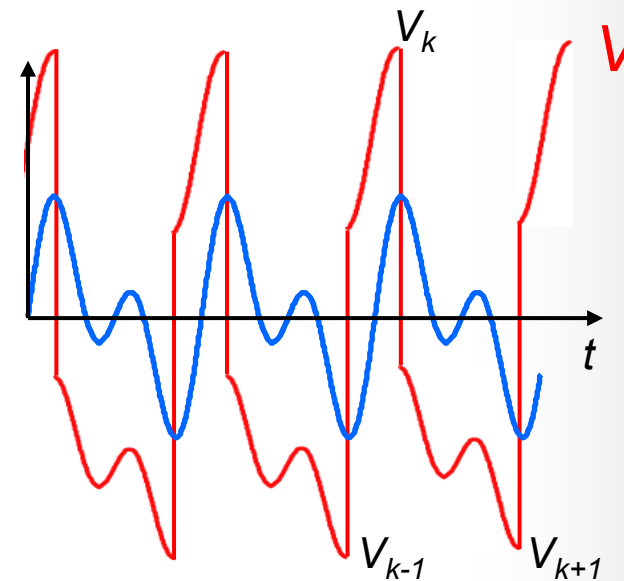
???



Quelle est la séquence de commutation qui maximise  $\sum_{k=1}^N V_k^2$  ?



$N$  élevé  
 $|V_k|$  bas



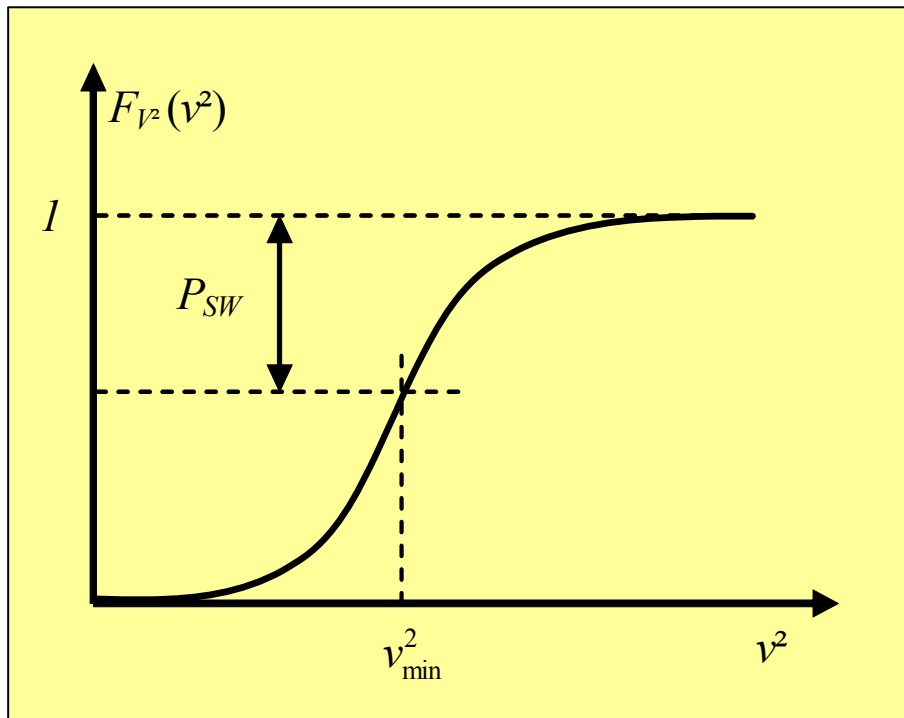
$N$  bas  
 $|V_k|$  élevé

# Loi de contrôle probabiliste (LCP)

Inversion de la tension au dessus d'un seuil significatif mais statistiquement probable  $v_{\min}$

$|V_k|$

$N$



Fonction de répartition:

$$F_{V^2}(v^2) = P[V^2 \leq v^2]$$

$P_{SW}$  défini par l'utilisateur

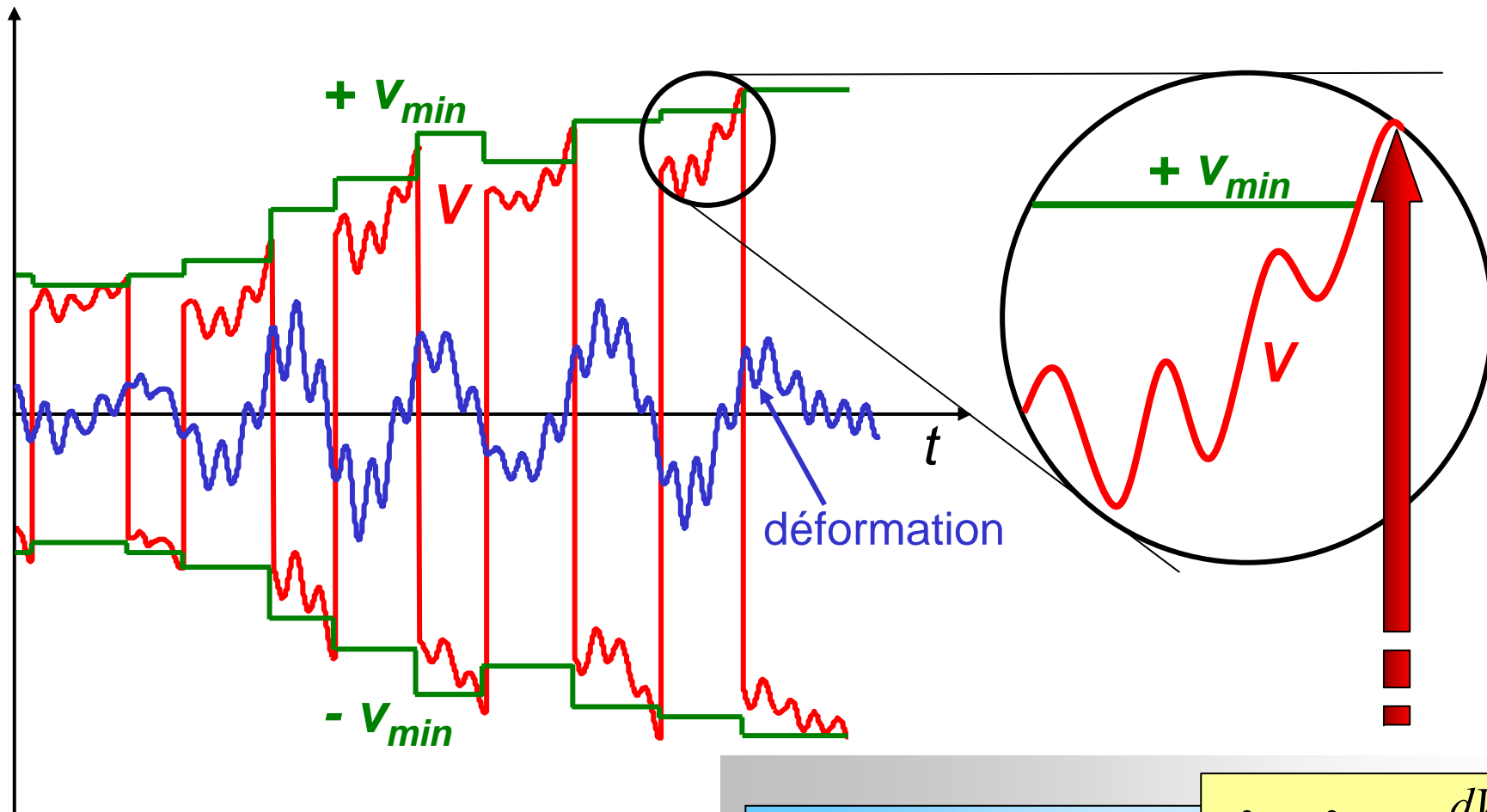
Calcul de la tension de seuil:

$$P[V^2 > v_{\min}^2] = P_{SW} = 1 - F_{V^2}(v_{\min}^2)$$

Condition de commutation:

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad V^2 > v_{\min}^2$$

# Loi de contrôle probabiliste (LCP)



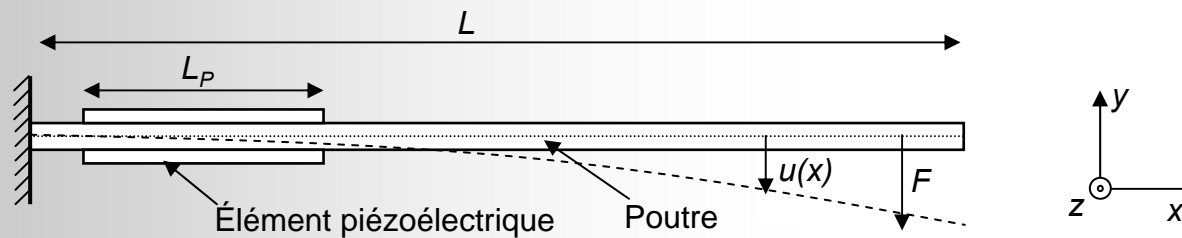
Condition de commutation

$$V^2 > v_{min}^2 \text{ et } \frac{dV}{dt} = 0$$



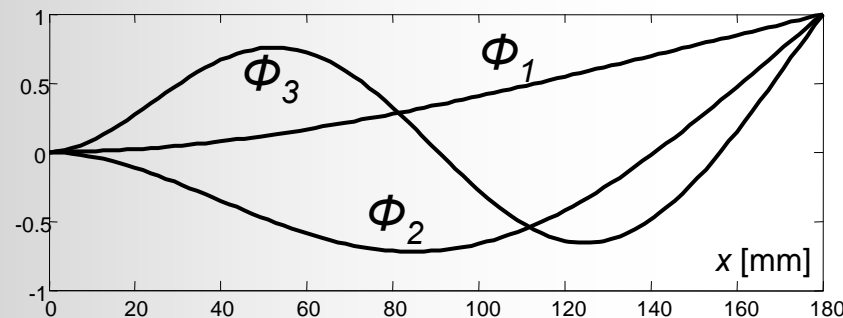
# Amortissement vibratoire d'une poutre en flexion

## Géométrie



## Modes considérés

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^3 \phi_j(x) r_j(t)$$



Mode	1	2	3
F (Hz)	56.4	353	990
$k^2$ (%)	0.92	0.44	0.07
$Q_m$	200	200	200

## Critères d'amortissement

Critère relatif au déplacement

$$I_u = \int_0^t \int_0^L u(x,t)^2 dx dt \propto \int_0^t u(L,t)^2 dt$$

$$A_u = \frac{(I_u)_{SSD}}{(I_u)_{CO}}$$

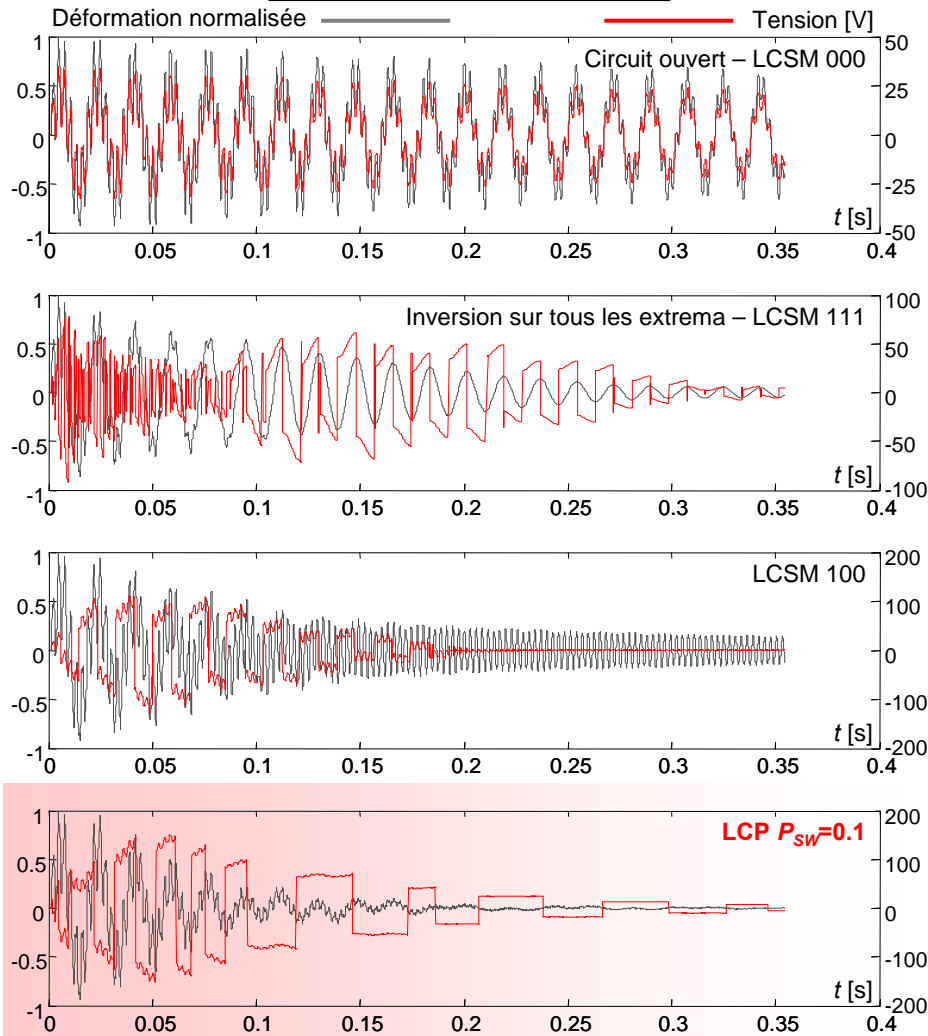
Critère relatif à l'énergie

$$I_E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \left[ M_j \int_0^t \dot{r}_j^2 dt + K_{Ej} \int_0^t r_j^2 dt \right]$$

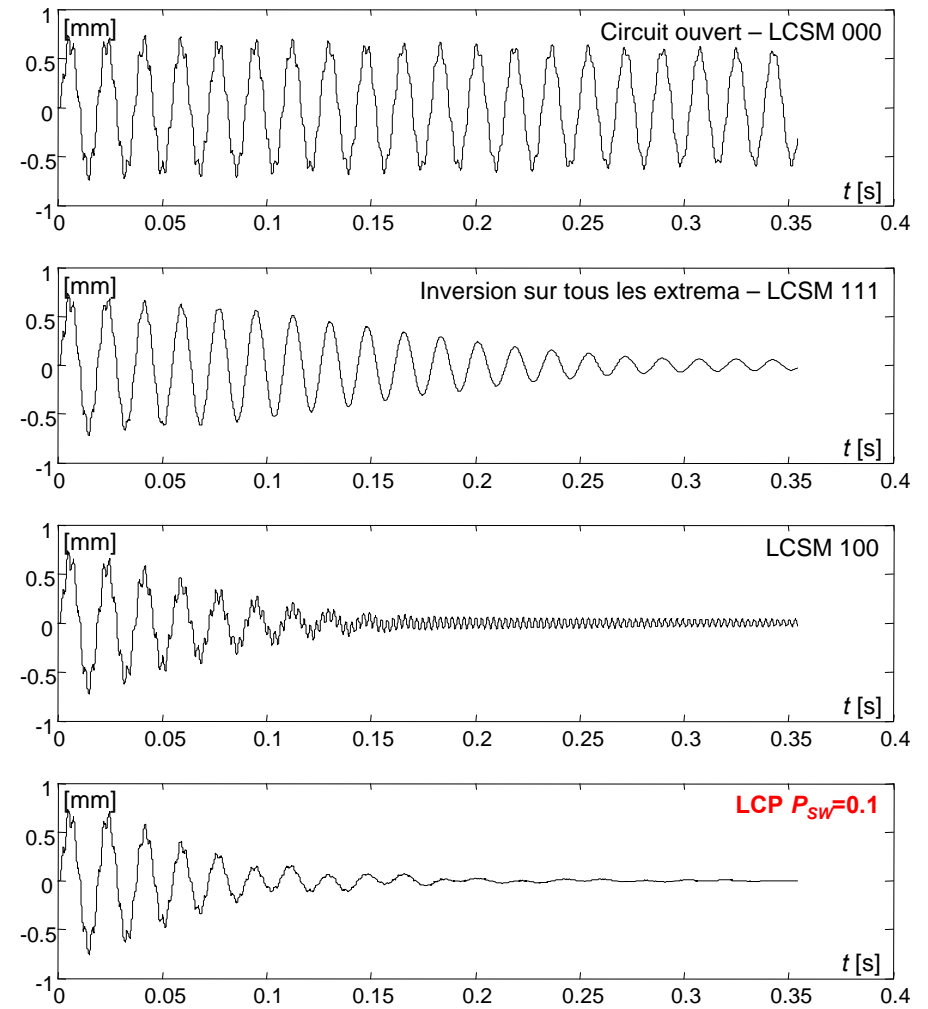
$$A_E = \frac{(I_E)_{SSD}}{(I_E)_{CO}}$$

# Réponse impulsionnelle – simulations

## Déformation et tension

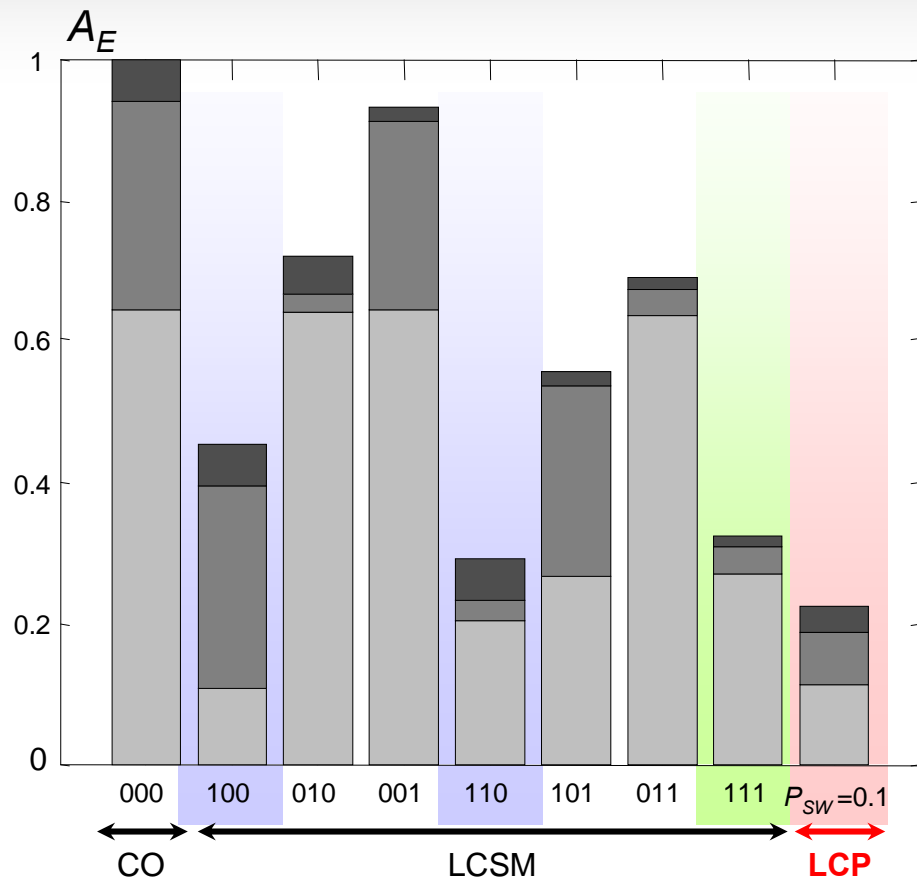


## Déplacement de l'extrémité libre de la poutre



# Réponse impulsionnelle – simulations

Répartition modale de l'énergie mécanique

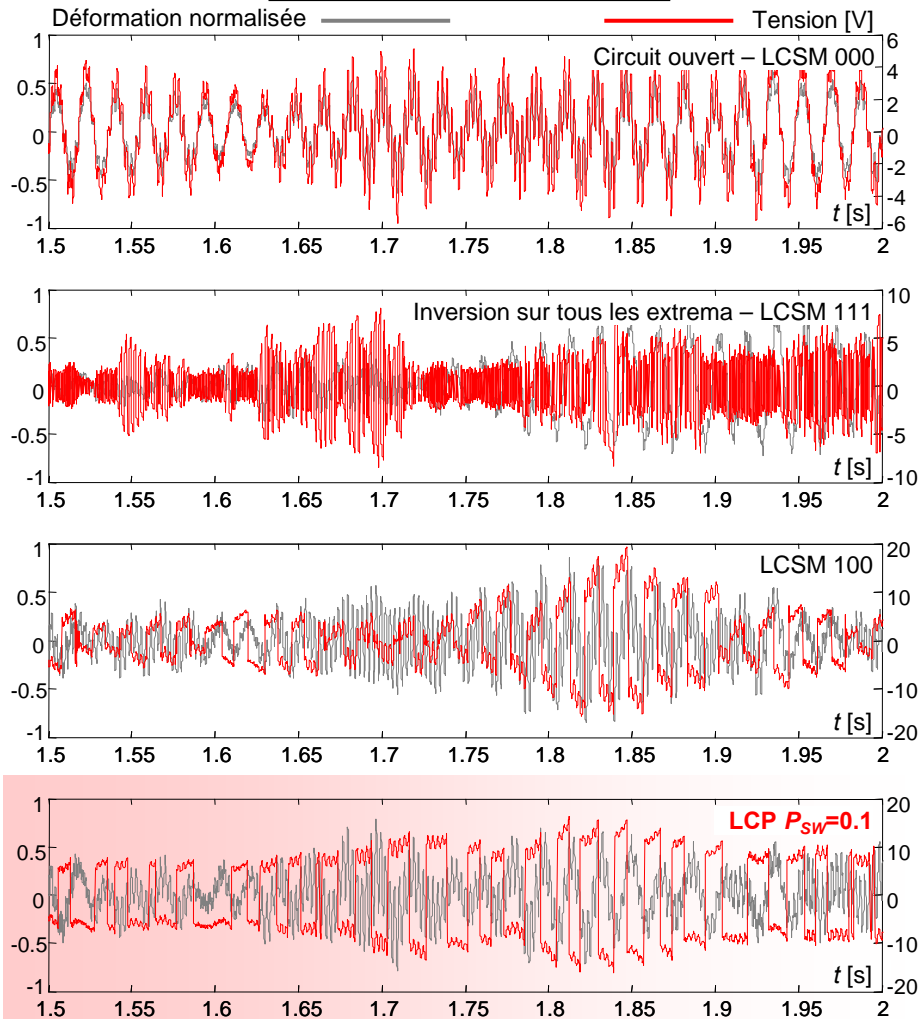


Amortissements globaux

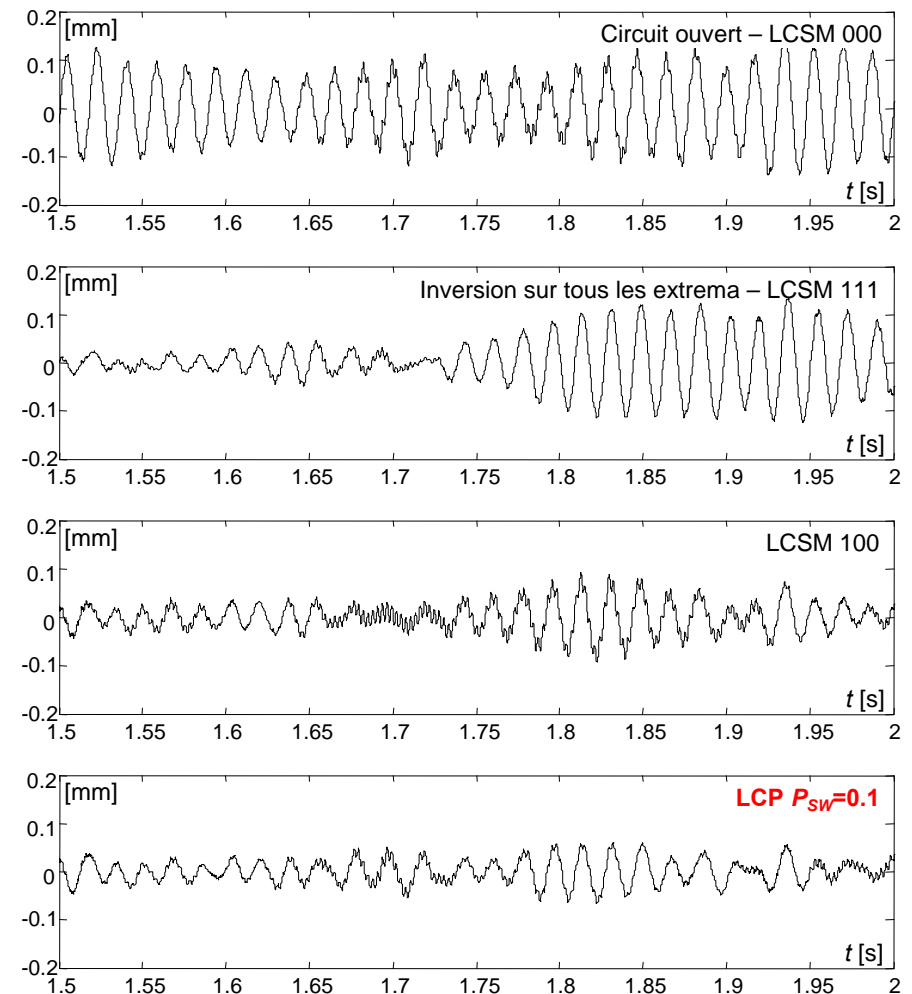
Loi de contrôle		$A_E$ [dB]	$A_u$ [dB]
Sélection des modes	000 – Circ. ouvert	0	0
	100	-3.45	<b>-7.62</b>
	010	-1.43	-0.0461
	001	-0.311	0.0145
	110	<b>-5.41</b>	-5.06
	101	-2.56	-3.78
	011	-1.61	-0.0700
	111 – ts les ext.	-4.89	-3.81
	Proba. - $P_{SW}=0.1$	<b>-6.50</b>	<b>-7.67</b>

# Réponse à un bruit blanc – simulations

Déformation et tension

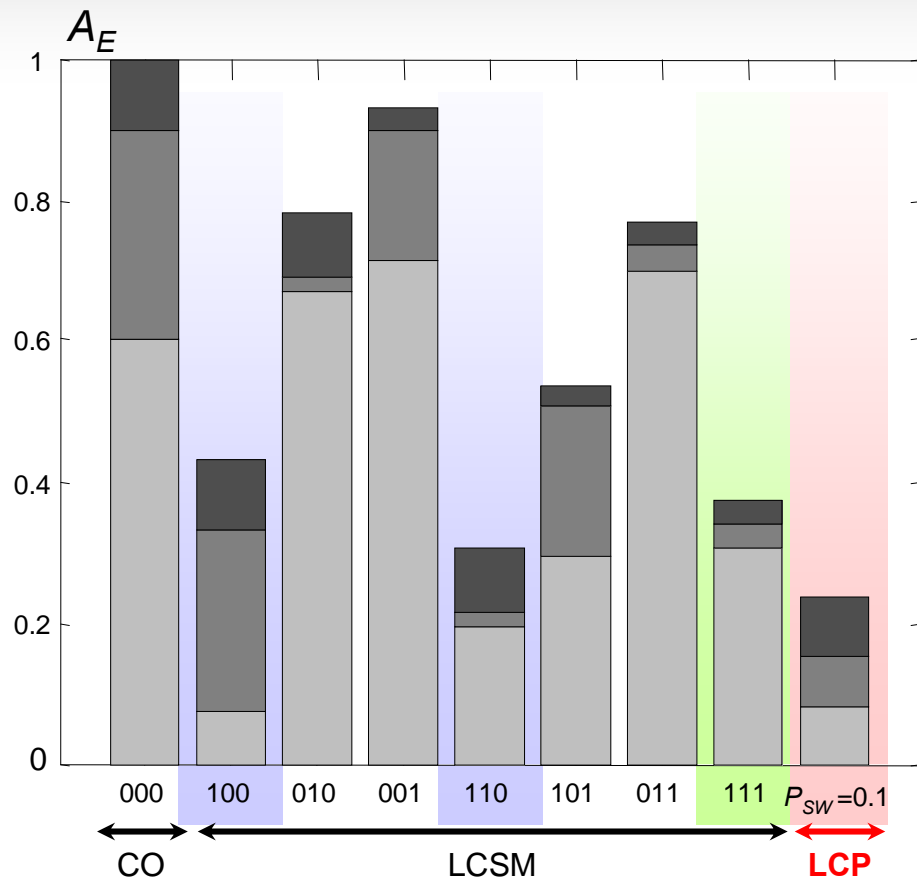


Déplacement de l'extrémité libre de la poutre



# Réponse à un bruit blanc – simulations

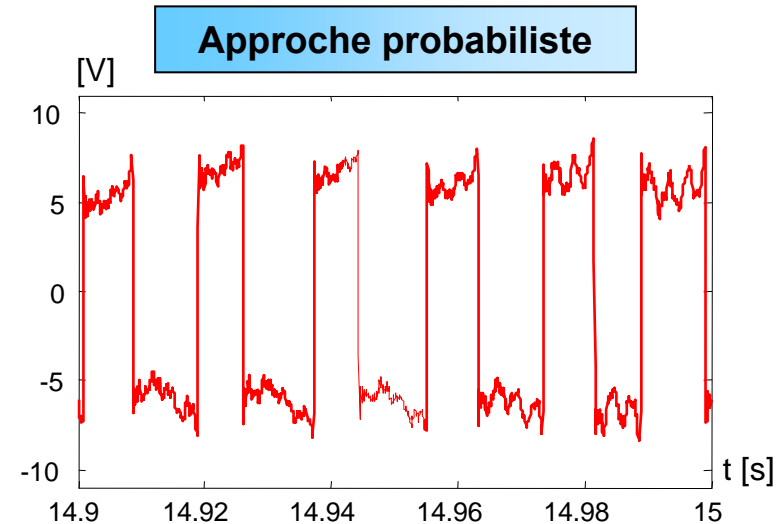
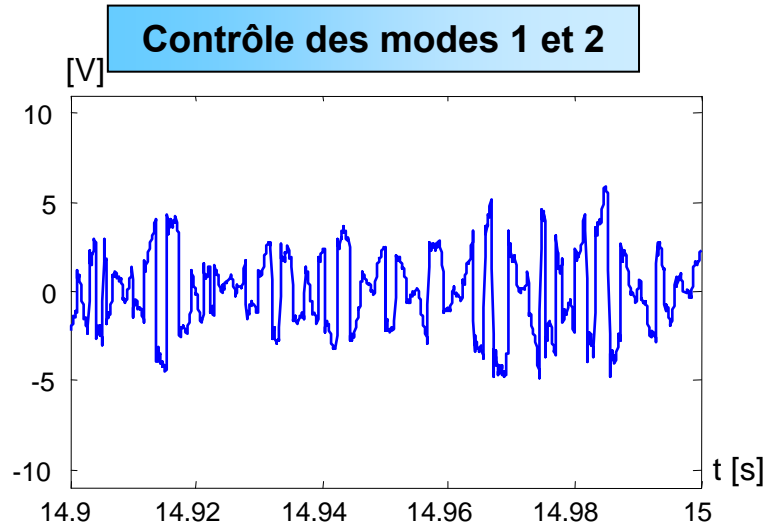
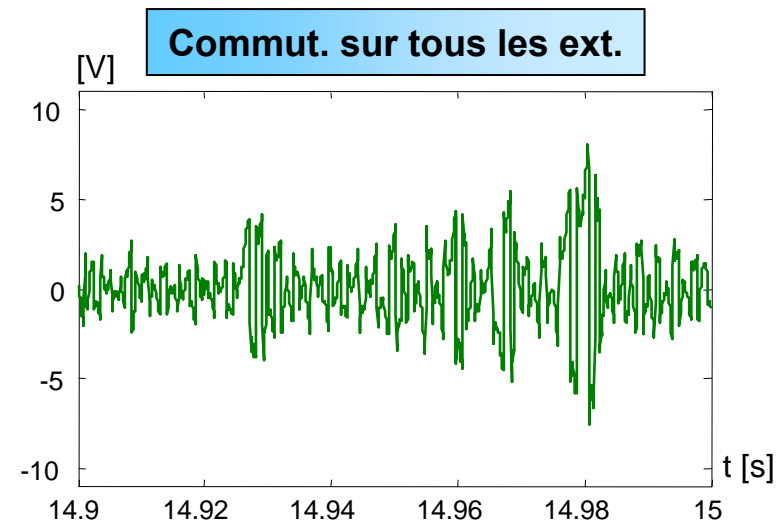
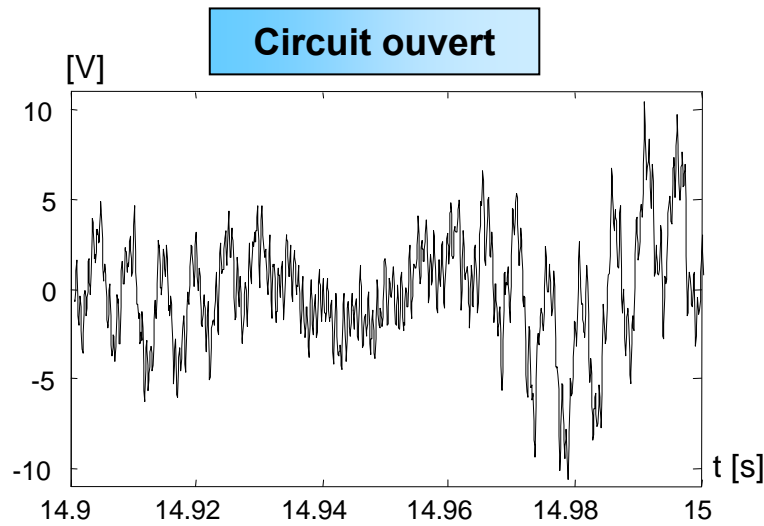
Répartition modale de l'énergie mécanique



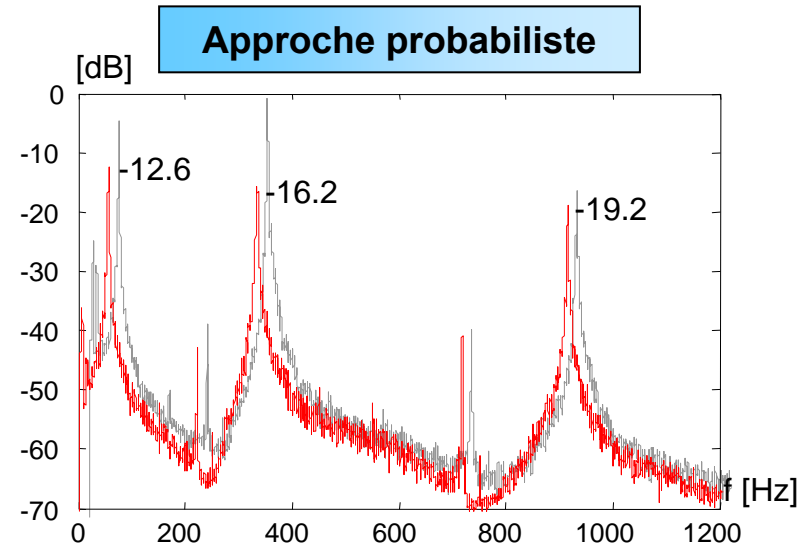
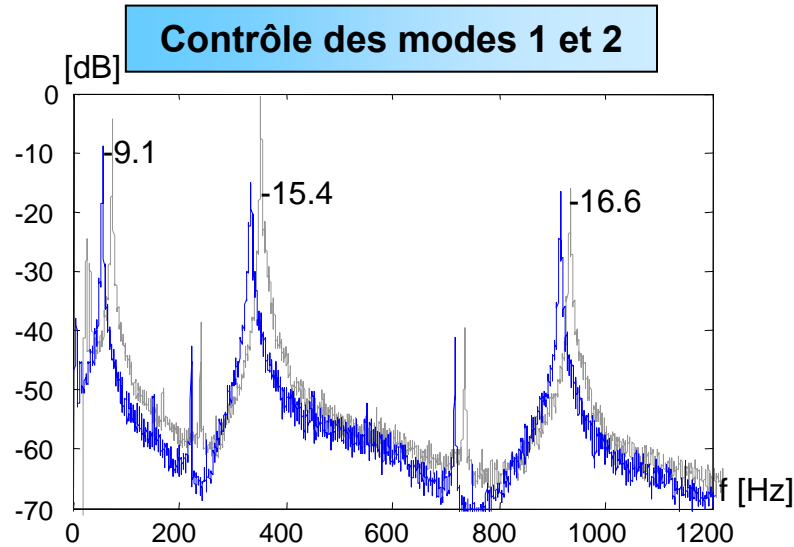
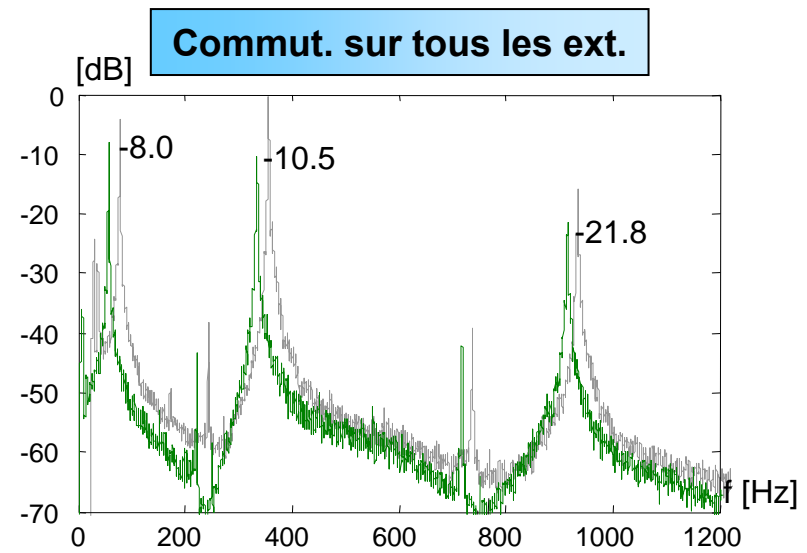
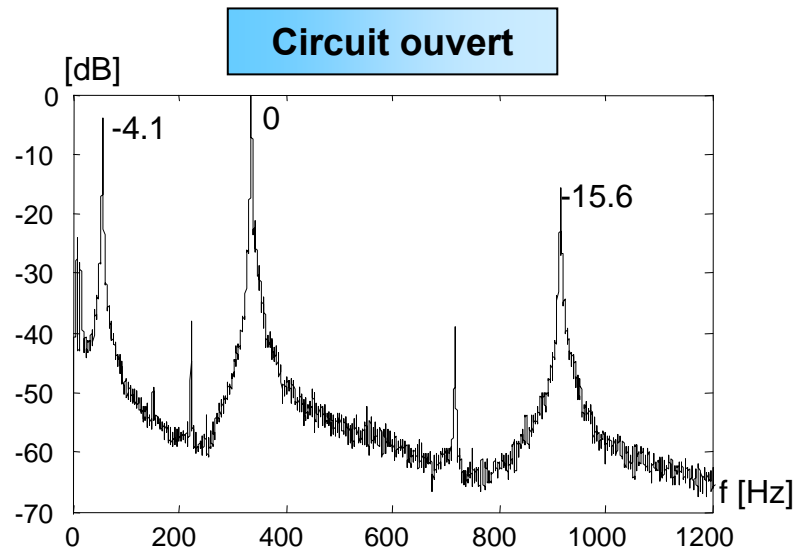
Amortissements globaux

Loi de contrôle		$A_E$ [dB]	$A_u$ [dB]
Sélection des modes	000 – Circ. ouvert	0	0
	100	-3.64	<b>-8.79</b>
	010	-1.08	0.42
	001	-0.31	0.74
	110	<b>-5.11</b>	-4.96
	101	-2.70	-3.08
	011	-1.14	0.62
	111 – ts les ext.	-4.27	-2.96
	Proba. – $P_{SW}=0.1$	<b>-6.32</b>	<b>-8.49</b>

# Réponse à un bruit blanc – Formes d’ondes expérimentales

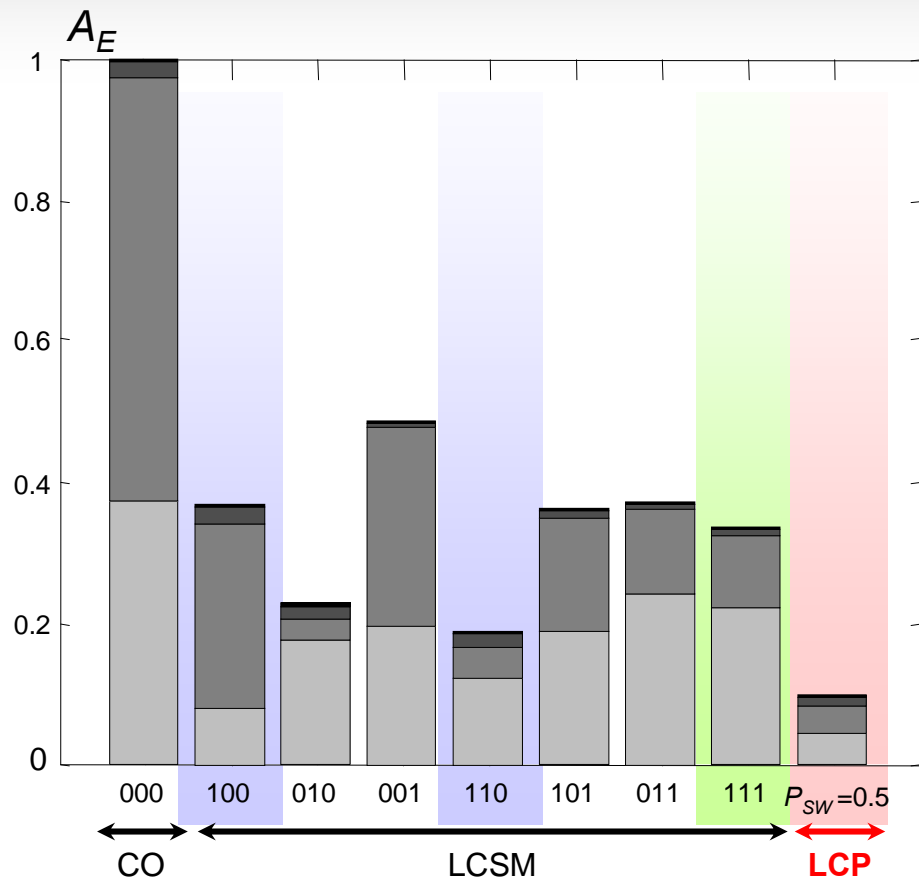


# Réponse à un bruit blanc – spectres expérimentaux



# Réponse à un bruit blanc – résultats expérimentaux

Répartition modale de l'énergie mécanique

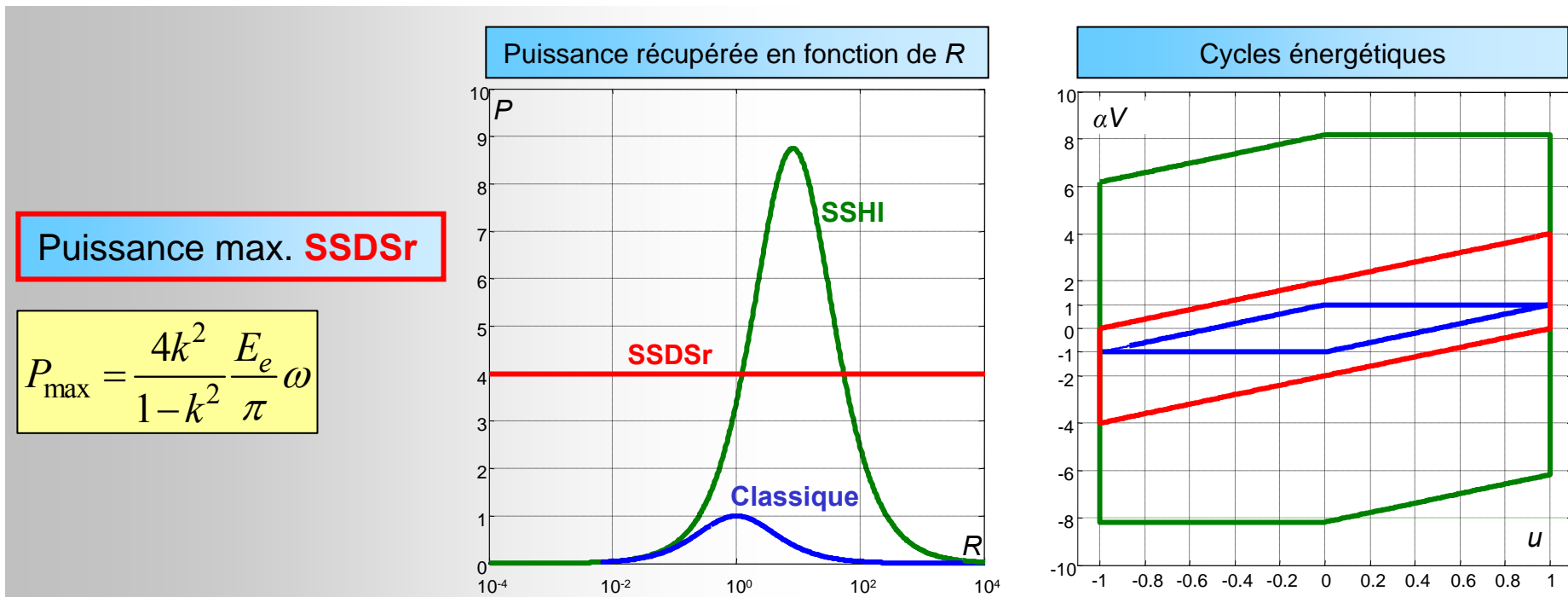
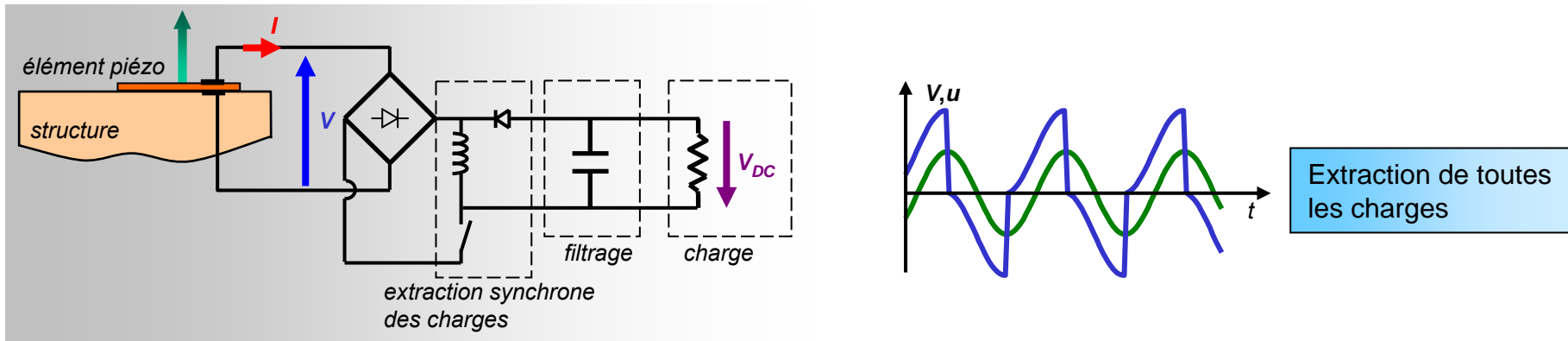


Amortissements globaux

Loi de contrôle		$A_E$ [dB]	$A_u$ [dB]
Sélection des modes	000 – Circ. ouvert	0	0
	100	-4.32	<b>-6.41</b>
	010	-6.42	-3.40
	001	-3.12	-2.73
	110	<b>-7.23</b>	-4.88
	101	-4.40	-3.00
	011	-4.29	-1.95
	111 – ts les ext.	-4.73	-2.34
Proba. – $P_{SW}=0.5$		<b>-10.06</b>	<b>-10.57</b>

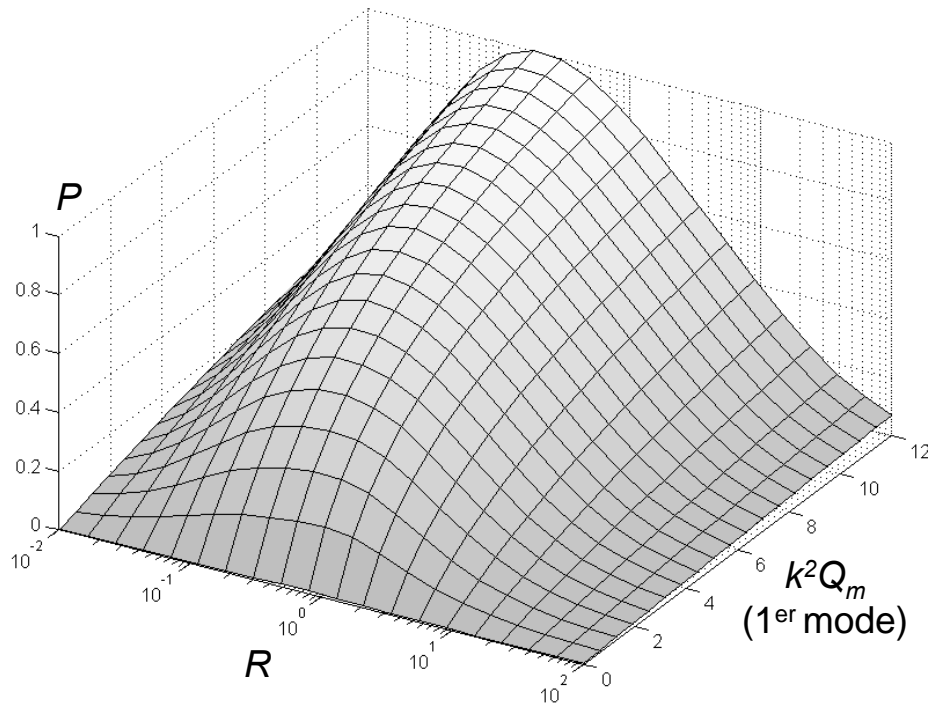


# Technique de récupération d'énergie large bande

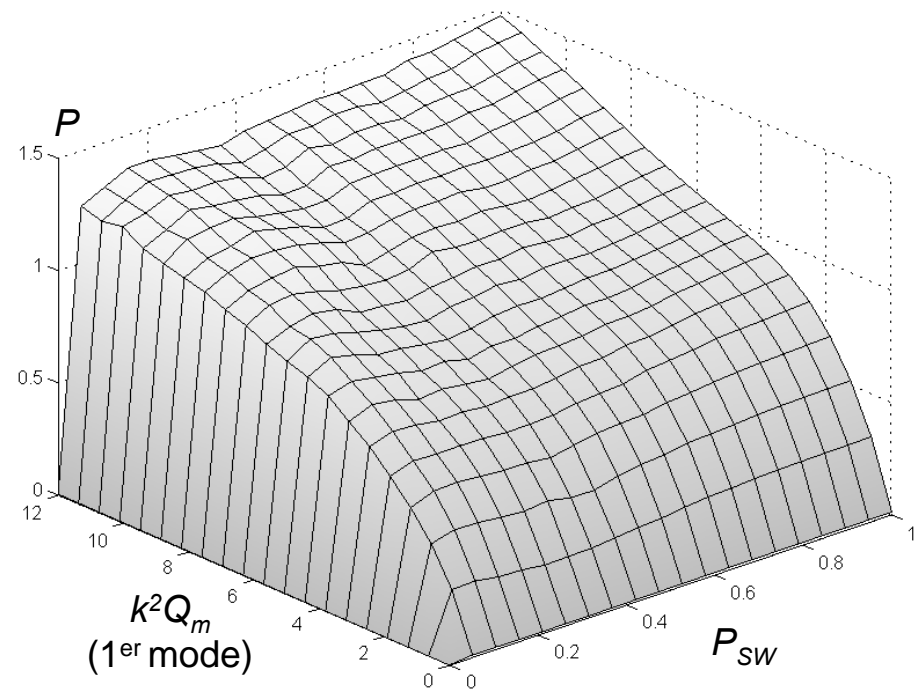


# Récupération d'énergie sur un bruit blanc – Puissance

Puissance en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$  (technique classique)  
de  $P_{SW}$  (technique **SSDSr**)



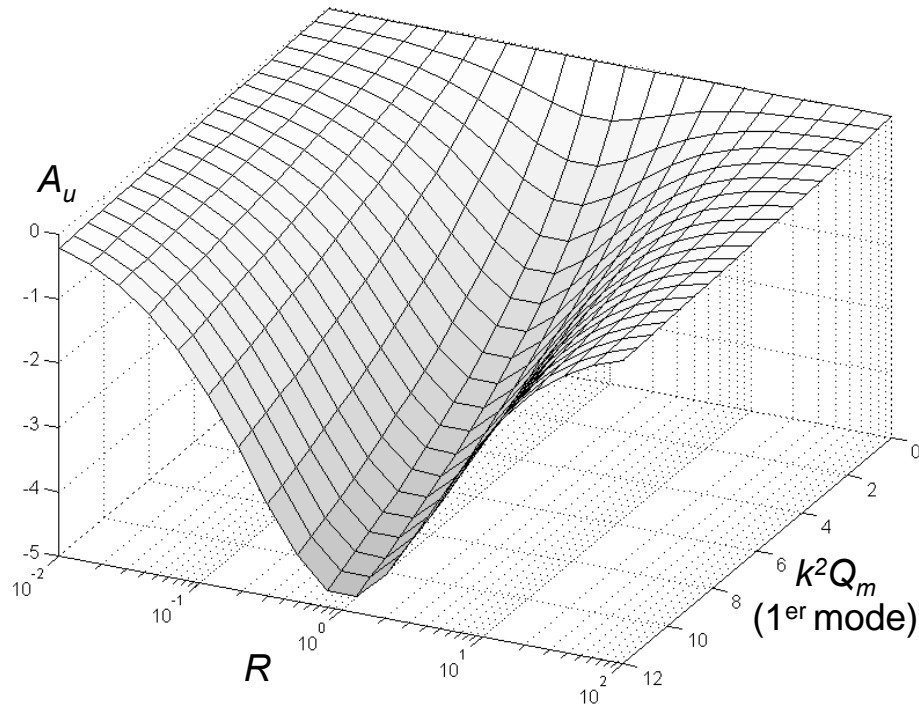
Technique classique



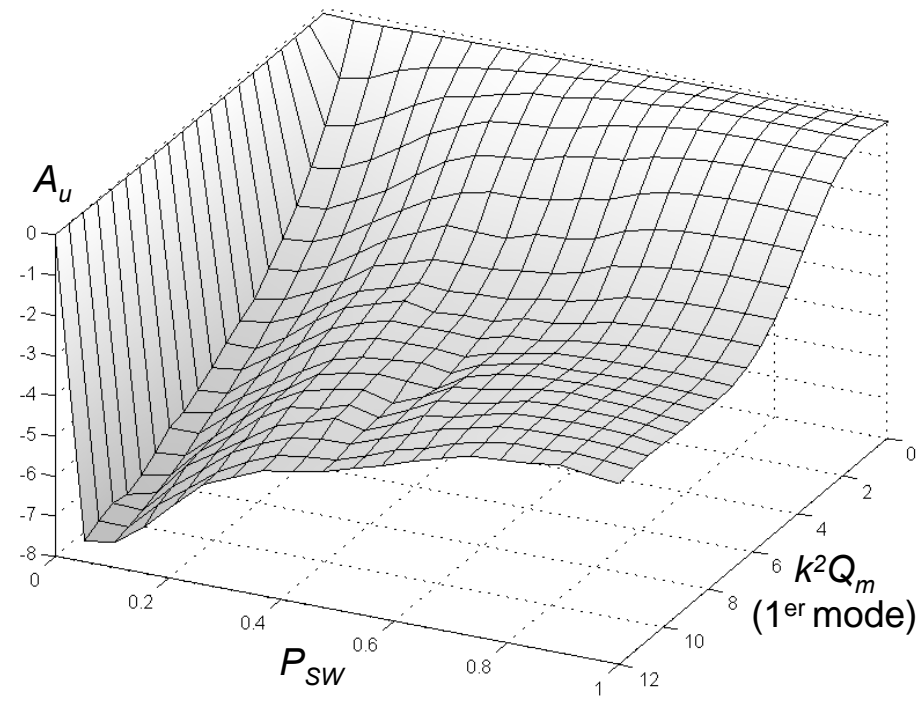
Technique **SSDSr**

# Récupération d'énergie sur un bruit blanc – Amortissement

Amortissement en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$  (technique classique)  
de  $P_{SW}$  (technique **SSDSr**)

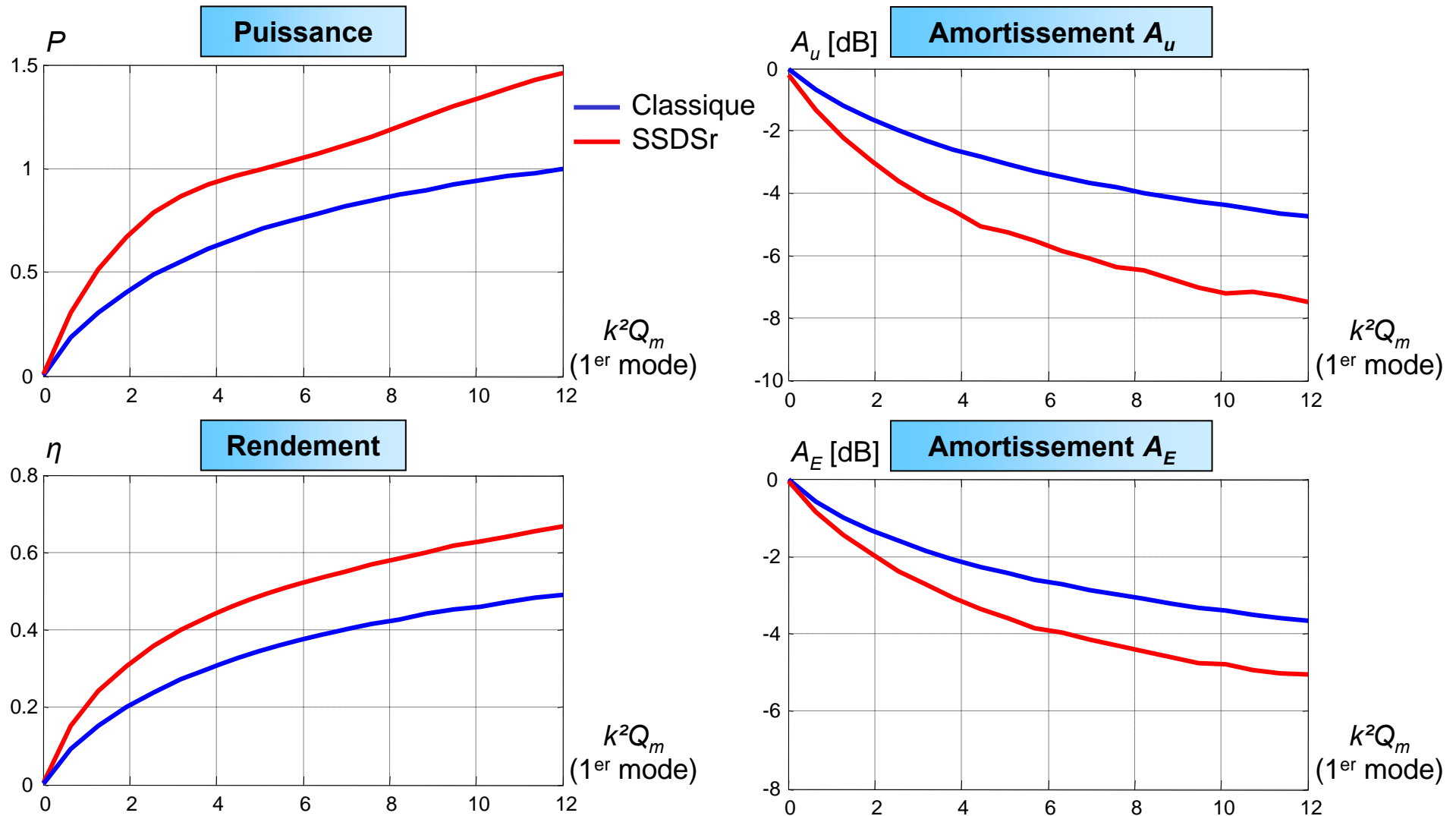


Technique classique



Technique **SSDSr**

# Récupération d'énergie sur un bruit blanc – conclusion



# Conclusion

## ➤ Amortissement vibratoire

### **Les techniques semi passives concurrencent les techniques passives et actives**

- ✓ Elles présentent des performances élevées
- ✓ Elles sont intrinsèquement adaptatives
- ✓ Elles sont simples à implémenter
- ✓ Elles peuvent être autoalimentées et oubliées dans la structure
- ✓ Loi de contrôle probabiliste performante pour les signaux large bande

## ➤ Récupération d'énergie

### **Les techniques de récupération d'énergie proposées permettent d'obtenir des performances près de 10 fois supérieures aux techniques classiques**

- ✓ Elles sont très simples à mettre en œuvre
- ✓ Le gain en puissance est fonction du type de sollicitation
- ✓ De nouvelles applications plus consommatrices sont envisageables

# Apport du travail de thèse

## ➤ Amortissement vibratoire

- ✓ Analyse des flux d'énergie (1 article soumis au JIMSS)
- ✓ Extension aux techniques semi actives (Expé. au Japon + 1 article soumis à JASA)
- ✓ Développement de l'approche probabiliste (1 article soumis au JSV )

## ➤ Récupération d'énergie

- ✓ Développement de plusieurs familles de dispositifs de récupération d'énergie (1 brevet, 1 article dans IEEE UFFC)
- ✓ Étude de la puissance récupérée en fonction du type de sollicitation (2 articles dans le JIMSS)
- ✓ Application de l'approche probabiliste à la récupération d'énergie

Brevet: 1

Journaux: 5 + 5 soumis

Conférences internationales: 8

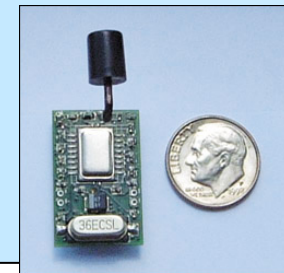
# Perspectives

## ➤ Amortissement vibratoire

- ✓ Autoalimentation de l'approche probabiliste
- ✓ Mise en œuvre sur des applications réelles (cartes électroniques)
- ✓ Extension au contrôle sonore – isolation phonique
- ✓ Comparaison avec les techniques actives
- ✓ Développement de systèmes hybrides (visqueux – semi passif)

## ➤ Récupération d'énergie

- ✓ Réseaux de capteurs sans fil
- ✓ Contrôle de santé (aéronautique)
- ✓ Suppression du câblage (bâtiment)



---

# Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire

---

Adrien Badel

Directeurs de thèse: M.C. Manuel Lagache, LOCIE, Université de Savoie  
Prof. Daniel Guyomar, LGEF, INSA de Lyon

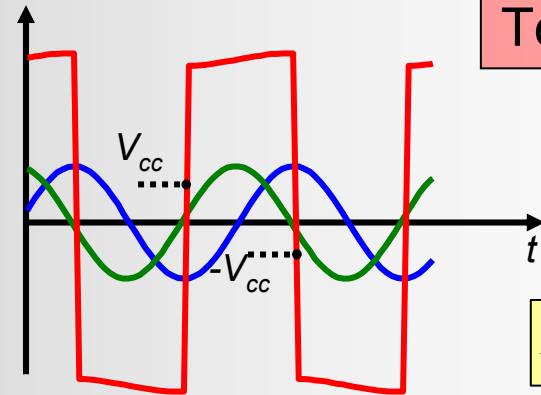
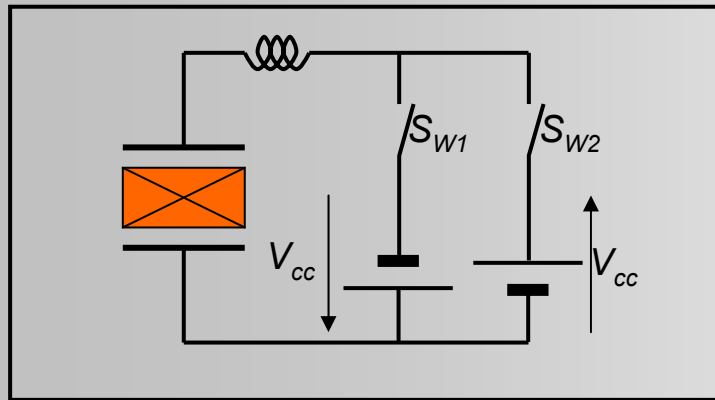


**LOCIE**





# Amélioration des performances SSD: la technique SSDV



Technique semi-active

— Tension  
— Déplacement  
— Vitesse

$$E_S = \alpha \int V u dt$$

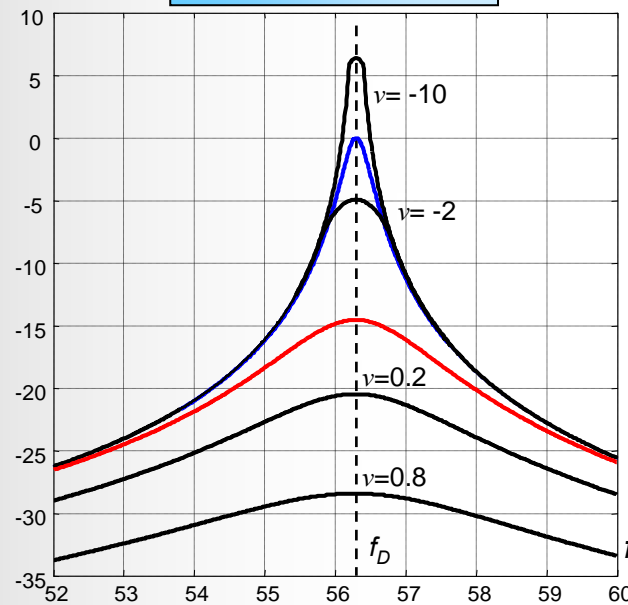
Amortissement à la résonance:

$$A_{SSDV} = \frac{1-\nu}{1+k^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}}$$

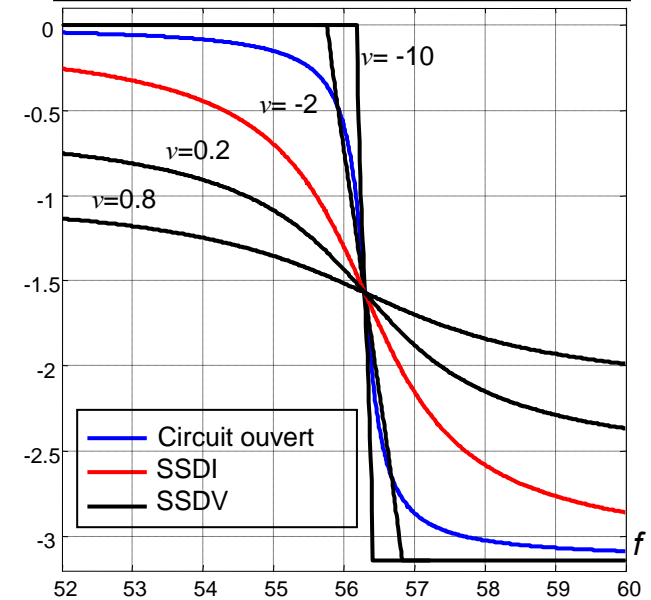
$$\nu = \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha V_{cc}}{F_M}$$

Instabilités pour  $\nu > 1$

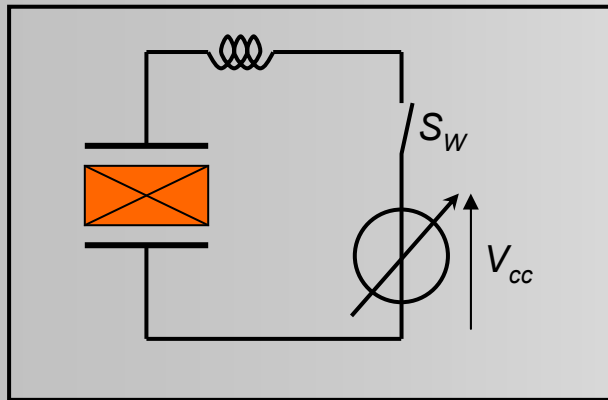
Amortissement [dB]



Phase de la fonction de transfert [rad]



# Amélioration de la technique SSDV



Tension sur un élément piézo déconnecté

$$\begin{cases} V_{cc} = -\beta \frac{\alpha}{C_0} u_M \\ V_{cc} = \beta \frac{\alpha}{C_0} u_M \end{cases}$$

Sur les max. de déplacement

Sur les min. de déplacement

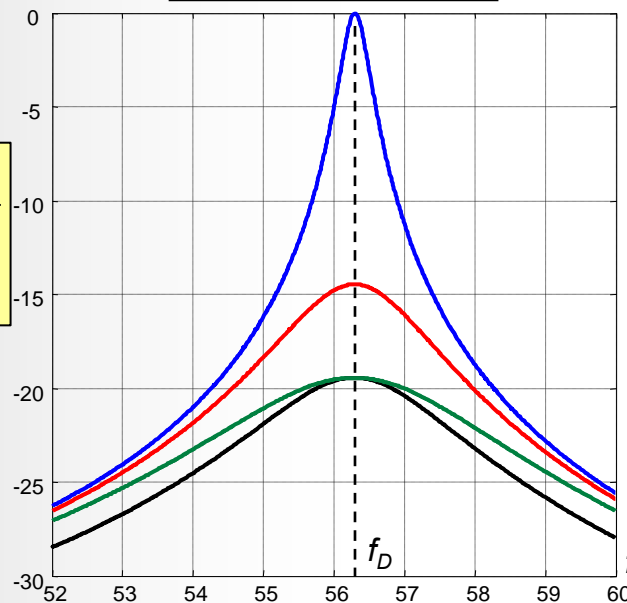
Amortissement à la résonance:

$$A_{SSDV} = \frac{1}{1 + (1 + \beta)k^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma}}$$

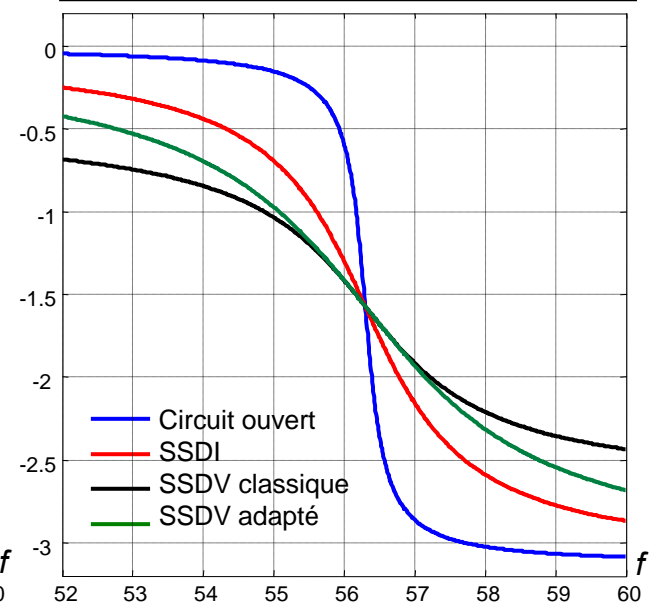
Plus d'instabilité

Légèrement moins efficace hors résonance

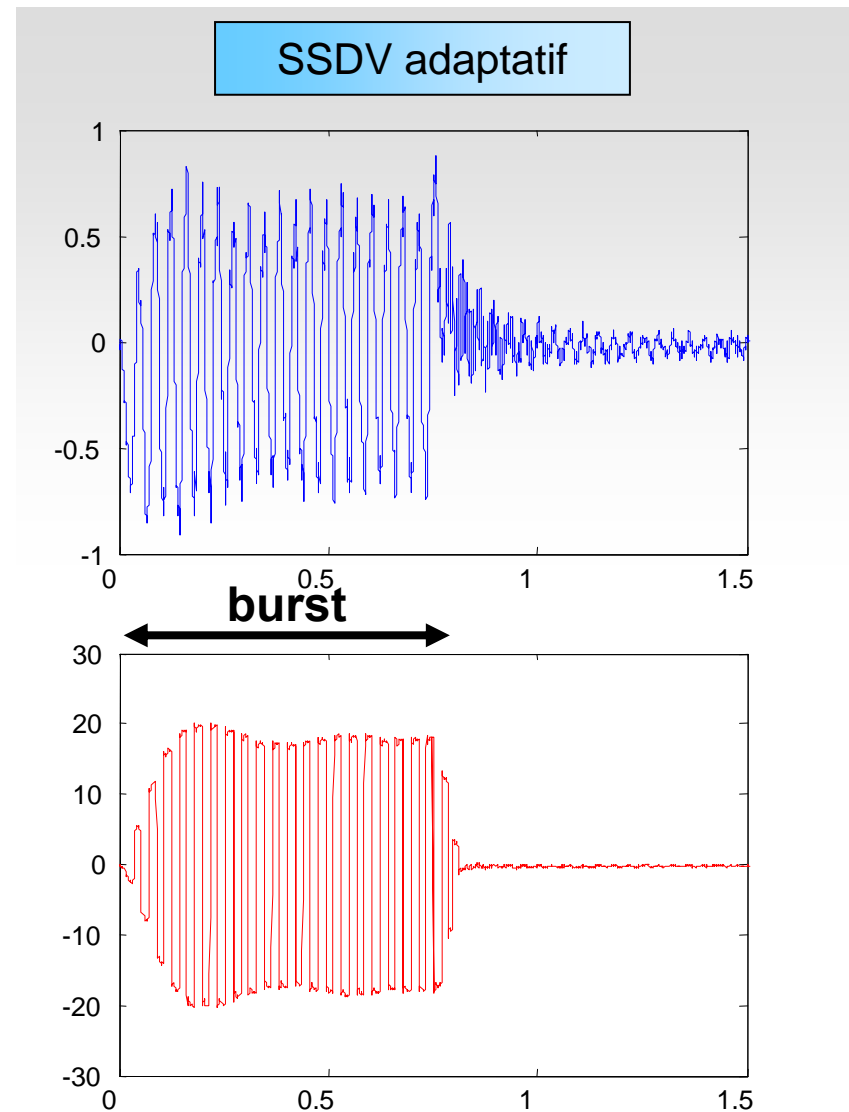
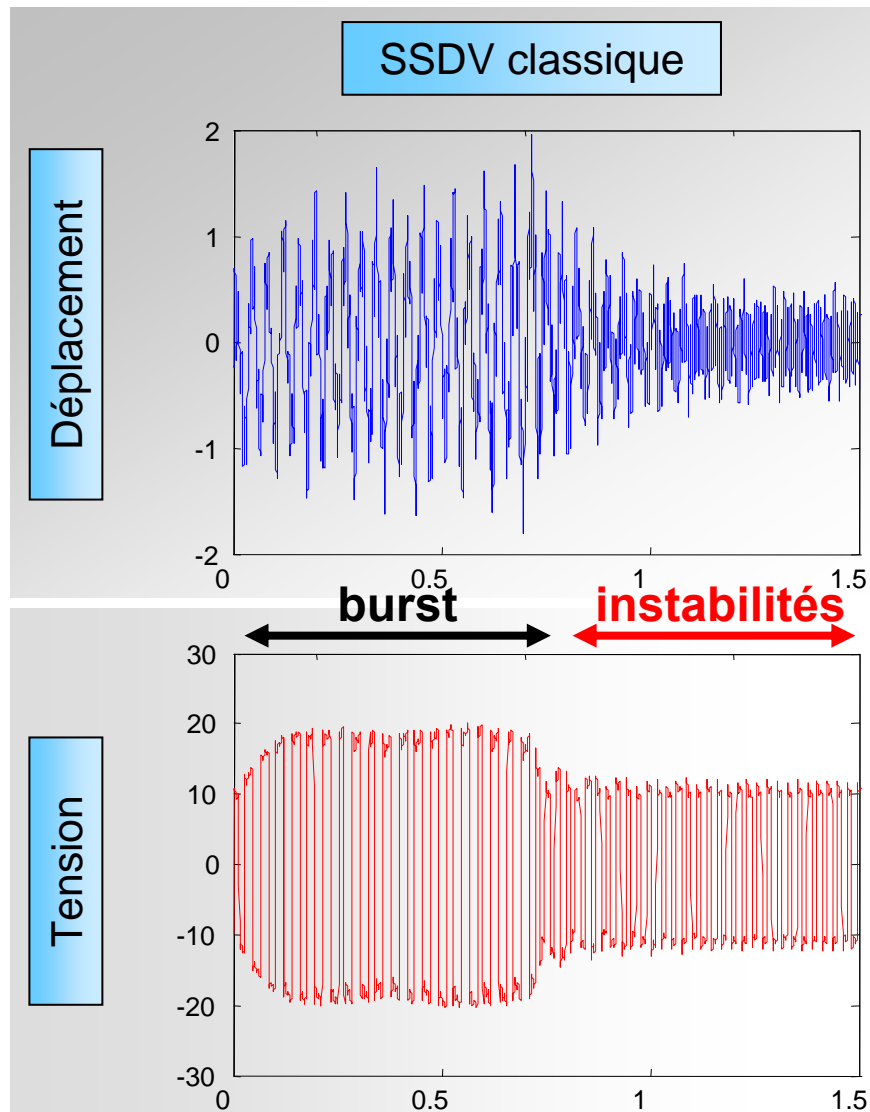
Amortissement [dB]



Phase de la fonction de transfert [rad]

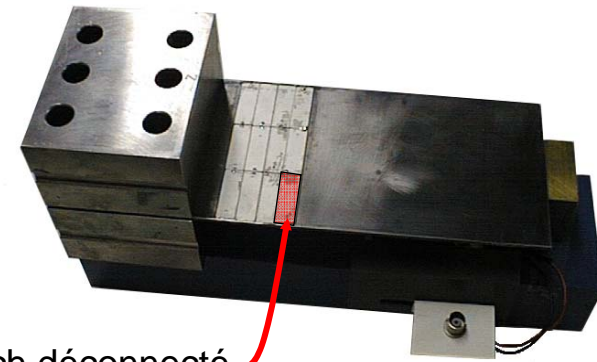


# SSDV et SSDV adaptatif – Stabilité



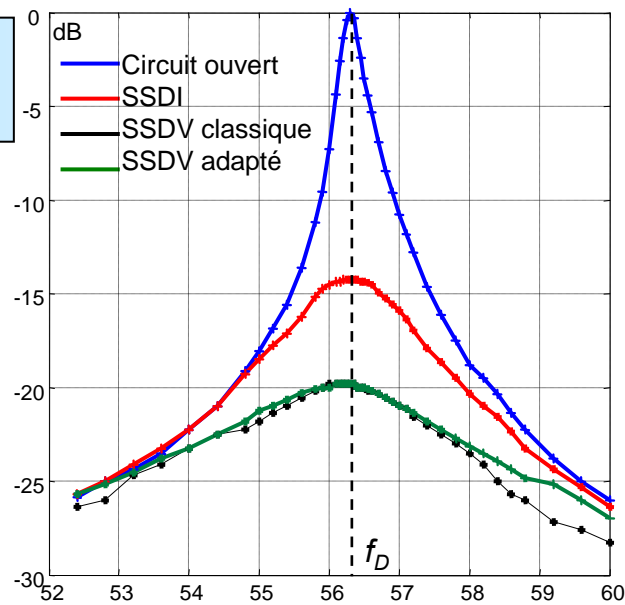
# Validation expérimentale, conclusion

Matériau de la lame	XC65 (acier bleu)
L x l x h	180 x 95 x 2 mm <sup>3</sup>
1 <sup>er</sup> mode de vibration	60 Hz
type de céramique PZT	P189 (QS-France)
taille des inserts PZT	30 x 10 x 0.3 mm <sup>3</sup>
nombre d'inserts PZT	24
surface des inserts PZT	7200 mm <sup>2</sup>
montage des inserts PZT	collés sur la poutre

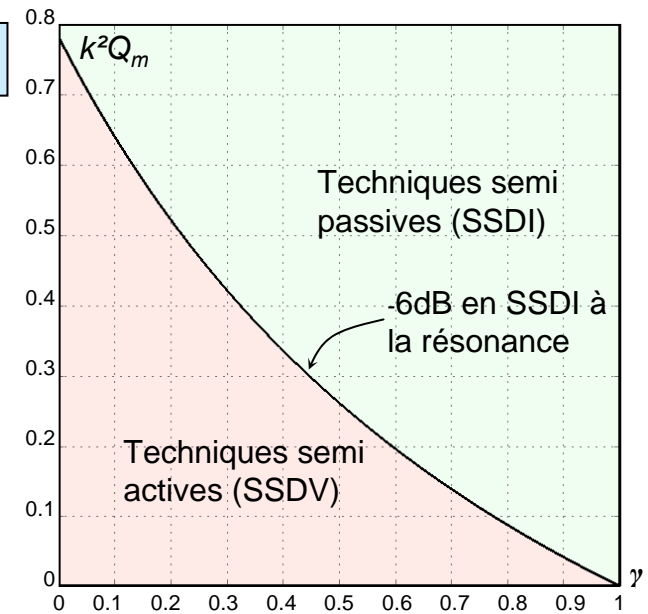


Patch déconnecté  
Tension  $V_S$  image du déplacement

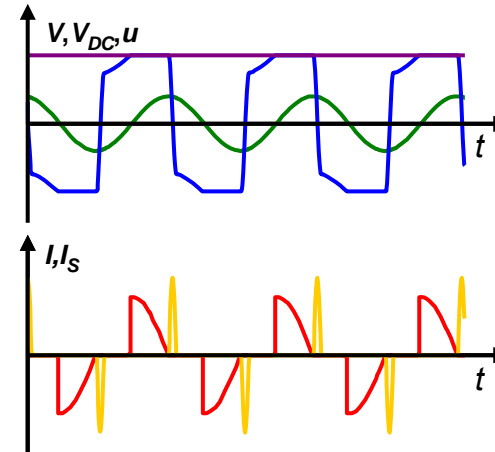
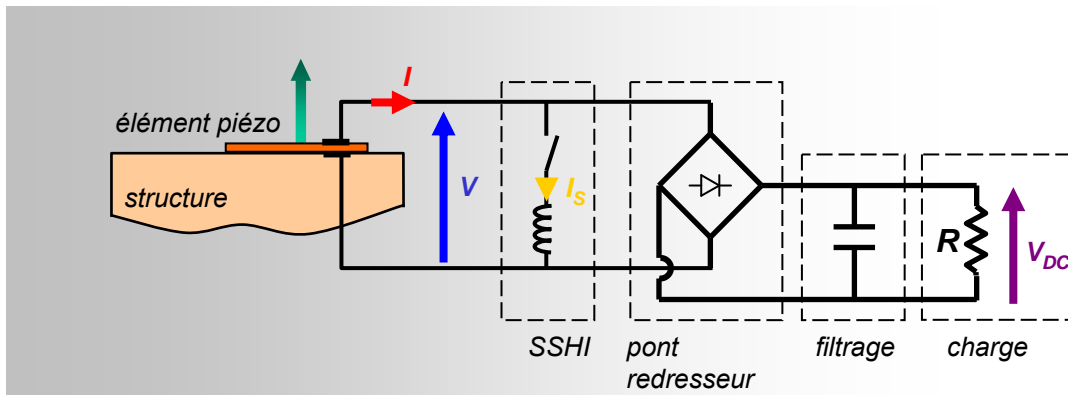
## Validation expérimentale



## Conclusion



# Vibration d'amplitude donnée – technique SSHI



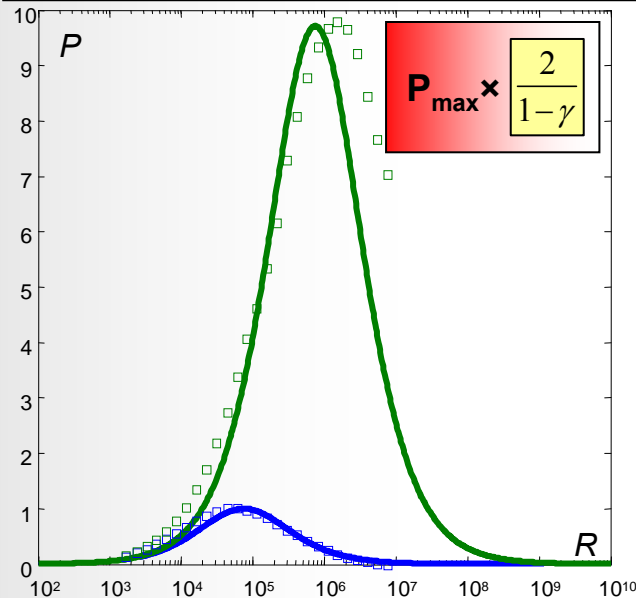
Résistance optimale:

$$R_{opt} = \frac{\pi}{C_0(1-\gamma)\omega}$$

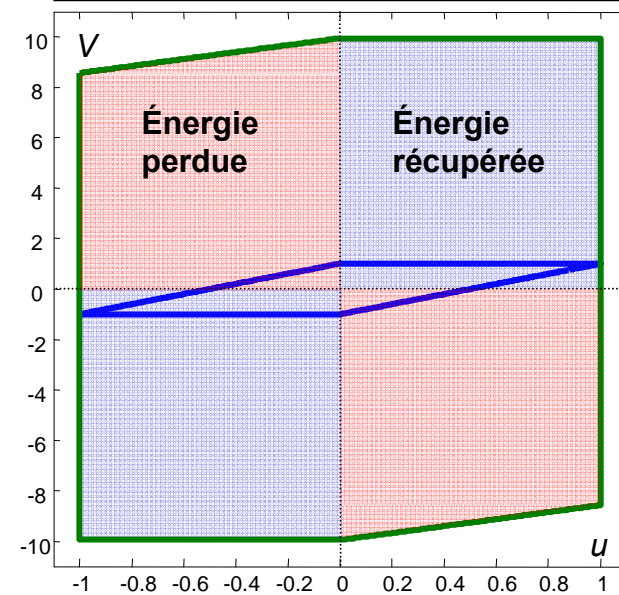
Puissance maximale:

$$P_{max} = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{2E_e}{\pi(1-\gamma)} \omega$$

Puissance récupérée en fonction de R

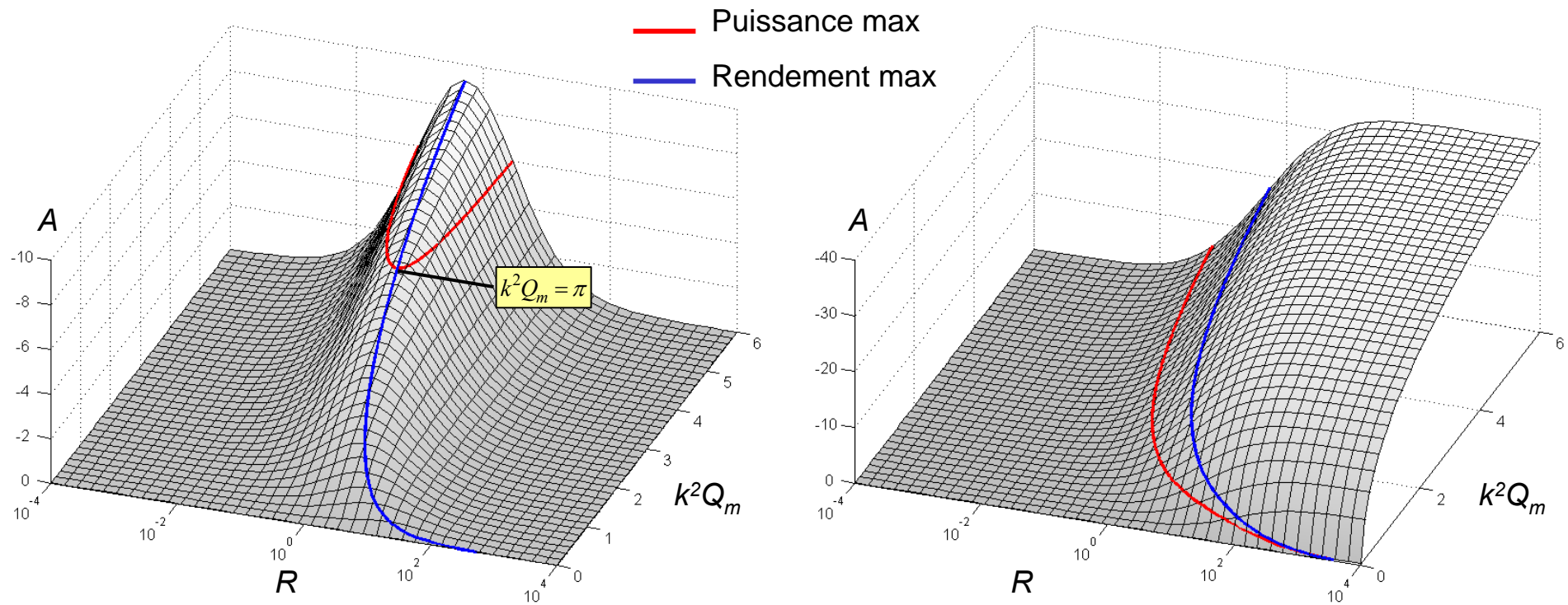


Cycle énergétique pour  $R=R_{opt}$



# Prise en compte de l'amortissement – Amortissement

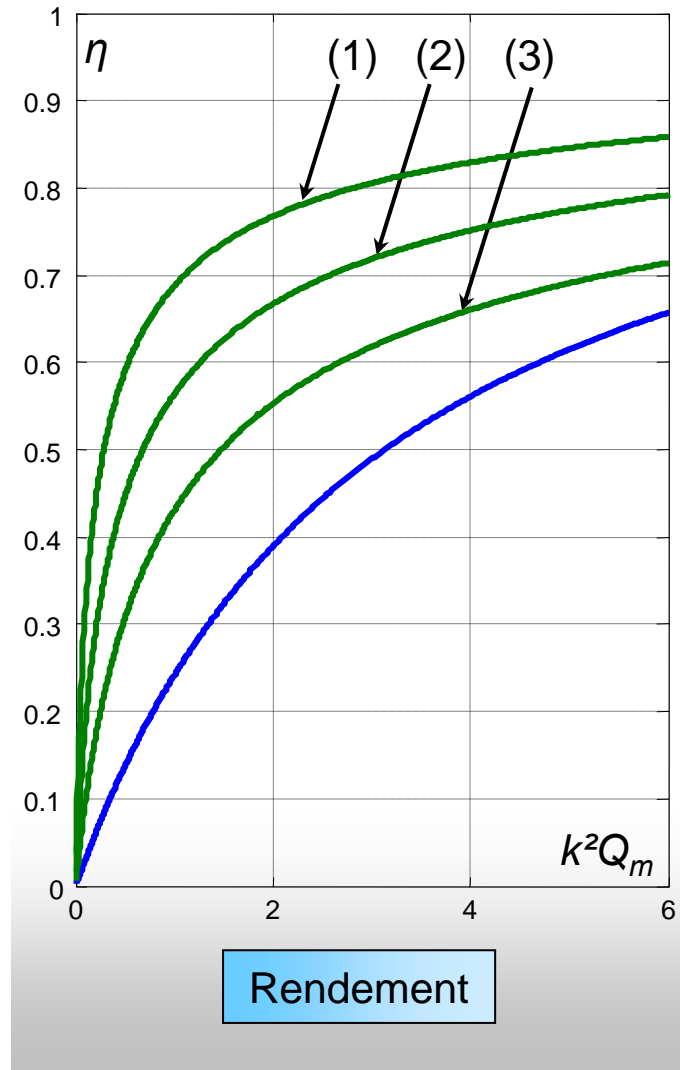
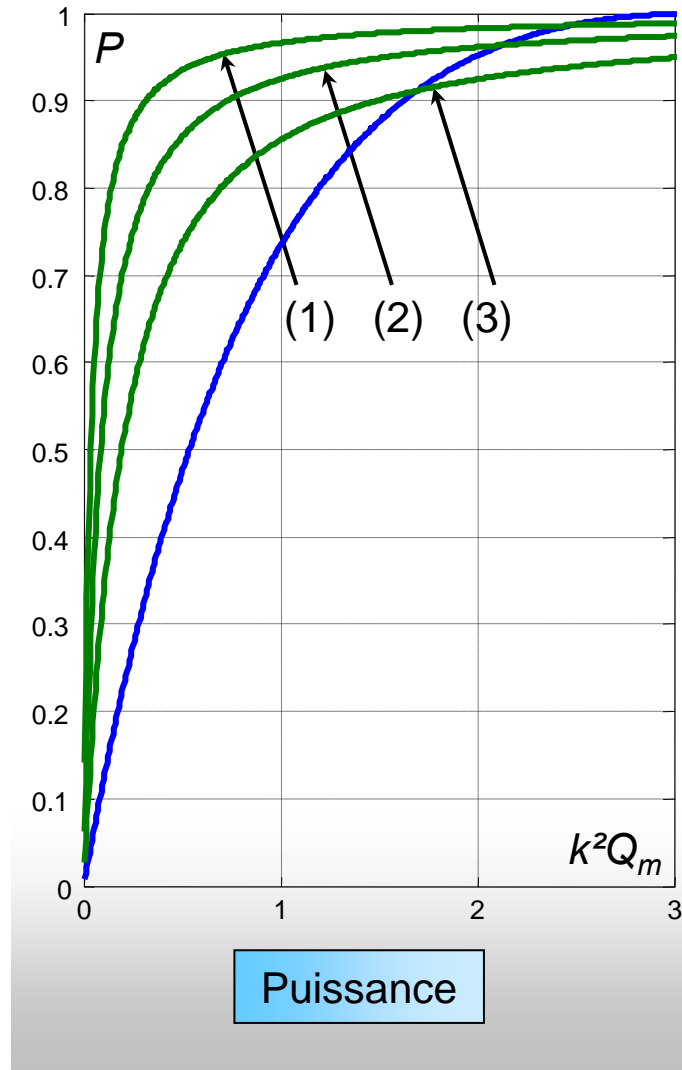
Amortissement en fonction de  $k^2 Q_m$  et de la charge  $R$



Technique classique

Technique SSHI

# Influence du coefficient d'inversion



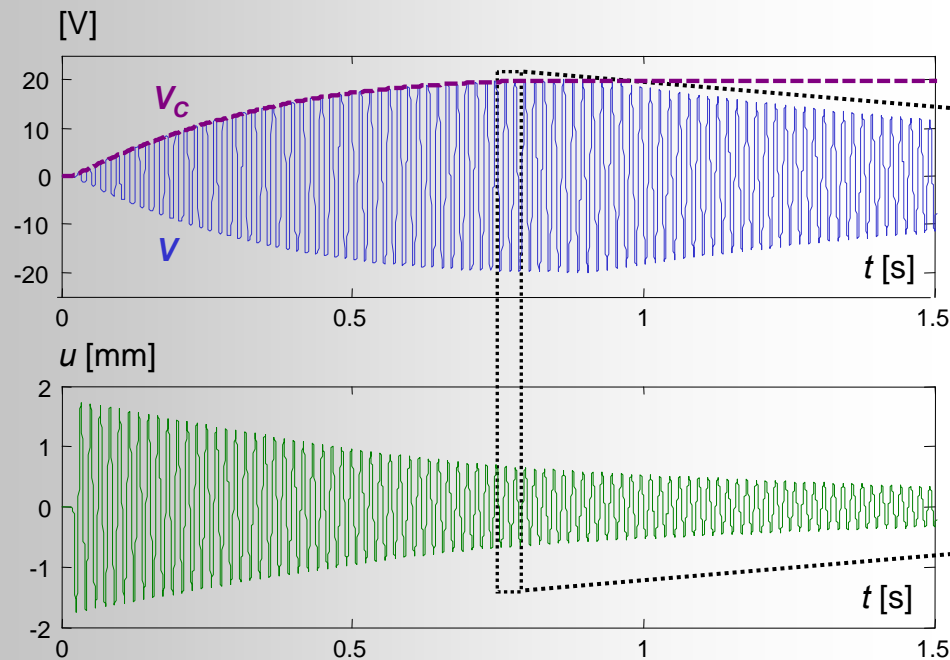
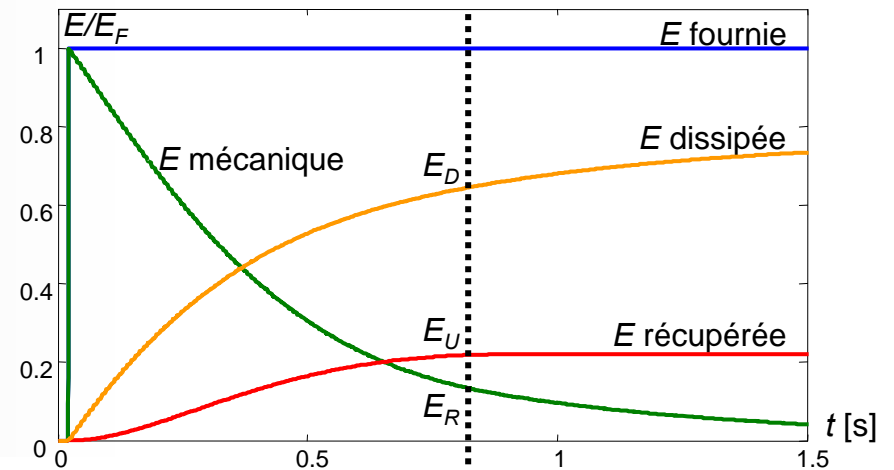
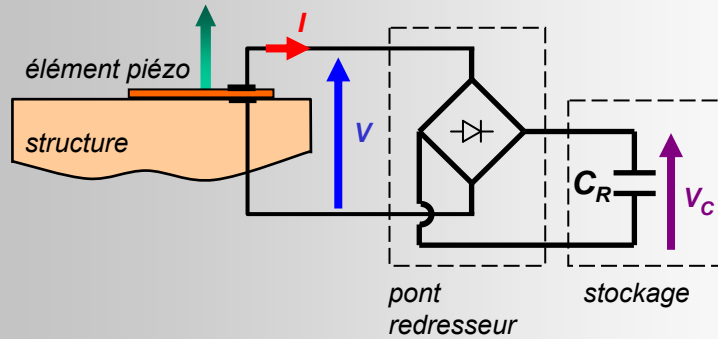
- (1)  $\gamma=0.9$
- (2)  $\gamma=0.75$
- (3)  $\gamma=0.5$

Technique SSHI  
Technique classique

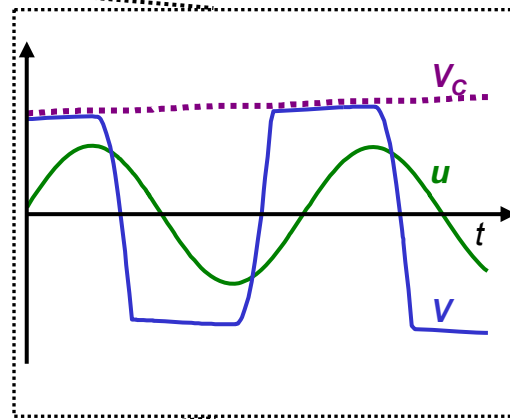


Importance de l'inversion électrique caractérisée par  $\gamma$

# Régime pulsé – approche standard

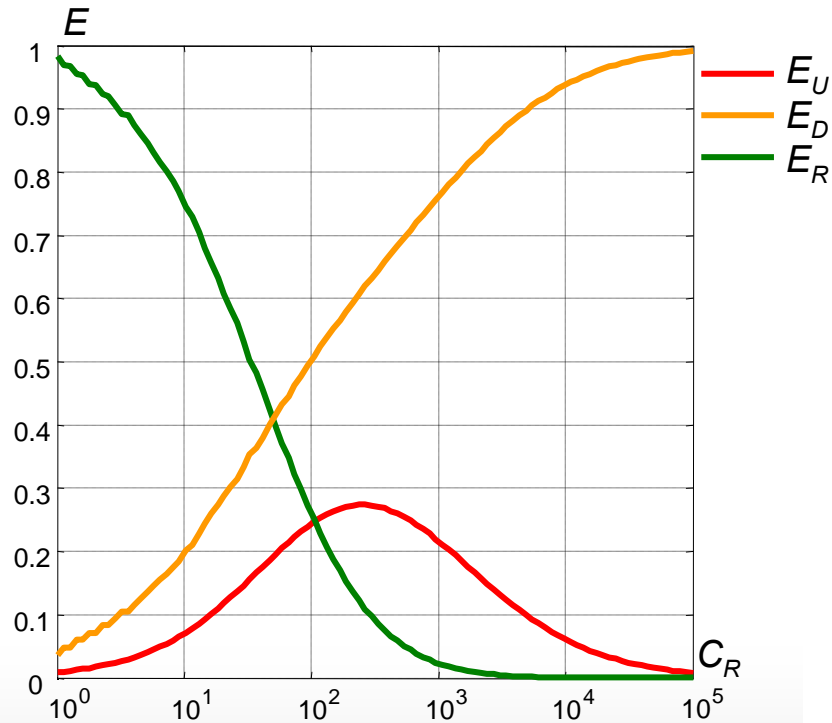


Fin du processus de récupération d'énergie

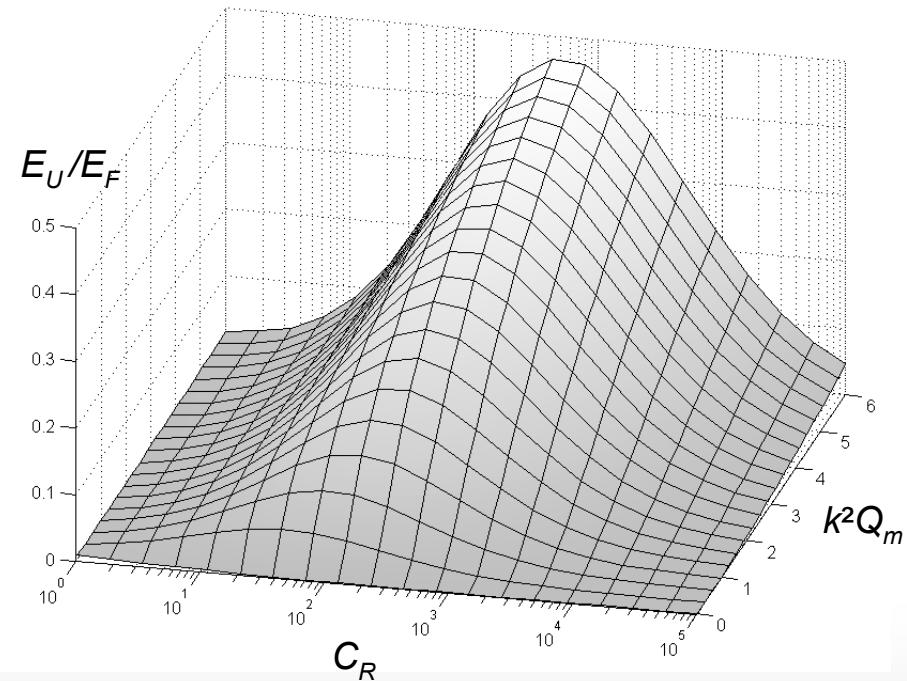




# Régime pulsé – approche standard – influence de $C_R$

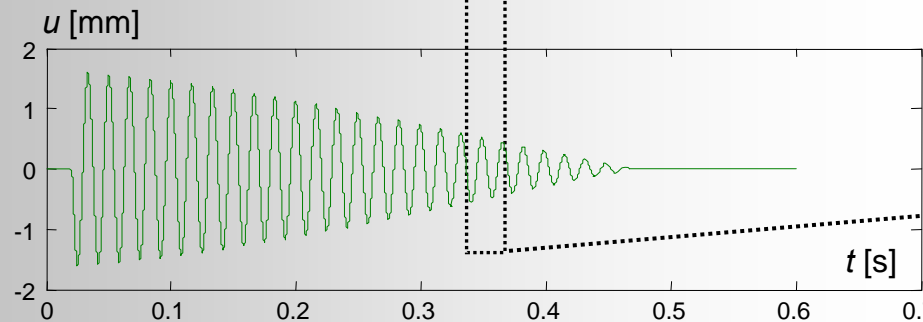
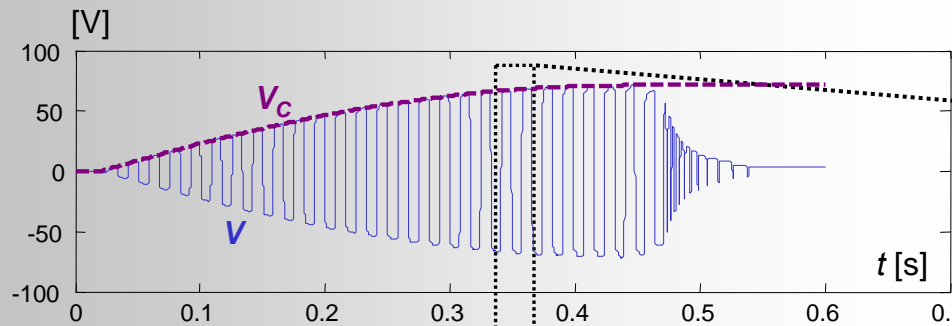
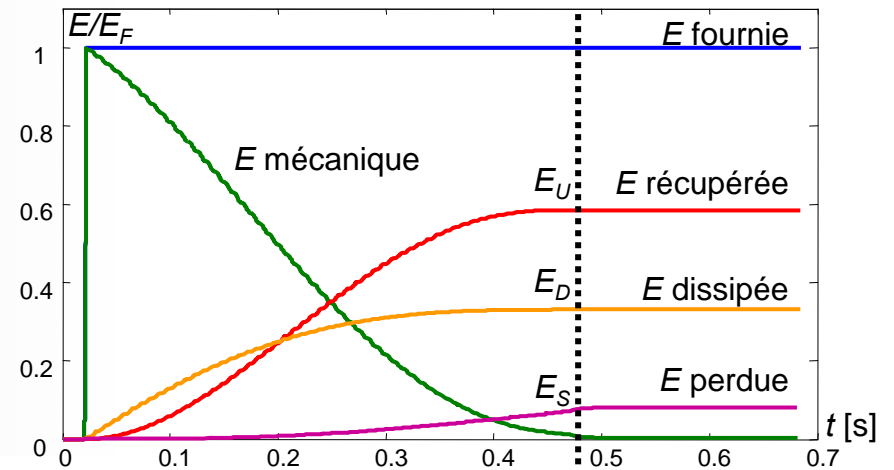
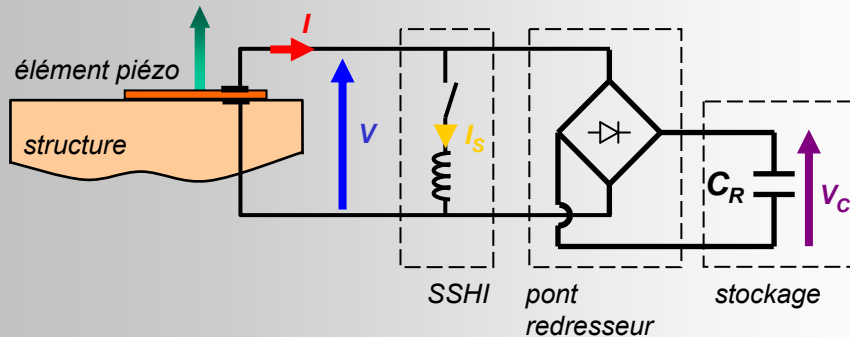


Répartition des énergies en fonction de  $C_R$  pour  $k^2 Q_m = 2.3$

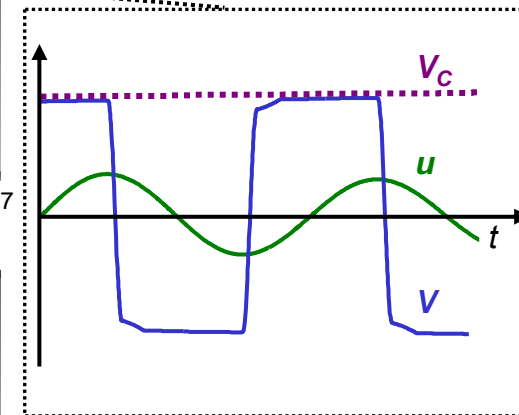


Énergie récupérée en fonction de  $k^2 Q_m$  et de  $C_R$

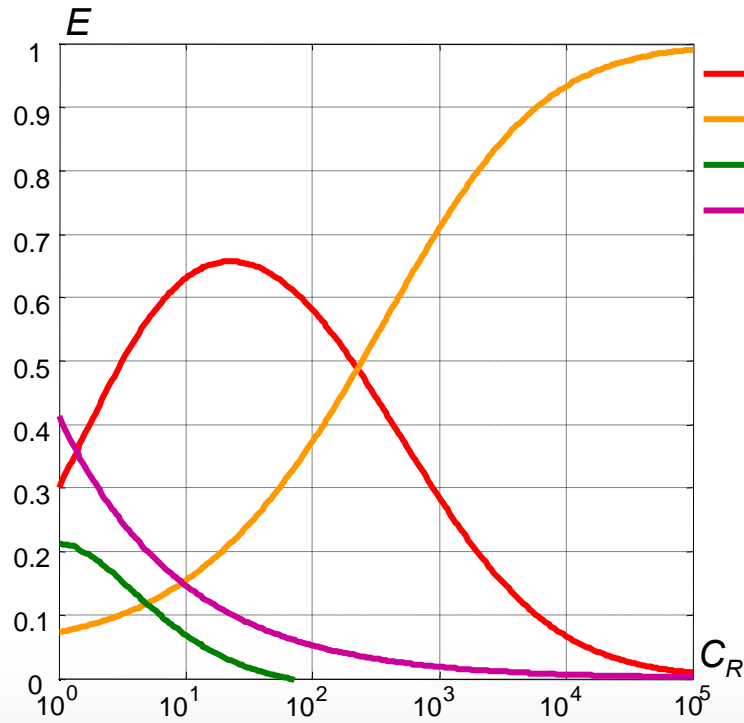
# Régime pulsé – approche non linéaire



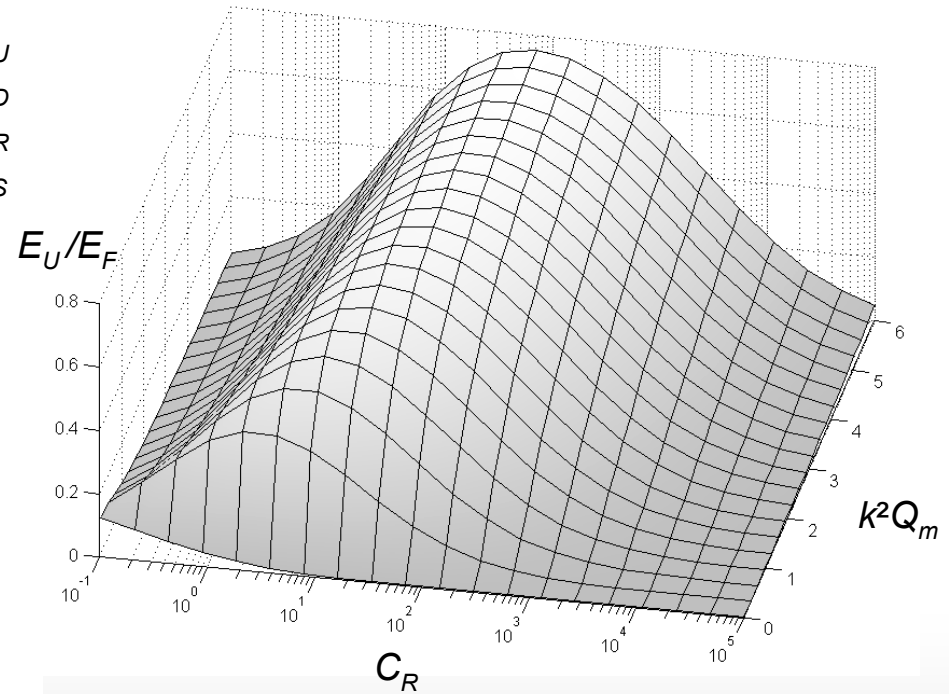
Fin du processus de récupération d'énergie



# Régime pulsé – approche non linéaire – influence de $C_R$

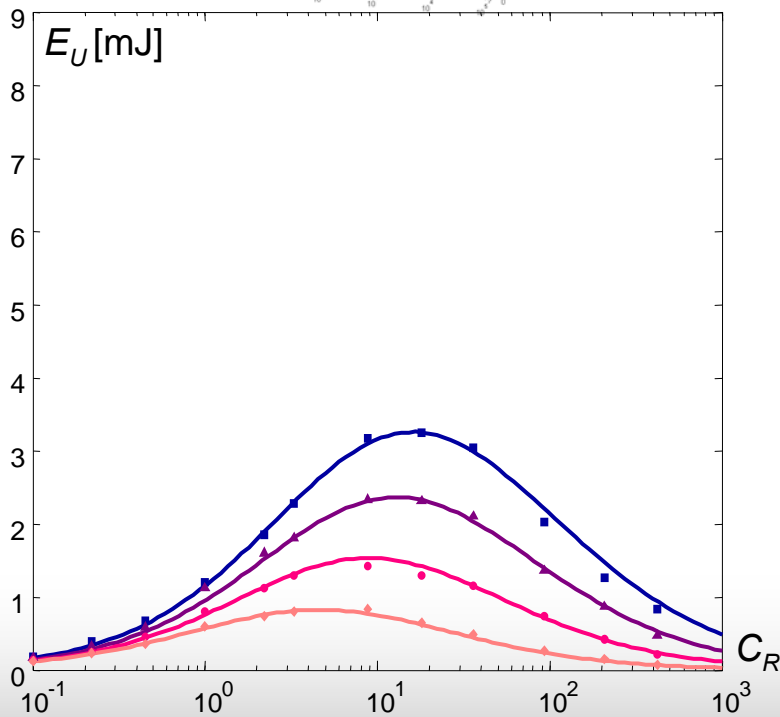
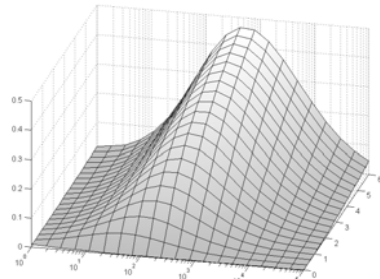


Répartition des énergies en fonction de  $C_R$  pour  $k^2 Q_m = 2.3$

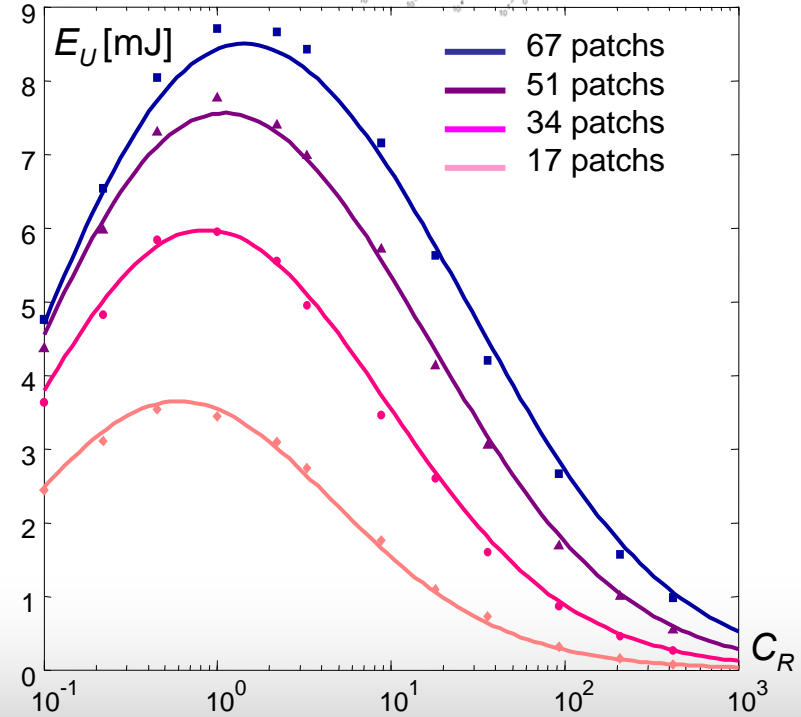
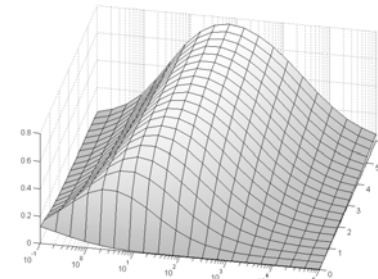


Énergie récupérée en fonction de  $k^2 Q_m$  et de  $C_R$

# Régime pulsé – validation expérimentale

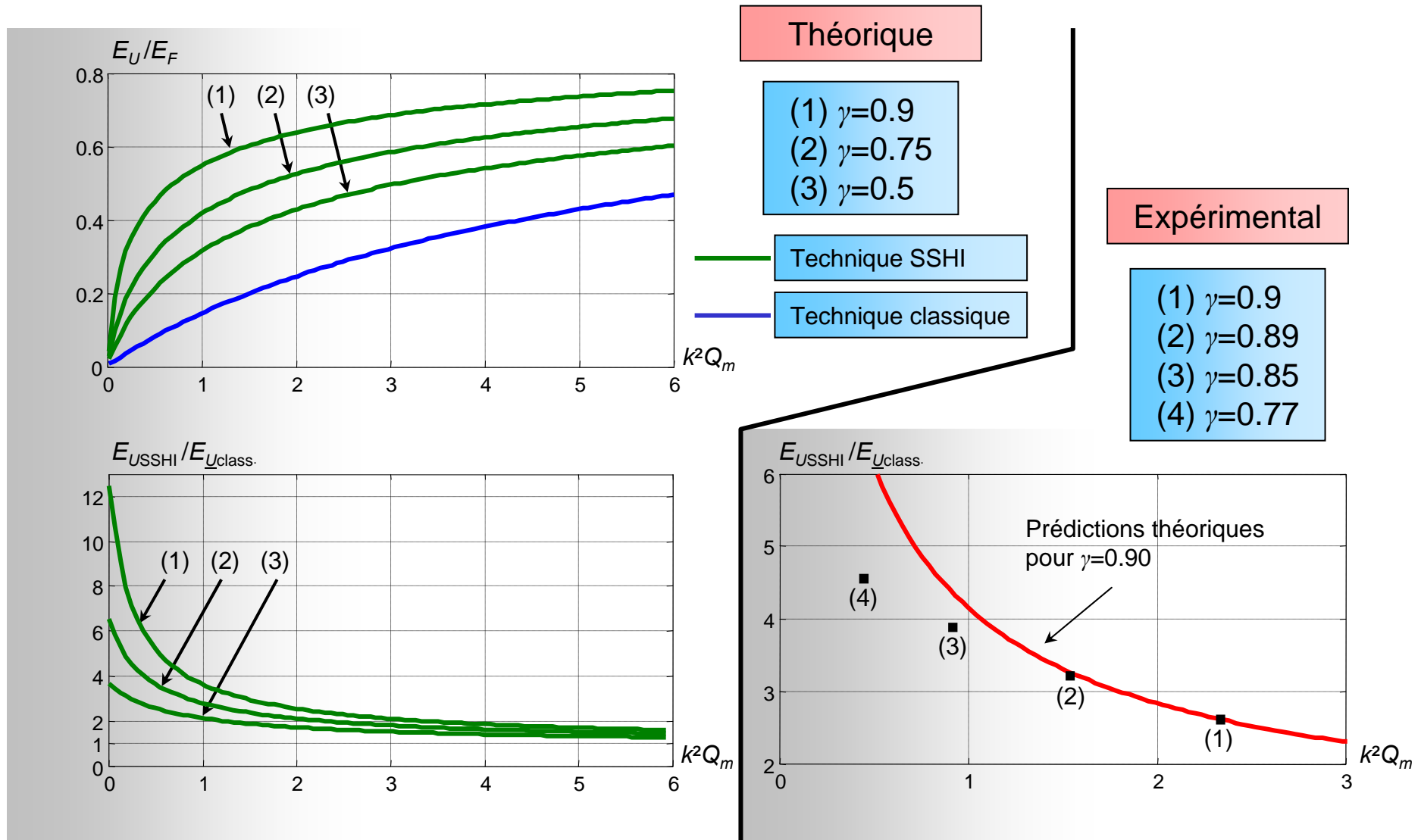


Technique classique



Technique SSHI

# Régime pulsé – influence du coefficient d'inversion



# Réalisation d'un prototype

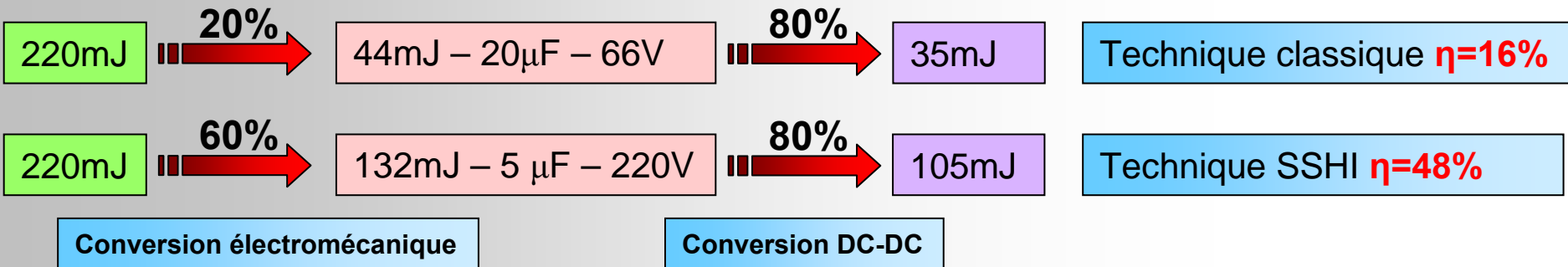
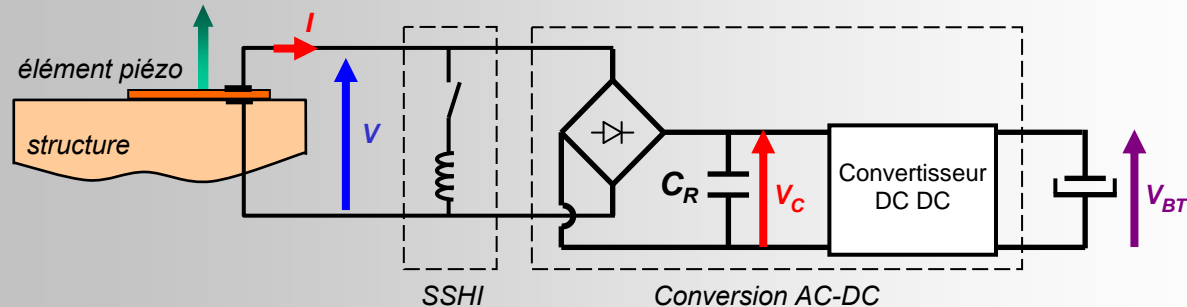
Dans le cadre d'un contrat avec un industriel

Cahier des charges

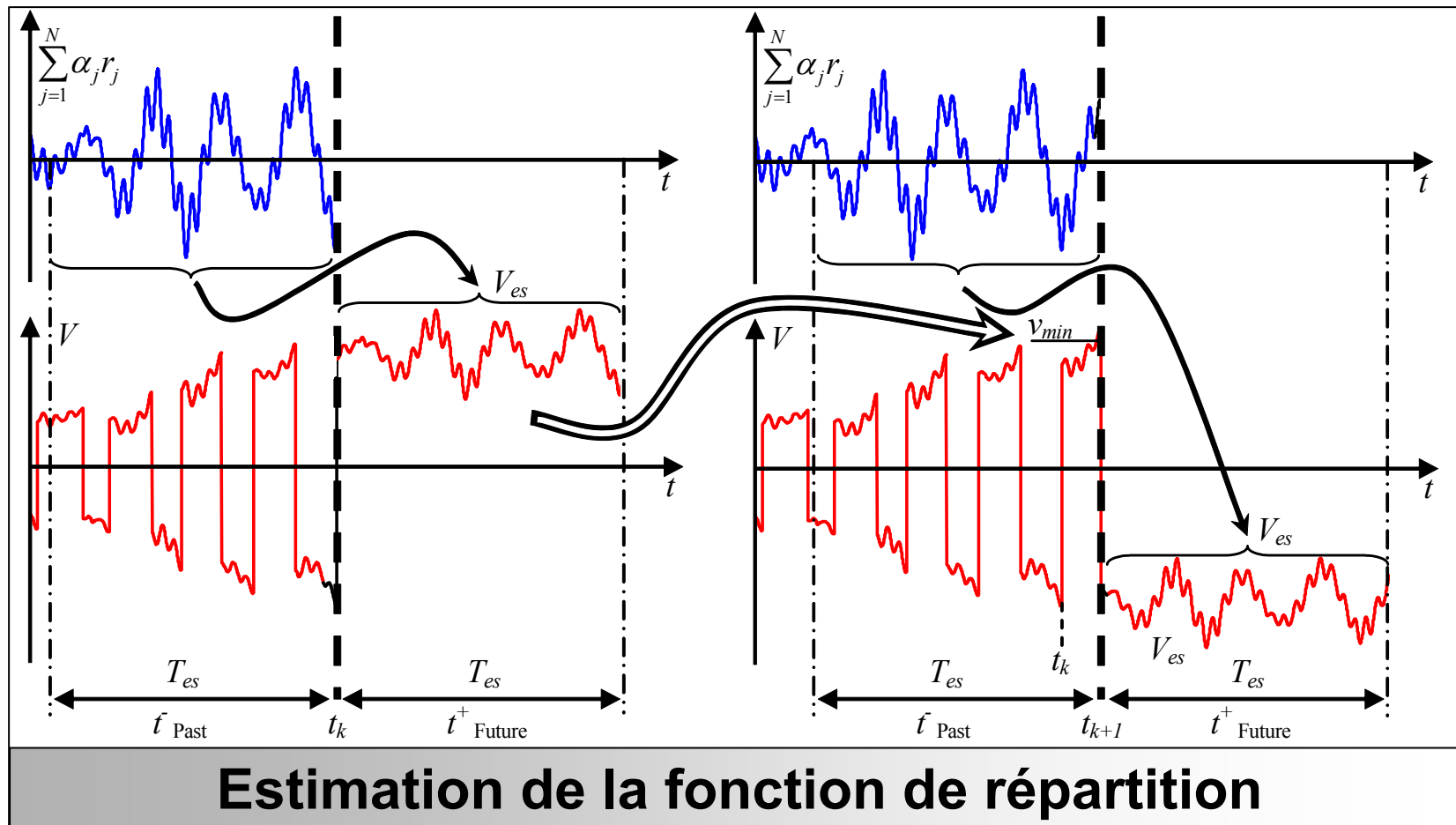
Régime impulsionnel

Stoker 100mJ sous 3V (condensateur de 20000  $\mu\text{F}$ )

Dispositif utilisé



# Loi de contrôle probabiliste (LCP)



$$\text{for } t \in ]t_k, t_{k+1}] \quad V(t) = -\gamma V_k + \frac{1}{C_0} \sum_{j=1}^N \alpha_j (r_j(t) - r_{jk})$$

# Loi de contrôle par sélection de modes (LCSM)

Loi de contrôle proposée par Corr et Clark

Puissance transférée

$$P_T = \sum_{j=1}^n \alpha_j \dot{r}_j V$$

$M$  est l'ensemble des modes que l'on désire contrôler

Objectif, contrôler la tension de façon à ce que la puissance transférée sur les modes sélectionnés soit toujours positive

$$P_{TM} = \sum_{j \in M} \alpha_j \dot{r}_j V > 0$$



Inversion à chaque fois que

$$\sum_{j \in M} \alpha_j r_j$$

atteint un extremum

Mise en oeuvre

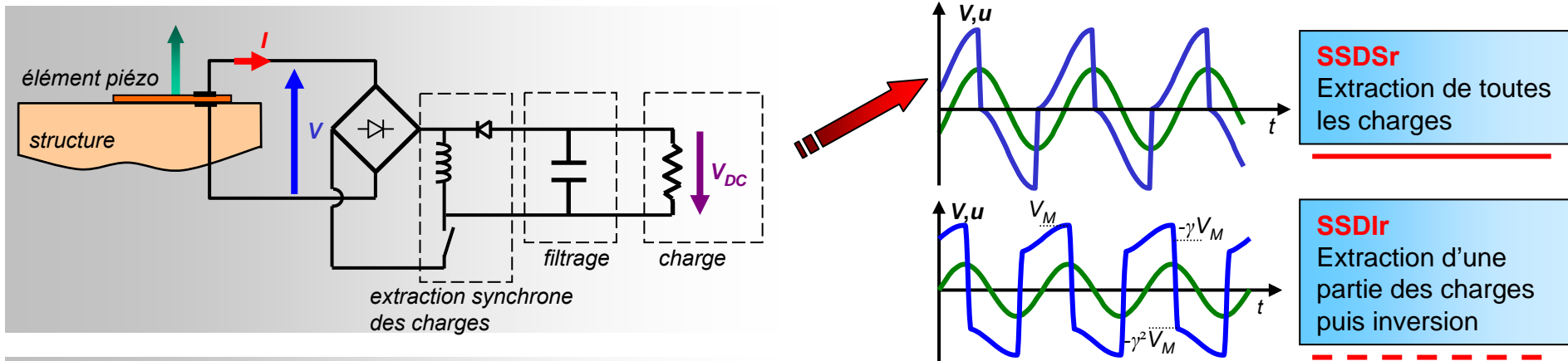
Tension un élément piézoélectrique déconnecté

$$V_S = \frac{1}{C_0} \sum_{j=1}^n \alpha_j r_j$$

Nécessité de connaître les modes et d'utiliser des filtres



# Les techniques de récupération d'énergie large bande



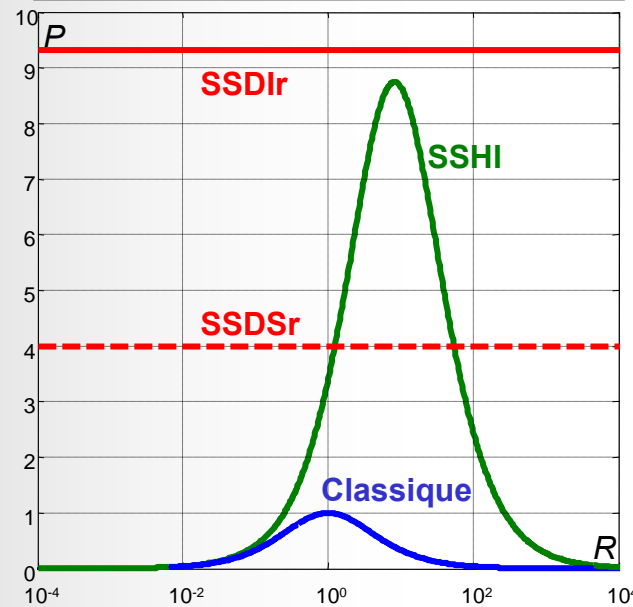
Puissance max. **SSDSr**

$$P_{\max} = \frac{4k^2}{1-k^2} \frac{E_e}{\pi} \omega$$

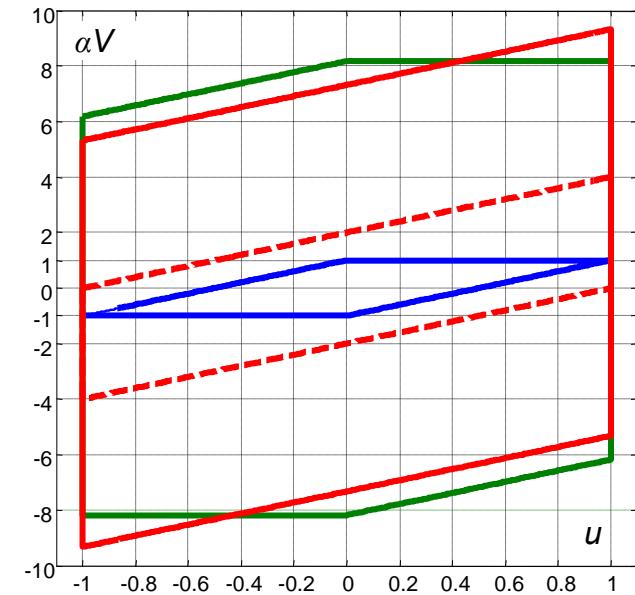
Puissance max. **SSDIr**

$$P_{\max} = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{4E_e}{\pi(1-\gamma^2)} \omega$$

Puissance récupérée en fonction de  $R$

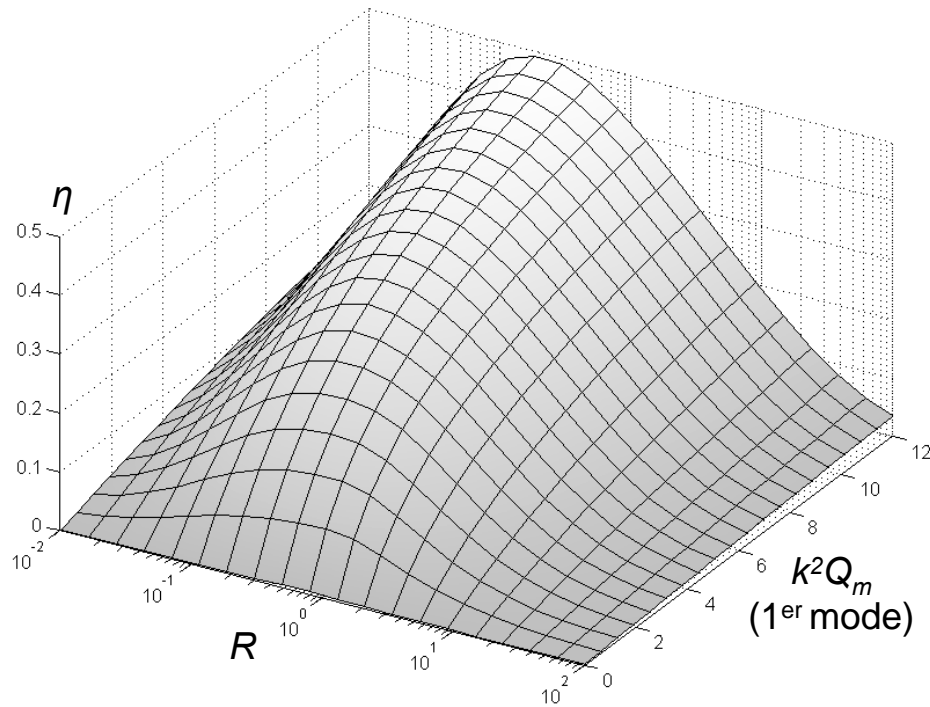


Cycles énergétiques

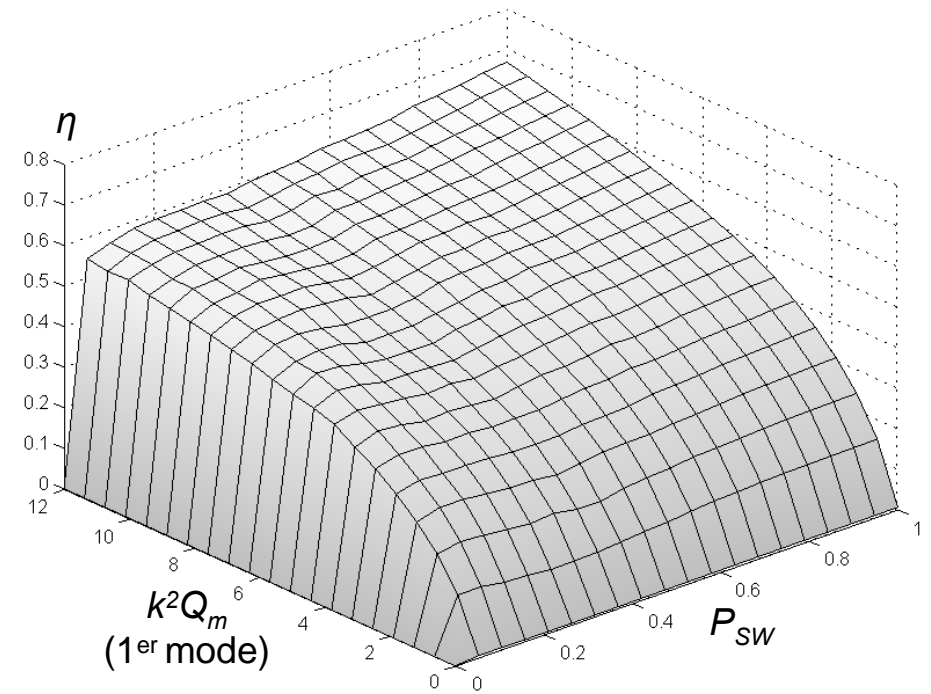


# Récupération d'énergie sur un bruit blanc – Rendement

Rendement en fonction de  $k^2Q_m$  et de la charge  $R$  (technique classique)  
de  $P_{SW}$  (technique **SSDSr**)

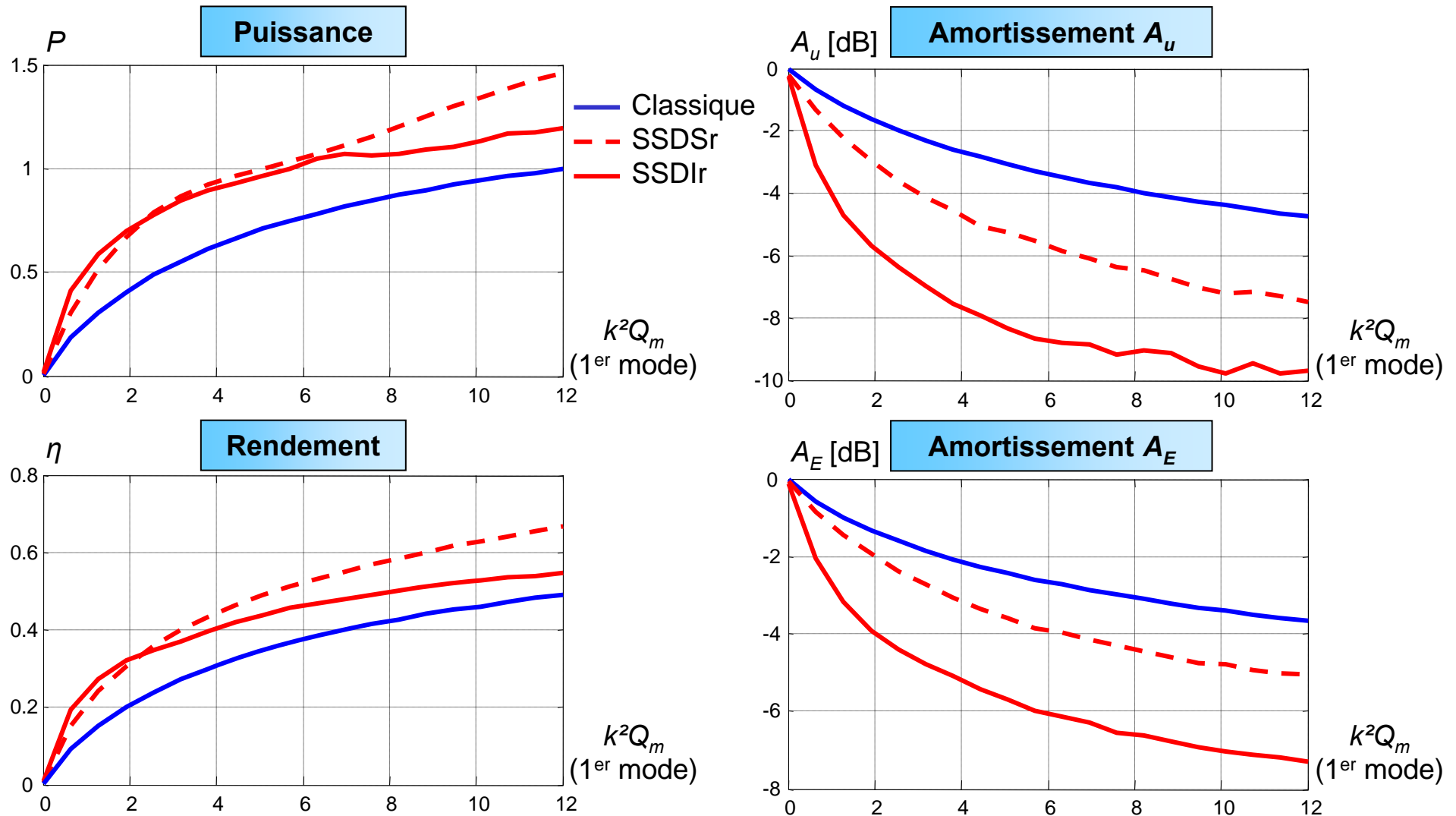


Technique classique



Technique **SSDSr**

# Récupération d'énergie sur un bruit blanc – conclusion

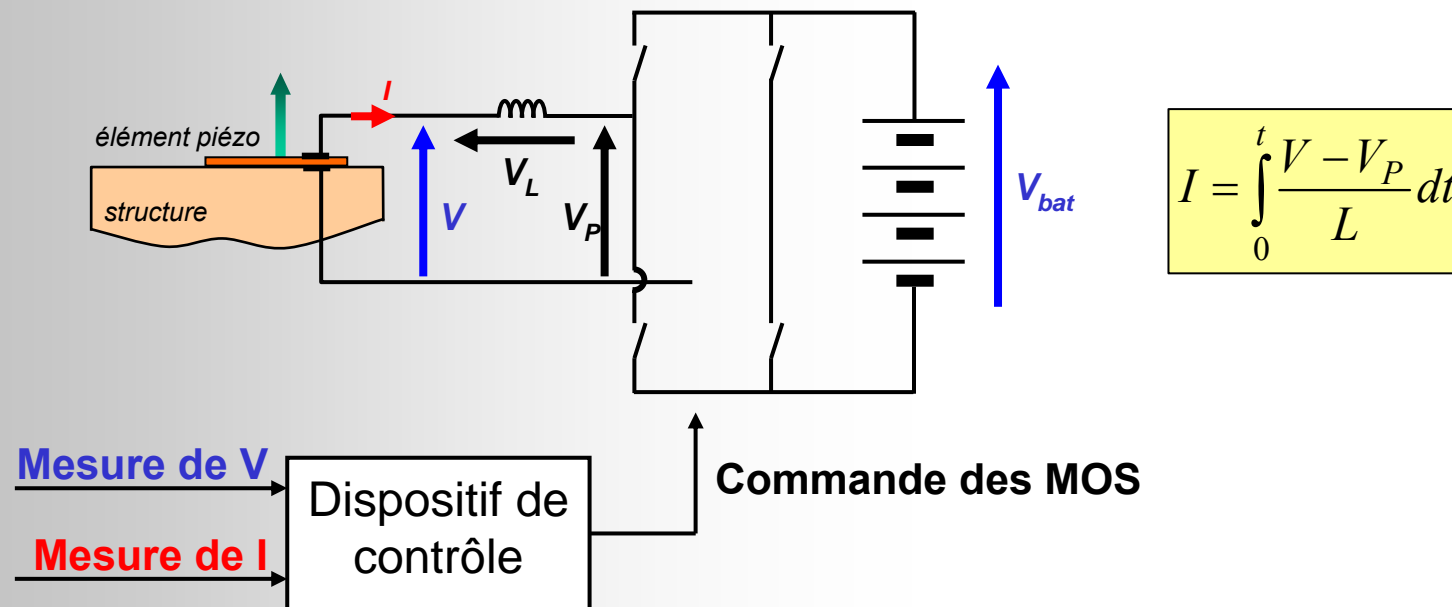


# Adaptation d'impédance multimodale

$$V(t) = \sum_{j=1}^n V_j \sin(\omega_j t + \varphi_j)$$

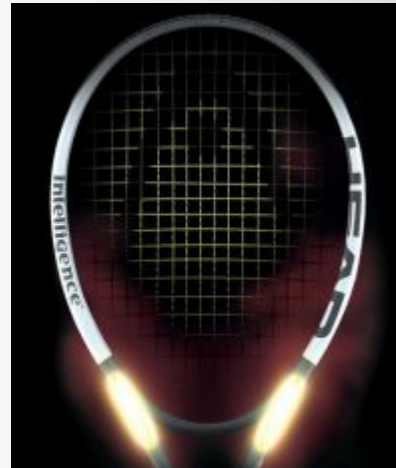
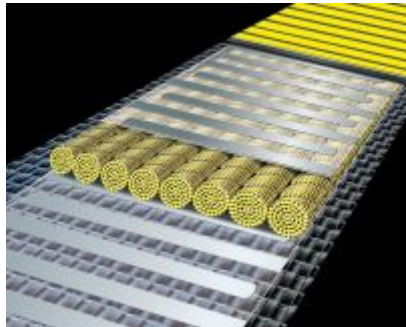
$$I(t) = \sum_{j=1}^n V_j C_0 \omega_j \sin(\omega_j t + \varphi_j)$$

$$R_j = \frac{1}{C_0 \omega_j}$$

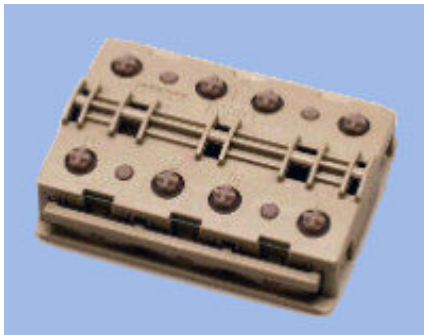


# Quelques applications

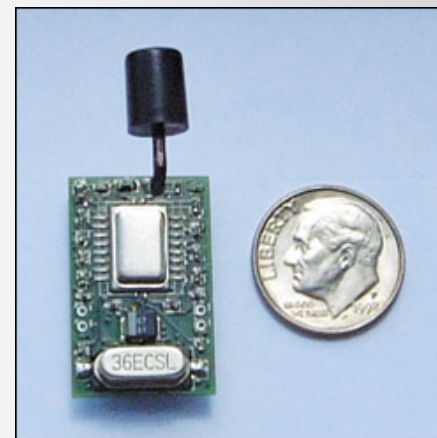
## ➤ Amortissement vibratoire



Raquette et ski Head®



Interrupteur sans fil EnOcean®



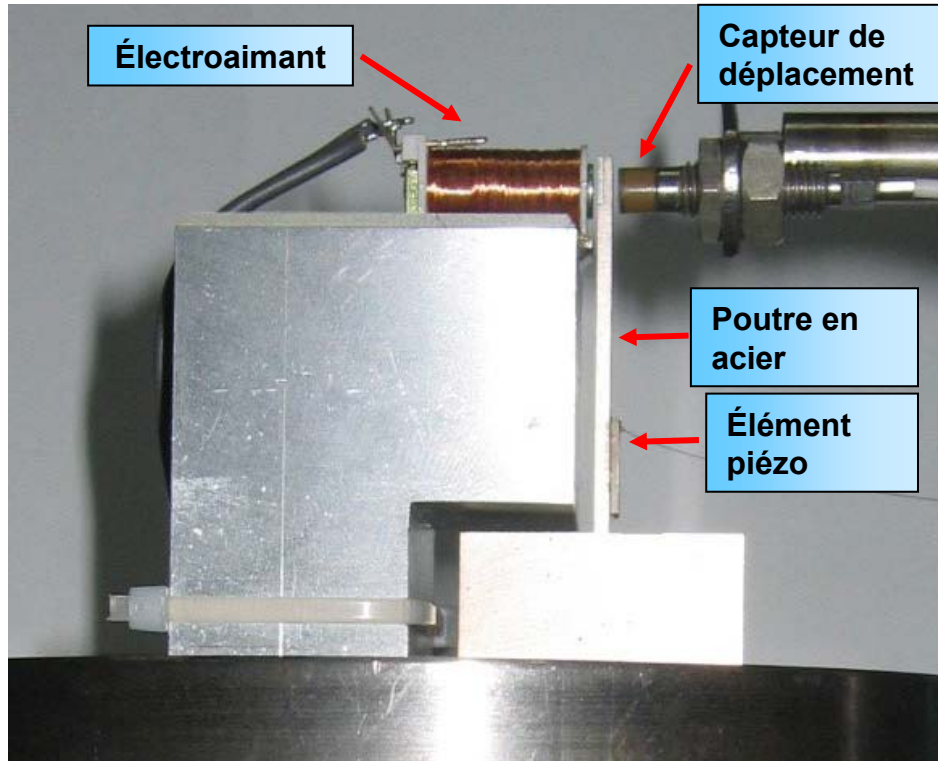
Réseau de capteurs sans fil



Emetteur RF (<1mW)

## ➤ Récupération d'énergie

# Conclusion



- ✓ Volume de la poutre:  
 $40 \times 7 \times 1.5 \text{ mm}^3$
- ✓ Volume de matériau piézo:  
 $10 \times 7 \times 1.5 \text{ mm}^3$
- ✓ Déplacement de la poutre:  
 $150 \mu\text{m}$  à  $900 \text{ Hz}$

Technique classique + céramique	$25 \mu\text{W}$
Technique SSHI + monocristaux	<b><math>4.1 \text{ mW}</math></b>

**PUISSANCE X160**