

Simulation de l'interaction rotor/stator sur des turbomachines aéronautiques en configuration non-accidentelle

Alain Batailly

Directeur de thèse
Co-encadrants

P. CARTRAUD
M. LEGRAND
C. PIERRE

Professeur, École Centrale de Nantes
Assistant chercheur, Université McGill
Doyen de la faculté de génie, Université McGill

Rapporteurs

E. BALMES
F. THOUVEREZ

Professeur, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Professeur, École Centrale de Lyon

Examineurs

M. BERTHILLIER
J.-P. LOMBARD
B. PESEUX

Professeur, Université de Franche-Comté
Ingénieur de Recherche, Snecma
Professeure émérite, École Centrale de Nantes

19 décembre 2008



Snecma
Groupe SAFRAN



Plan de la présentation

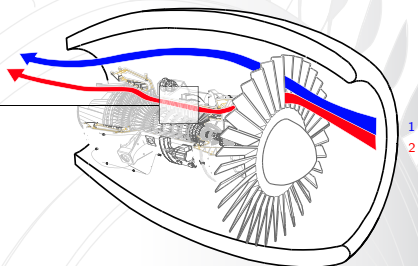
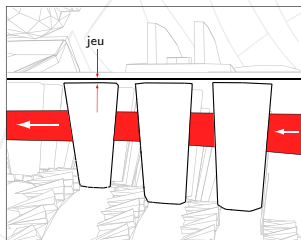


- 1 Introduction
- 2 Réduction modale
- 3 Interaction modale 2D
- 4 Interaction modale 3D (2 diamètres)
- 5 Conclusion

Introduction



- Optimisation du rendement des turbo-machines aéronautiques
- Diminution des pertes aérodynamiques
- Réduction du jeu aube/carter.



⇒ ↗ contacts aubes/carter et phénomène d'interaction modale

Réduction modale : justification



- Modèles éléments finis de grande dimension (10^5 , 10^6 ddl...)
- Simulations dynamiques non linéaires
- Choix de procédures explicites (nombreux pas de temps)
- Nécessité d'optimiser les temps de calculs en minimisant la taille des matrices utilisées (tout en conservant la dynamique impliquée dans le phénomène d'interaction)

Réduction modale : justification



- Modèles éléments finis de grande dimension (10^5 , 10^6 ddl...)
- Simulations dynamiques non linéaires
- Choix de procédures explicites (nombreux pas de temps)
- Nécessité d'optimiser les temps de calculs en minimisant la taille des matrices utilisées (tout en conservant la dynamique impliquée dans le phénomène d'interaction)

⇒ Méthode de réduction modale (*CMS Component Mode Synthesis*)

Introduction



Objectifs :

- Évaluer la performance de méthodes de synthèse modale pour l'étude d'interaction modale (phénomène hautement non-linéaire)
- Déterminer la méthode de réduction modale la mieux adaptée à l'étude
- Fournir un code d'interaction adapté à l'environnement industriel Snecma

Plan de la présentation



- 1 Introduction
- 2 Réduction modale**
- 3 Interaction modale 2D
- 4 Interaction modale 3D (2 diamètres)
- 5 Conclusion

Réduction modale : principe



- Réduction modale \iff projection de l'équation du mouvement

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

dans une base adaptée au problème étudié.

- Définition d'une matrice de passage rectangulaire Φ
- Changement de variable $\mathbf{x} = \Phi\mathbf{x}_r$ et projection

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{\mathbf{x}}_r + \Phi^T \mathbf{D} \Phi \dot{\mathbf{x}}_r + \Phi^T \mathbf{K} \Phi \mathbf{x}_r = \Phi^T \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_r = \Phi^T \mathbf{Y} \Phi, \quad \mathbf{Y} = \mathbf{K}, \mathbf{D} \text{ ou } \mathbf{M}$$

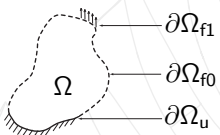
- Équation du mouvement réduite

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{D}_r \dot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{K}_r \mathbf{x}_r = \mathbf{F}_r \quad (3)$$

Réduction modale : principe



Méthode CMS \implies découpage de la structure étudiée en sous-domaines



$$\text{dels} \ll \text{i} \text{ntérieurs} \gg = \Omega \cup \partial\Omega_{f0}$$

$$\text{dels} \ll \text{f} \text{rontières} \gg = \partial\Omega_u \cup \partial\Omega_{f1}$$

La frontière dépend de la méthode considérée et du type de simulation réalisée

Réorganisation :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{if} \\ \mathbf{K}_{fi} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{if} \\ \mathbf{M}_{fi} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix}$$

Réduction modale : choix de la méthode



- ① Méthodes à interfaces **fixes**
 - ▶ Craig-Bampton [Craig 1968]
 - ▶ Benfield-Hruda [Benfield 1971]...
- ② Méthodes à interfaces **libres**
 - ▶ Craig-Martinez [Martinez 1984]
 - ▶ MacNeal [MacNeal 1971]
 - ▶ Rubin [Rubin 1974]...
- ③ Méthodes à interfaces **mixtes**
- ④ Méthodes à interfaces **chargées**

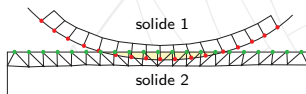
Réduction modale : choix de la méthode



Compatibilité algorithme de contact/modèles réduits

⇒ nécessité d'avoir des ddl physiques dans le modèle réduit.

⇒ estimation des distances entre les structures et possibilité de correction des déplacements



- ddl frontière solide 1
- ddl frontière solide 2

Conditions de Signorini :

$$\lambda \geq 0$$

$$g \geq 0$$

$$\lambda g = 0$$

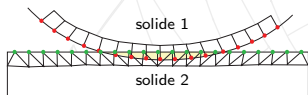
Réduction modale : choix de la méthode



Compatibilité algorithme de contact/modèles réduits

⇒ nécessité d'avoir des ddl physiques dans le modèle réduit.

⇒ estimation des distances entre les structures et possibilité de correction des déplacements



- ddl frontière solide 1
- ddl frontière solide 2

Conditions de Signorini :

$$\lambda \geq 0$$

$$g \geq 0$$

$$\lambda g = 0$$

Méthodes de *Craig-Bampton* et de *Craig-Martinez*

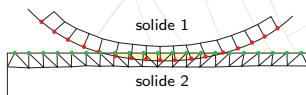
Réduction modale : choix de la méthode



Compatibilité algorithmes de contact/modèles réduits

⇒ nécessité d'avoir des ddl physiques dans le modèle réduit.

⇒ estimation des distances entre les structures et possibilité de correction des déplacements



- ddl frontière solide 1
- ddl frontière solide 2

Conditions de Signorini :

$$\lambda \geq 0$$

$$g \geq 0$$

$$\lambda g = 0$$

Méthodes de *Craig-Bampton* et de *Craig-Martinez*

- *Méthode de Craig-Bampton* : Samcef, et [Legrand 2005]

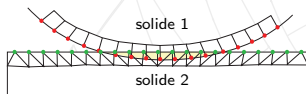
Réduction modale : choix de la méthode



Compatibilité algorithme de contact/modèles réduits

⇒ nécessité d'avoir des ddl physiques dans le modèle réduit.

⇒ estimation des distances entre les structures et possibilité de correction des déplacements



- ddl frontière solide 1
- ddl frontière solide 2

Conditions de Signorini :

$$\lambda \geq 0$$

$$g \geq 0$$

$$\lambda g = 0$$

Méthodes de *Craig-Bampton* et de *Craig-Martinez*

- *Méthode de Craig-Bampton* : Samcef, et [Legrand 2005]
- *Méthode de Craig-Martinez* : objectif de l'étude, évaluation interfaces libres

Réduction modale : Craig-Bampton



Craig-Bampton

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_s & \Phi_{e,\eta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

- Modes **s**tatiques : Φ_s

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{if} \\ \mathbf{K}_{fi} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_s \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{ii}\Phi_s + \mathbf{K}_{if}\mathbf{I} = \mathbf{0} \implies \Phi_s = -\mathbf{K}_{ii}^{-1}\mathbf{K}_{if}$$

- Modes **e**ncastés : Φ_e

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{if} \\ \mathbf{K}_{fi} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{if} \\ \mathbf{M}_{fi} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_e \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

paramètre de réduction : η (colonnes de Φ_e)

Craig-Martinez

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{if}\mathbf{R}_{ff}^{-1} & \Phi_{1i} - \mathbf{R}_{if}\mathbf{R}_{ff}^{-1}\Phi_{1f} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

- Modes libres

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{if} \\ \mathbf{K}_{fi} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{if} \\ \mathbf{M}_{fi} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Phi \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

- Correction pseudo-statique

paramètre de réduction : ϕ (colonnes de Φ)

Réduction modale : modèles industriels



Calcul du terme de flexibilité résiduelle :

$$R = K^{-1} - \Phi_1 \Omega_1^{-1} \Phi_1^T$$

Approximation sur K : les termes de couplage sont négligés

- approximation forte
- **vérification de la convergence des modèles réduits**
- prise en compte pour l'interprétation des résultats

Réduction modale : modèles industriels



Calcul du terme de flexibilité résiduelle :

$$R = K^{-1} - \Phi_1 \Omega_1^{-1} \Phi_1^T$$

- inversion de la matrice raideur du modèle EF

Approximation sur K : les termes de couplage sont négligés

- approximation forte
- **vérification de la convergence des modèles réduits**
- prise en compte pour l'interprétation des résultats

Réduction modale : modèles industriels



Calcul du terme de flexibilité résiduelle :

$$\mathbf{R} = \mathbf{K}^{-1} - \Phi_1 \Omega_1^{-1} \Phi_1^T$$

- inversion de la matrice raideur du modèle EF
- une procédure de réduction par modèle réduit

Approximation sur \mathbf{K} : les termes de couplage sont négligés

- approximation forte
- **vérification de la convergence des modèles réduits**
- prise en compte pour l'interprétation des résultats

Réduction modale : modèles industriels



Calcul du terme de flexibilité résiduelle :

$$R = K^{-1} - \Phi_1 \Omega_1^{-1} \Phi_1^T$$

- inversion de la matrice raideur du modèle EF
- une procédure de réduction par modèle réduit
- nécessité de minimiser les temps de calculs

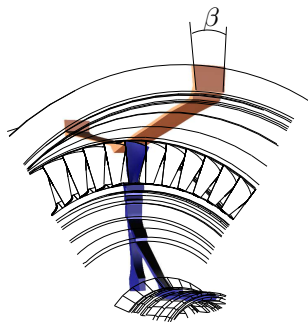
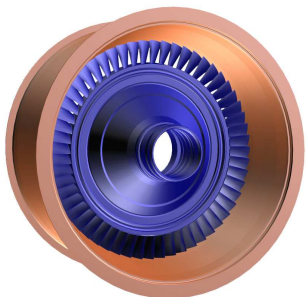
Approximation sur K : les termes de couplage sont négligés

- approximation forte
- **vérification de la convergence des modèles réduits**
- prise en compte pour l'interprétation des résultats

Réduction modale : modèles industriels



Disque aubagé monobloc (DAM) et carter qui l'entoure

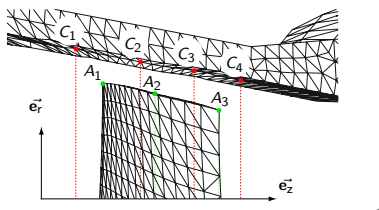


- 56 aubes \implies 56 secteurs pour chaque structure
- $\simeq 2 \cdot 10^6$ ddls pour la roue aubagée
- $\simeq 2 \cdot 10^5$ ddls pour le carter

Réduction modale : modèles industriels



Sélection des nœuds frontières utilisés pour la gestion du contact



- 3 nœuds frontières par secteur de roue
- 8 nœuds frontières par secteur de carter
- Position des nœuds frontières paramétrable

Réduction modale : description des méthodes



Méthode de Craig-Bampton

- modes encastrés

Méthode de Craig-Martinez



Les paramètres de réduction de chaque méthode sont

η : nombre de modes encastrés pour la méthode de Craig-Bampton

ϕ : nombre de modes libres pour la méthode de Craig-Martinez

Réduction modale : description des méthodes



Méthode de Craig-Bampton

- modes encastrés
- modes statiques

Méthode de Craig-Martinez



Les paramètres de réduction de chaque méthode sont

η : nombre de modes encastrés pour la méthode de Craig-Bampton

ϕ : nombre de modes libres pour la méthode de Craig-Martinez

Réduction modale : description des méthodes

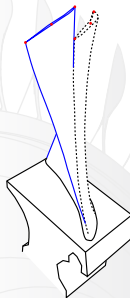


Méthode de Craig-Bampton

- modes encastrés
- modes statiques

Méthode de Craig-Martinez

- modes libres + CPS



Les paramètres de réduction de chaque méthode sont

η : nombre de modes encastrés pour la méthode de Craig-Bampton

ϕ : nombre de modes libres pour la méthode de Craig-Martinez

Réduction modale : description des méthodes

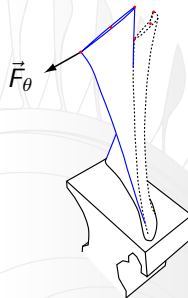


Méthode de Craig-Bampton

- modes encastrés
- modes statiques

Méthode de Craig-Martinez

- modes libres + CPS
- (modes d'attache)



Les paramètres de réduction de chaque méthode sont

η : nombre de modes encastrés pour la méthode de Craig-Bampton

ϕ : nombre de modes libres pour la méthode de Craig-Martinez

Réduction modale : convergence



- Critère en fréquence propre (%) :

$$\frac{f_{\text{CMS}} - f_{\text{EF}}}{f_{\text{EF}}} \times 100 \quad (6)$$

convergence en termes de *valeurs propres*

- Indicateur d'erreur en énergie de déformation [Bobillot 2002] :

$$\mathbf{r}_i = [\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}] \Phi \mathbf{z}_i \neq \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{s,i} = \hat{\mathbf{K}}^{-1} \mathbf{r}_i \quad (8)$$

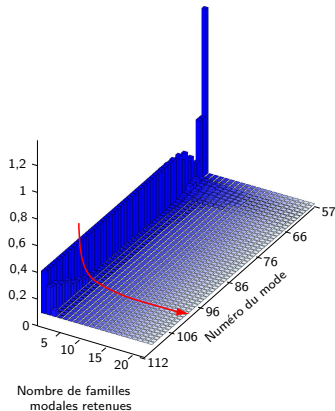
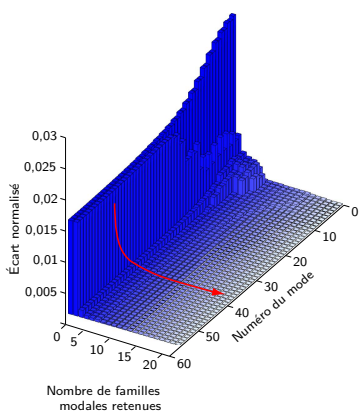
$$\epsilon_{i,1} = \frac{\mathbf{r}_{s,i}^T \mathbf{K} \mathbf{r}_{s,i}}{(\Phi \mathbf{z}_i)^T \mathbf{K} \Phi \mathbf{z}_i} \quad (9)$$

convergence en termes de *vecteurs propres*

Réduction modale : convergence



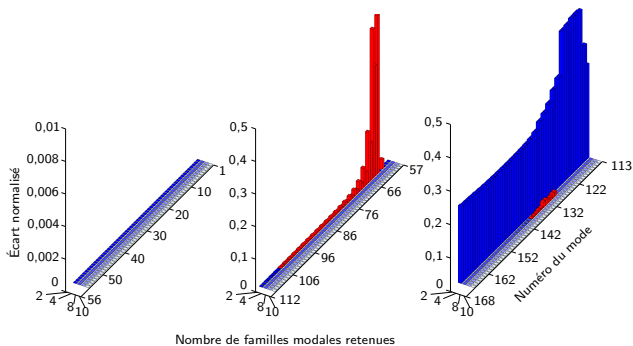
Convergence en fréquences propres : Roue aubagée / Méthode de Craig-Bampton



Réduction modale : convergence



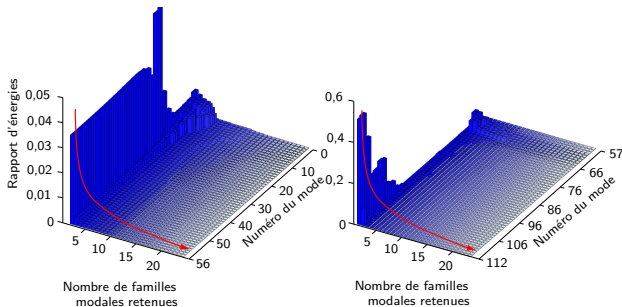
Convergence en fréquences propres : Roue aubagée / Méthode de Craig-Martinez



Réduction modale : convergence



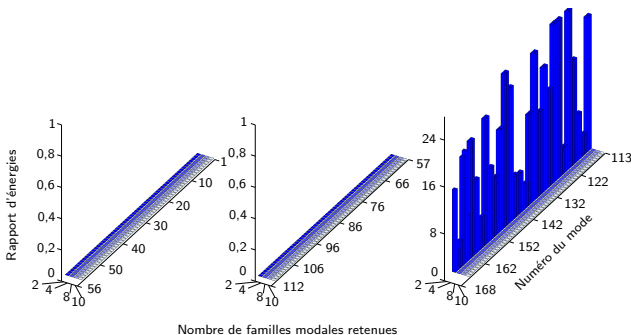
Convergence des indicateurs d'erreur en énergie de déformation : Roue aubagée / Méthode de Craig-Bampton



Réduction modale : convergence



Convergence des indicateurs d'erreur en énergie de déformation :
Roue aubagée / Méthode de Craig-Martinez



Réduction modale : convergence



Conclusion

- Deux structures réduites avec deux méthodes de réduction différentes
- Convergence de l'ensemble des modèles réduits vers les modèles éléments finis ($\eta \nearrow$ et $\phi \nearrow$)
- Complémentarité des critères de convergence
- Influence de l'approximation réalisée mais bonne convergence des modèles réduits
- Résultats pour une simulation linéaire, ϕ et η ne peuvent pas être anticipés pour une simulation non-linéaire

Plan de la présentation



- 1 Introduction
- 2 Réduction modale
- 3 Interaction modale 2D**
- 4 Interaction modale 3D (2 diamètres)
- 5 Conclusion

Interaction 2D



Objectifs

- 1 Validation des simulations de contact en fonction des paramètres de réduction
- 2 Étude de l'influence des restrictions cinématiques sur la détection de régimes d'interaction

interaction 2D : définition



Interaction modale : *configuration dynamique particulière entre deux structures à symétrie cyclique*

Phénomène initié par un ou plusieurs *contacts aube/carter* sur la circonférence des structures

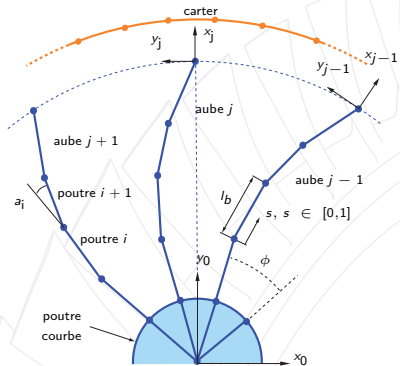
Travaux réalisés sur le sujet :

- [Berthillier 1991] rapport interne Snecma
- [Schmiechen 1997] thèse de doctorat
- [Legrand 2005] thèse de doctorat

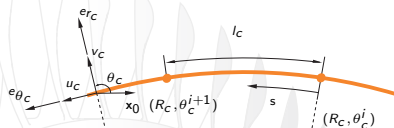
interaction 2D : modèles



Roue aubagée



Carter



Propriétés matériaux : roue aubagée plus raide que le carter

Interaction 2D : description du phénomène



Description du phénomène

Interaction 2D : description du phénomène

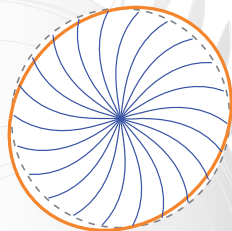


Les travaux précédents ont notamment permis d'identifier certains régimes d'interaction [Legrand 2008].

Observation des distances aubes/carter pour chaque aube au cours d'une simulation

Simulation réalisée :

- Excitation du carter à deux diamètres
- Chargement maintenu sur 0,1 ms
- Les structures sont ensuite libres d'interagir
- Coefficient de frottement : $\mu = 0,2$

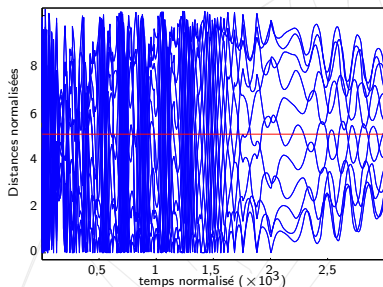


Structures projetées sur leurs deux premiers modes à deux diamètres
Itérations sur Ω

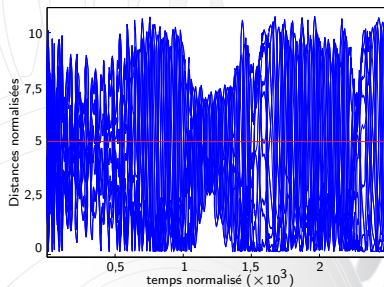
Interaction 2D : description du phénomène



Régime amorti :



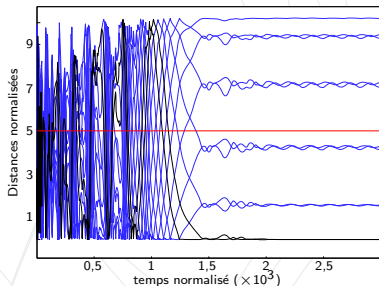
Régime entretenu :



Interaction 2D : description du phénomène



Régime bloqué :



Régime divergent

Lien entre la divisibilité du nombre d'aubes par le nombre de diamètres de l'excitation et le type de régimes observés.

Interaction 2D : CMS / contact



Évaluation des méthodes de réduction

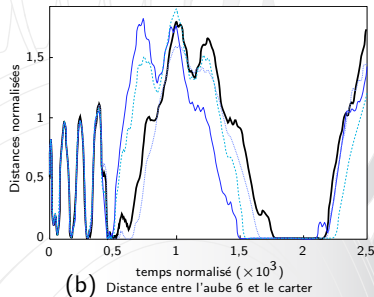
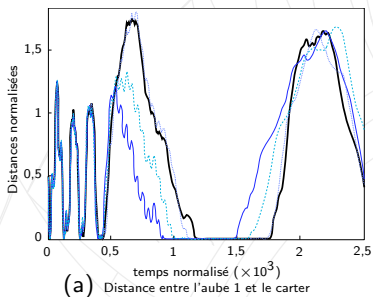
- régime amorti
- régime bloqué
- régime **entretenu**

Interaction 2D : CMS / contact



Évaluation des méthodes CMS avec algorithmes de contact

Régime entretenu : méthode de Craig-Bampton



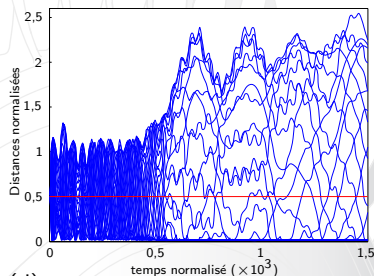
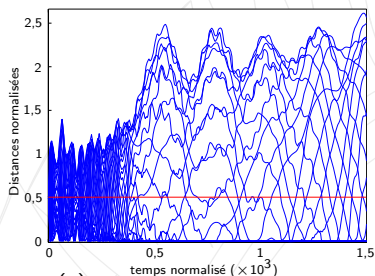
$$\eta = 44 \text{ ---}; \eta = 88 \text{ ---}; \eta = 220 \text{ ---}; u_{ef}(t) \text{ ---}$$

Interaction 2D : CMS / contact



Évaluation des méthodes CMS avec algorithme de contact

Régime entretenu : méthode de Craig-Martinez



Interaction 2D : CMS / contact



Évaluation des méthodes CMS : conclusion sur le cas 2D

- Mise en évidence de deux types de convergence
 - ▶ Convergence *globale* (type de régime simulé)
 - ▶ Convergence *locale* (exactitude des déplacements)
- Résultats encourageants pour tous les régimes avec la méthode de Craig-Bampton
- La méthode de Craig-Martinez converge difficilement pour certains régimes (entretenu)
- Méthode de Craig-Bampton privilégiée pour l'étude des restrictions cinématiques

interaction 2D : organisation de l'étude



Étude de l'influence des restrictions cinématiques

interaction 2D : organisation de l'étude



1 Influence des restrictions cinématiques

- ▶ Réduction des modèles éléments finis
- ▶ Projection du carter sur ses deux premiers modes à n_d diamètres (S_2) et de la roue aubagée (S_1)
- ▶ Étude paramétrique en frottement et vitesse de rotation

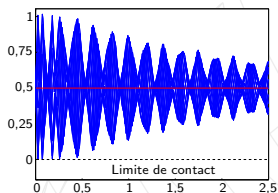
2 Comparaison des résultats obtenus pour chaque cas

Interaction 2D : résultats

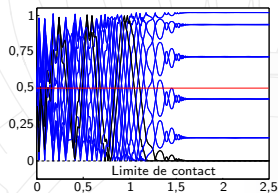


Étude S_1 : Projection de la roue et du carter

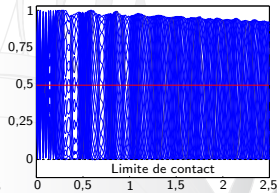
Identification des modes d'interaction :



(e) temps normalisé ($\times 10^3$)
amorti ($n_d=2, \Omega = 1$).



(f) temps normalisé ($\times 10^3$)
bloqué ($n_d=2, \Omega = 1,15$).



(g) temps normalisé ($\times 10^3$)
entretenu ($n_d=3, \Omega = 1,7$).

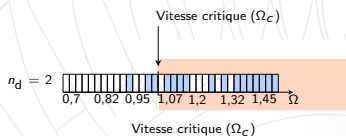
Distances aubes/carter — (— pour les aubes en contact permanent) et jeu initial — pour les différents régimes d'interaction obtenus dans le cadre de l'étude S_1 .

Interaction 2D : résultats



Étude S_1 : Projection de la roue et du carter

Carte des interactions pour une excitation à deux diamètres :

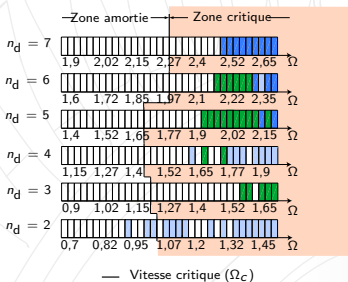


Interaction 2D : résultats



Étude S_1 : Projection de la roue et du carter

Carte des interactions pour une excitation à deux diamètres :



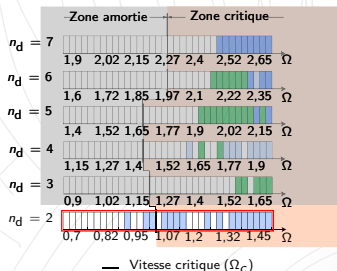
$n_d = 2 \text{ à } 7 \quad \mu = 0,2$:

régime bloqué ■,
 régime entretenu ■
 et régime divergent ■

Interaction 2D : résultats

Étude S_1 : Projection de la roue et du carter

Carte des interactions pour une excitation à deux diamètres :



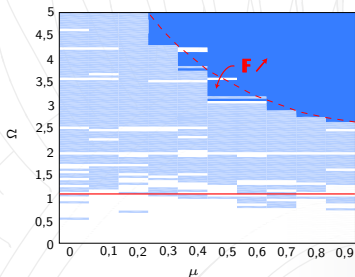
$n_d = 2 \text{ à } 7 \mu = 0,2$:

- régime bloqué ■,
- régime entretenu ■
- et régime divergent ■

Interaction 2D : résultats

Étude S_1 : Projection de la roue et du carter

Carte des interactions pour une excitation à deux diamètres :



Itérations Ω et μ pour $n_d = 2$:

régime bloqué ■

régime divergent ■

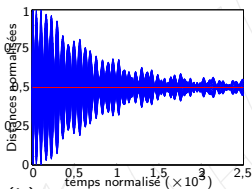
vitesse critique — $\Omega_c = 1,07485$

Interaction 2D : résultats

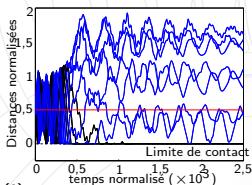


Étude S₂ : Projection du carter seul

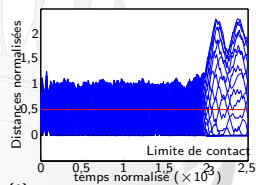
Identification des modes d'interaction :



(h) Régime amorti ($n_d=2$, $\Omega = 1,5$).



(i) Régime bloqué ($n_d=2$, $\Omega = 1,95$).



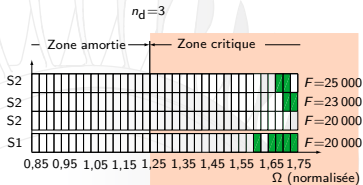
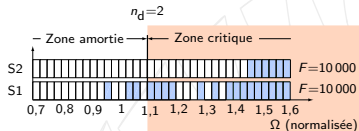
(j) Régime entretenu ($n_d=3$, $\Omega = 1,725$).

Distances aubes/carter — (— pour les aubes en contact permanent)
pour les différents régimes d'interaction détectés dans le cadre de l'étude
S₂, jeu initial —

Interaction 2D : résultats



Étude S₂ : Projection du carter seul



Régimes bloqués ■ détectés pour $n_d=2$ pour les études S1 et S2.

Régimes entretenus ■ détectés pour $n_d=3$ pour les études S1 et S2.

⇒ Raréfaction des modes d'interaction

Suppression des restrictions cinématiques (S_3) ⇒ aucun mode d'interaction

Interaction 2D : conclusion



- Bonne performance des méthodes de réduction modale avec l'algorithme de contact (CB)
- Sensibilité de la méthode de Craig-Martinez
- Les restrictions cinématiques favorisent artificiellement la détection de régimes d'interaction
- Deux modèles, deux types d'études : compromis à trouver entre temps de calcul et précision
- Raréfaction des régimes d'interaction (études S1, S2 et S3), réorientation de l'étude 3D

Plan de la présentation



- 1 Introduction
- 2 Réduction modale
- 3 Interaction modale 2D
- 4 Interaction modale 3D (2 diamètres)**
- 5 Conclusion

Interaction 3D



Objectifs

- 1 Implémentation d'une méthode à interfaces libres pour l'étude d'interactions rotor/stator
- 2 Étude du comportement du DAM fourni par Snecma et de sa sensibilité aux différents paramètres de simulation (μ , Ω)
- 3 Comparaison avec une méthode à interfaces fixes (validation et choix)
- 4 Mise en place d'un code compatible avec l'environnement Snecma permettant d'étudier les interactions rotor/stator pour tout couple de structures roue aubagée/carter

Interaction 3D



Conclusion de l'étude de convergence :

- Convergence CB $\eta = 336$
- Convergence CM $\phi = 448$

Correspondance des résultats convergés

η et $\phi \implies$ bonne approximation des trois premières familles de modes propres (1F, 1T et 2F)

Comparaison des méthodes de réduction

Comparaison des méthodes en deux temps :

- $\Omega \in [0; 12,5]$
- $\Omega > \Omega_{c,2} = 15,025$
- Obtention de la plage de validité commune

Interaction 3D

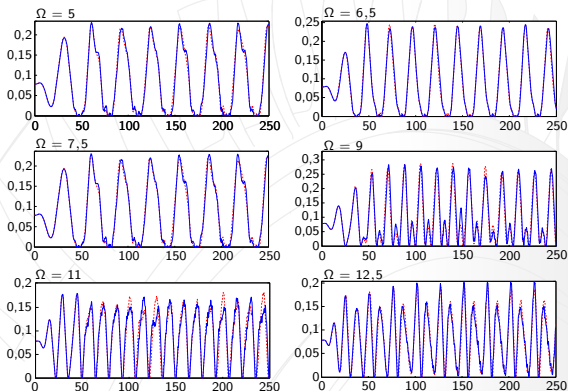
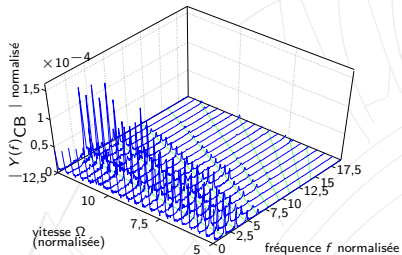

 $\Omega \in [0; 12,5] :$


FIGURE: Distances aube/carter, nœud 3 aube 1. Craig-Bampton —, Craig-Martinez

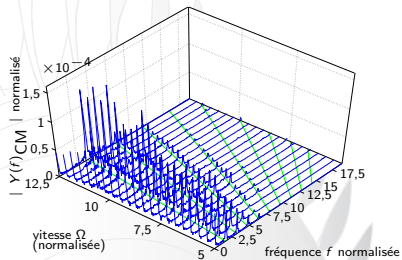
Interaction 3D



$\Omega \in [0; 12,5]$:



(a) Spectres obtenus avec le modèle de Craig-Bampton.



(b) Spectres obtenus avec le modèle de Craig-Martinez.

FIGURE: Spectres — obtenus avec les modèles de Craig-Bampton et de Craig-Martinez. Les droites $f = n_d \frac{k\Omega}{\pi}$ — sont tracées pour k variant de 1 à 9.

Interaction 3D



$\Omega \in [0; 12,5]$:

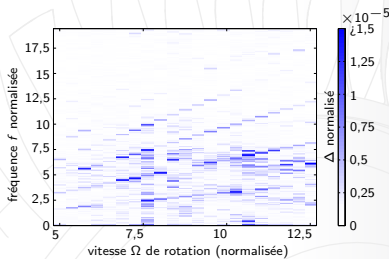
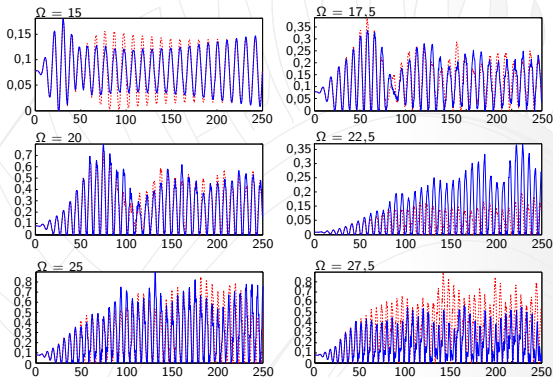


FIGURE: Représentation à l'aide d'un code couleur de l'écart entre les spectre obtenus pour les modèles de Craig-Bampton et de Craig-Martinez.

Interaction 3D



$\Omega > \Omega_{c,2} = 15,025$:

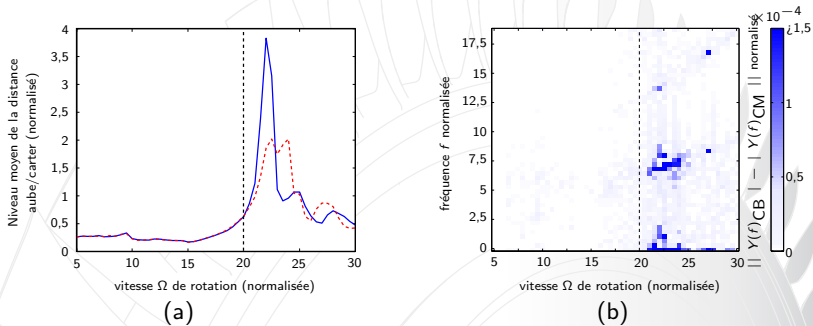


Distances aube/carter, u nœud 3, aube 1. Craig-Bampton —, Craig-Martinez

Interaction 3D



Plage de validité :



Mise en évidence de la limite de la plage de validité des modèles réduits

Interaction 3D



Conclusion partielle :

- Plage de validité commune $\Omega \in [0; 20]$
- Absence de solution de référence \implies limite de l'étude à la plage de validité
- Seule différence significative : autour de la vitesse critique $\Omega_{c,2}$
- Sensibilité numérique sur la détection de la vitesse critique

Interaction 3D

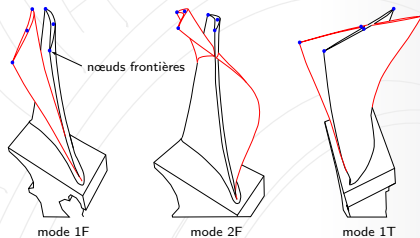


Influence des différents diamètres nodaux :

Résultats précédents : analyse temporelle et fréquentielle

Influence des diamètres nodaux \Rightarrow information supplémentaire
(proximité des fréquences propres)

Étude limitée aux trois premières familles modales (du fait de η et ϕ)



Modes propres de la roue aubagée sur seul secteur (aube déformée —).

Interaction 3D



Influence des différents diamètres nodaux :

Vecteur solution

$$u(t) = \sum_{i=1}^{N_t} u_i(t) \Phi_i \quad (10)$$

Approximation

$$u(t) \simeq \underbrace{\sum_{i=1}^{56} u_{i,1F}(t) \Phi_{i,1F}}_{\text{famille 1F}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{56} u_{i,1T}(t) \Phi_{i,1T}}_{\text{famille 1T}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{56} u_{i,2F}(t) \Phi_{i,2F}}_{\text{famille 2F}} \quad (11)$$

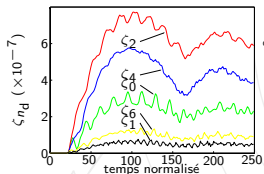
Calcul des coefficients d'influence

pour $(i,j) \in [1; 56]$, si $n_d(\Phi_i) = n_d(\Phi_j)$, alors $\zeta_{n_d}(t) = \sqrt{u_i(t)^2 + u_j(t)^2}$

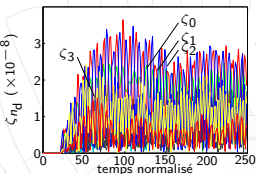
Interaction 3D



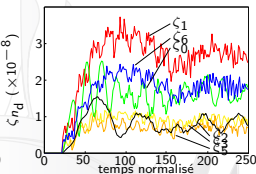
Influence des différents diamètres nodaux :



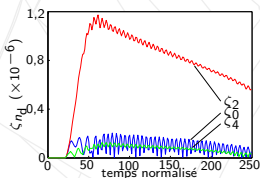
(c) modes 1F



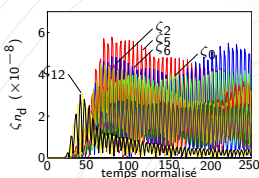
(d) modes 1T



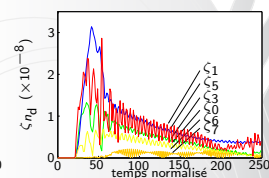
(e) modes 2F

Influence des différents diamètres nodaux pour $\Omega = 10$ 

(f) modes 1F



(g) modes 1T



(h) modes 2F

Influence des différents diamètres nodaux pour $\Omega = 15$

Interaction 3D



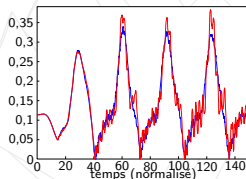
Optimisation de la réduction modale :

Suppression de la base modale des diamètres négligeables.

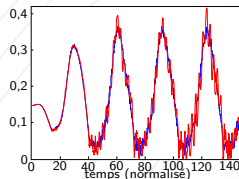
Modes conservés dans la base de réduction :

- initialement : $\phi = 448$; 8 familles de 56 modes
- optimisation : $\phi = 56$; $n_d = 0, 2, 4$ et 6 des 8 premières familles

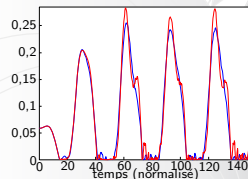
Dimension de la base modale divisée par **8**.



(i) Nœud 1 de l'aube 1.



(j) Nœud 2 de l'aube 1.



(k) Nœud 3 de l'aube 1.

Comparaison des distances aubes/carter pour les trois nœuds frontières de l'aube 1 entre le modèle réduit initial — et le modèle réduit optimisé —

Plan de la présentation



- 1 Introduction
- 2 Réduction modale
- 3 Interaction modale 2D
- 4 Interaction modale 3D (2 diamètres)
- 5 Conclusion

Conclusion générale



Validation des méthodes de synthèse modale

	Craig-Bampton	Craig-Martinez
Optimisation de la base de réduction	-	+
Robustesse numérique	+	-
Facilité d'implémentation	+	-
Temps de mise en œuvre	+	-
Précision	+	+

Confirmation du choix de la méthode de Craig-Bampton pour application industrielle

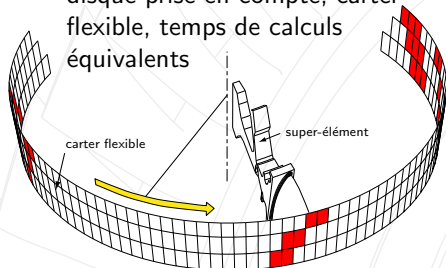
Conclusion générale



Applications industrielles

Contact avec une aube en sur-longueur

- **enjeux** : simulation rapide sur modèle 3D complexe
- **avancées** : dynamique du disque prise en compte, carter flexible, temps de calculs équivalents



Code compatible environnement Snecma

- **enjeux** : Simulation de contact aubes/carter paramétrable
 - ▶ matériau ($E, \rho, \nu...$), $\mu, \Omega...$
 - ▶ couple roue/carter
- **résultats** : Code compatible avec l'environnement Snecma
 - ▶ Réduction par Samcef
 - ▶ Chaînage des opérations

Conclusion générale



Perspectives

- Enrichissement du modèle
 - ▶ Intégration d'une loi d'usure (abradable)
 - ▶ Interaction pour des modèles multi-étages
- Optimisation du profil d'aube (nouveau critère)
- Etude avec plusieurs types de chargement sur le carter (nombre de diamètres de l'excitation quelconque)
- Optimisation de la base de réduction de la méthode de Craig-Bampton