

Mise en oeuvre d'un absorbeur vibro-acoustique non-linéaire et analyses préliminaires par continuations expérimentale et numérique

Arthur Givois^b - Rita Moussa^b - Thomas Boutin^b - Nicolas Dauchez^b

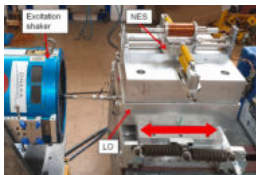
Université de Technologie de Compiègne - Laboratoire Roberval
^b Équipe Acoustique et Vibrations
^b Équipe Design

Journées du GDR EX-MODELI - 9 & 10 novembre 2023

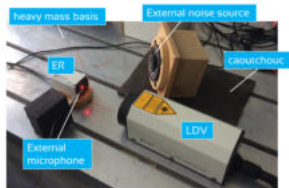
Contexte (1 - GDR)

Axe 1 ("exploitation et modélisation des non-linéarités") \rightsquigarrow absorbeurs / NES

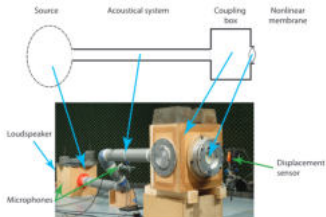
Cadiou et al., JSV 2022



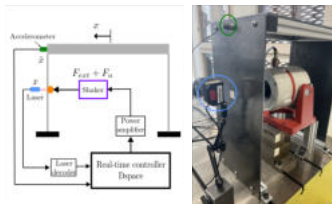
de Bono et al., JSV 2023



Bouzid et al.,
Acta Acust United Acust 2022



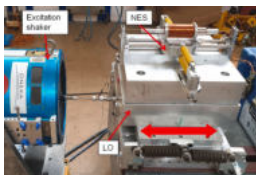
Mesny et al., MSSP 2023



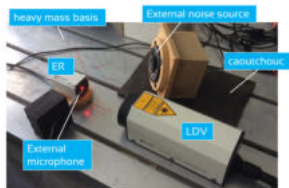
Contexte (1 - GDR)

Axe 1 ("exploitation et modélisation des non-linéarités") \rightsquigarrow absorbeurs / NES

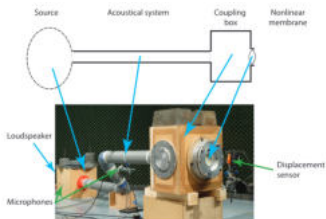
Cadiou et al., JSV 2022



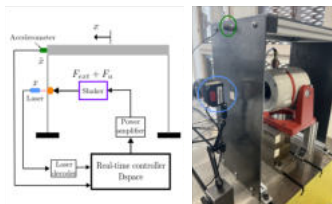
de Bono et al., JSV 2023



Bouid et al.,
Acta Acust United Acust 2022



Mesny et al., MSSP 2023



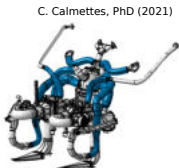
Objectifs : proposer des solutions passives pour la réduction de niveaux acoustiques à basses fréquences et en milieu confiné

Contexte (2 - UTC, Acoustique & Vibration)

Activités liés à l'acoustique dans le domaine audible



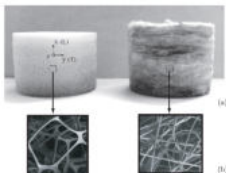
Paroi acoustique
Réseau aéraulique pour conditionnement d'air



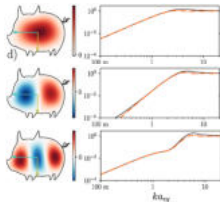
C. Calmettes, PhD (2021)

Réseau aéraulique pour conditionnement d'air
Silencieux acoustiques (revêtement poreux)

L. Lei, PhD (2018)



C. Garcia Armijos, PhD (2022)



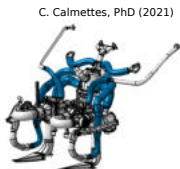
Contexte (2 - UTC, Acoustique & Vibration)

Activités liés à l'acoustique dans le domaine audible

↪ verrou technologique à basses fréquences : évaluer l'apport possible des NES

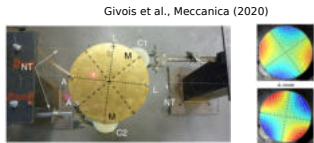


Paroi acoustique
Réseau aéralique pour conditionnement d'air

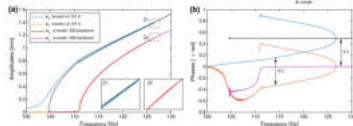


C. Calmettes, PhD (2021)

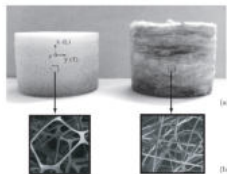
Réseau aéralique pour conditionnement d'air
Silencieux acoustiques (revêtement poreux)



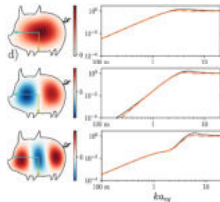
Givois et al., Meccanica (2020)



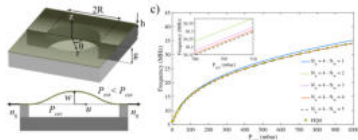
L. Lei, PhD (2018)



C. Garcia Armijos, PhD (2022)



Sarafraz et al., Nonlinear Dyn. (2022)



Modélisation de milieux minces avec NL geom.

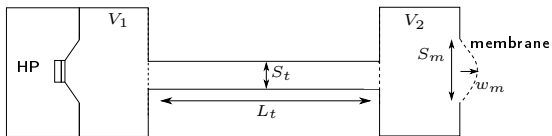
+ simulations & analyse expérimentale de systèmes en résonance interne 1:1

Plan de présentation

- ▶ Contexte
- ▶ Développement d'un banc expérimental électro-mécano-acoustique
 - ▶ Conception
 - ▶ Fabrication
 - ▶ Test préliminaire de pompage
- ▶ Analyse du résonateur NL
 - ▶ Modélisation de la membrane en grands déplacements, projection modale
 - ▶ Courbes maîtresses du résonateur NL découplé (continuation en phase)
- ▶ Analyse du système couplé \rightsquigarrow *slow invariant manifold* (continuation en amplitude)
- ▶ Conclusion & perspectives

Banc expérimental (1) - conception

Revisite des expériences du LMA¹



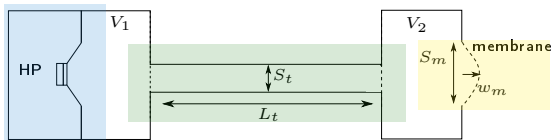
¹Cochelin B., Herzog P. & Mattei P.-O., Comptes-Rendus Mécaniques, 2007.
Arthur G. & al. GDR EX-MODELI

Banc expérimental (1) - conception

Dimensionnement \rightsquigarrow prise en compte du caractère couplé du dispositif

\rightsquigarrow système électro - mécano - acousto - mécanique

Revisite des expériences du LMA¹

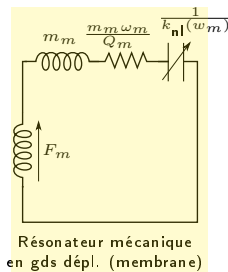
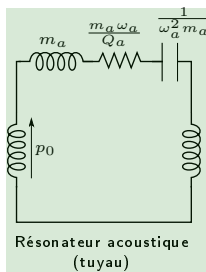
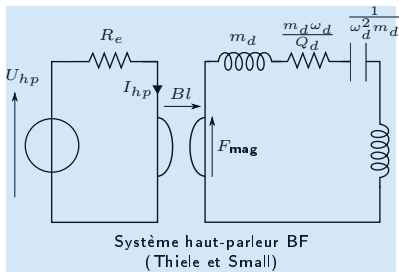


¹Cochelin B., Herzog P. & Mattei P.-O., Comptes-Rendus Mécaniques, 2007.
Arthur G. & al. GDR EX-MODELI

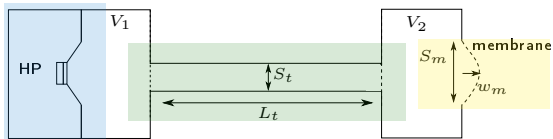
Banc expérimental (1) - conception

Dimensionnement \rightsquigarrow prise en compte du caractère couplé du dispositif

\rightsquigarrow système électro - mécano - acousto - mécanique



Revisite des expériences du LMA¹

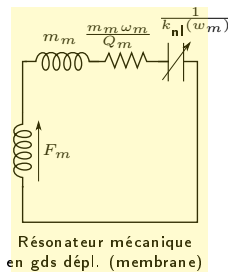
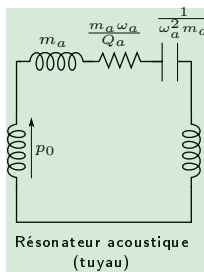
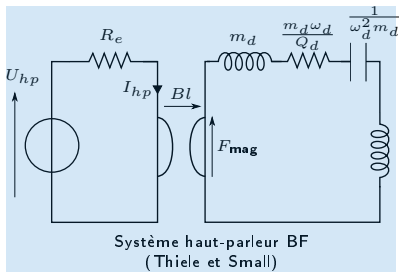


¹Cochelin B., Herzog P. & Mattei P.-O., Comptes-Rendus Mécaniques, 2007.
Arthur G. & al. GDR EX-MODELI

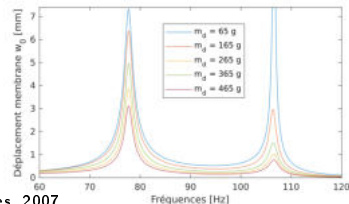
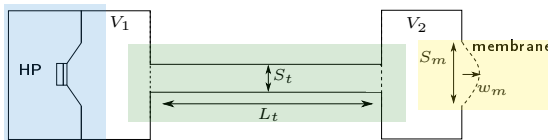
Banc expérimental (1) - conception

Dimensionnement \rightsquigarrow prise en compte du caractère couplé du dispositif

\rightsquigarrow système électro - mécano - acousto - mécanique



Revisite des expériences du LMA¹

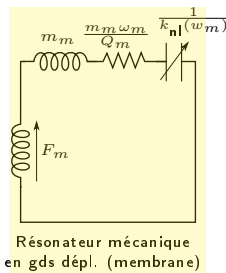
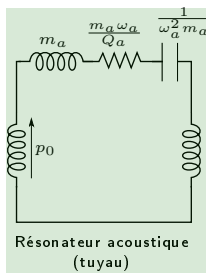
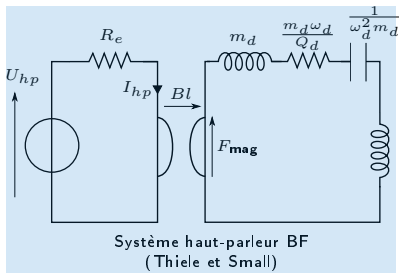


¹Cochelin B., Herzog P. & Mattei P.-O., Comptes-Rendus Mécaniques, 2007.
Arthur G. & al.

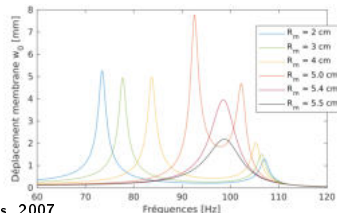
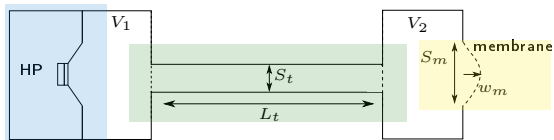
Banc expérimental (1) - conception

Dimensionnement \rightsquigarrow prise en compte du caractère couplé du dispositif

\rightsquigarrow système électro - mécano - acousto - mécanique



Revisite des expériences du LMA¹

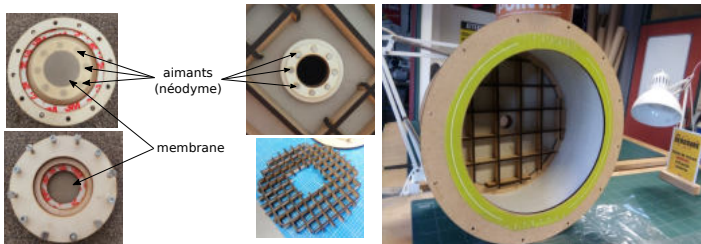


¹Cochelin B., Herzog P. & Mattei P.-O., Comptes-Rendus Mécaniques, 2007.
Arthur G. & al.

Banc expérimental (2) - fabrication

Dispositif en bois, réalisation artisanale :

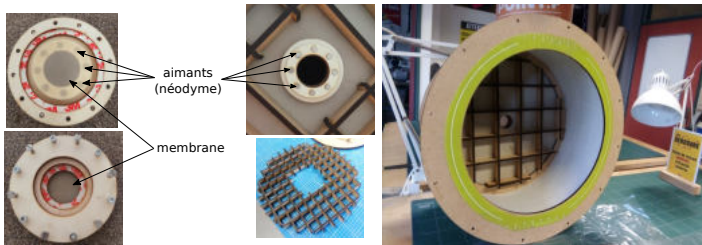
- ▶ découpe laser & fabrication additive
- ▶ assemblages à croix mi-bois & queue d'aronde



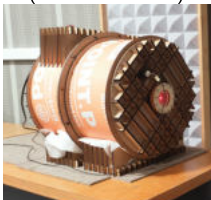
Banc expérimental (2) - fabrication

Dispositif en bois, réalisation artisanale :

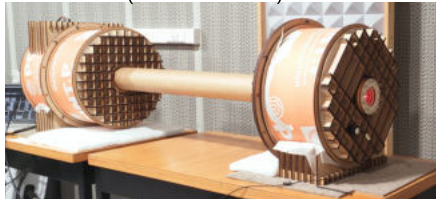
- ▶ découpe laser & fabrication additive
- ▶ assemblages à croix mi-bois & queue d'aronde



Dispositif 1
(sans réson. ac.)

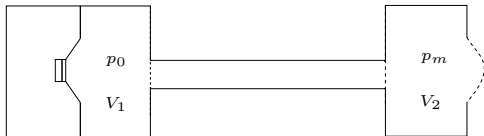
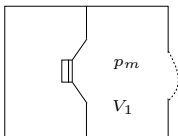


Dispositif 2
(avec réson. ac.)



Banc expérimental (3)

Intérêt du dispositif 1 : analyse de $f_{nl}(q_m)$ sans couplage avec le résonateur primaire



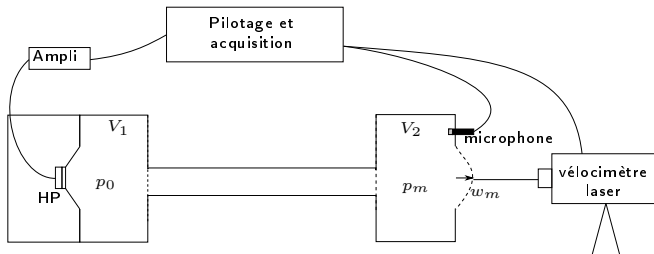
$$\ddot{q}_m + 2\xi_m \omega_m \dot{q}_m + \omega_m^2 q_m + \epsilon f_{nl}(q_m) = \epsilon \alpha_p p_m$$

$$\ddot{q}_m + 2\xi_m \omega_m \dot{q}_m + \omega_m^2 q_m + \epsilon f_{nl}(q_m) = \epsilon \alpha_m p_m$$

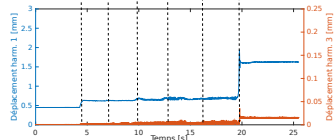
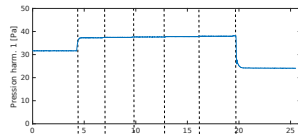
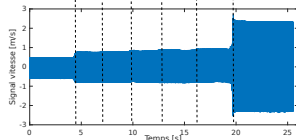
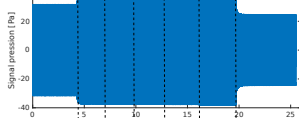
$$\begin{aligned} \ddot{p}_m + 2\xi_a \omega_a \dot{p}_m + (\omega_a^2 + \epsilon \beta_1 \alpha_m + \beta_2) p_m \\ + \beta_1 [\alpha_m (\omega_a^2 - \omega_m^2) q_m + \alpha_m (2\xi_a \omega_a - 2\xi_m \omega_m) \dot{q}_m \\ - \epsilon f_{nl}(q_m)] = -\beta_2 P_0 \cos(\Omega t) \end{aligned}$$

Test préliminaire : mise en évidence du pompage

Fréquence fixée à la résonance acoustique ($f_a = 166.2$ Hz), augmentation incrémentale de I_{hp}



$I_{hp} = [472, 567, 570, 573, 576, 579, 582] \text{ mA}$



Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

$$\begin{aligned}\rho h \ddot{w} + D \Delta \Delta w - n_0 \Delta w - \operatorname{div}(\mathbf{N} \nabla w) &= p(\mathbf{x}, t) \\ \rho h \ddot{\mathbf{u}} - \operatorname{div} \mathbf{N} &= \mathbf{n}(\mathbf{x}, t).\end{aligned}$$

Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

inertie & forçage en-plan négligés, vibrations axisym ($\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = w(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_z + u(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_r$)

$$\rho h \ddot{w} + D \Delta \Delta w - n_0 \Delta w - \operatorname{div}(\mathbf{N} \nabla w) = p(\mathbf{x}, t)$$

$$\rho h \dot{u} - \operatorname{div} \mathbf{N} = \underline{n}(\mathbf{x}, t).$$

Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

inertie & forçage en-plan négligés, vibrations axisym ($\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = w(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_z + u(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_r$)

Adimensionnement ($\epsilon = \frac{Eh}{n_0}$)

+ réécriture en (w, u) :

$$\ddot{w} - \Delta w - \epsilon g_{\text{nl}}(u, w) = \epsilon p(\mathbf{x}, t)$$

$$\left(u, r + \frac{u}{r}\right)_{,r} + h_{\text{nl}}(u, w) = 0.$$

Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

inertie & forçage en-plan négligés, vibrations axisym ($\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = w(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_z + u(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_r$)

Adimensionnement ($\epsilon = \frac{Eh}{n_0}$)

+ réécriture en (w, u) :

$$\ddot{w} - \Delta w - \epsilon g_{\text{nl}}(u, w) = \epsilon p(\mathbf{x}, t)$$

$$\left(u, r + \frac{u}{r}\right)_{,r} + h_{\text{nl}}(u, w) = 0.$$

Projection sur modes transverses & radiaux:

$$w(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^K \phi_k(\mathbf{x}) q_k(t), \quad \phi_k(\mathbf{x}) = \kappa_k J_0(\omega_k r)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^P \psi_p(\mathbf{x}) \eta_p(t), \quad \psi_p(\mathbf{x}) = \lambda_p J_1(\gamma_p r)$$

Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

inertie & forçage en-plan négligés, vibrations axisym ($\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = w(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_z + u(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_r$)

Adimensionnement ($\epsilon = \frac{Eh}{n_0}$)

+ réécriture en (w, u) :

$$\ddot{w} - \Delta w - \epsilon g_{nl}(u, w) = \epsilon p(\mathbf{x}, t)$$

$$\left(u, r + \frac{u}{r}\right)_{,r} + h_{nl}(u, w) = 0.$$

Projection sur modes transverses & radiaux:

$$w(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^K \phi_k(\mathbf{x}) q_k(t), \quad \phi_k(\mathbf{x}) = \kappa_k J_0(\omega_k r)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^P \psi_p(\mathbf{x}) \eta_p(t), \quad \psi_p(\mathbf{x}) = \lambda_p J_1(\gamma_p r)$$

Système couplé :

$$\ddot{q}_k + \omega_k^2 q_k + \epsilon \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^K a_{pi}^k \eta_p q_i + \epsilon \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^K c_{ijl}^k q_i q_j q_l = \epsilon \alpha_k p_m$$

$$\gamma_p^2 \eta_p + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K b_{ij}^p q_i q_j = 0$$

Vibrations NL de membranes

Équation des plaques avec tension axisym. & NL de von Kármán,

inertie & forçage en-plan négligés, vibrations axisym ($\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = w(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_z + u(\mathbf{x}, t)\mathbf{e}_r$)

Adimensionnement ($\epsilon = \frac{Eh}{n_0}$)

+ réécriture en (w, u) :

$$\ddot{w} - \Delta w - \epsilon g_{nl}(u, w) = \epsilon p(\mathbf{x}, t)$$

$$\left(u, r + \frac{u}{r}, r + h_{nl}(u, w) = 0.\right.$$

Projection sur modes transverses & radiaux:

$$w(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^K \phi_k(\mathbf{x})q_k(t), \quad \phi_k(\mathbf{x}) = \kappa_k J_0(\omega_k r)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^P \psi_p(\mathbf{x})\eta_p(t), \quad \psi_p(\mathbf{x}) = \lambda_p J_1(\gamma_p r)$$

Système couplé :

$$\ddot{q}_k + \omega_k^2 q_k + \epsilon \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^K a_{pi}^k \eta_p q_i + \epsilon \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^K c_{ijl}^k q_i q_j q_l = \epsilon \alpha_k p_m$$

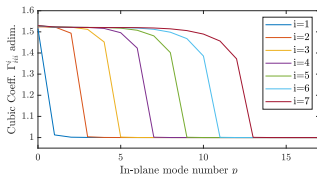
$$\gamma_p^2 \eta_p + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K b_{ij}^p q_i q_j = 0$$

Condensation \rightsquigarrow NL cubiques :

$$\ddot{q}_k + \omega_k^2 q_k + \epsilon \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^K \Gamma_{ijl}^k q_i q_j q_l = \epsilon \alpha_k p$$

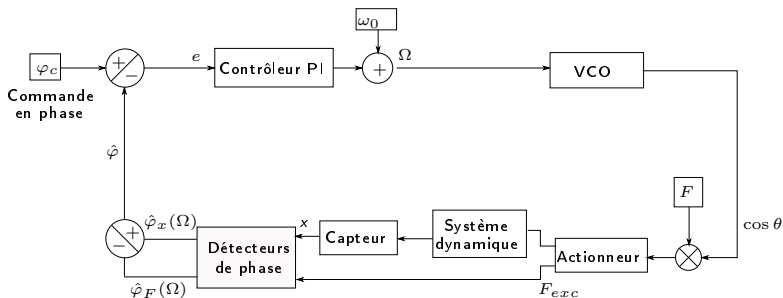
$$\Gamma_{ijl}^k = c_{ijl}^k - \sum_{p=1}^P \frac{b_{jl}^p a_{pi}^k}{\gamma_p^2}$$

\rightsquigarrow Résolution par continuation de solutions périodiques (MANLAB)



Continuation expérimentale: implémentation

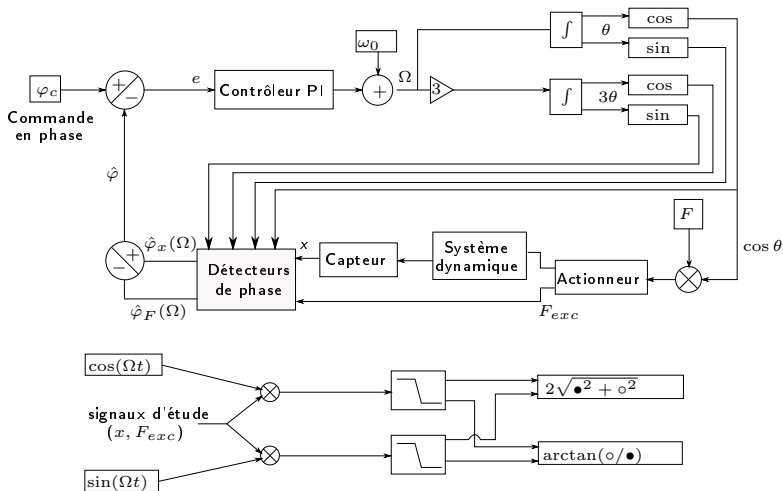
Mise en oeuvre d'une boucle à verrouillage de phase



↪ implémentation avec contrôleur (typiquement dSpace & scripts Simulink)

Continuation expérimentale: implémentation

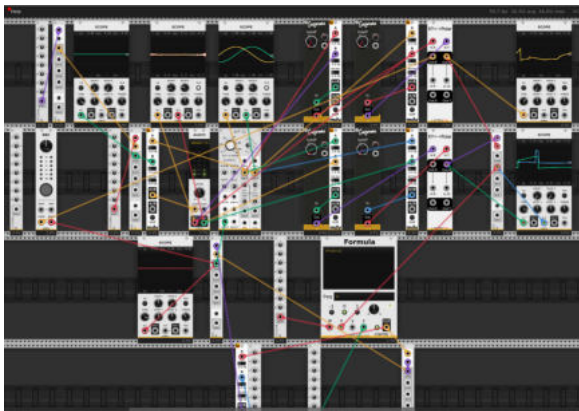
Mise en oeuvre d'une boucle à verrouillage de phase



↪ implémentation avec contrôleur (typiquement dSpace & scripts Simulink)

Continuation expérimentale: implémentation

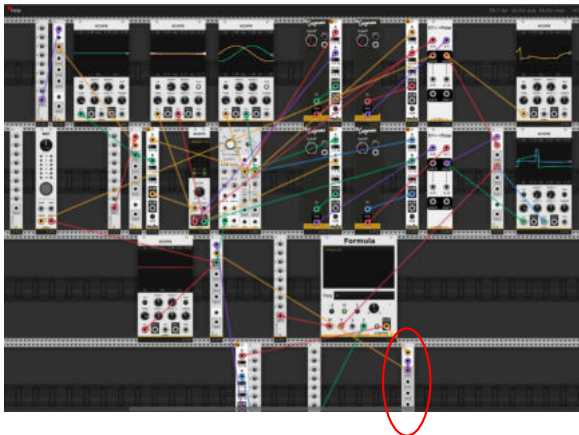
Contrôle implémenté sous VCV Rack \rightsquigarrow interface de synthèse sonore par module



Avantage : logiciel libre et gratuit...

Continuation expérimentale: implémentation

Contrôle implémenté sous VCV Rack \rightsquigarrow interface de synthèse sonore par module

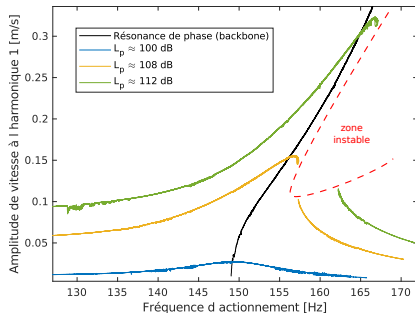
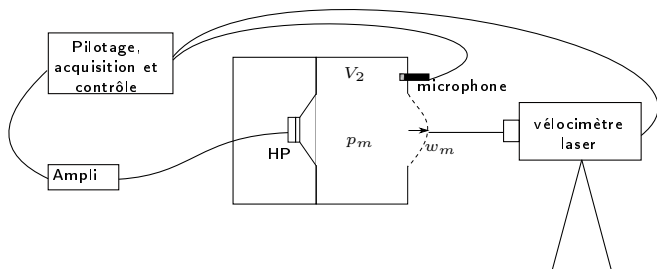


$$\Omega = \omega_0 + K_I \sum_n e(n)$$



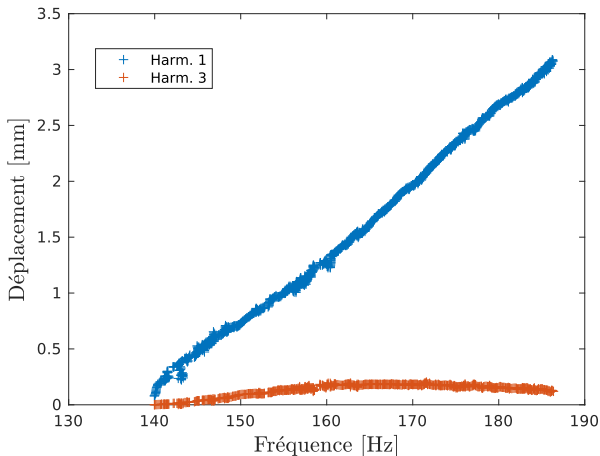
Avantage : logiciel libre et gratuit...

Continuation expérimentale: implémentation



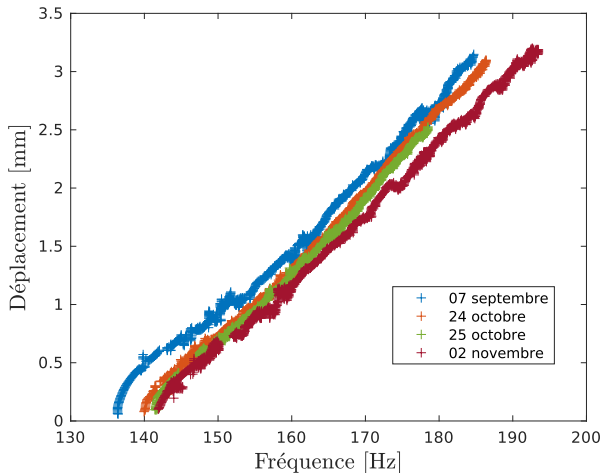
Courbes maîtresses : mesures et recalages

Courbe maîtresse \rightsquigarrow commande de phase t.q. $\varphi_v - \varphi_{p_m} = 0$ et \nearrow de I_{hp}



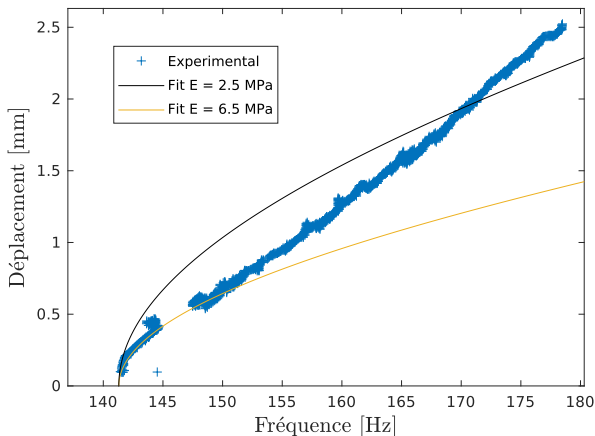
Courbes maîtresses : mesures et recalages

Courbe maîtresse \rightsquigarrow commande de phase t.q. $\varphi_v - \varphi_{p_m} = 0$ et \nearrow de I_{hp}



Courbes maîtresses : mesures et recalages

Courbe maîtresse \rightsquigarrow commande de phase t.q. $\varphi_v - \varphi_{p_m} = 0$ et \nearrow de I_{hp}



Recalage avec $\ddot{q}_m + \omega_m^2 q_m + \epsilon f_{nl}(q_m) = 0$, $f_{nl}(q_m) = \Gamma_{111}^1 q_m^3$, $\epsilon = \frac{Eh}{n_0}$

Système couplé : *slow invariant manifold*

- ▶ Osc. meca. : $\ddot{q}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{q}_m + \omega_m^2q_m + \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3 = \epsilon\alpha_m p_m$
- ▶ Osc. ac. (CL ouvert-ouvert) : $\ddot{U}_L + 2\xi_a\omega_a\dot{U}_L + \omega_a^2U_L = -\left(\frac{1}{2\rho_a L}\right)(p_0 + p_m)$
- ▶ Cons. volume : $U_L = \left(\frac{\chi_s V_1}{S}\right)p_m + \alpha_m q_m$

Système couplé : *slow invariant manifold*

- ▶ Osc. meca. : $\ddot{q}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{q}_m + \omega_m^2q_m + \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3 = \epsilon\alpha_m p_m$
- ▶ Osc. ac. (CL ouvert-ouvert) : $\ddot{U}_L + 2\xi_a\omega_a\dot{U}_L + \omega_a^2U_L = -\left(\frac{1}{2\rho_a L}\right)(p_0 + p_m)$
- ▶ Cons. volume : $U_L = \left(\frac{\chi_s V_1}{S}\right)p_m + \alpha_m q_m$

⇒ écriture en (q_m, p_m) , simulé avec Manlab :

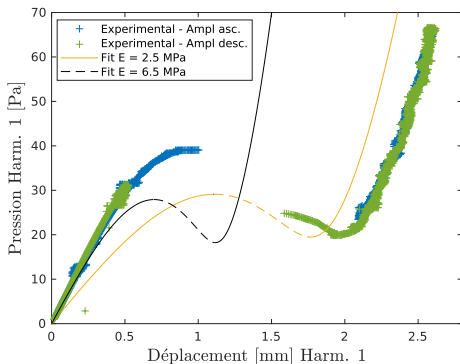
$$\begin{aligned}\ddot{q}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{q}_m + \omega_m^2q_m + \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3 &= \epsilon\alpha_m p_m \\ \ddot{p}_m + 2\xi_a\omega_a\dot{p}_m + (\omega_a^2 + \epsilon\beta_1\alpha_m + \beta_2)p_m + \beta_1[\alpha_m(\omega_a^2 - \omega_m^2)q_m \\ + \alpha_m(2\xi_a\omega_a - 2\xi_m\omega_m)\dot{q}_m - \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3] &= -\beta_2\lambda \cos(\Omega t)\end{aligned}$$

Système couplé : *slow invariant manifold*

- ▶ Osc. meca. : $\ddot{q}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{q}_m + \omega_m^2q_m + \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3 = \epsilon\alpha_m p_m$
- ▶ Osc. ac. (CL ouvert-ouvert) : $\ddot{U}_L + 2\xi_a\omega_a\dot{U}_L + \omega_a^2U_L = -\left(\frac{1}{2\rho_a L}\right)(p_0 + p_m)$
- ▶ Cons. volume : $U_L = \left(\frac{\chi_s V_1}{S}\right)p_m + \alpha_m q_m$

⇒ écriture en (q_m, p_m) , simulé avec Manlab :

$$\begin{aligned} \ddot{q}_m + 2\xi_m\omega_m\dot{q}_m + \omega_m^2q_m + \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3 &= \epsilon\alpha_m p_m \\ \ddot{p}_m + 2\xi_a\omega_a\dot{p}_m + (\omega_a^2 + \epsilon\beta_1\alpha_m + \beta_2)p_m + \beta_1[\alpha_m(\omega_a^2 - \omega_m^2)q_m \\ + \alpha_m(2\xi_a\omega_a - 2\xi_m\omega_m)\dot{q}_m - \epsilon\Gamma_{111}^1q_m^3] &= -\beta_2\lambda \cos(\Omega t) \end{aligned}$$



Conclusions et perspectives

Conclusions :

- ▶ fabrication d'un banc *low-cost* vibro-acoustique revisité
- ▶ analyse détaillée de la fonction NL possible *rapidement*
 - montage avec oscillateur NL découplé
 - implémentation *low-cost* d'un contrôle de phase
- ▶ modélisation minimale de la membrane en grands déplacements
 - à développer en vue de recalages précis

Conclusions et perspectives

Conclusions :

- ▶ fabrication d'un banc *low-cost* vibro-acoustique revisité
- ▶ analyse détaillée de la fonction NL possible *rapidement*
 - montage avec oscillateur NL découplé
 - implémentation *low-cost* d'un contrôle de phase
- ▶ modélisation minimale de la membrane en grands déplacements
 - à développer en vue de recalages précis

Perspectives :

- ▶ développements sur modèle de membrane en grands déplacements
 - viscoélasticité \rightsquigarrow amortissement NL
 - grandes rotations
- ▶ analyse du rôle du matériau et mise en oeuvre d'autres membranes
 - rôle de la dissipation dans le NES
 - adaptation mécanique à l'air (maîtrise du couplage)
 - membrane bi-stable
- ▶ installations en conduit



Merci
à P.-O. Mattei