



*Soutenance de thèse
en vue de l'obtention du titre de
Docteur de l'École Centrale de Lyon
Spécialité mécanique*



Étude d'amortisseurs non-linéaires appliqués aux roues aubagées et aux systèmes multi-étages

Denis Laxalde

Jury d'examen :

A. Berlioz, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse
J.-C. Golinval, Professeur, Université de Liège
J.-P. Lombard, Adjoint méthodes en mécanique, Snecma
C. Pierre, Professeur, Université McGill de Montréal
C. Gibert, Ingénieur de Recherche, École Centrale de Lyon
F. Thouverez, Professeur, École Centrale de Lyon

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse

Introduction

Dynamique des roues aubagées

Analyse non-linéaire fréquentielle

Étude d'amortisseurs non-linéaires

Conclusions et perspectives

Introduction

Dynamique des roues aubagées

Analyse non-linéaire fréquentielle

Étude d'amortisseurs non-linéaires

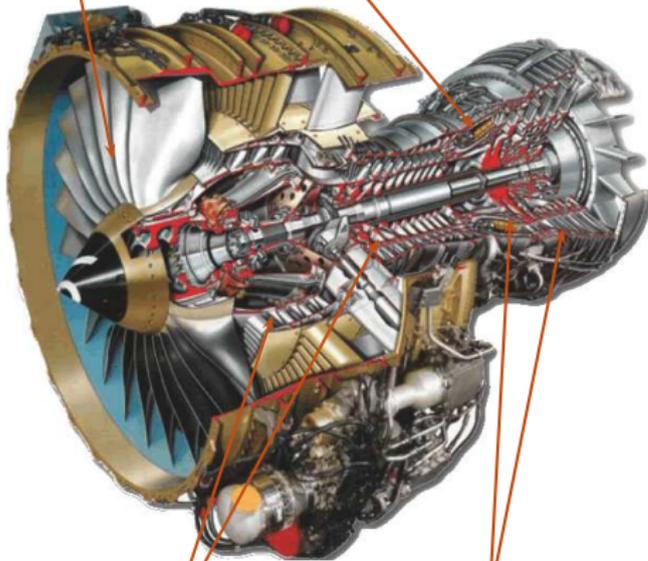
Conclusions et perspectives

Les roues aubagées de turboréacteurs

Turboréacteur civil :

Soufflante

Chambre de combustion



Compresseurs BP et HP

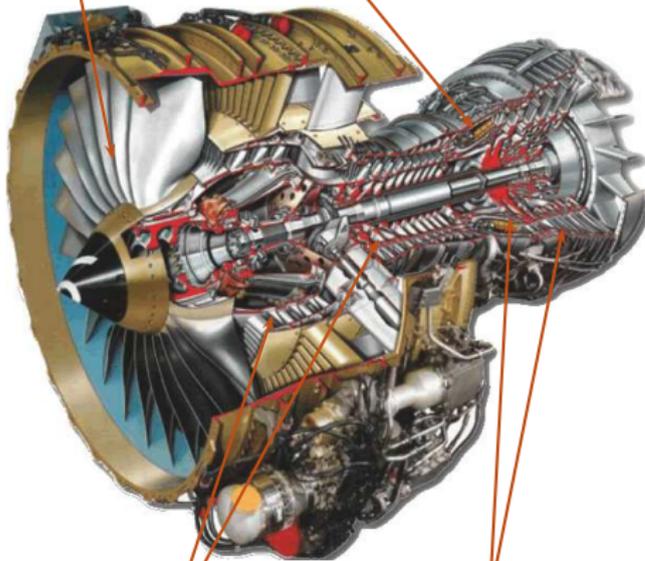
Turbines HP et BP

Les roues aubagées de turboréacteurs

Turboréacteur civil :

Soufflante

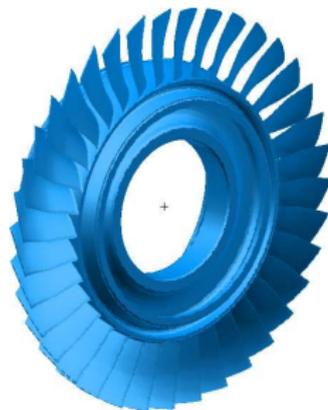
Chambre de combustion



Compresseurs BP et HP

Turbines HP et BP

Roue aubagée (mobile) :



Différentes technologies :

- ▶ Modules axiaux, centrifuges, axiaux-centrifuges
- ▶ Assemblées (aubes + disque)
- ▶ **Monoblocs** (DAM, ANAM)

Contexte et cadre des recherches

Conception des turbomachines modernes :

Augmentation des
performances et des
durées de vie

```
graph LR; A[Augmentation des performances et des durées de vie] --> B[Optimisation mécanique]; A --> C[Progrès technologiques];
```

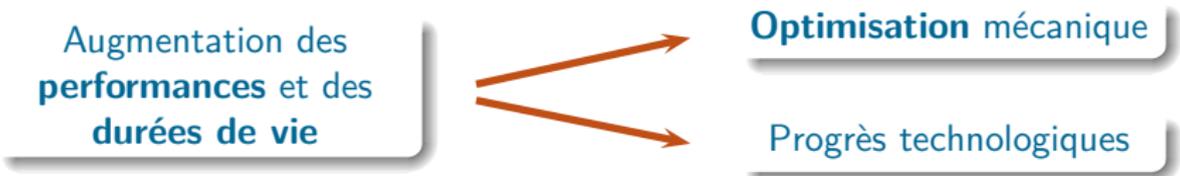
Optimisation mécanique

Progrès technologiques

Contexte et cadre des recherches

Conception des turbomachines modernes :

Augmentation des
performances et des
durées de vie



Optimisation mécanique

Progrès technologiques

Enjeux pour les constructeurs :

- ▶ maîtrise des niveaux vibratoires
- ▶ amélioration de la prédictivité des méthodes de simulation

Contexte et cadre des recherches

Conception des turbomachines modernes :

Augmentation des
performances et des
durées de vie



Optimisation mécanique

Progrès technologiques

Enjeux pour les constructeurs :

- ▶ maîtrise des niveaux vibratoires
- ▶ amélioration de la prédictivité des méthodes de simulation

Thématiques de recherche :

- ① Étude d'amortisseurs non-linéaires :

Technologies : Dispositifs frottants, absorbeurs de vibrations

Méthodologies : Modélisation, analyse non-linéaire, études numériques et expérimentales

Contexte et cadre des recherches

Conception des turbomachines modernes :

Augmentation des
performances et des
durées de vie



Optimisation mécanique

Progrès technologiques

Enjeux pour les constructeurs :

- ▶ maîtrise des niveaux vibratoires
- ▶ amélioration de la prédictivité des méthodes de simulation

Thématiques de recherche :

- 1 Étude d'amortisseurs non-linéaires :

Technologies : Dispositifs frottants, absorbeurs de vibrations

Méthodologies : Modélisation, analyse non-linéaire, études numériques et expérimentales

- 2 Modélisation et **analyse dynamique** des ensembles **multi-étages** de roues aubagées

Introduction

Dynamique des roues aubagées

Conception et modélisation des roues aubagées

Analyse dynamique multi-étage

Analyse non-linéaire fréquentielle

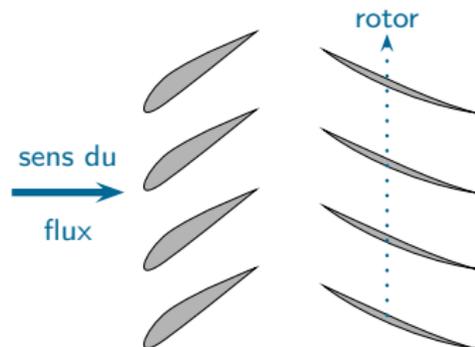
Étude d'amortisseurs non-linéaires

Conclusions et perspectives

Sources d'excitation

Aéroélasticité : étude des interactions entre les forces d'origine inertielle, élastique et aérodynamique agissant sur les éléments structuraux

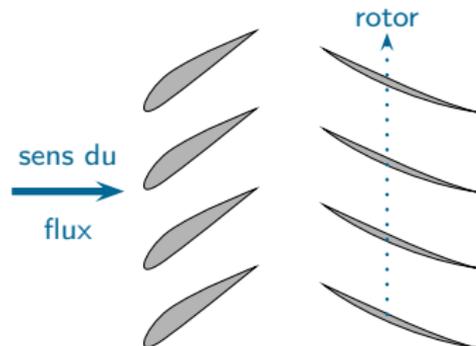
- 1 Aéroélasticité statique
- 2 Réponse forcée :
 - excitations par sillage
 - phénomènes **synchrones**
- 3 Flottement
 - vibrations instables et auto-entretenues
 - phénomènes **asynchrones**
- 4 Autres phénomènes asynchrones



Sources d'excitation

Aéroélasticité : étude des interactions entre les forces d'origine inertielle, élastique et aérodynamique agissant sur les éléments structuraux

- 1 Aéroélasticité statique
- 2 Réponse forcée :
 - excitations par sillage
 - phénomènes **synchrones**
- 3 Flottement
 - vibrations instables et auto-entretenues
 - phénomènes **asynchrones**
- 4 Autres phénomènes asynchrones



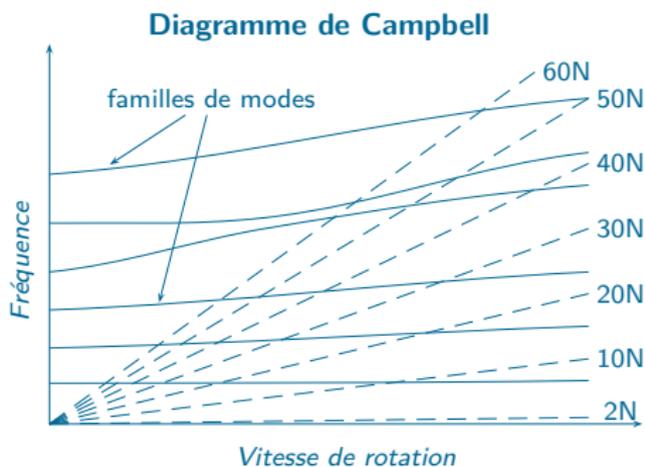
Excitations mécaniques :

- ▶ Excitation par les rotors
- ▶ Contact rotor / stator
- ▶ Situations accidentelles

Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

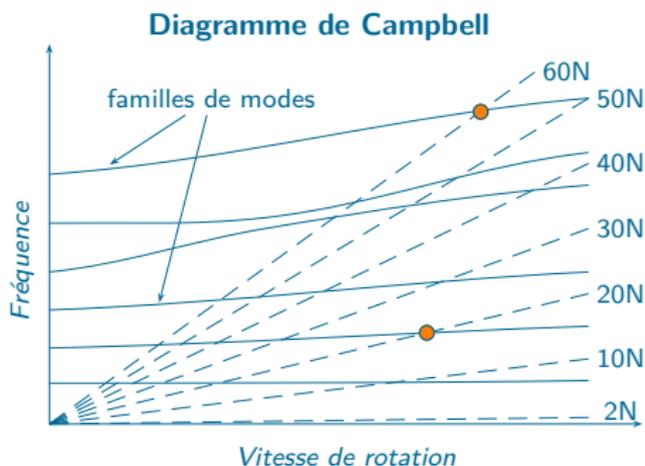
► Situation modale



Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

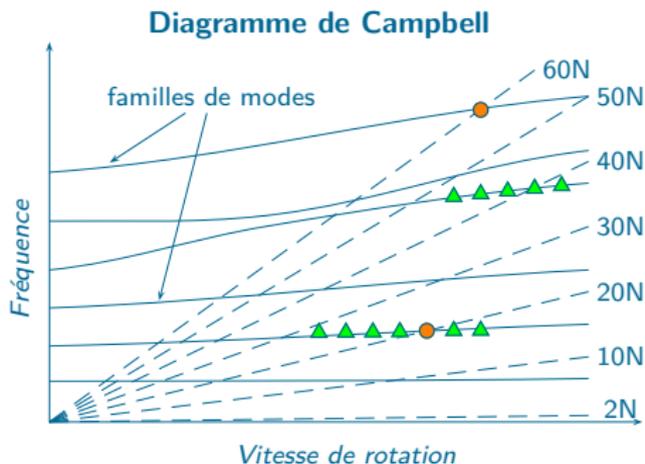
- ▶ Situation modale
- ▶ Réponse forcée ●
 - détection des coïncidences



Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

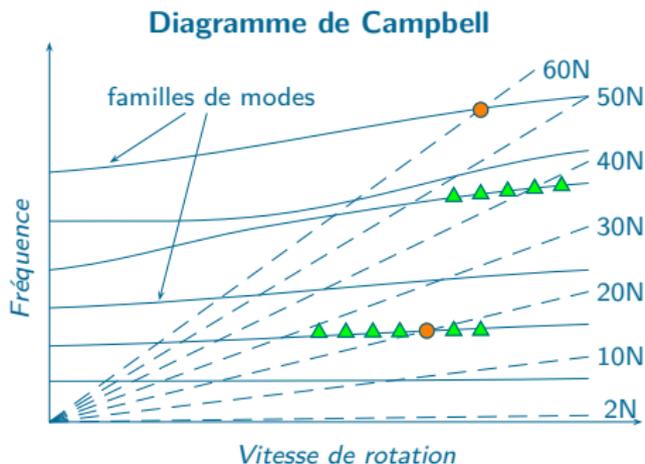
- ▶ Situation modale
- ▶ Réponse forcée ●
 - détection des coïncidences
- ▶ Flottement ▲
 - modes aéroélastiques & stabilité



Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

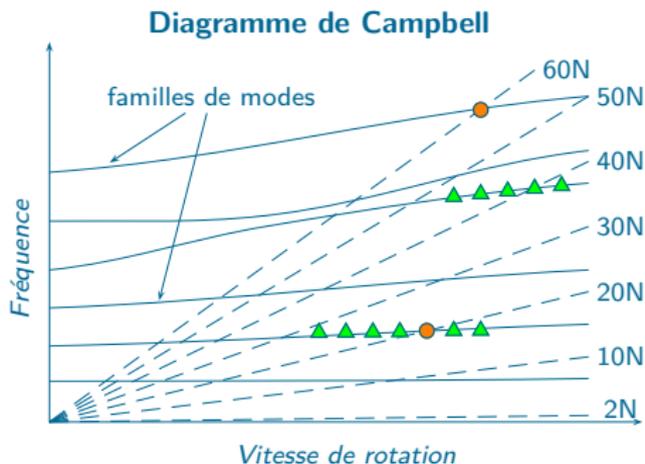
- ▶ Situation modale
- ▶ Réponse forcée ●
 - détection des coïncidences
- ▶ Flottement ▲
 - modes aéroélastiques & stabilité
- ▶ Effets du désaccordage



Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

- ▶ Situation modale
- ▶ Réponse forcée ●
 - détection des coïncidences
- ▶ Flottement ▲
 - modes aéroélastiques & stabilité
- ▶ Effets du désaccordage
- ▶ Analyse en fatigue vibratoire



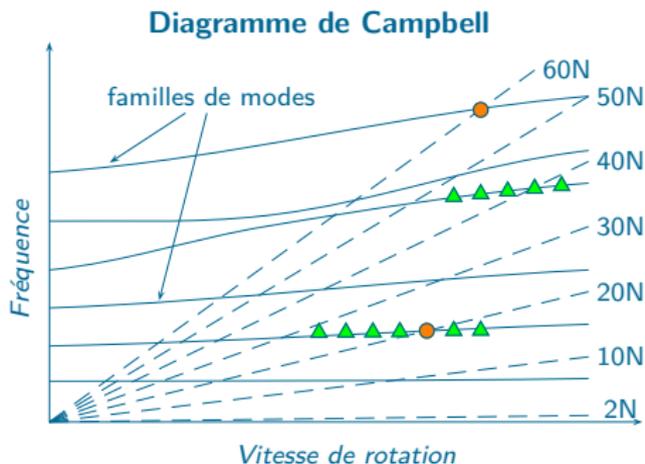
Conception dynamique

Prédiction des risques vibratoires

- ▶ Situation modale
- ▶ Réponse forcée ●
 - détection des coïncidences
- ▶ Flottement ▲
 - modes aéroélastiques & stabilité
- ▶ Effets du désaccordage
- ▶ Analyse en fatigue vibratoire

Retours d'expérience :

- ▶ classement des conceptions
- ▶ marges



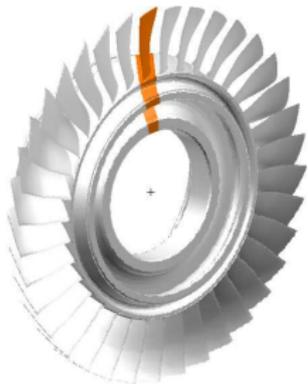
Symétrie cyclique

Roue aubagée accordée :



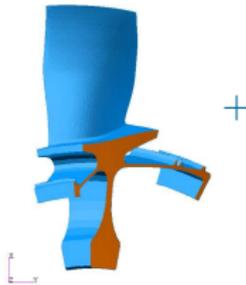
Symétrie cyclique

Roue aubagée accordée :



Symétrie cyclique :

Secteur



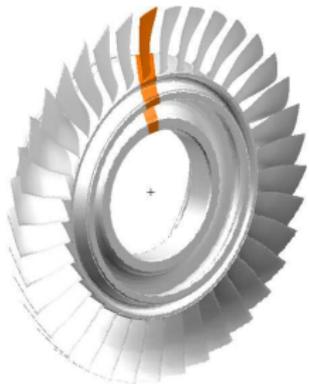
Contraintes inter-secteurs :

$$\tilde{\mathbf{u}}^k = \tilde{\mathbf{d}}^k e^{-ik\alpha}$$

k : nombre d'onde

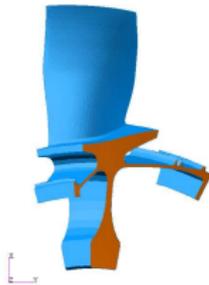
Symétrie cyclique

Roue aubagée accordée :



Symétrie cyclique :

Secteur



+

Contraintes inter-secteurs :

$$\tilde{\mathbf{u}}^k = \mathbf{d}^k e^{-ik\alpha}$$

 k : nombre d'onde

Base physique

$$\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_n, n = 1, \dots, N_{\text{secteurs}}\}$$

Base cyclique

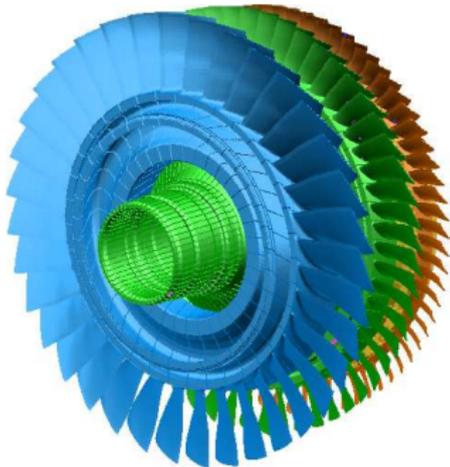
$$\tilde{\mathbf{u}}^k, \text{ secteur de référence, onde } k$$

- ▶ Analyses découplées par nombre de d'onde
- ▶ Recombinaison (nombre d'onde k) :

$$\mathbf{u} = \mathbf{e}^k \otimes \tilde{\mathbf{u}}^k \text{ avec } \mathbf{e}^k = \left[1 \quad e^{\frac{2j\pi k}{N}} \quad e^{\frac{4j\pi k}{N}} \quad \dots \quad e^{\frac{2(N-1)j\pi k}{N}} \right]^T$$

Analyse dynamique multi-étage

Ensemble multi-étage de roues aubagées :

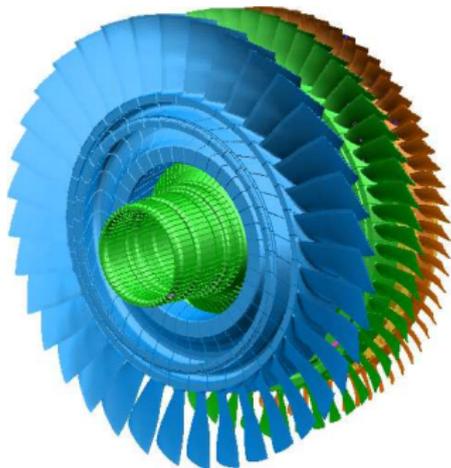


Problématique :

- ▶ Optimisation des conceptions
- ▶ Réduction des marges de fonctionnement
- ⇒ **Dynamique multi-étage**

Analyse dynamique multi-étage

Ensemble multi-étage de roues aubagées :



Problématique :

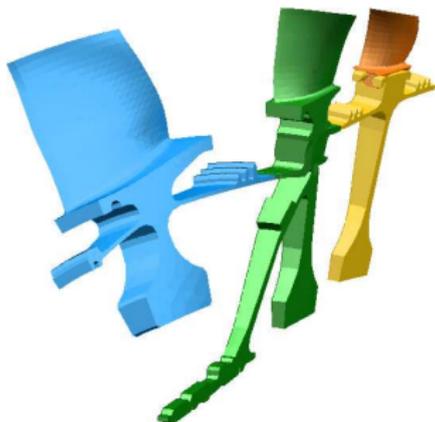
- ▶ Optimisation des conceptions
 - ▶ Réduction des marges de fonctionnement
- ⇒ Dynamique multi-étage

État de l'art :

- ▶ Calcul complet (360°)
- ▶ Modèles dégradés (2D, Fourier, ...)
- ▶ Sous-structuration multi-niveau
- ▶ *Symétrie cyclique multi-étage*

Symétrie cyclique multi-étage

Secteur multi-étage :



- ▶ 1 secteur de chaque étage
- ▶ incompatibilité géométrique à l'interface

Principes de l'analyse :

- 1 Symétrie cyclique pour chaque étage :
 - Secteur de référence
 - Déphasage inter-secteur selon un nombre d'onde
- 2 Couplage inter-étage
 - compatibilité en base physique
 - *équivalence des nombres d'onde*

⇒ Validation par comparaison avec une référence 360°

Notations :

$\tilde{\mathbf{u}}_s^n$ base cyclique, étage s , onde n

\mathbf{b}_u déplacements à l'interface

Couplage inter-étage (1)

Soit deux étages de N_1 et N_2 secteurs ($N_1 < N_2$)

- ▶ Continuité des déplacements à l'interface inter-étage :
 - dans la base physique commune :

$$A^b \mathbf{u}_1 - {}^b \mathbf{u}_2 = 0$$

- en composantes cycliques :

$$A \sum_{n=0}^{N_1-1} \mathbf{e}_1^n \otimes {}^{b\sim} \mathbf{u}_1^n - \sum_{p=0}^{N_2-1} \mathbf{e}_2^p \otimes {}^{b\sim} \mathbf{u}_2^p = 0$$

Couplage inter-étage (1)

Soit deux étages de N_1 et N_2 secteurs ($N_1 < N_2$)

- ▶ Continuité des déplacements à l'interface inter-étage :
 - dans la base physique commune :

$$A^b \mathbf{u}_1 - {}^b \mathbf{u}_2 = 0$$

- en composantes cycliques :

$$A \sum_{n=0}^{N_1-1} \mathbf{e}_1^n \otimes {}^b \tilde{\mathbf{u}}_1^n - \sum_{p=0}^{N_2-1} \mathbf{e}_2^p \otimes {}^b \tilde{\mathbf{u}}_2^p = 0$$

- ▶ Projection sur la base cyclique 2 :

$$(\mathbf{e}_2^{p*} \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A \sum_{n=0}^{N_1-1} (\mathbf{e}_1^n \otimes \mathcal{I}_{b_1}) {}^b \tilde{\mathbf{u}}_1^n - {}^b \tilde{\mathbf{u}}_2^p = 0$$

Couplage inter-étage (1)

Soit deux étages de N_1 et N_2 secteurs ($N_1 < N_2$)

- ▶ Continuité des déplacements à l'interface inter-étage :
 - dans la base physique commune :

$$A^b \mathbf{u}_1 - {}^b \mathbf{u}_2 = 0$$

- en composantes cycliques :

$$A \sum_{n=0}^{N_1-1} \mathbf{e}_1^n \otimes {}^b \tilde{\mathbf{u}}_1^n - \sum_{p=0}^{N_2-1} \mathbf{e}_2^p \otimes {}^b \tilde{\mathbf{u}}_2^p = 0$$

- ▶ Projection sur la base cyclique 2 :

$$\underbrace{(\mathbf{e}_2^{p*} \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A \sum_{n=0}^{N_1-1} (\mathbf{e}_1^n \otimes \mathcal{I}_{b_1})}_{\text{couplage des nombres d'onde}} {}^b \tilde{\mathbf{u}}_1^n - {}^b \tilde{\mathbf{u}}_2^p = 0$$

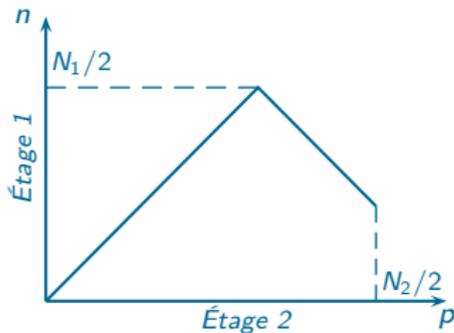
⇒ Sélection des nombres de d'onde à coupler par congruence. . .

Couplage inter-étage (2)

- Couplage entre nombres de d'onde :

$$C(p, n) = (\mathbf{e}_{N_2, p}^* \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A (\mathbf{e}_{N_1, n} \otimes \mathcal{I}_{b_1})$$

- Équivalence des nombres d'onde :

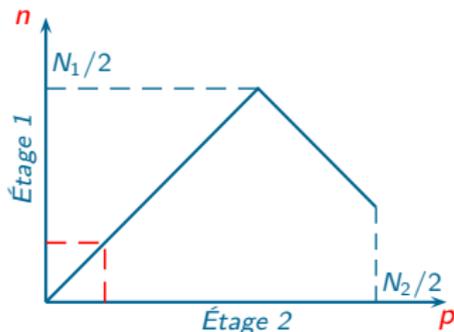


Couplage inter-étage (2)

- ▶ Couplage entre nombres de d'onde :

$$C(p, n) = (\mathbf{e}_{N_2, p}^* \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A (\mathbf{e}_{N_1, n} \otimes \mathcal{I}_{b_1})$$

- ▶ Équivalence des nombres d'onde :



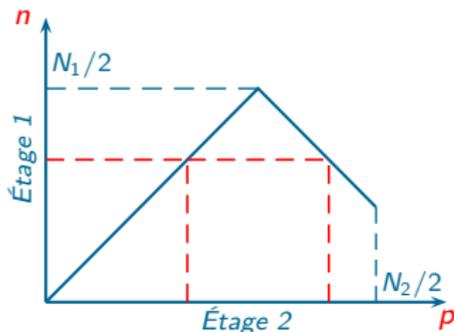
$$\blacktriangleright 0 < n < N_1 - \frac{N_2}{2} \Rightarrow p = n$$

Couplage inter-étage (2)

- ▶ Couplage entre nombres de d'onde :

$$C(p, n) = (\mathbf{e}_{N_2, p}^* \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A (\mathbf{e}_{N_1, n} \otimes \mathcal{I}_{b_1})$$

- ▶ Équivalence des nombres d'onde :



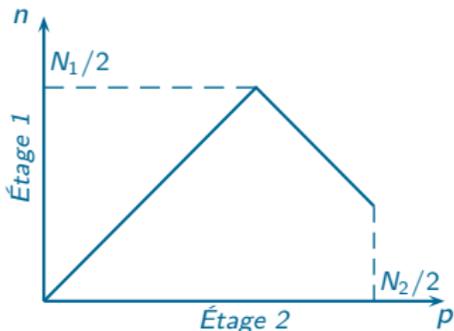
- ▶ $0 < n < N_1 - \frac{N_2}{2} \Rightarrow p = n$
- ▶ $N_1 - \frac{N_2}{2} \leq n \leq \frac{N_1}{2} \Rightarrow p = [n, N_1 - n]$

Couplage inter-étage (2)

- ▶ Couplage entre nombres de d'onde :

$$C(p, n) = (\mathbf{e}_{N_2, p}^* \otimes \mathcal{I}_{b_2}) A (\mathbf{e}_{N_1, n} \otimes \mathcal{I}_{b_1})$$

- ▶ Équivalence des nombres d'onde :

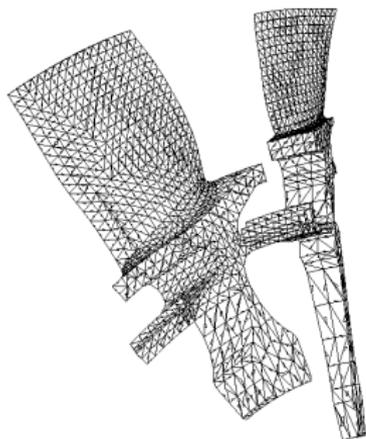


- ▶ $0 < n < N_1 - \frac{N_2}{2} \Rightarrow p = n$
- ▶ $N_1 - \frac{N_2}{2} \leq n \leq \frac{N_1}{2} \Rightarrow p = [n, N_1 - n]$

Relation de couplage inter-étage

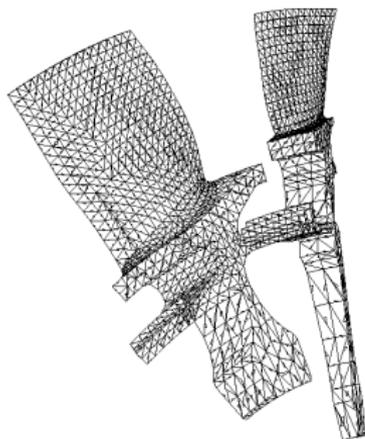
$$\left(\mathbf{e}_2^{p(n)*} \otimes \mathcal{I}_{b_2} \right) A \left(\mathbf{e}_1^n \otimes \mathcal{I}_{b_1} \right) \tilde{\mathbf{u}}_1^n - \tilde{\mathbf{u}}_2^{p(n)} = 0$$

Deux DAM de CoHP



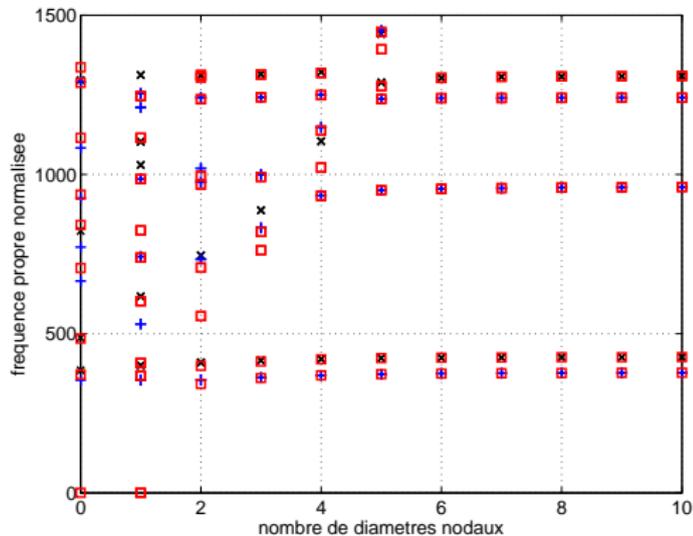
- ▶ 1^{er} étage – 36 secteurs
- ▶ 2^{ème} étage – 60 secteurs

Deux DAM de CoHP



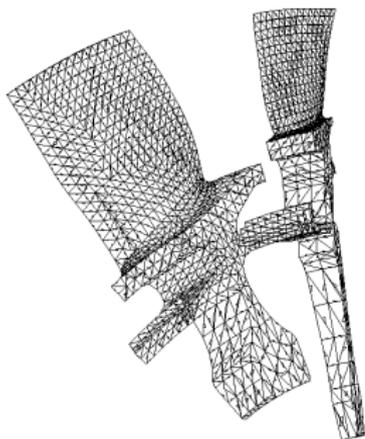
- ▶ 1^{er} étage – 36 secteurs
- ▶ 2^{ème} étage – 60 secteurs

Situation modale



- × étage 1 seul
- + étage 2 seul
- multi-étage

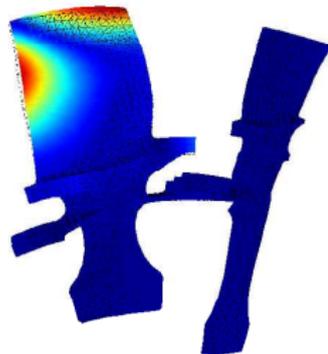
Deux DAM de CoHP



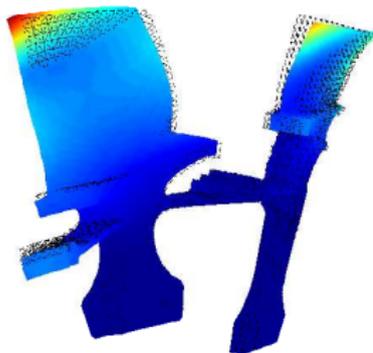
- ▶ 1^{er} étage – 36 secteurs
- ▶ 2^{ème} étage – 60 secteurs

Déformées modales

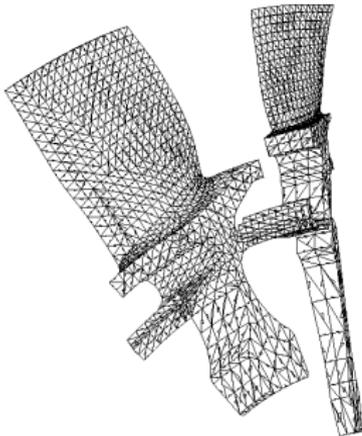
Comportement mono-étage :



Comportement multi-étage :

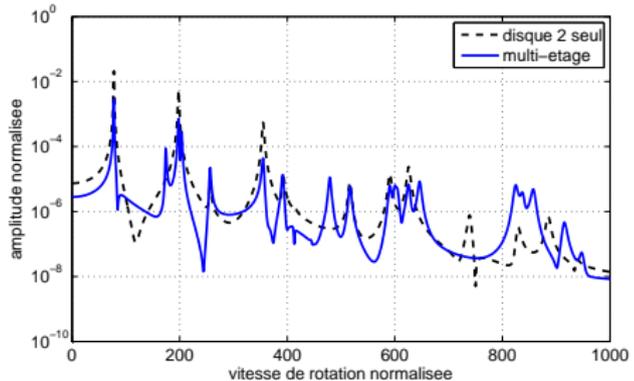
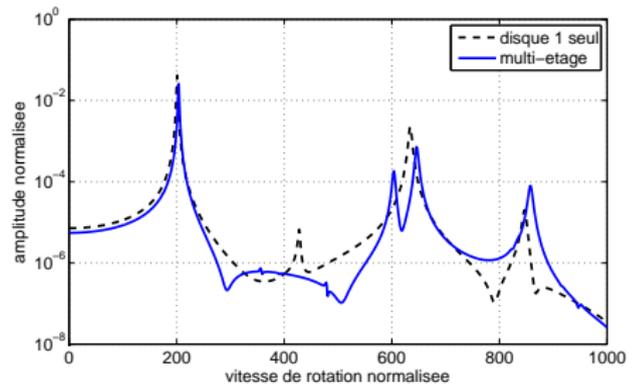


Deux DAM de CoHP



- ▶ 1^{er} étage – 36 secteurs
- ▶ 2^{ème} étage – 60 secteurs

Réponse forcée



Introduction

Dynamique des roues aubagées

Analyse non-linéaire fréquentielle

- Motivations

- Modes complexes non-linéaires

- Application à un système simple

- Réponse forcée

Étude d'amortisseurs non-linéaires

Conclusions et perspectives

Objectifs :

- ▶ Analyse dynamique de systèmes non-linéaires

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \text{ ou } \mathbf{p}(t)$$

- ▶ Non-linéarités **dissipatives** : frottement, ...

Objectifs :

- ▶ Analyse dynamique de systèmes non-linéaires

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \text{ ou } \mathbf{p}(t)$$

- ▶ Non-linéarités **dissipatives** : frottement, ...

Applications aux roues aubagées :

- ▶ Symétrie cyclique
- ▶ Réponse forcée
- ▶ **Flottement** (description modale, stabilité, cycles limites)

Objectifs :

- ▶ Analyse dynamique de systèmes non-linéaires

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) = \mathbf{0} \text{ ou } \mathbf{p}(t)$$

- ▶ Non-linéarités **dissipatives** : frottement, ...

Applications aux roues aubagées :

- ▶ Symétrie cyclique
- ▶ Réponse forcée
- ▶ **Flottement** (description modale, stabilité, cycles limites)

Choix méthodologiques :

- ▶ Méthodes fréquentielles – *Balance harmonique*
- ▶ **Approche modale** pour les systèmes **dissipatifs**
- ▶ Modélisation des interfaces en contact et frottement

Modes complexes non-linéaires

Definition

Un mode complexe non-linéaire est une oscillation du système autonome non-conservatif présentant (potentiellement) un déphasage entre ses coordonnées.

Modes complexes non-linéaires

Definition

Un mode complexe non-linéaire est une oscillation du système autonome non-conservatif présentant (potentiellement) un déphasage entre ses coordonnées.

- ▶ Valeur propre complexe :

$$\lambda = -\beta + i\omega$$

- ▶ Série de Fourier :

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{n=0}^{N_h} e^{n\lambda t} \mathbf{X}_n$$

- ▶ Vecteur propre complexe :

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_n^{\Re} + i\mathbf{X}_n^{\Im}, n = 1, \dots, N_h\}$$

Modes complexes non-linéaires

Definition

Un mode complexe non-linéaire est une oscillation du système autonome non-conservatif présentant (potentiellement) un déphasage entre ses coordonnées.

- ▶ Valeur propre complexe :

$$\lambda = -\beta + i\omega$$

- ▶ Série de Fourier :

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{n=0}^{N_h} e^{n\lambda t} \mathbf{x}_n$$

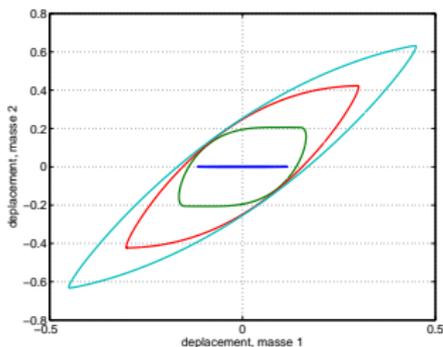
- ▶ Vecteur propre complexe :

$$\mathbf{X} = \{ \mathbf{X}_n^{\Re} + i\mathbf{X}_n^{\Im}, n = 1, \dots, N_h \}$$

Ex. :



Trajectoires pour différentes énergies :



Formulation fréquentielle

Problème aux valeurs propres complexes non-linéaires

Trouver $\{\lambda, \mathbf{X}\}$ tel que $Z(\lambda)\mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

$$Z(\lambda) = \text{diag}(Z_n), Z_n = (n\lambda)^2 M + n\lambda C + K$$

Formulation fréquentielle

Problème aux valeurs propres complexes non-linéaires

Trouver $\{\lambda, \mathbf{X}\}$ tel que $Z(\lambda)\mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

$$Z(\lambda) = \text{diag}(Z_n), Z_n = (n\lambda)^2 M + n\lambda C + K$$

- Définition de l'amplitude modale :

$$q = q^{\Re} + iq^{\Im}$$

Formulation fréquentielle

Problème aux valeurs propres complexes non-linéaires

Trouver $\{\lambda, \mathbf{X}\}$ tel que $Z(\lambda)\mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

$$Z(\lambda) = \text{diag}(Z_n), Z_n = (n\lambda)^2 M + n\lambda C + K$$

- Définition de l'amplitude modale :

$$q = q^{\Re} + iq^{\Im}$$

- Normalisation du mode :

$$\mathbf{X} = \Phi^{\Re} q^{\Re} + i\Phi^{\Im} q^{\Im}$$

Formulation fréquentielle

Problème aux valeurs propres complexes non-linéaires

Trouver $\{\lambda, \mathbf{X}\}$ tel que $Z(\lambda)\mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

$$Z(\lambda) = \text{diag}(Z_n), Z_n = (n\lambda)^2 M + n\lambda C + K$$

- ▶ Définition de l'amplitude modale :

$$q = q^{\Re} + iq^{\Im}$$

- ▶ Normalisation du mode :

$$\mathbf{X} = \Phi^{\Re} q^{\Re} + i\Phi^{\Im} q^{\Im}$$

- ▶ Continuation selon l'amplitude modale

Formulation fréquentielle

Problème aux valeurs propres complexes non-linéaires

Trouver $\{\lambda, \mathbf{X}\}$ tel que $Z(\lambda)\mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

$$Z(\lambda) = \text{diag}(Z_n), Z_n = (n\lambda)^2 M + n\lambda C + K$$

- Définition de l'amplitude modale :

$$q = q^{\Re} + iq^{\Im}$$

- Normalisation du mode :

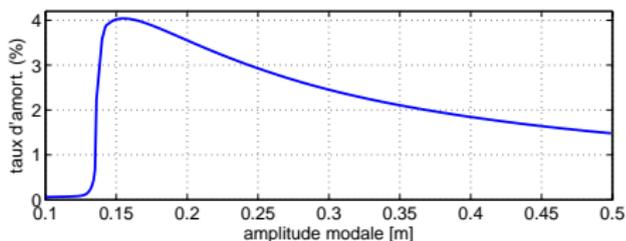
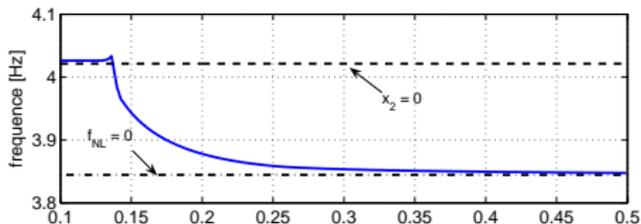
$$\mathbf{X} = \Phi^{\Re} q^{\Re} + i\Phi^{\Im} q^{\Im}$$

- Continuation selon l'amplitude modale
- $\mathbf{F}(\mathbf{X})$, vecteur fréquentiel des forces NL, calculé par *Alternance Fréquentielle-Temporelle* :

$$\mathbf{X} \xrightarrow{iDFT} \mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t) \xrightarrow{\text{Loi NL}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \xrightarrow{DFT} \mathbf{F}$$

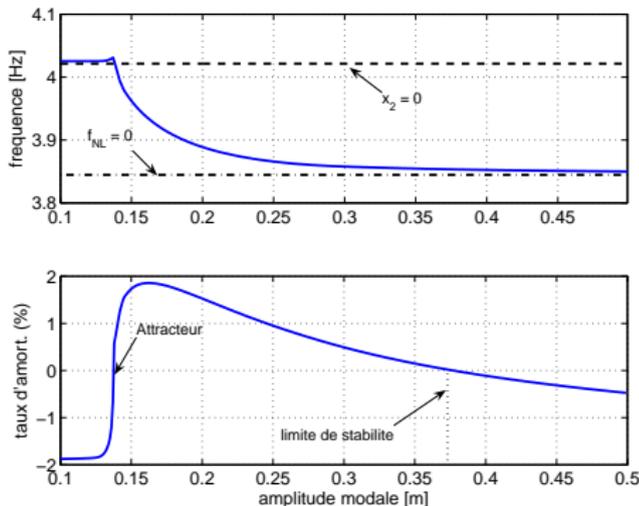


- Paramètres modaux (fréquence et taux d'amortissement) :





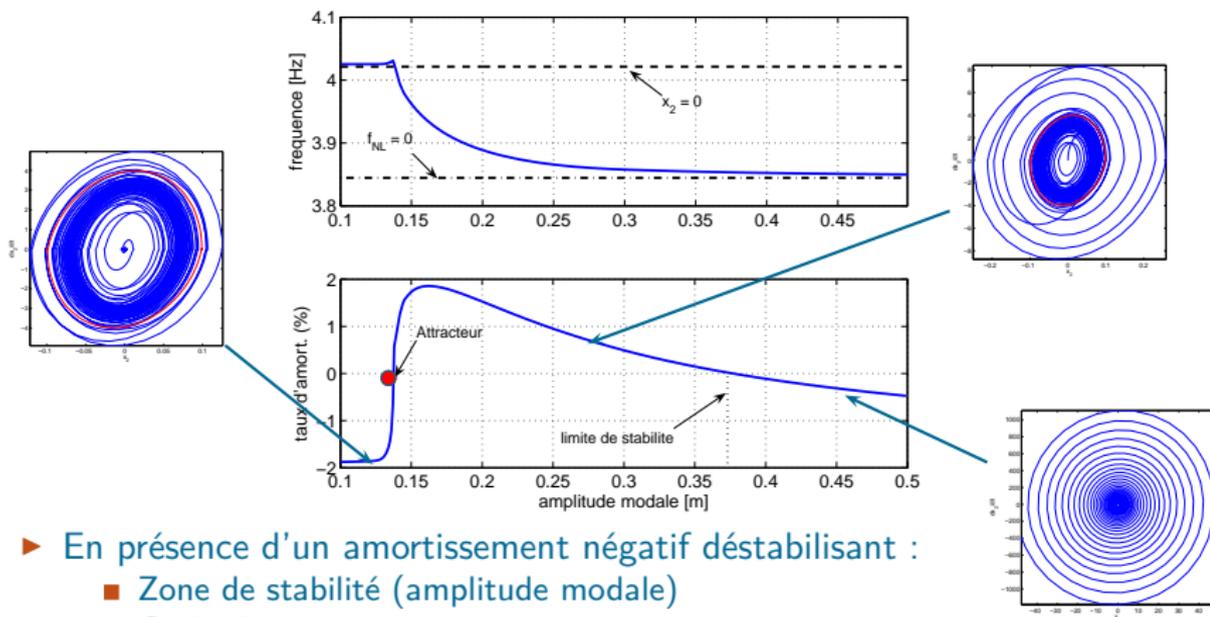
- Paramètres modaux (fréquence et taux d'amortissement) :



- En présence d'un amortissement négatif déstabilisant :
 - Zone de stabilité (amplitude modale)
 - Cycles limites



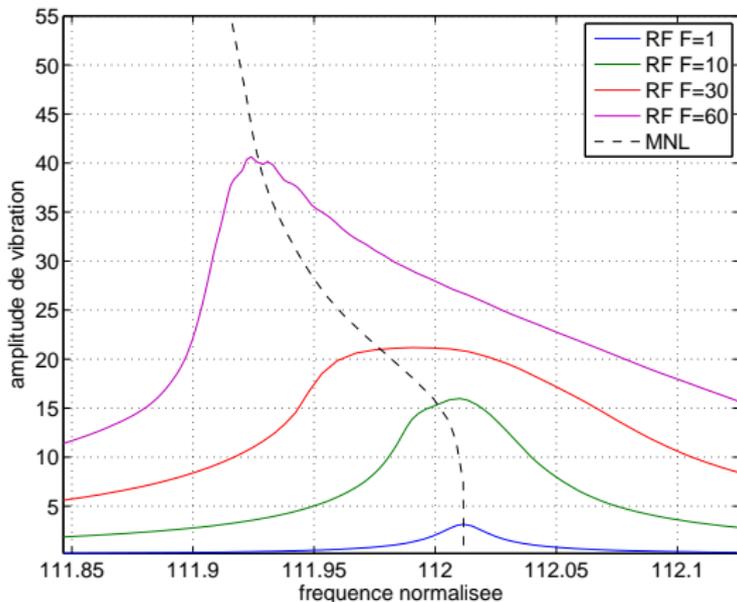
- Paramètres modaux (fréquence et taux d'amortissement) :



- En présence d'un amortissement négatif déstabilisant :
 - Zone de stabilité (amplitude modale)
 - Cycles limites

Deux approches possibles :

- ▶ Calcul direct : $Z(\omega) \mathbf{X} + \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{P}$
- ▶ Synthèse possible de réponses forcées non-linéaires à partir des paramètres modaux



Introduction

Dynamique des roues aubagées

Analyse non-linéaire fréquentielle

Étude d'amortisseurs non-linéaires

Joncs de friction : étude numérique

Joncs de friction : étude expérimentale

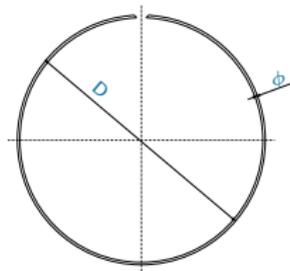
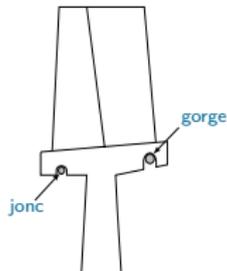
Pompage énergétique

Conclusions et perspectives

Amortissement par joncs de friction

Problématique : les structures monoblocs sont très peu amorties

Solution technologique étudiée : joncs de friction



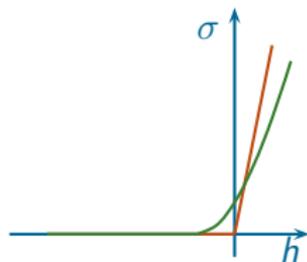
Modélisation :

- ▶ Disque aubagé : modèle EF réduit
 - nœuds de contact
 - nœuds d'excitation / observation
- ▶ Jonc : Poutre circulaire 3D
- ▶ Symétrie cyclique

Modélisation du contact

Contact :

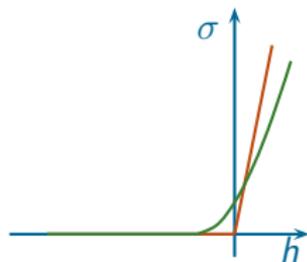
- ▶ Nœuds à nœuds
- ▶ Unilatéral
- ▶ Pénalité



Modélisation du contact

Contact :

- ▶ Nœuds à nœuds
- ▶ Unilatéral
- ▶ Pénalité

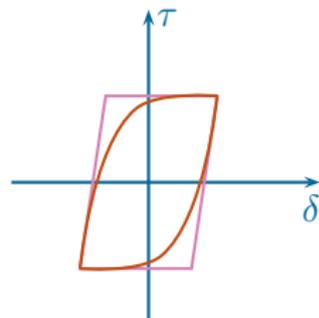


Frottement :

- ▶ Lois macroscopiques
- ▶ Effets microscopiques

$$\tau = f(\dot{\delta}, \sigma, z, \dots)$$

$$\dot{z} = g(\sigma, \dot{\delta}, z, \dots)$$



z : variable interne caractérisant l'état microscopique de la surface d'interaction

Ex. : modèle de Dahl, Bouc-Wen, LuGre...

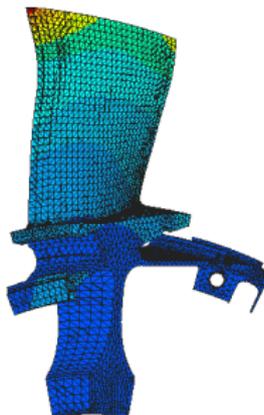
Analyse modale

Exemple industriel :

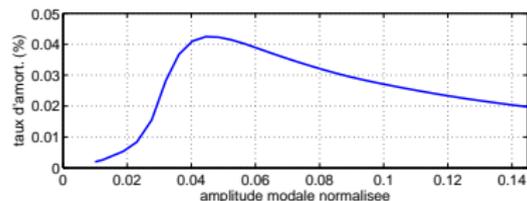
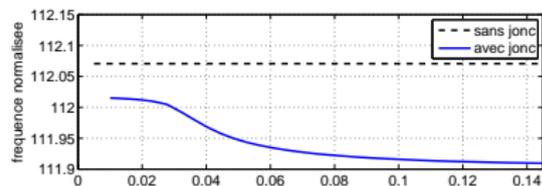
DAM de CoHP



Mode 2F à 4 DN



Paramètres modaux :



Analyse modale

Exemple industriel :

DAM de CoHP

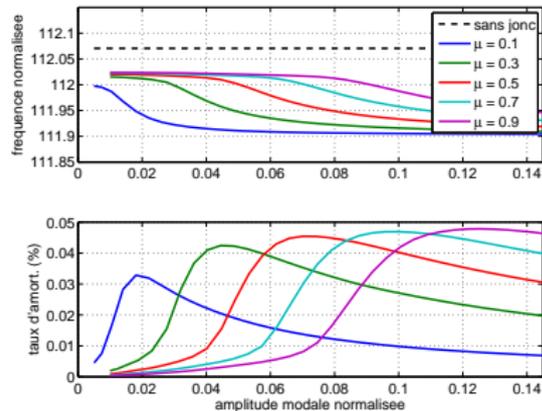


Mode 2F à 4 DN



Études d'influence :

Coefficient de frottement



Analyse modale

Exemple industriel :

DAM de CoHP

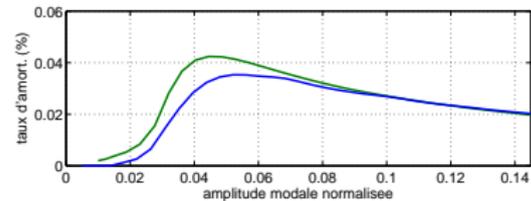
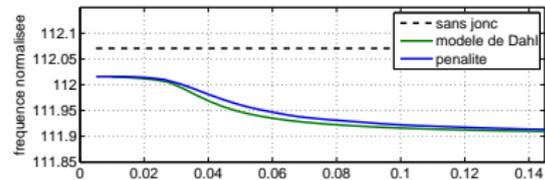


Mode 2F à 4 DN



Études d'influence :

Modèle de frottement



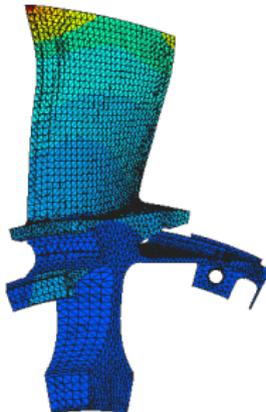
Analyse modale

Exemple industriel :

DAM de CoHP

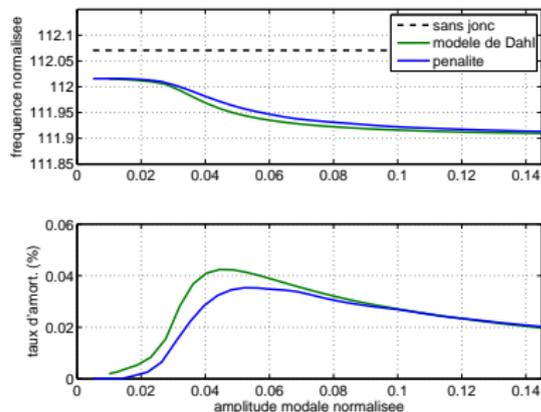


Mode 2F à 4 DN



Études d'influence :

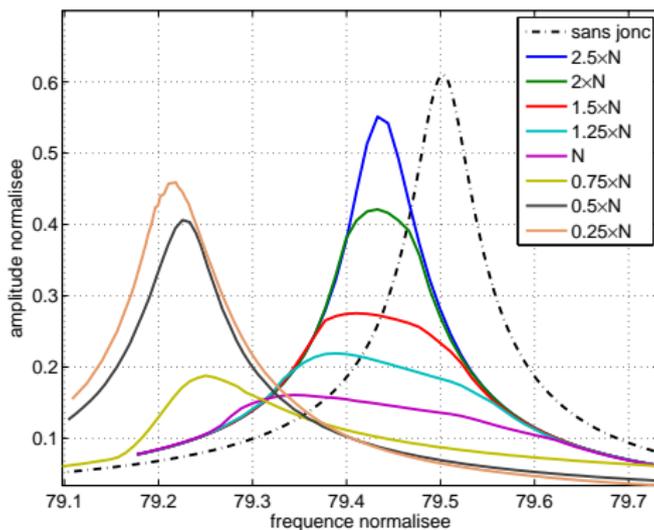
Modèle de frottement



Avantages de l'approche modale :

- ▶ Prédiction directe de l'efficacité d'amortissement
- ▶ Études paramétriques
- ▶ Prédiction « directe » de l'effet stabilisant de l'amortissement par frottement et des **cycles limites**

Exemple : influence de l'effort normal de contact (N)



Règles de conception :

- ▶ l'efficacité du jonc dépend de la participation de sa zone d'implantation du jonc au mouvement global
- ▶ **Compromis** : efficacité d'amortissement / plage de fonctionnement

Étude expérimentale

Objectifs :

- ▶ Évaluation des performances amortissantes
- ▶ Compréhension des phénomènes d'amortissement par frottement
- ▶ Validation et calibration les outils de simulation

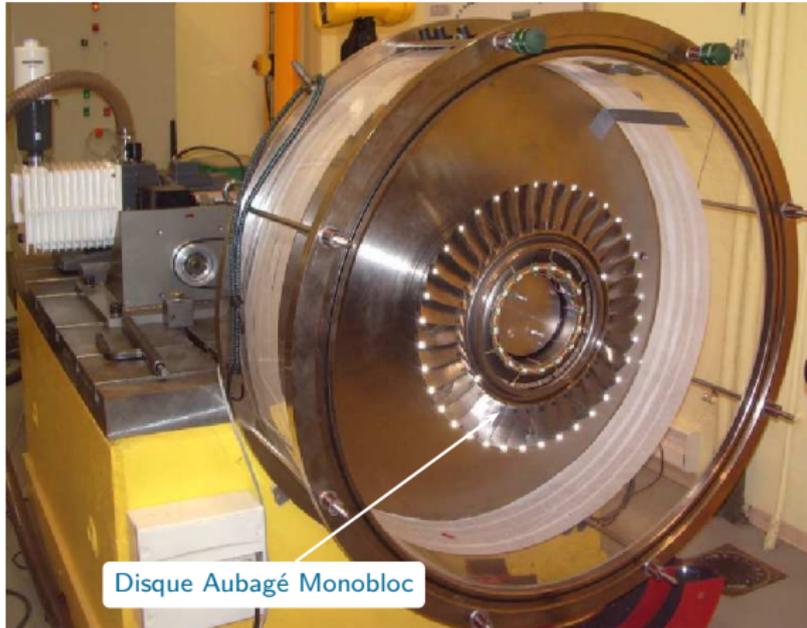
Étude expérimentale

Objectifs :

- ▶ Évaluation des performances amortissantes
- ▶ Compréhension des phénomènes d'amortissement par frottement
- ▶ Validation et calibration les outils de simulation

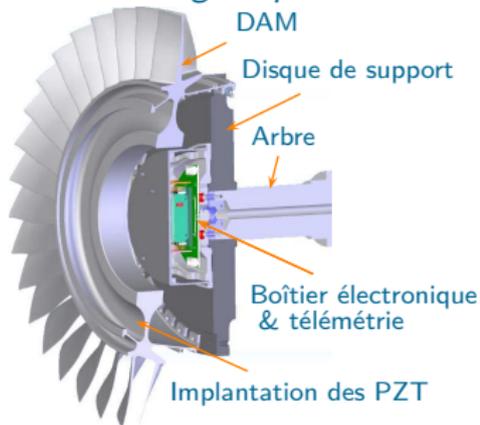
Méthodes expérimentales :

- ▶ Config. d'essais :
 - sous vide
 - en rotation
- ▶ Excitation :
 - piézoélectrique
 - à diam. nodaux
- ▶ Instrumentation :
 - jauges de déf.
 - télémétrie

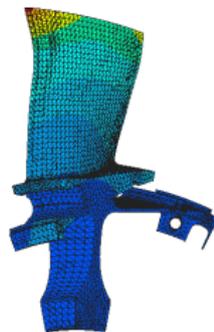


Étude expérimentale (2)

Détail du montage expérimental



Mode cible : 2F, 4 diamètres



Implantation des joncs

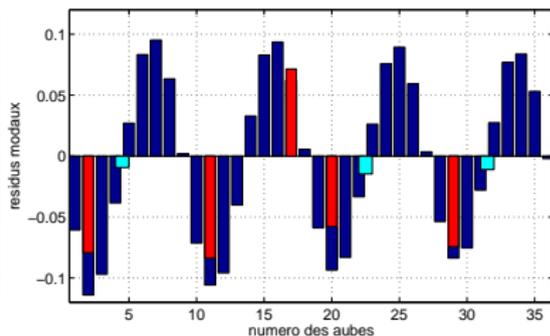
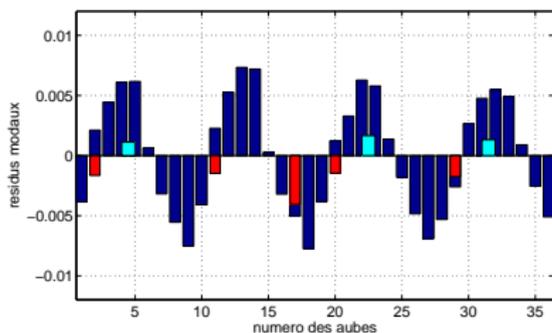
Objectifs :

- ▶ Études phénoménologiques et paramétriques
 - Vitesse de rotation
 - Niveau d'excitation
- ▶ Comparaison calculs-essais

Analyses préliminaires

1 Analyse modale linéaire à l'arrêt

■ Modes cibles (2F-4DN) identifiés



■ : laser - pale, ■ : jauge - pale, ■ : jauge - plate-forme

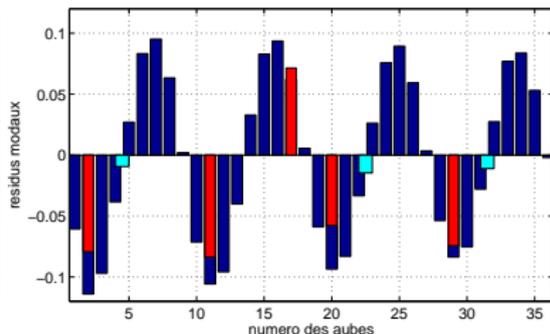
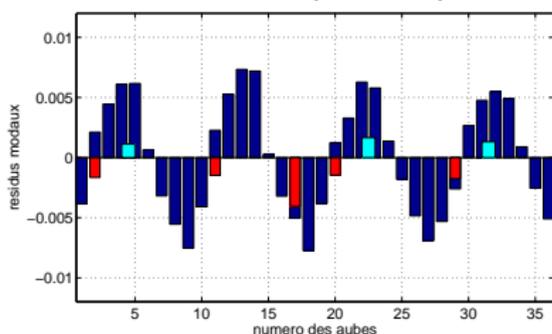
■ Désaccordage : xxx

■ Amortissement : xxx

Analyses préliminaires

1 Analyse modale linéaire à l'arrêt

■ Modes cibles (2F-4DN) identifiés



■ : laser - pale, ■ : jauge - pale, ■ : jauge - plate-forme

■ Désaccordage : xxx

■ Amortissement : xxx

2 Calibration des données mesurées

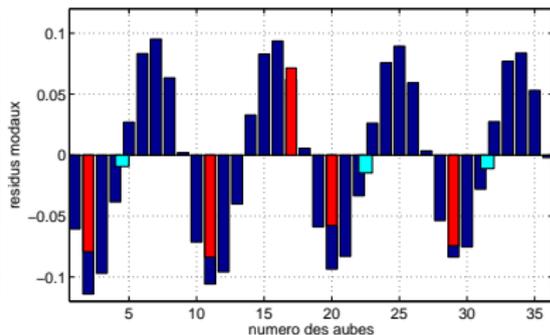
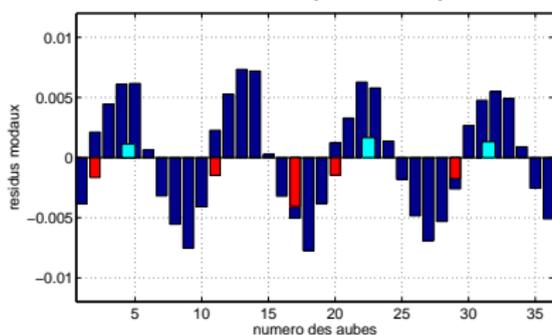
■ déformations des pales instrumentées / déformation max sur la roue

■ transfert déplacements / déformations

Analyses préliminaires

1 Analyse modale linéaire à l'arrêt

■ Modes cibles (2F-4DN) identifiés



■ : laser - pale, ■ : jauge - pale, ■ : jauge - plate-forme

■ Désaccordage : xxx

■ Amortissement : xxx

2 Calibration des données mesurées

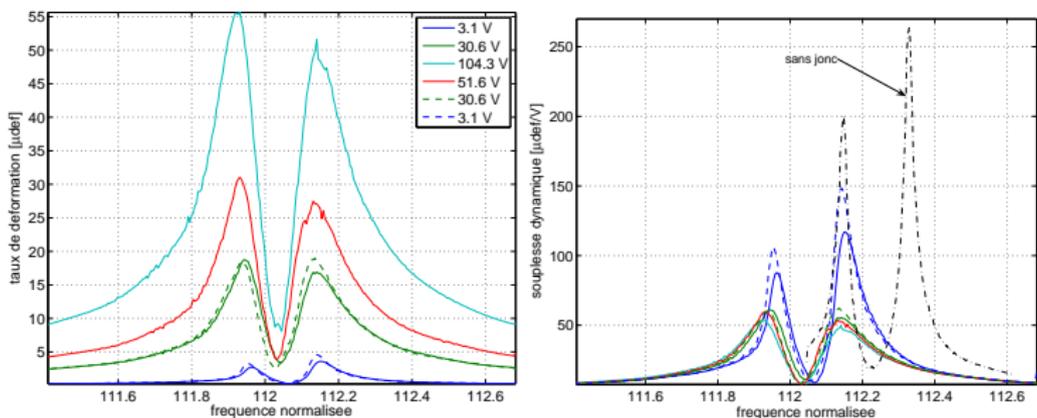
■ déformations des pales instrumentées / déformation max sur la roue

■ transfert déplacements / déformations

3 Vérification de la reproductibilité en présence de non-linéarités

Résultats expérimentaux (1)

Essai à vitesse fixe (1500 tr/min), un jonc, plusieurs niveaux d'excitation :

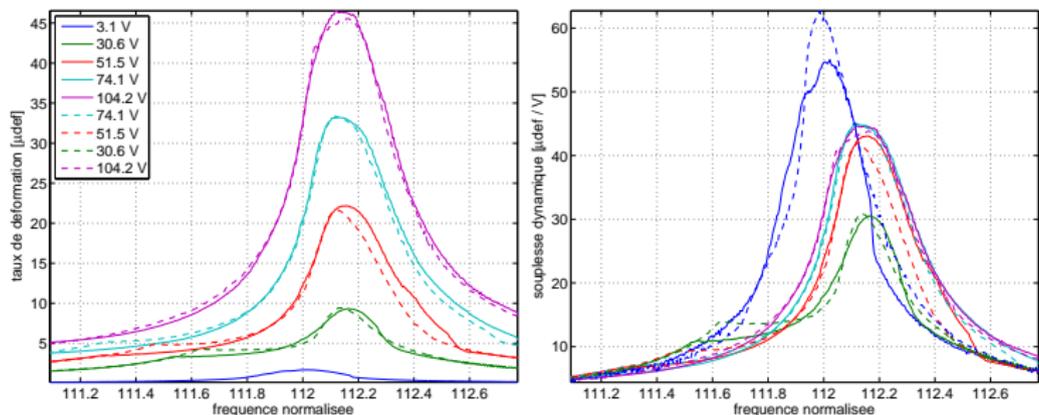


Phénomélogie :

- ▶ effets non-linéaires & atténuation des niveaux vibratoires
 - ▶ décalage des fréquences de résonances vers les basses fréquences
- ⇒ qualitativement conforme aux prédictions

Résultats expérimentaux (2)

Basse vitesse (1000 tr/min), plusieurs niveaux d'excitation :



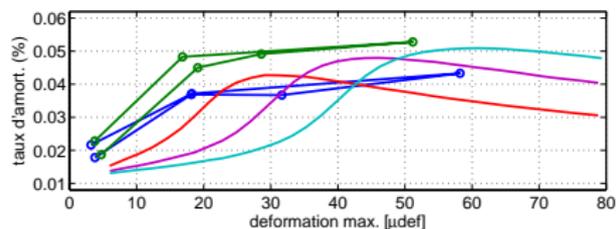
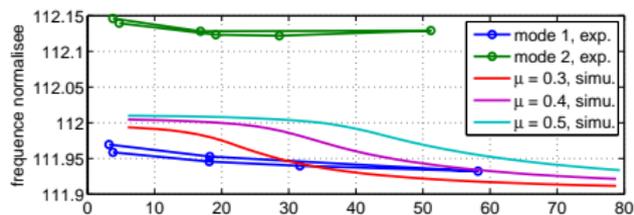
Phénomélogie :

- ▶ évolution différente des fréquences de résonance
 - ▶ effets non-linéaires plus importants (décollement, impacts, usure, ...)
- ⇒ complexe et difficilement reproductible numériquement

Comparaison avec la modélisation

Comparaison des paramètres modaux :

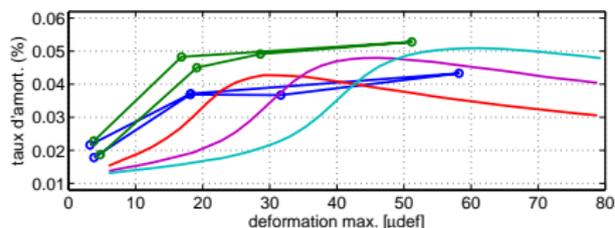
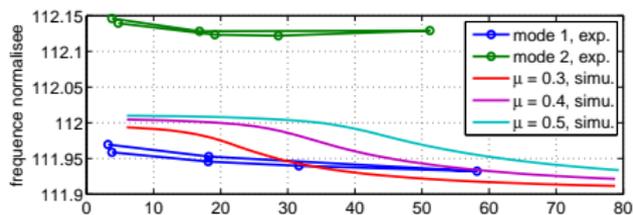
- ▶ Lissage linéaire des FRF
- ▶ Modèle de frottement de Dahl
- ▶ Plusieurs coefficients de frottement



Comparaison avec la modélisation

Comparaison des paramètres modaux :

- ▶ Lissage linéaire des FRF
- ▶ Modèle de frottement de Dahl
- ▶ Plusieurs coefficients de frottement



Analyse :

- ▶ Incertitudes expérimentales (niveaux)
- ▶ Limitations de la modélisation (désaccordage, discrétisation, ...)

Conclusion

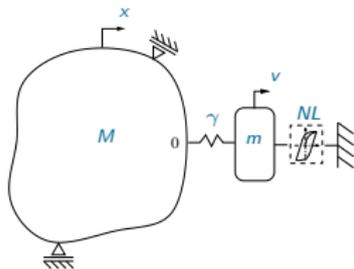
Les ordres de grandeur et les évolutions des paramètres modaux théoriques et expérimentales sont comparables

Pompage énergétique

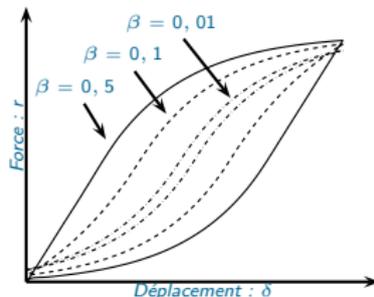
Principe :

Absorber puis dissiper l'énergie vibratoire d'une structure principale à l'aide d'un petit dispositif passif fortement non-linéaire

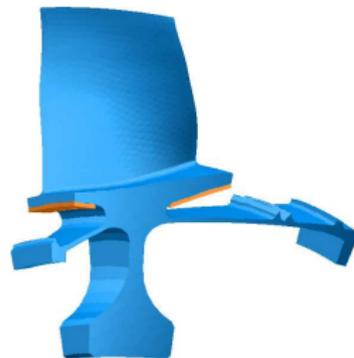
Système étudié



Non-linéarité de Bouc-Wen :



Application potentielle :

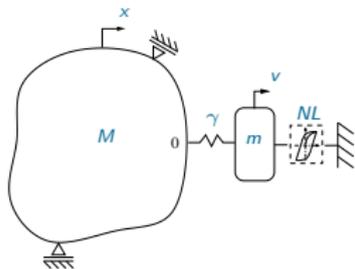


Pompage énergétique

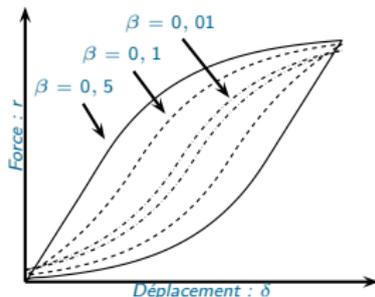
Principe :

Absorber puis dissiper l'énergie vibratoire d'une structure principale à l'aide d'un petit dispositif passif fortement non-linéaire

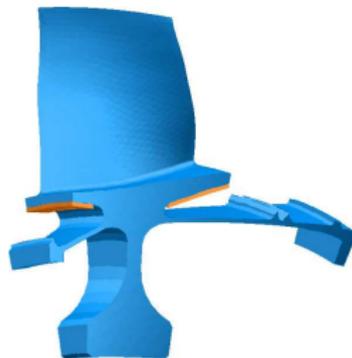
Système étudié



Non-linéarité de Bouc-Wen :



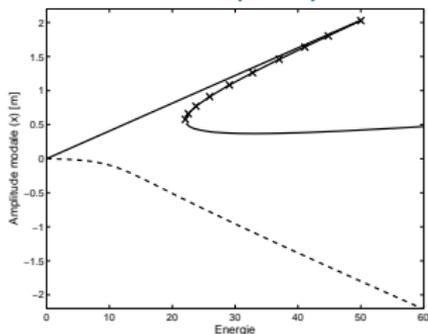
Application potentielle :



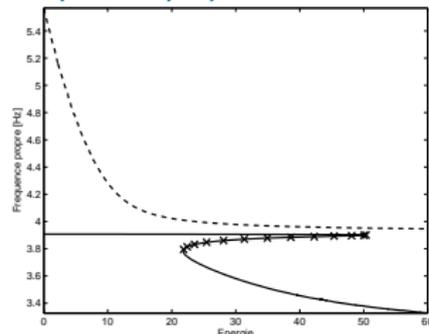
- ▶ Mise en œuvre des approches fréquentielles développées
 - Analyse modale
 - Comparaison et validation par analyses temporelles (régime transitoire, *flottement*)
- ▶ Critères de conception

Analyse modale et énergétique

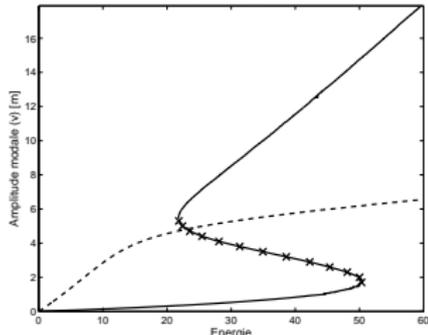
Oscillateur principal



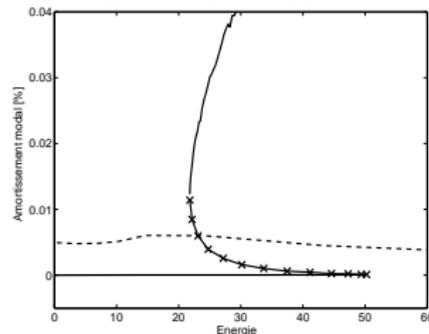
Fréquences propres



Absorbeur



Amortissements modaux

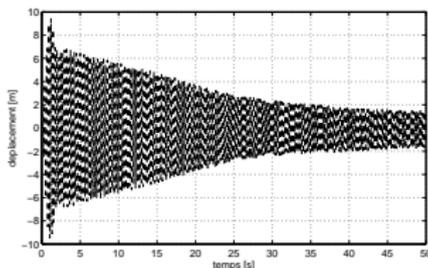
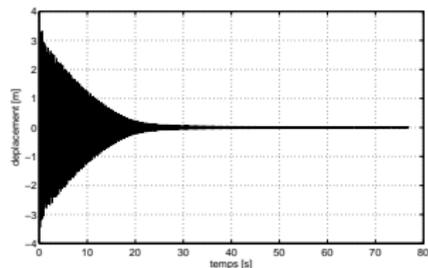


- ▶ Dépendance énergétique
- ▶ Nécessite une non-linéarité faiblement dissipative

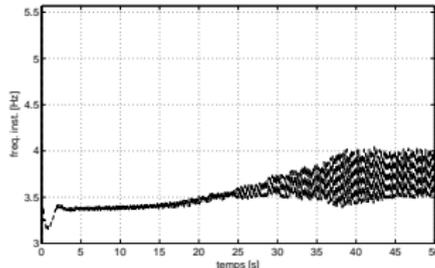
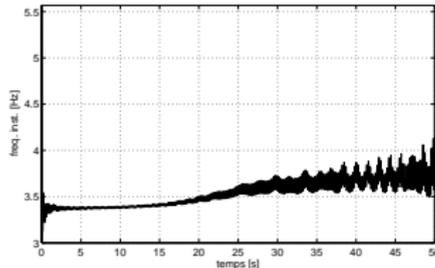
Régime transitoire

- ▶ Réponse impulsionnelle : $\dot{x}(t=0) = \sqrt{2h}$, $x(t=0) = 0$

Réponse temporelle



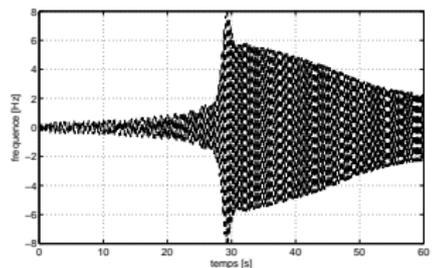
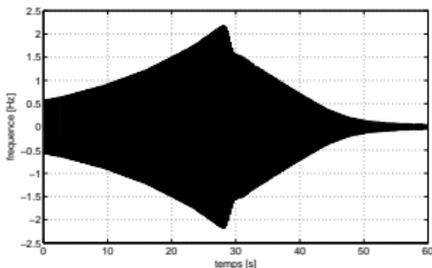
Fréquence instantanée



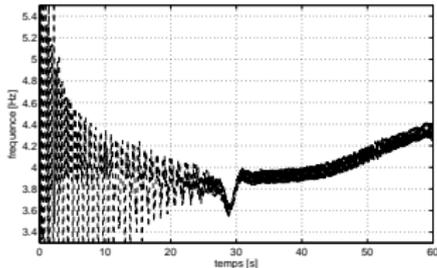
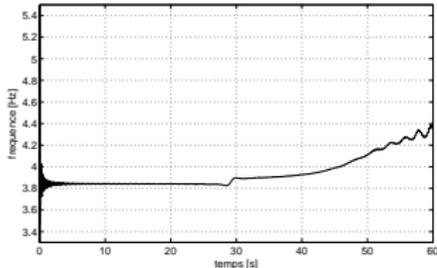
- ▶ le pompage énergétique a lieu au delà d'un **niveau d'énergie seuil**
- ▶ comportement conforme aux prédictions des modes non-linéaires

- ▶ En présence d'un amortissement négatif : $\xi = -0.2\%$

Réponse temporelle



Fréquence instantanée



- ▶ **stabilisation** au delà d'une amplitude seuil
- ▶ l'amortissement négatif et celui de la non-linéarité se compensent

Compromis : pompage énergétique / dissipation / potentiel stabilisant

Introduction

Dynamique des roues aubagées

Analyse non-linéaire fréquentielle

Étude d'amortisseurs non-linéaires

Conclusions et perspectives

Principales contributions

- Modélisation multi-étage
 - Symétrie cyclique multi-étage
 - **Industrialisation** dans un code EF

Principales contributions

- ① Modélisation multi-étage
 - Symétrie cyclique multi-étage
 - **Industrialisation** dans un code EF
- ② Analyse non-linéaire et étude d'amortisseurs non-linéaires
 - Méthode des **modes non-linéaires complexes**
 - Modélisation des joncs de friction
 - Développement d'un banc d'essais
 - Applications sur des **cas moteurs**, industrialisation
 - Étude du **pompage énergétique** pour des **non-linéarités hystérétiques**

Perspectives scientifiques et industrielles

- ① Analyses multi-étages :
 - Critères et pratiques de conception multi-étage
 - Intégration du désaccordage (aléatoire, volontaire)

Perspectives scientifiques et industrielles

- 1. Analyses multi-étages :
 - Critères et pratiques de conception multi-étage
 - Intégration du désaccordage (aléatoire, volontaire)
- 2. Analyse non-linéaire et modélisation des interfaces :
 - Analyses de stabilité et étude des bifurcations (approches multi-fréquentielles)
 - Couplage aéroélastique (calcul aérodynamique fréquentiel)
 - Enrichissement des modèles de contact et prise en compte des effets d'usure

Perspectives scientifiques et industrielles

- 1 Analyses multi-étages :
 - Critères et pratiques de conception multi-étage
 - Intégration du désaccordage (aléatoire, volontaire)
- 2 Analyse non-linéaire et modélisation des interfaces :
 - Analyses de stabilité et étude des bifurcations (approches multi-fréquentielles)
 - Couplage aéroélastique (calcul aérodynamique fréquentiel)
 - Enrichissement des modèles de contact et prise en compte des effets d'usure
- 3 Étude d'amortisseurs non-linéaires :
 - Joncs de friction*** :
 - Études expérimentales supplémentaires
 - Corrélation calculs-essais
 - Pompage énergétique*** :
 - Réalisation technologique et application à des structures complexes
 - Amélioration des modélisations et de leur représentativité



*Soutenance de thèse
en vue de l'obtention du titre de
Docteur de l'École Centrale de Lyon
Spécialité mécanique*



Étude d'amortisseurs non-linéaires appliqués aux roues aubagées et aux systèmes multi-étages

Denis Laxalde

Jury d'examen :

A. Berlioz, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse
J.-C. Golinval, Professeur, Université de Liège
J.-P. Lombard, Adjoint méthodes en mécanique, Snecma
C. Pierre, Professeur, Université McGill de Montréal
C. Gibert, Ingénieur de Recherche, École Centrale de Lyon
F. Thouverez, Professeur, École Centrale de Lyon

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse