

Soutenance de doctorat

Contributions à l'optimisation de systèmes mécaniques non réguliers : reconception d'aubes de compresseur

Solène Kojtych

28 juin 2022

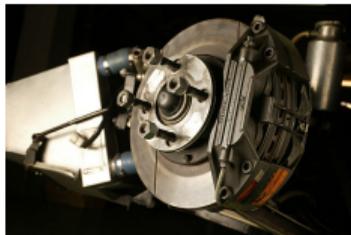
Membres du jury :

M. Lévesque	Polytechnique Montréal	président
A. Batailly	Polytechnique Montréal	membre et directeur de recherche
C. Audet	Polytechnique Montréal et GERAD	membre et codirecteur de recherche
S. Le Digabel	Polytechnique Montréal et GERAD	membre
J. Demange	Safran Aircraft Engines	membre externe
N. Virgilio	Polytechnique Montréal	représentant de la direction des études supérieures



Contexte

- systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

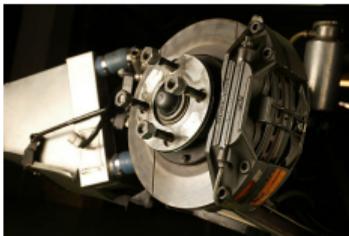
2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Contexte

- systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

- verrou scientifique

- ▶ absence de cadre théorique unifié

1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

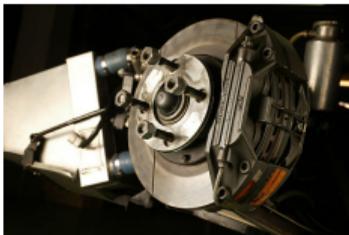
2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Contexte

- systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

- verrou scientifique

- ▶ absence de cadre théorique unifié \implies stratégies numériques prédictives

1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

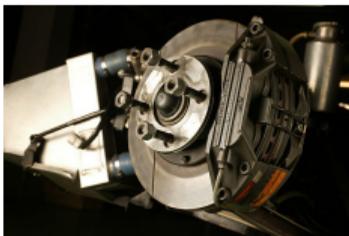
2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Contexte

● systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



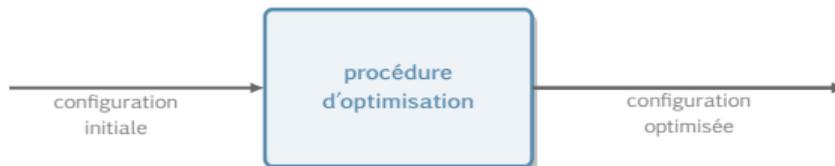
▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

● verrou scientifique

- ▶ absence de cadre théorique unifié \implies stratégies numériques prédictives



1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

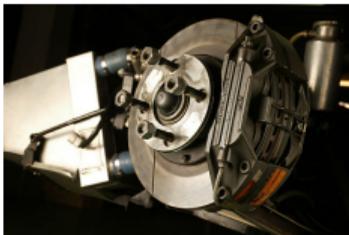
2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Contexte

● systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



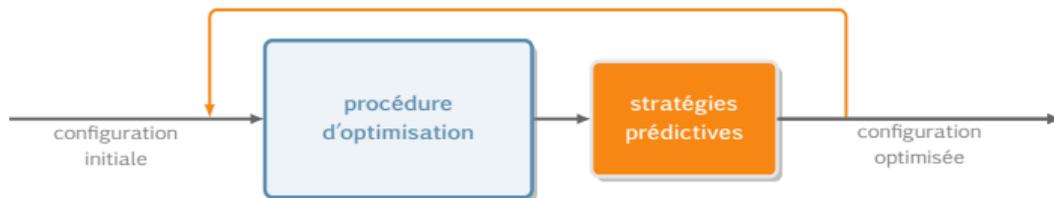
▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

● verrou scientifique

▶ absence de cadre théorique unifié \implies stratégies numériques prédictives



1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

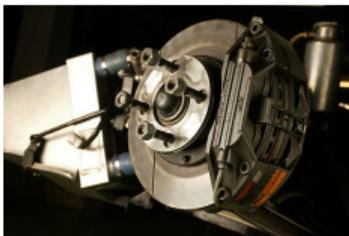
2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Contexte

● systèmes mécaniques non réguliers



▶ frein¹



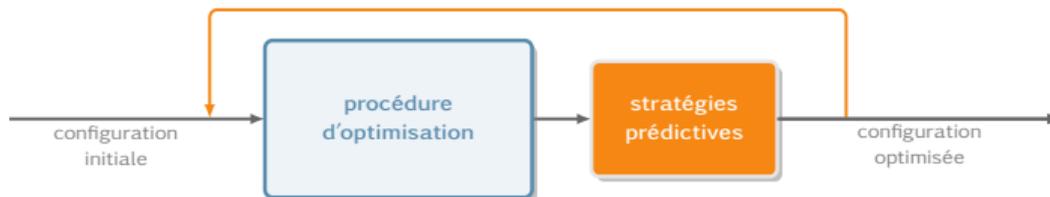
▶ turbine²



▶ assemblage boulonné³

● verrou scientifique

- ▶ absence de cadre théorique unifié \Rightarrow stratégies numériques prédictives



Outils pour l'intégration de stratégies numériques prédictives en amont dans les cycles de conception

1. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Disk_brake_001.jpg?uselang=fr.

2. URL : <https://www.ge.com/reports/two-giant-steam-engines-each-named-arabelle-head-for-the-english-countryside/>.

3. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/ALUMINUM_AND_STAINLESS_STEEL_FLANGE_ASSEMBLY_-_NARA_-_17444079.jpg.



Cadre mathématique





Cadre mathématique



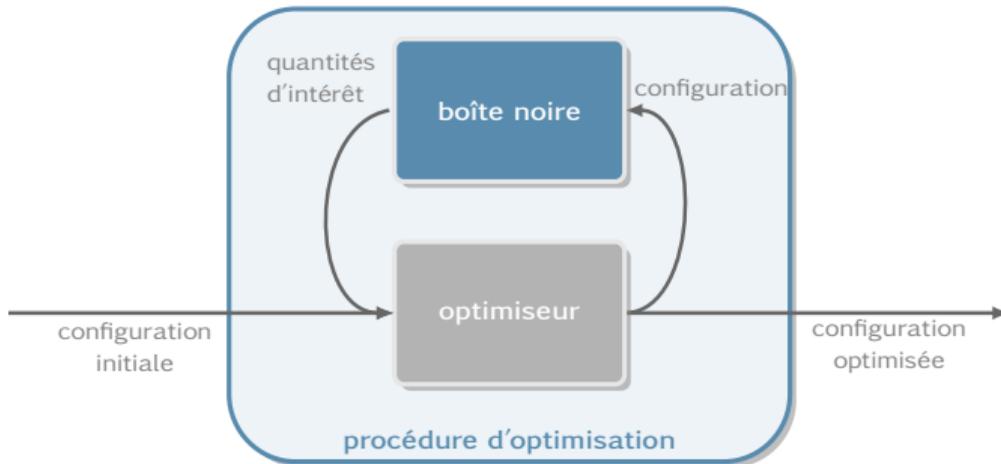


Cadre mathématique





Cadre mathématique

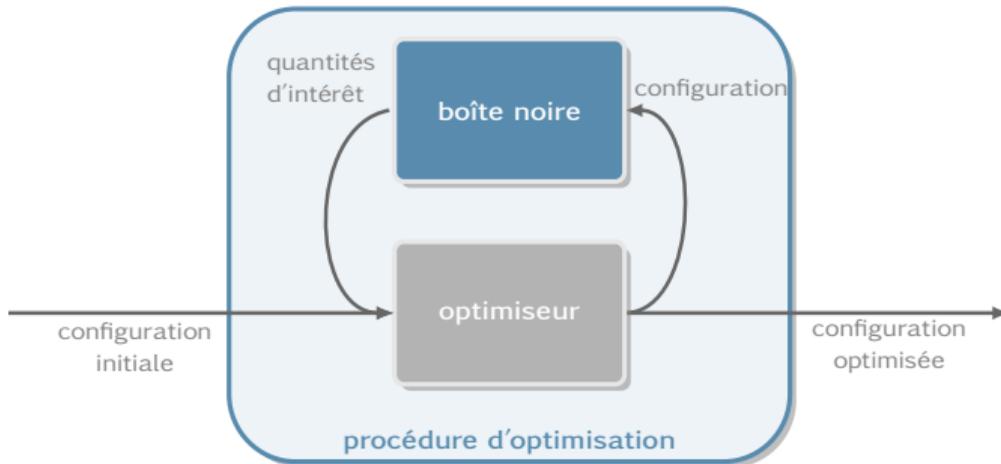


- problème d'optimisation de boîte noire

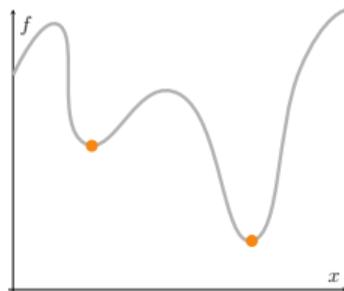




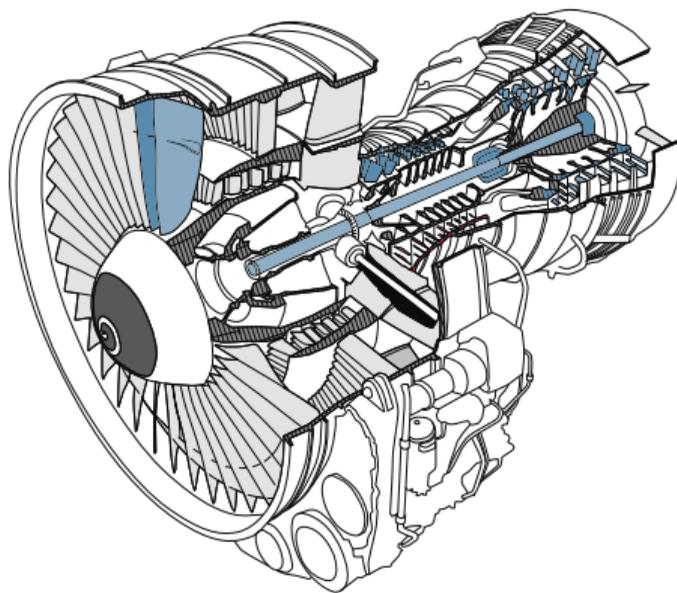
Cadre mathématique



- problème d'optimisation de boîte noire



ERREUR



► moteur d'avion , adaptée de 4.

- compresseur aéronautique
 - ▶ réduction des jeux
 - ▶ interfaces non régulières

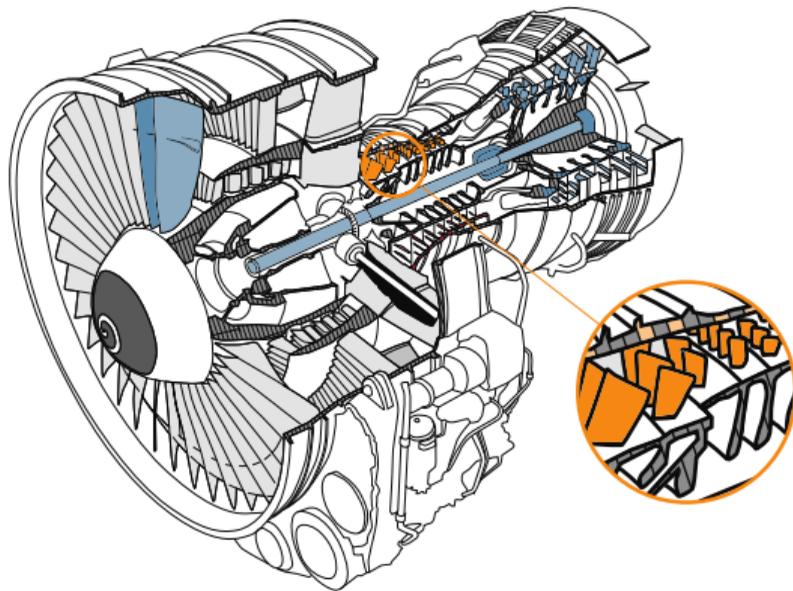
4. Y. COLAÏTIS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03318777>. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, 2021.

5. L. REID et al. (1978). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780025165>.

6. D. C. URASEK et al. (1979). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790015796>.



Cadre industriel



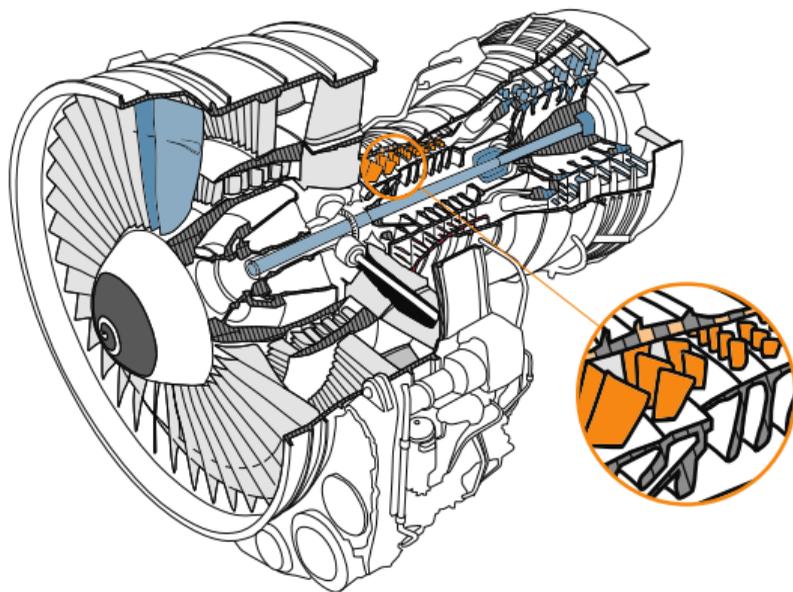
► moteur d'avion , adaptée de 4.

- compresseur aéronautique
 - ▶ réduction des jeux
 - ▶ interfaces non régulières
- interface de contact aube/carter
 - ▶ vitesses d'interactions élevées
 - ▶ phénomènes préjudiciables

4. Y. COLAÏTIS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03318777>. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, 2021.

5. L. REID et al. (1978). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780025165>.

6. D. C. URASEK et al. (1979). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790015796>.



► moteur d'avion , adaptée de 4.

- compresseur aéronautique
 - ▶ réduction des jeux
 - ▶ interfaces non régulières
 - interface de contact aube/carter
 - ▶ vitesses d'interactions élevées
 - ▶ phénomènes préjudiciables
-
- recherche de critères de conception

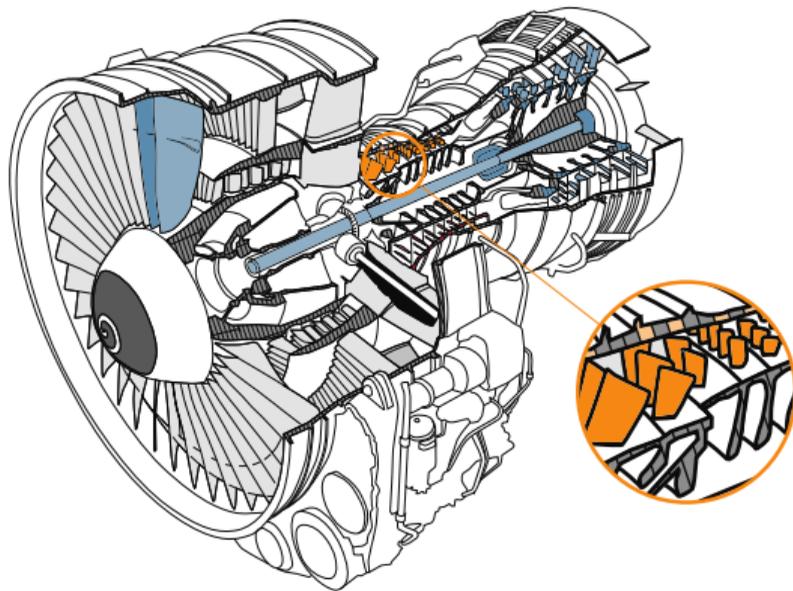
4. Y. COLAÏTIS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03318777>. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, 2021.

5. L. REID et al. (1978). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780025165>.

6. D. C. URASEK et al. (1979). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790015796>.



Cadre industriel



► moteur d'avion , adaptée de 4.

- compresseur aéronautique
 - ▶ réduction des jeux
 - ▶ interfaces non régulières
 - interface de contact aube/carter
 - ▶ vitesses d'interactions élevées
 - ▶ phénomènes préjudiciables
-
- recherche de critères de conception ⇒ **reconception d'aubes industrielles**
 - ▶ modèles d'aubes ouverts de la NASA : rotor 37,⁵ rotor 67⁶

4. Y. COLAÏTIS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03318777>. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal, 2021.

5. L. REID et al. (1978). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780025165>.

6. D. C. URASEK et al. (1979). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790015796>.



Objectifs

- mathématiques appliquées

① algorithme d'optimisation pour systèmes non réguliers





Objectifs

- mathématiques appliquées

① algorithme d'optimisation pour systèmes non réguliers

- génie mécanique

② outil de modélisation d'aubes industrielles

③ reconception d'aubes industrielles pour améliorer leur robustesse aux interactions de contact

④ critères de conception





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Problème

Mads

DiscoMads

Convergence

Résultats

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Conclusion

1 Introduction

2 Algorithme d'optimisation

3 Pertinence industrielle

4 Outil de modélisation

5 Reconception d'aubes industrielles

6 Conclusion





Problème de conception

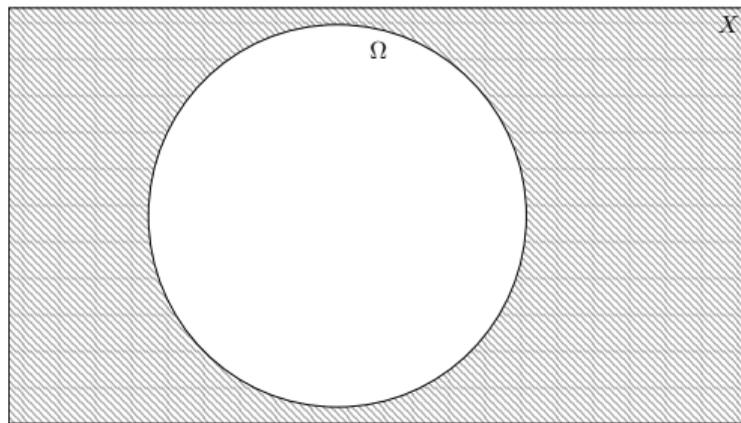
$$\min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x}) \quad (1)$$





Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \tag{1}$$



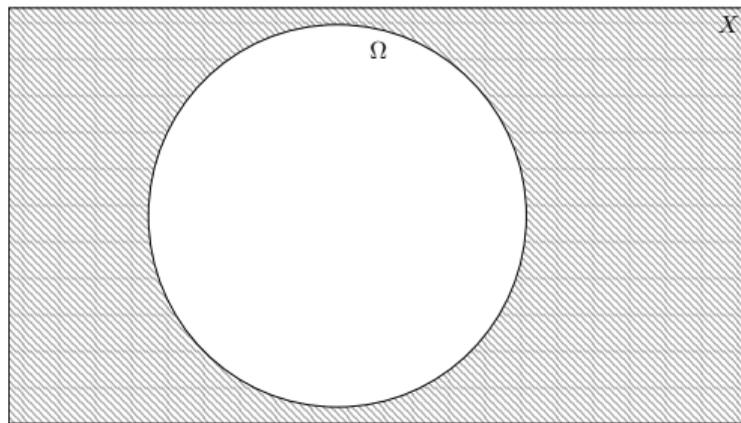
$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$





Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$



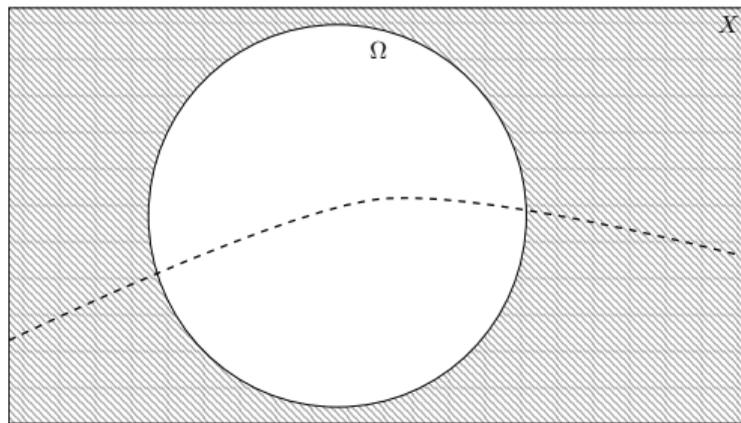
$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

- défi de conception : éviter les zones de résonance non linéaires



Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$



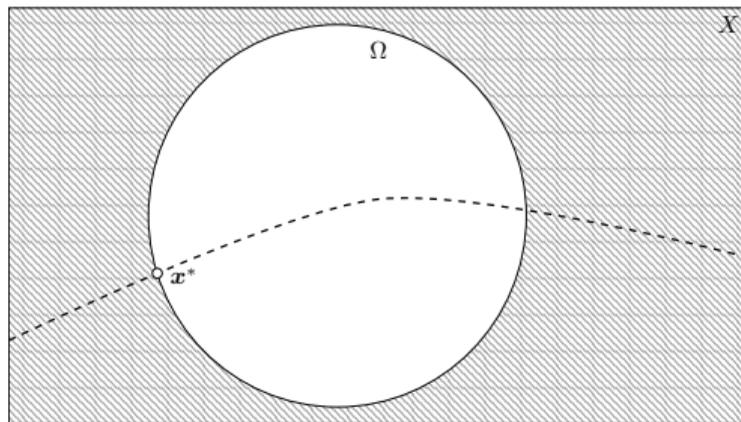
$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

- défi de conception : éviter les zones de résonance non linéaires



Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$



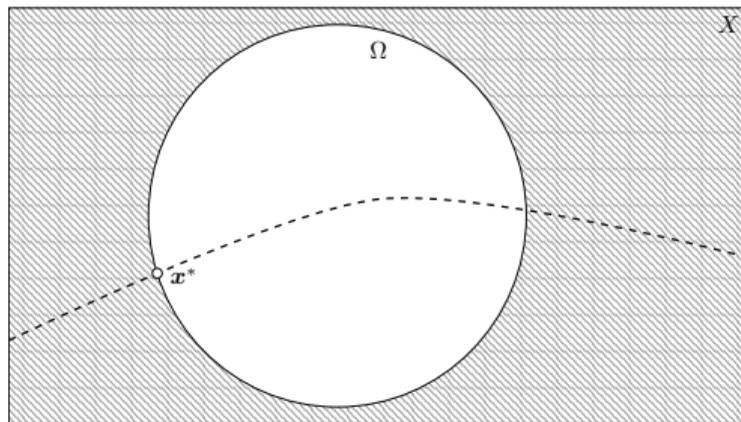
$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

- défi de conception : éviter les zones de résonance non linéaires



Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \text{et} \quad & d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff x \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } c \end{aligned} \tag{1}$$



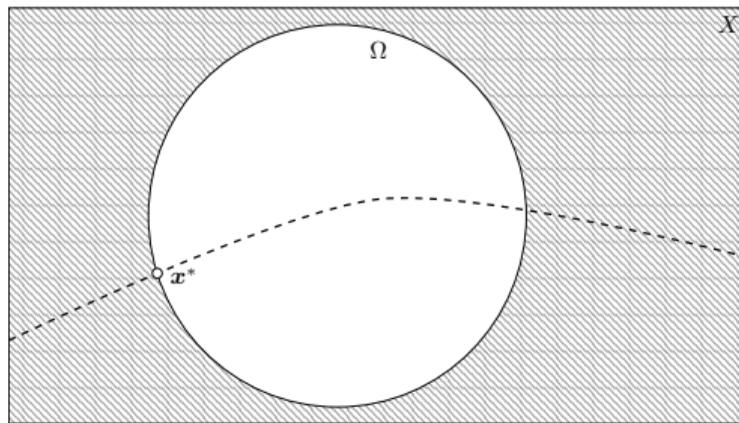
$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

- défi de conception : éviter les zones de résonance non linéaires



Problème de conception

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \text{et} \quad & d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff x \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } c \end{aligned} \tag{1}$$



$$\Omega = \{\mathbf{x} \in X : \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

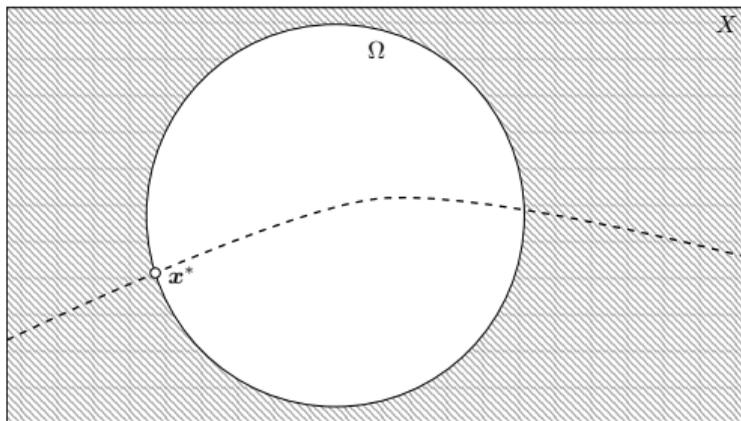
- défi de conception : éviter les zones de résonance non linéaires

Développer un algorithme d'optimisation de boîtes noires pour résoudre le problème (1)



Modélisation

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x}) \\ & \text{sujet à } \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \text{et } d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff \mathbf{x} \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } \mathbf{c} \end{aligned}$$





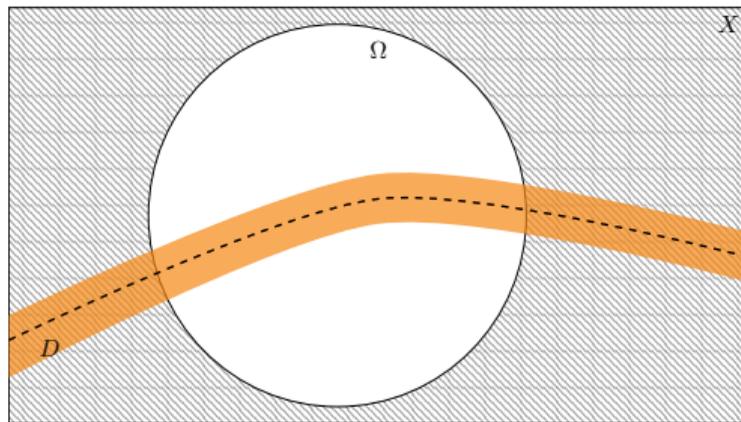
Modélisation

$$\min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x})$$

$$\text{sujet à } \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\text{et } d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff \mathbf{x} \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } \mathbf{c}$$

- **zone de discontinuités faibles D** (■) : accroissement de f ou c_j entre deux points à distance maximale r_d excède un taux limite τ



$$D = \{y \in X : \exists j \in J, \exists z \in X \cap B_{r_d}(y), |c_j(y) - c_j(z)| > \tau \|y - z\|\}$$



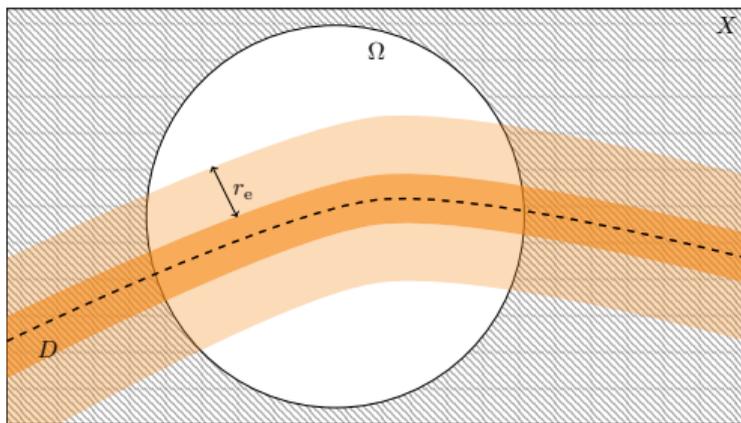
Modélisation

$$\min_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x})$$

$$\text{sujet à } \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\text{et } d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff \mathbf{x} \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } \mathbf{c}$$

- **zone de discontinuités faibles** D (■) : accroissement de f ou c_j entre deux points à distance maximale r_d excède un taux limite τ
- **marge de sécurité** M (■ U ■) : domaine de rayon r_e autour de D



$$M = X \cap (\cup_{\mathbf{x} \in D} B_{r_e}(\mathbf{x}))$$

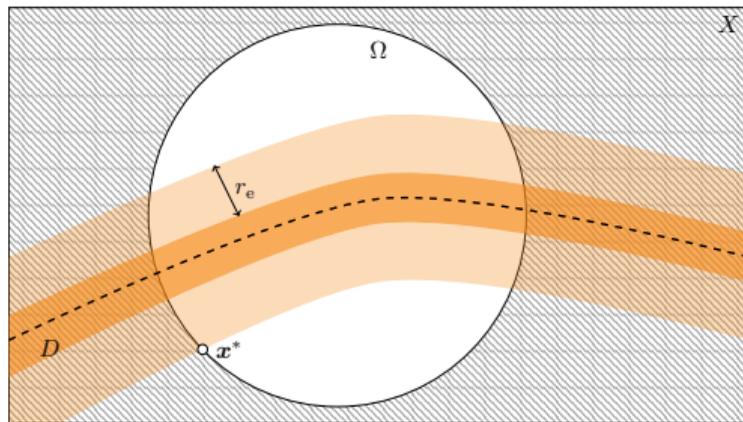
$$\mathbf{x} \notin M \iff d(\mathbf{x}) \leq 0$$



Modélisation

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \text{et } d(\mathbf{x}) \leq 0 \iff \mathbf{x} \text{ loin des discontinuités de } f \text{ et } \mathbf{c} \end{aligned}$$

- **zone de discontinuités faibles** D (■) : accroissement de f ou c_j entre deux points à distance maximale r_d excède un taux limite τ
- **marge de sécurité** M (■ U ■) : domaine de rayon r_e autour de D

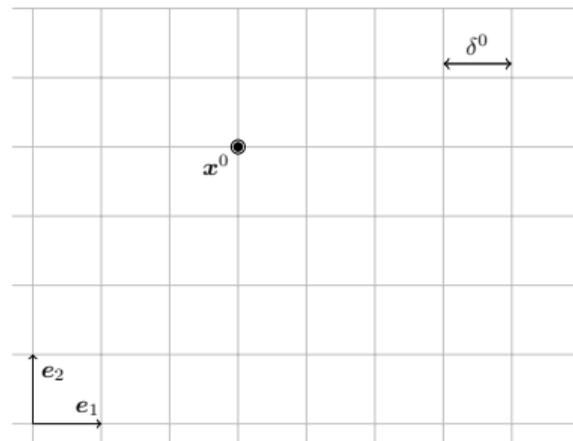


$$\begin{aligned} M &= X \cap (\cup_{\mathbf{x} \in D} B_{r_e}(\mathbf{x})) \\ \mathbf{x} \notin M &\iff d(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$



Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

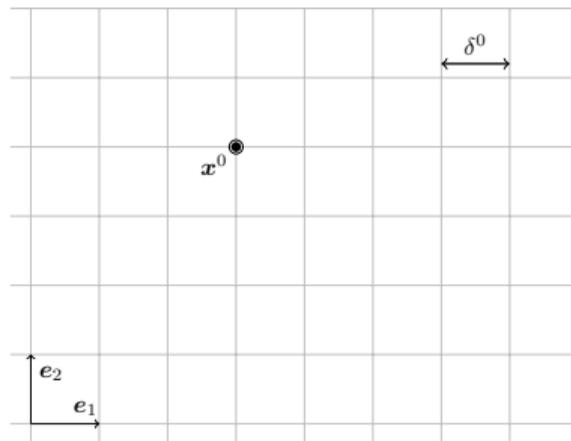




Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k





Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

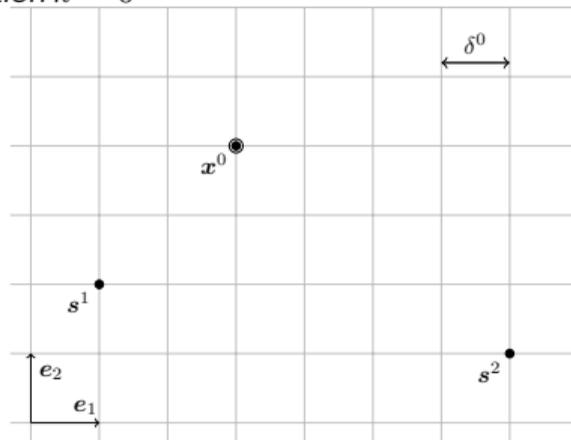
Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur

itération $k = 0$



- recherche

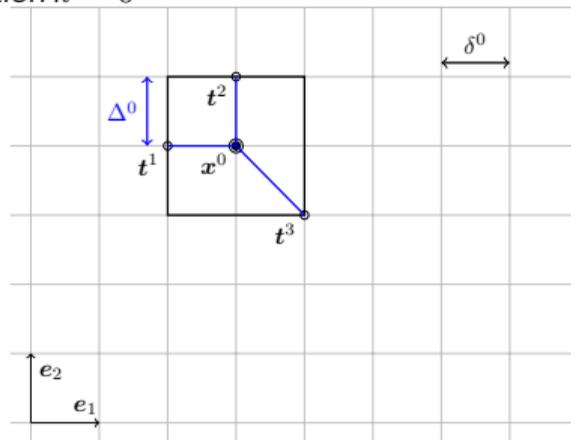


Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 0$



1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur

2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

- recherche

- sonde

- ▶ $f(x^0) \leq f(t^1)$

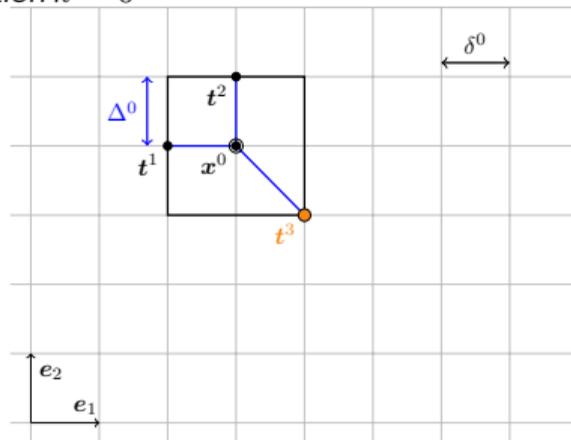


Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads ⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant \mathbf{x}^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 0$



1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur

2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

- recherche

- sonde

- ▶ $f(\mathbf{x}^0) \leq f(\mathbf{t}^1)$

- ▶ $f(\mathbf{x}^0) \leq f(\mathbf{t}^2)$

- ▶ $f(\mathbf{x}^0) > f(\mathbf{t}^3) \Rightarrow$ succès



Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant \mathbf{x}^k sur un maillage de pas δ^k

1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur

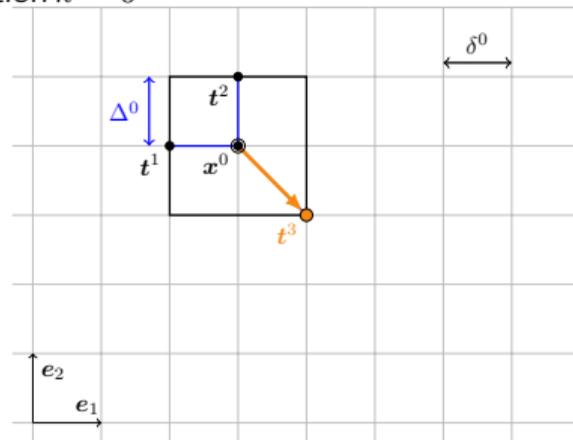
2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

3 mise à jour selon succès/échec

- ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , \mathbf{x}^{k+1}

itération $k = 0$



- recherche

- sonde

- ▶ $f(\mathbf{x}^0) \leq f(\mathbf{t}^1)$
- ▶ $f(\mathbf{x}^0) \leq f(\mathbf{t}^2)$
- ▶ $f(\mathbf{x}^0) > f(\mathbf{t}^3) \Rightarrow$ succès



Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur

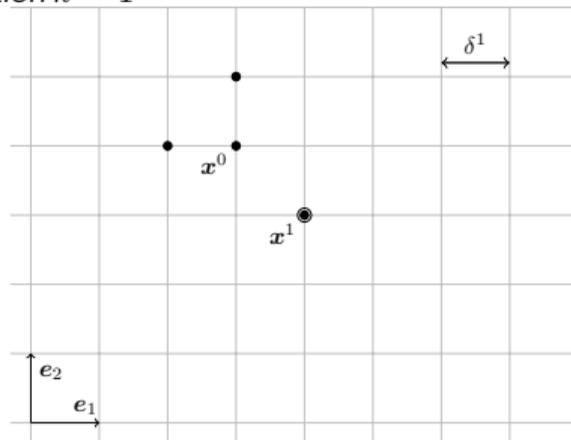
2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

3 mise à jour selon succès/échec

- ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}

itération $k = 1$





Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 1$

1 recherche globale

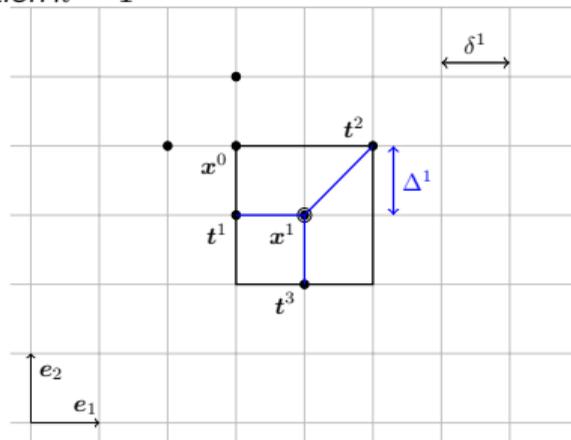
- ▶ définie par l'utilisateur

2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

3 mise à jour selon succès/échec

- ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}



- recherche
- sonde



Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

① recherche globale

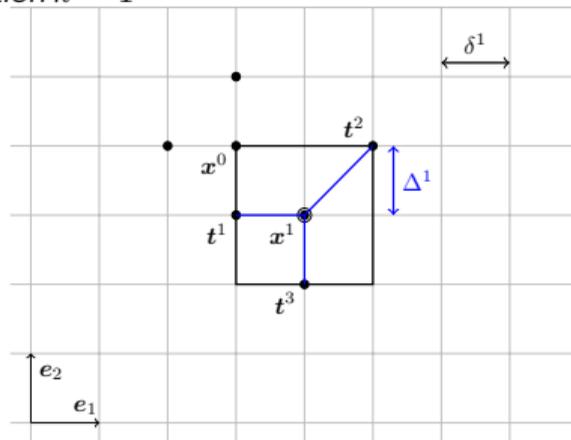
- ▶ définie par l'utilisateur

② sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k

③ mise à jour selon succès/échec

- ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}

itération $k = 1$ 

- recherche

- sonde

- ▶ $f(x^1) \leq f(t^4)$
- ▶ $f(x^1) \leq f(t^5)$
- ▶ $f(x^1) \leq f(t^6) \Rightarrow$ échec



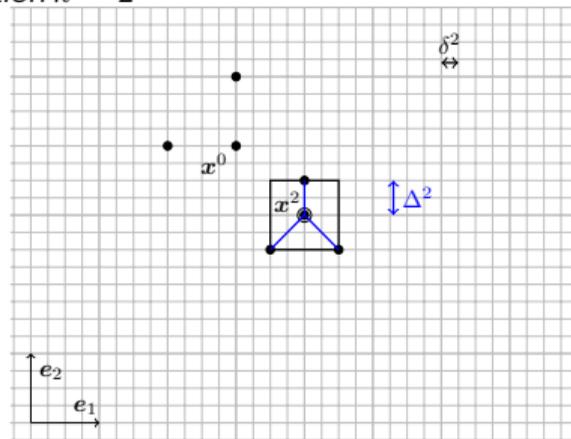
Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads⁷

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 2$

- 1 **recherche globale**
 - ▶ définie par l'utilisateur
- 2 **sonde locale**
 - ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k
- 3 **mise à jour selon succès/échec**
 - ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}



- recherche
- sonde



Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k
- ① **recherche globale**
 - ▶ définie par l'utilisateur
- ② **sonde locale**
 - ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k
- ③ **mise à jour selon succès/échec**
 - ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}





Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

1 recherche globale

- définie par l'utilisateur
- révélation après chaque évaluation

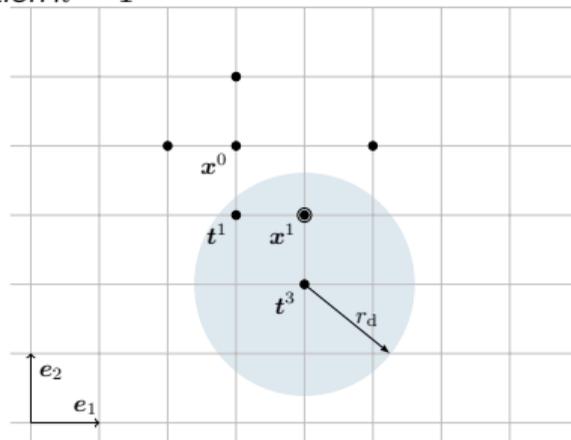
2 sonde locale

- directions de sonde de paramètre Δ^k
- révélation après chaque évaluation

3 mise à jour selon succès/échec

- calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}

itération $k = 1$



- révélation



Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

1 recherche globale

- définie par l'utilisateur
- révélation après chaque évaluation

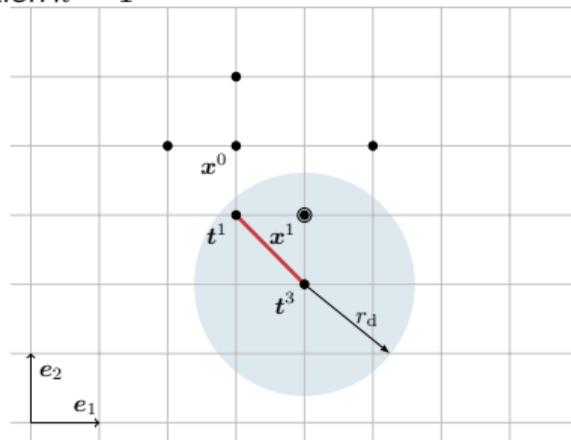
2 sonde locale

- directions de sonde de paramètre Δ^k
- révélation après chaque évaluation

3 mise à jour selon succès/échec

- calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}

itération $k = 1$



- révélation

- $|f(t^1) - f(t^3)| \leq \tau \|t^1 - t^3\|$

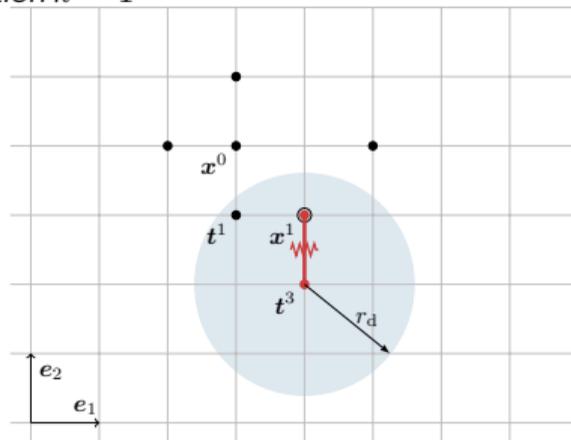


Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 1$



1 recherche globale

- ▶ définie par l'utilisateur
- ▶ révélation après chaque évaluation

2 sonde locale

- ▶ directions de sonde de paramètre Δ^k
- ▶ révélation après chaque évaluation

3 mise à jour selon succès/échec

- ▶ calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}

● révélation

- ▶ $|f(t^1) - f(t^3)| \leq \tau \|t^1 - t^3\|$
- ▶ $|f(t^3) - f(x^1)| > \tau \|t^3 - x^1\|$
 $\implies x^1$ et t^3 points révélateurs $\in D$



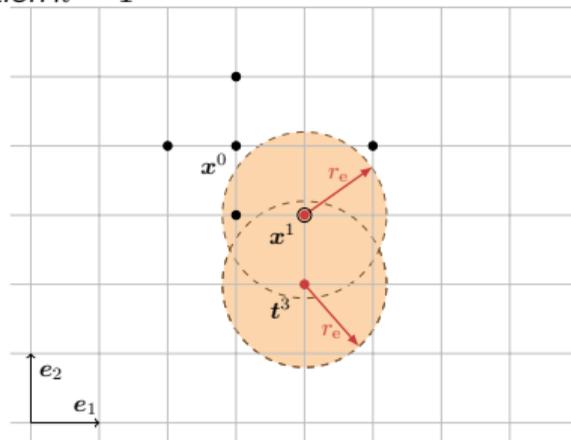
Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 1$

- recherche globale**
 - définie par l'utilisateur
 - révélation après chaque évaluation
- sonde locale**
 - directions de sonde de paramètre Δ^k
 - révélation après chaque évaluation
- mise à jour selon succès/échec**
 - calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}



- révélation
- exclusion
 - contrainte d'exclusion autour de x^1 et t^3



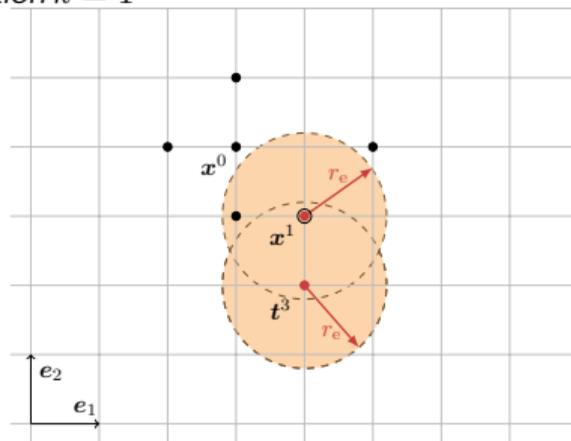
Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 1$

- recherche globale**
 - définie par l'utilisateur
 - révélation après chaque évaluation
- sonde locale**
 - directions de sonde de paramètre Δ^k
 - révélation après chaque évaluation
- mise à jour selon succès/échec ou révélation**
 - calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}



- révélation
- exclusion
 - contrainte d'exclusion autour de x^1 et t^3



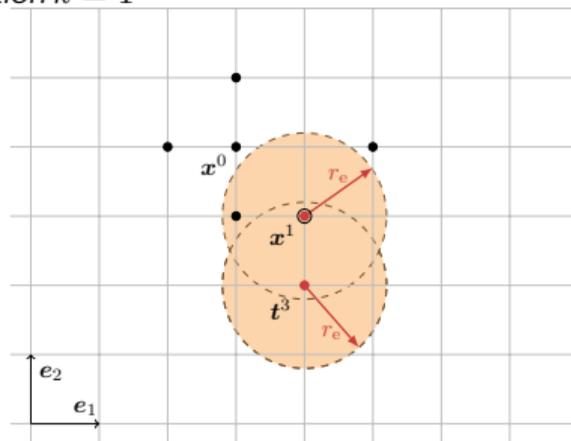
Algorithme proposé : DiscoMads

Une itération de DiscoMads

- but : trouver un meilleur point que l'itéré courant x^k sur un maillage de pas δ^k

itération $k = 1$

- recherche globale**
 - définie par l'utilisateur
 - révélation après chaque évaluation
- sonde locale**
 - sonde révélatrice : points aléatoires autour de x^k
 - directions de sonde de paramètre Δ^k
 - révélation après chaque évaluation
- mise à jour selon succès/échec ou révélation**
 - calcul de Δ^{k+1} , δ^{k+1} , x^{k+1}



- révélation
- exclusion
 - contrainte d'exclusion autour de x^1 et t^3



Conditions d'optimalité aux points où l'algorithme converge

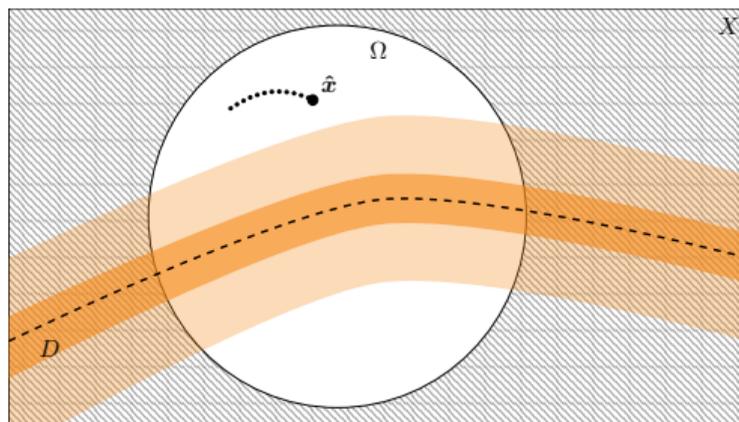




Analyse de convergence

Conditions d'optimalité aux points où l'algorithme converge

- le point raffinant \hat{x} satisfait certaines conditions



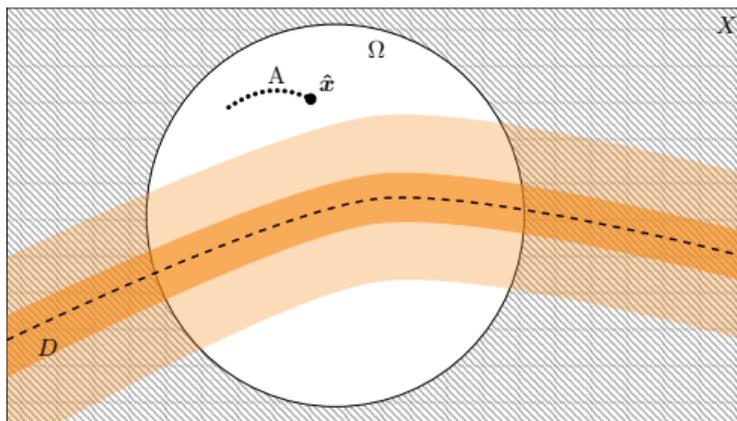


Analyse de convergence

Conditions d'optimalité aux points où l'algorithme converge

- le point raffinant \hat{x} satisfait certaines conditions

▶ cas A $\implies f^\circ(\hat{x}, p) \geq 0$ (de Mads)

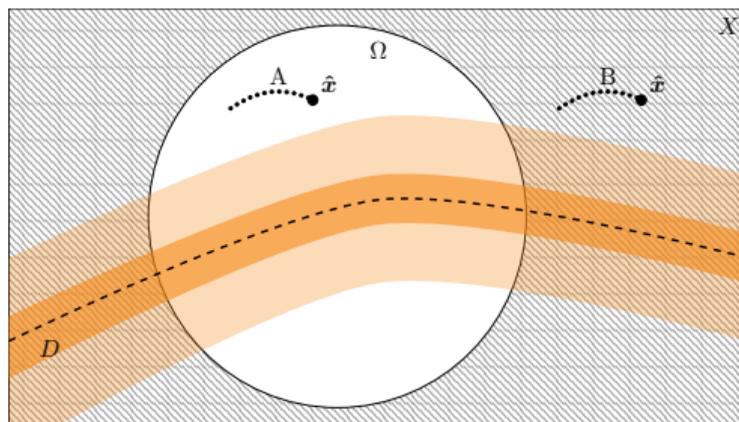




Conditions d'optimalité aux points où l'algorithme converge

- le point raffinant $\hat{\boldsymbol{x}}$ satisfait certaines conditions

- ▶ cas A $\implies f^\circ(\hat{\boldsymbol{x}}, p) \geq 0$ (de Mads)
- ▶ cas B $\implies \hat{h}^\circ(\hat{\boldsymbol{x}}, p) \geq 0$ (de Mads)



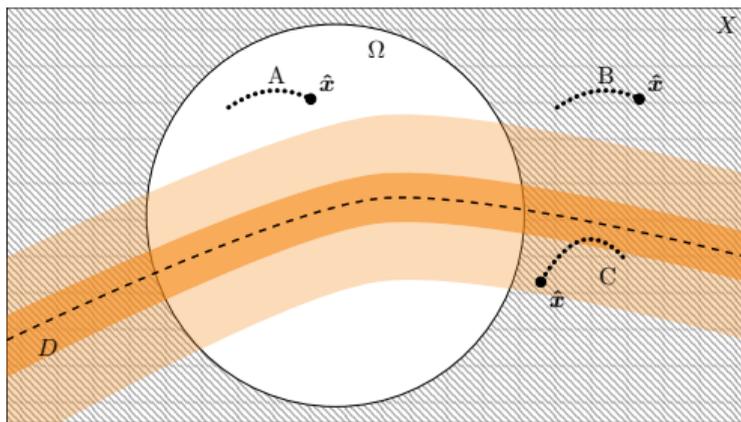
$$\hat{h}(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^m \max(c_j(\boldsymbol{x}), 0)^2 + \max(d(\boldsymbol{x}), 0)^2 \quad \text{si } \boldsymbol{x} \in X, \quad \infty \quad \text{sinon}$$



Conditions d'optimalité aux points où l'algorithme converge

• le point raffiné $\hat{\mathbf{x}}$ satisfait certaines conditions

- ▶ cas A $\implies f^\circ(\hat{\mathbf{x}}, p) \geq 0$ (de Mads)
- ▶ cas B $\implies \hat{h}^\circ(\hat{\mathbf{x}}, p) \geq 0$ (de Mads)
- ▶ cas C \implies **nouveau résultat** : $\hat{\mathbf{x}}$ est un minimum local de \hat{h} sur X



$$\hat{h}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m \max(c_j(\mathbf{x}), 0)^2 + \max(d(\mathbf{x}), 0)^2 \quad \text{si } \mathbf{x} \in X, \quad \infty \quad \text{sinon}$$



Résultats numériques

- implémentation de DiscoMads dans NOMAD⁸ version 3.9.1

8. S. LE DIGABEL. *ACM Trans. Math. Softw.* (2011). issn : 0098-3500. doi : 10.1145/1916461.1916468.

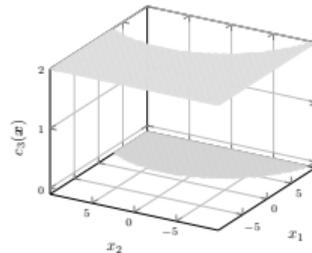
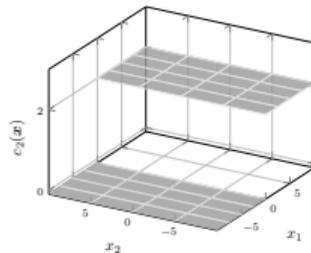
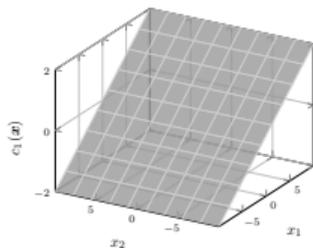
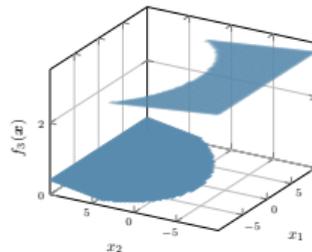
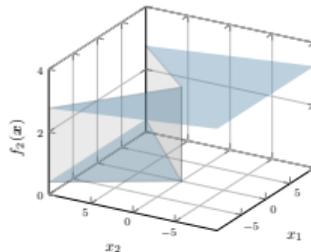
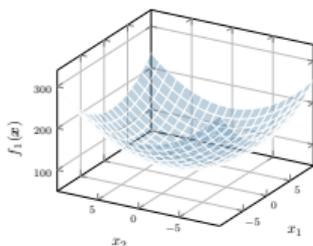
9. URL : https://gitlab.lava.polymtl.ca/depots_publics/codes/blackbox_buckling.

10. URL : <https://github.com/bbopt/styrene>.



Résultats numériques

- implémentation de DiscoMads dans NOMAD⁸ version 3.9.1
- validation sur 10 problèmes analytiques



8. S. LE DIGABEL. *ACM Trans. Math. Softw.* (2011). issn : 0098-3500. doi : 10.1145/1916461.1916468.

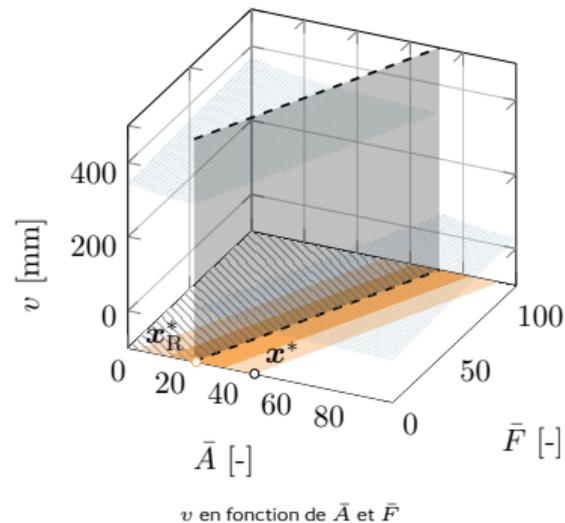
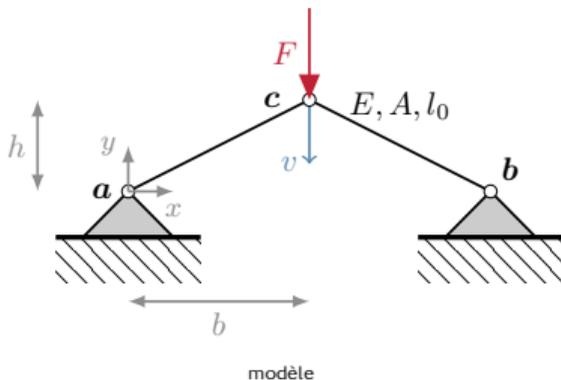
9. URL : https://gitlab.lava.polymtl.ca/depots_publics/codes/blackbox_buckling.

10. URL : <https://github.com/bbopt/styrene>.



Résultats numériques

- implémentation de DiscoMads dans NOMAD⁸ version 3.9.1
- validation sur 10 problèmes analytiques
- problème de flambement de treillis⁹
 - ▶ éloignement à la discontinuité



8. S. LE DIGABEL. *ACM Trans. Math. Softw.* (2011). issn : 0098-3500. doi : 10.1145/1916461.1916468.

9. URL : https://gitlab.lava.polymtl.ca/depots_publics/codes/blackbox_buckling.

10. URL : <https://github.com/bbopt/styrene>.



Résultats numériques

- implémentation de DiscoMads dans NOMAD⁸ version 3.9.1
- validation sur 10 problèmes analytiques
- problème de flambement de treillis⁹
 - ▶ éloignement à la discontinuité
- problème de production de styrène¹⁰
 - ▶ éloignement aux zones de contraintes cachées

8. S. LE DIGABEL. *ACM Trans. Math. Softw.* (2011). issn : 0098-3500. doi : 10.1145/1916461.1916468.

9. URL : https://gitlab.lava.polymtl.ca/depots_publics/codes/blackbox_buckling.

10. URL : <https://github.com/bbopt/styrene>.



Résultats numériques

- implémentation de DiscoMads dans NOMAD⁸ version 3.9.1
- validation sur 10 problèmes analytiques
- problème de flambement de treillis⁹
 - ▶ éloignement à la discontinuité
- problème de production de styrène¹⁰
 - ▶ éloignement aux zones de contraintes cachées
- problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion
 - ▶ éloignement aux discontinuités et zones de fort accroissement

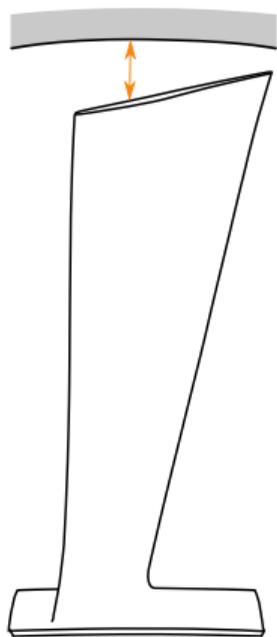
8. S. LE DIGABEL. *ACM Trans. Math. Softw.* (2011). issn : 0098-3500. doi : 10.1145/1916461.1916468.

9. URL : https://gitlab.lava.polymtl.ca/depots_publics/codes/blackbox_buckling.

10. URL : <https://github.com/bbopt/styrene>.



Problème de vibrations d'aubes de moteur d'avion



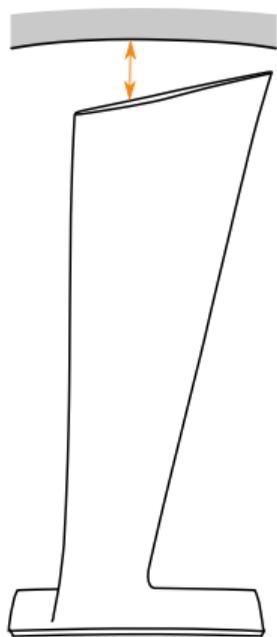
► jeu aube/carter ()

11. A. BATAILLY et al. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (2015), doi : 10.1115/1.4028263.

12. E. PIOLLET. *Journal of Sound and Vibration* (2019), issn : 0022-460X, doi : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114878>.



Problème de vibrations d'aubes de moteur d'avion



- quantité d'intérêt^{11, 12} : déplacement radial en bout d'aube

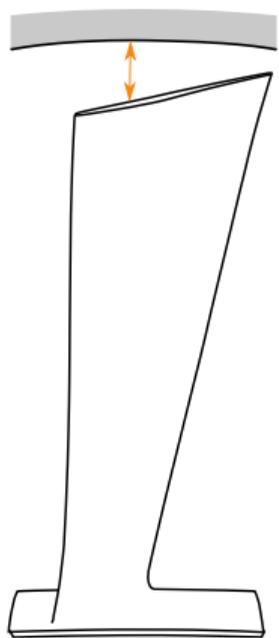
▶ jeu aube/carter (↔)

11. A. BATAILLY et al. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (2015), doi : 10.1115/1.4028263.

12. E. PIOLLET. *Journal of Sound and Vibration* (2019), issn : 0022-460X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114878>.

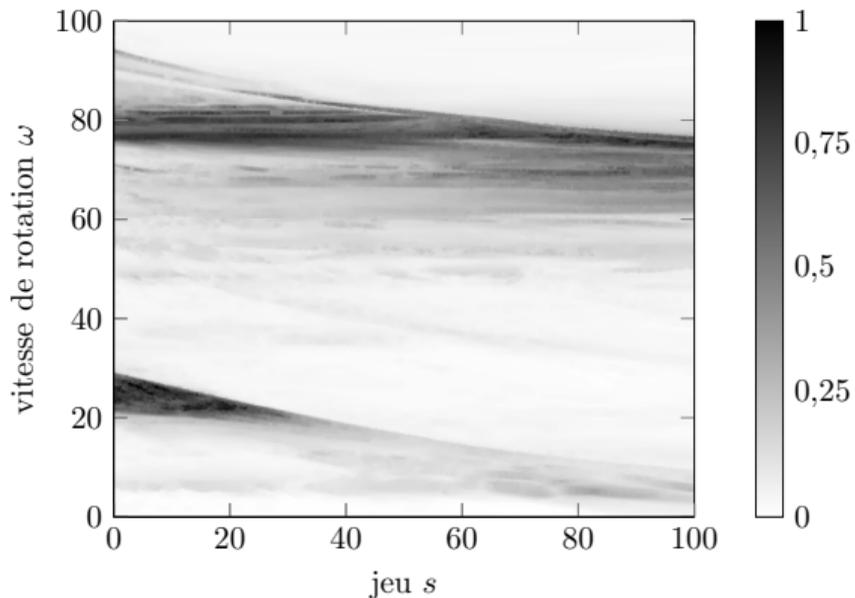


Problème de vibrations d'aubes de moteur d'avion



► jeu aube/carter (↔)

- quantité d'intérêt^{11, 12} : déplacement radial en bout d'aube
- surface de réponse \Rightarrow 45 000 simulations

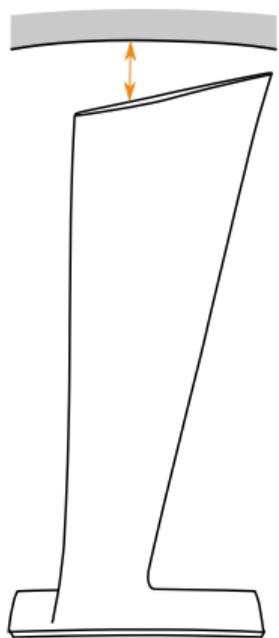


11. A. BATAILLY et al. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (2015), doi : 10.1115/1.4028263.

12. E. PIOLLET. *Journal of Sound and Vibration* (2019), issn : 0022-460X, doi : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114878>.

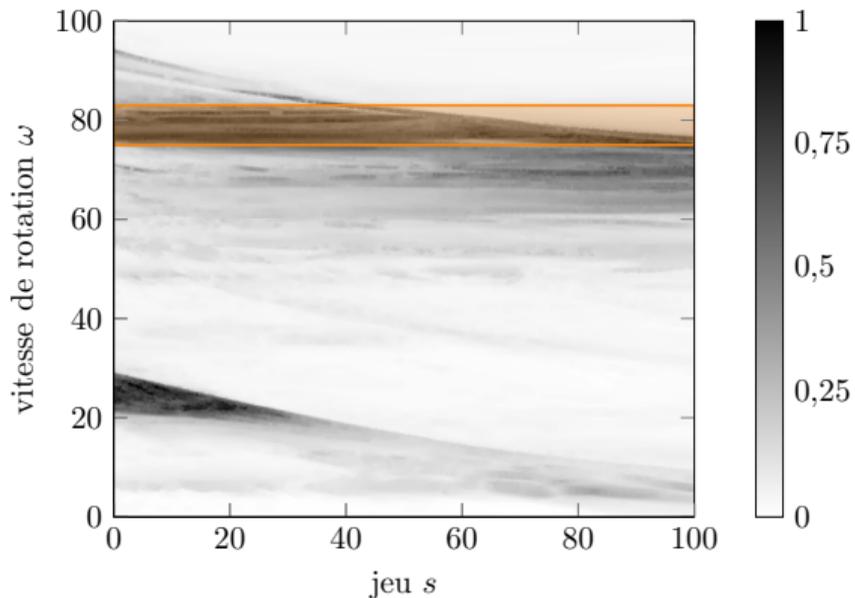


Problème de vibrations d'aubes de moteur d'avion



► jeu aube/carter (↔)

- quantité d'intérêt^{11, 12} : déplacement radial en bout d'aube
- surface de réponse \Rightarrow 45 000 simulations



11. A. BATAILLY et al. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* (2015), doi : 10.1115/1.4028263.

12. E. PIOLLET. *Journal of Sound and Vibration* (2019), issn : 0022-460X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114878>.



Introduction

Algorithme
d'optimisation

Problème

Mads

DiscoMads

Convergence

Résultats

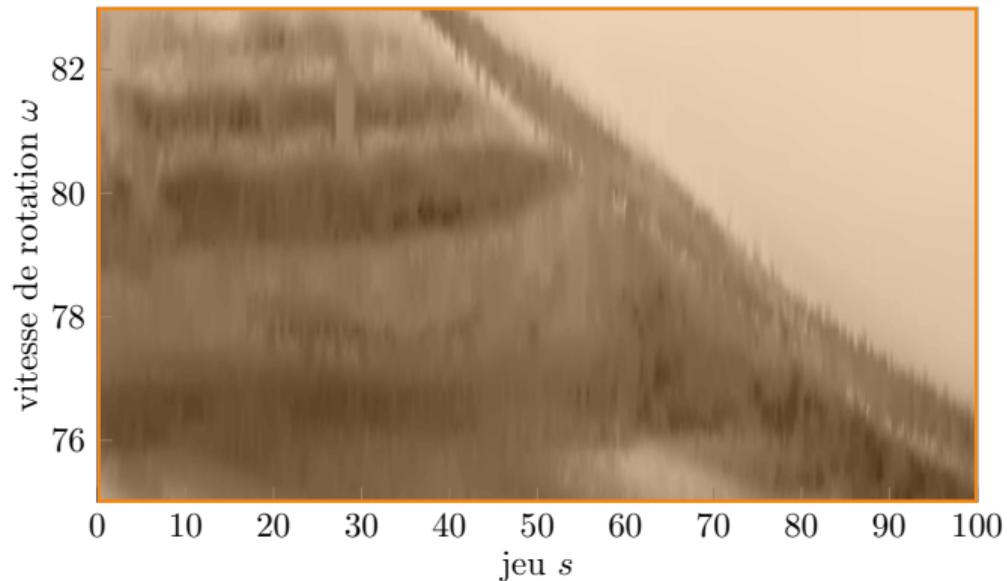
Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Conclusion

Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Problème

Mads

DiscoMads

Convergence

Résultats

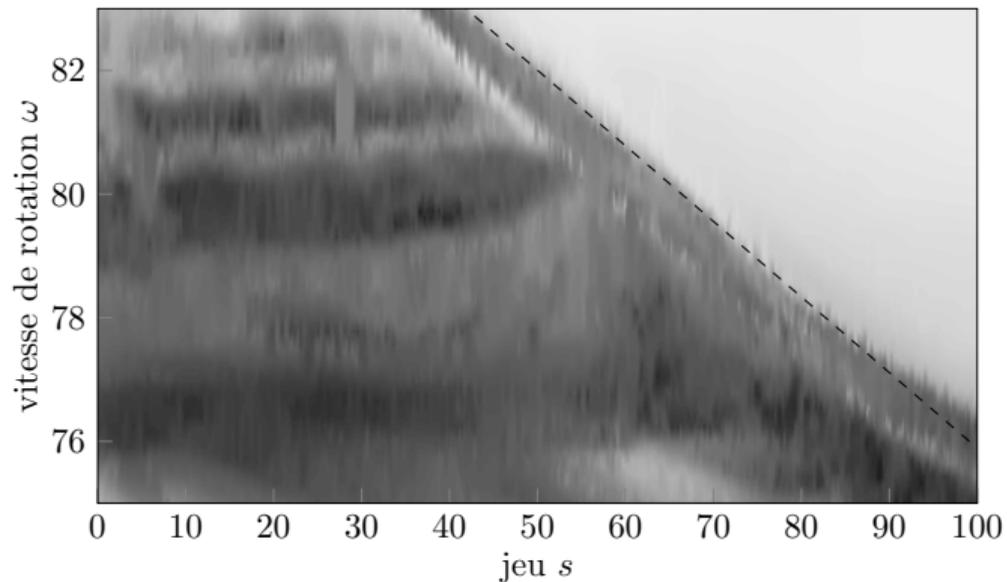
Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

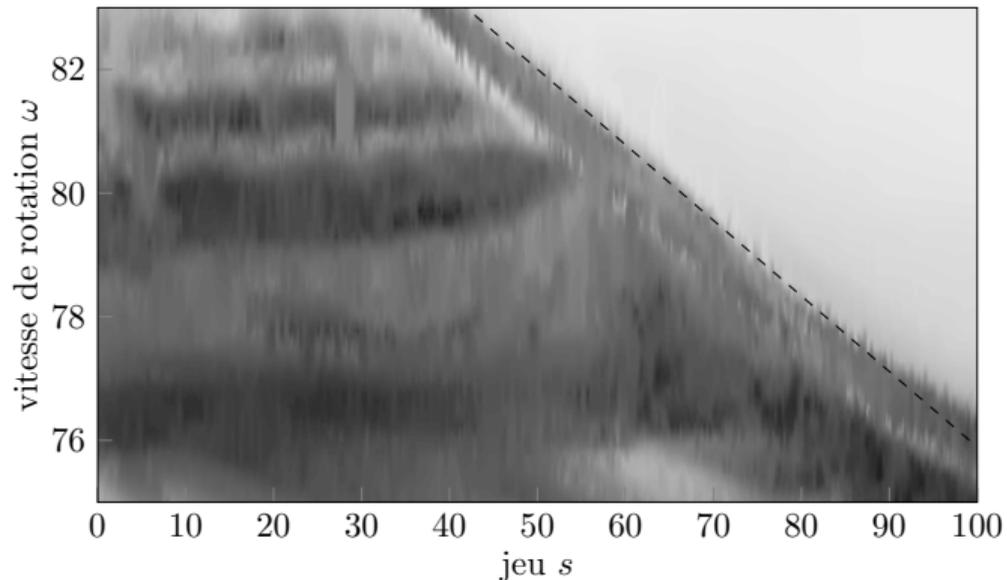
Conclusion

Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion





Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion

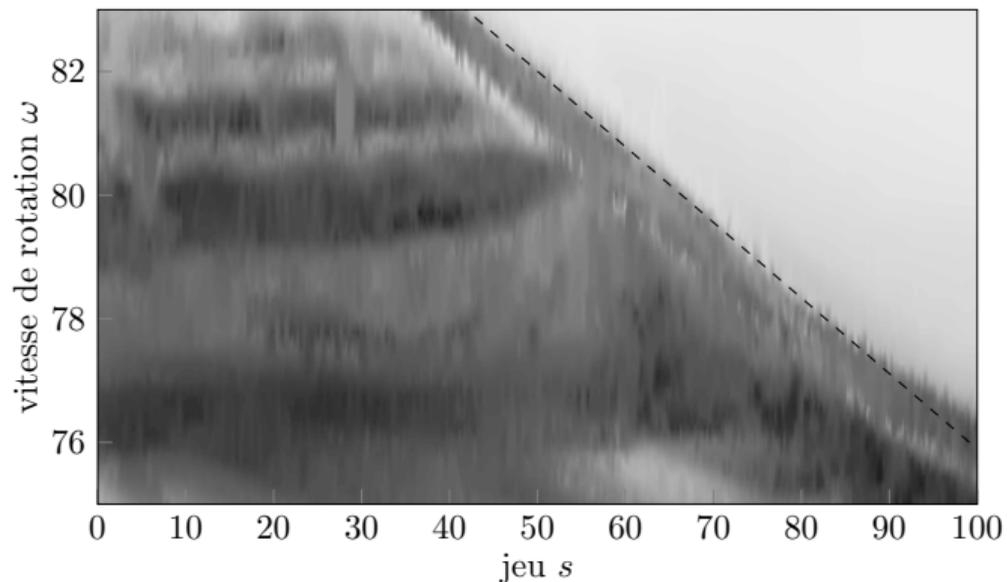


- problème d'optimisation simplifié

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.c.} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \text{et} \quad & \mathbf{d}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

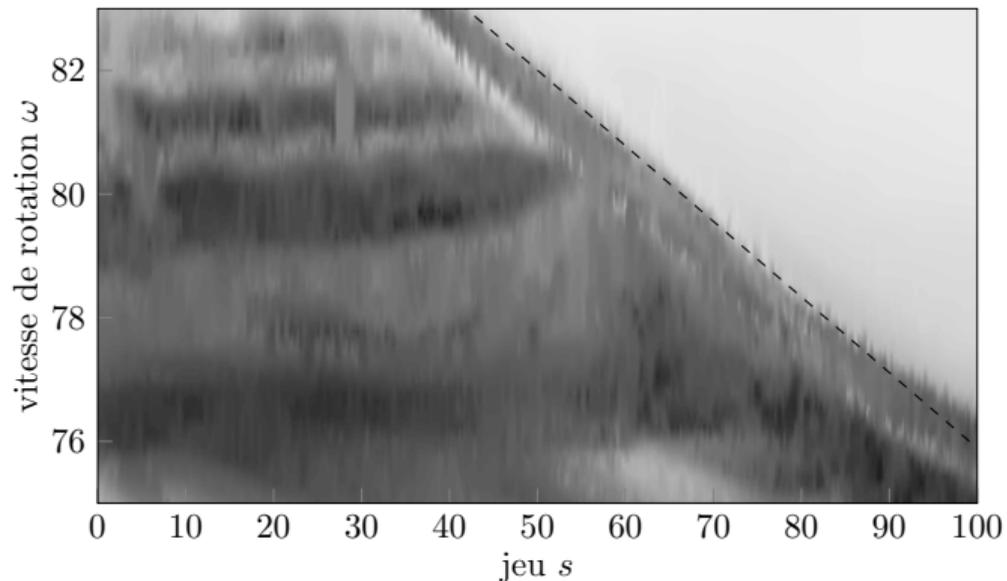
$$\min_{(s,\omega)} f(s,\omega)$$

$$\text{s.c. } c(s,\omega) \leq 0$$

$$\text{et } d(s,\omega) \leq 0$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion

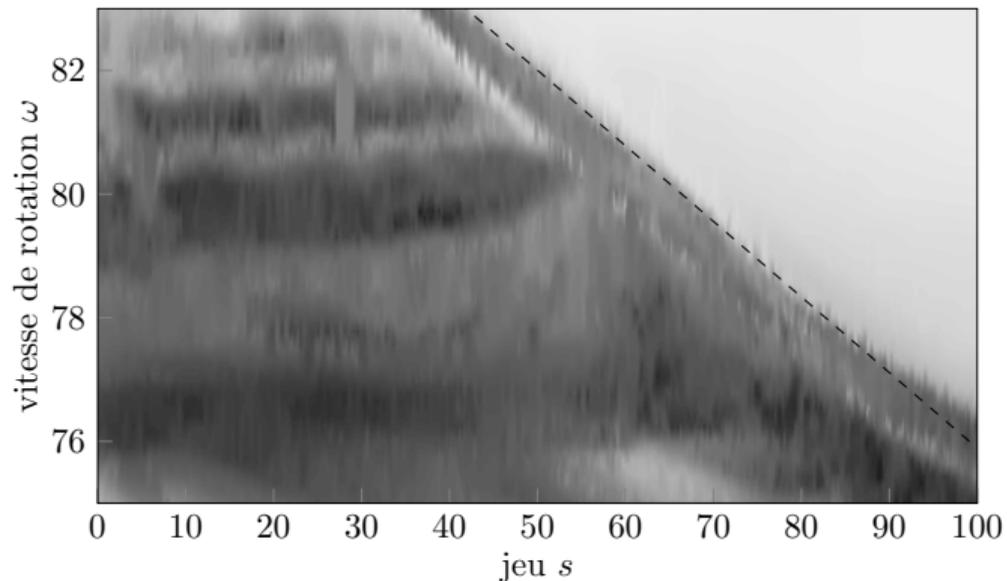


- problème d'optimisation simplifié

$$\begin{aligned} \min_{(s,\omega)} \quad & s \\ \text{s.c.} \quad & c(s,\omega) \leq 0 \\ \text{et} \quad & d(s,\omega) \leq 0 \end{aligned}$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

$$\min_{(s,\omega)} s$$

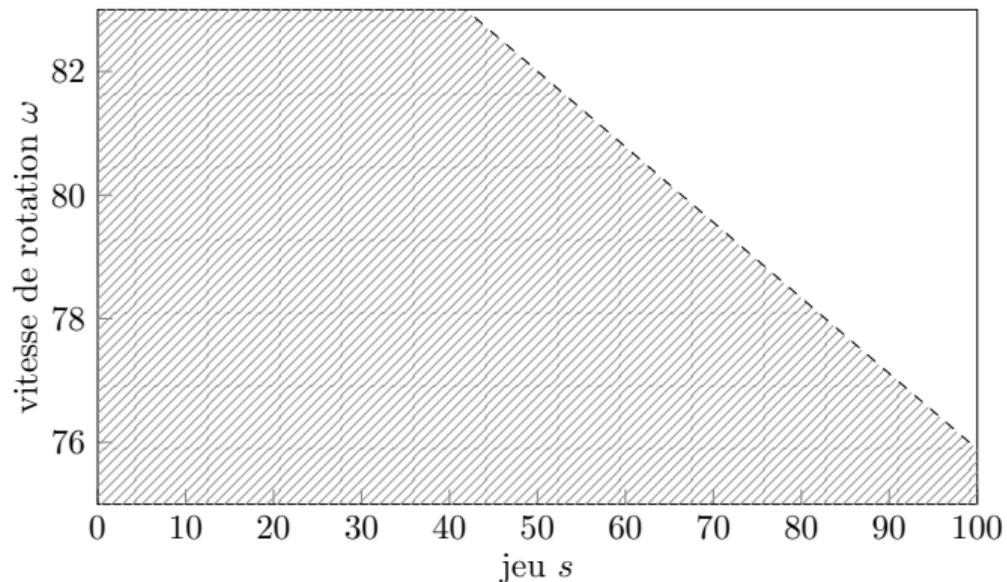
$$\text{s.c. } v(s,\omega) \leq v_{max}$$

$$\text{et } d(s,\omega) \leq 0$$





Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

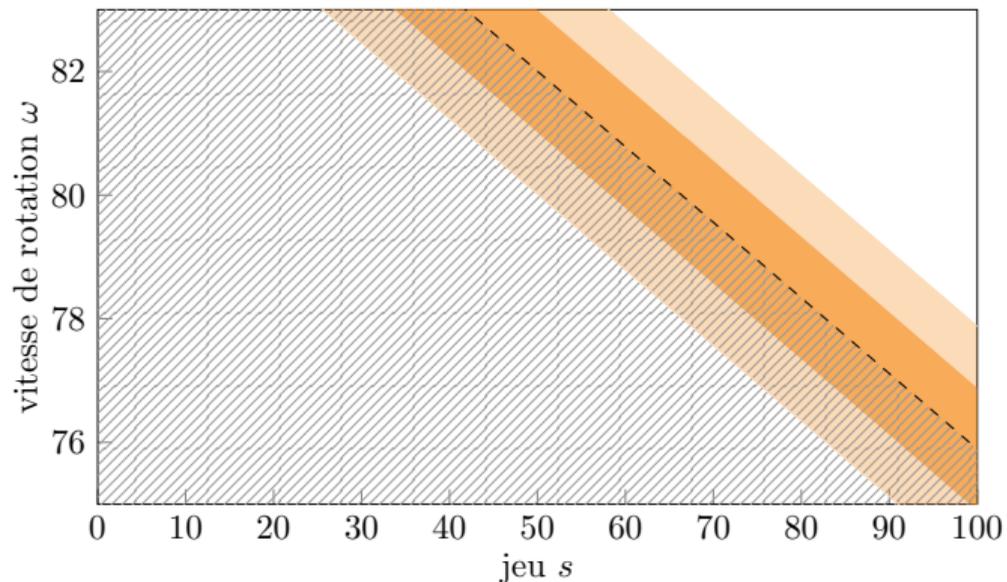
$$\min_{(s, \omega)} s$$

$$\text{s.c. } v(s, \omega) \leq v_{max}$$

$$\text{et } d(s, \omega) \leq 0$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

$$\min_{(s, \omega)} s$$

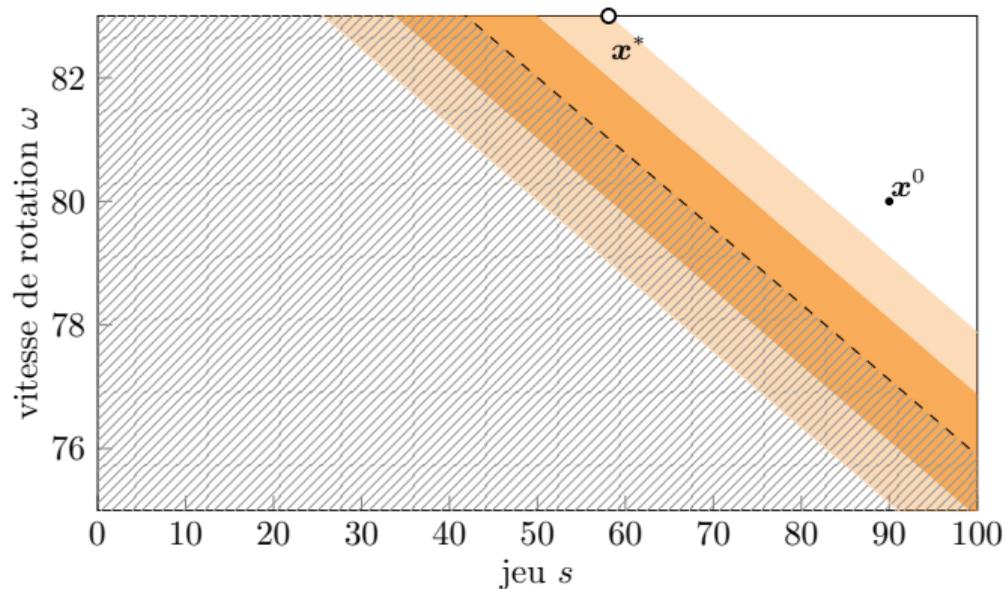
$$\text{s.c. } v(s, \omega) \leq v_{max}$$

$$\text{et } d(s, \omega) \leq 0$$

$$\blacktriangleright r_d = 1 \quad \tau = 0,4 \quad r_e = 1$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

$$\min_{(s,\omega)} s$$

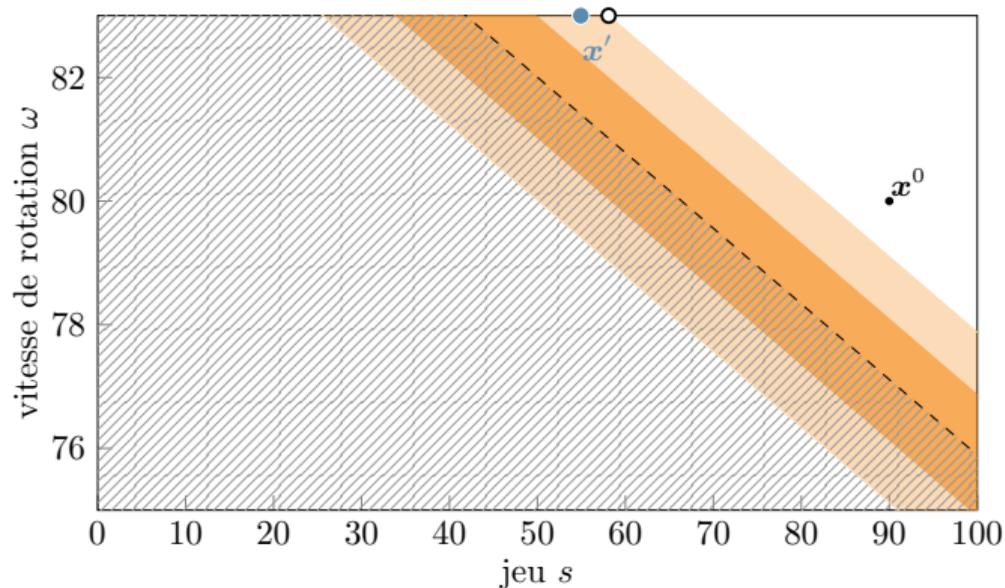
$$\text{s.c. } v(s,\omega) \leq v_{max}$$

$$\text{et } d(s,\omega) \leq 0$$

$$\blacktriangleright r_d = 1 \quad \tau = 0,4 \quad r_e = 1$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

$$\min_{(s, \omega)} s$$

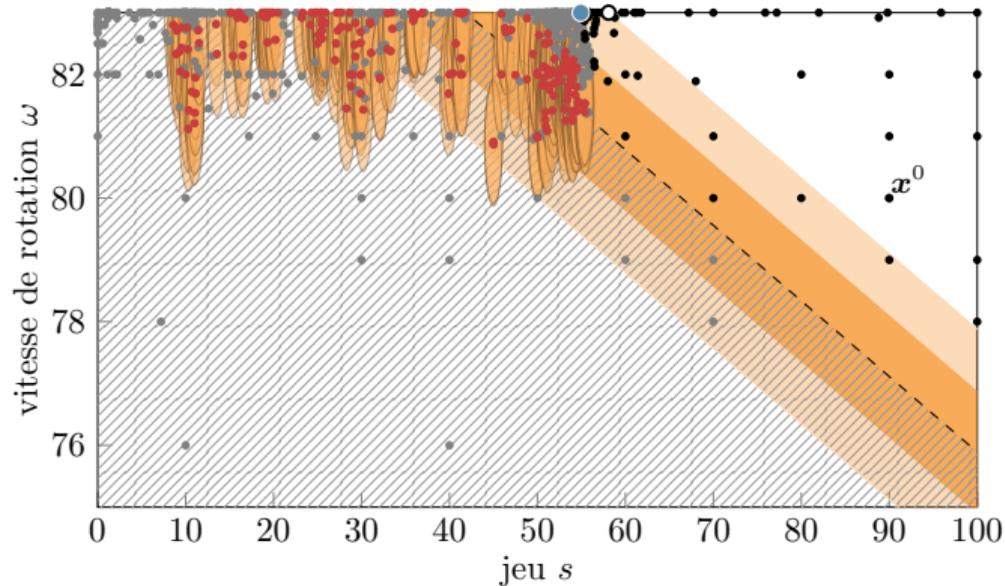
$$\text{s.c. } v(s, \omega) \leq v_{max}$$

$$\text{et } d(s, \omega) \leq 0$$

$$\blacktriangleright r_d = 1 \quad \tau = 0,4 \quad r_e = 1$$



Problème de vibrations d'aubes de moteurs d'avion



- problème d'optimisation simplifié

$$\min_{(s, \omega)} s$$

$$\text{s.c. } v(s, \omega) \leq v_{max}$$

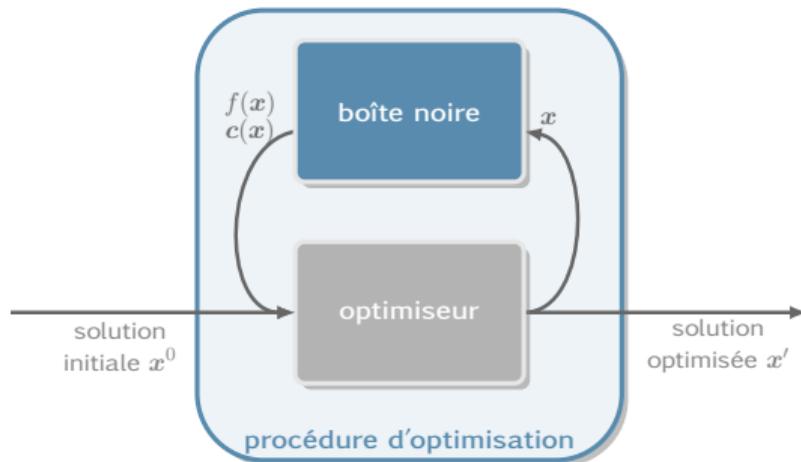
$$\text{et } d(s, \omega) \leq 0$$

$$\blacktriangleright r_d = 1 \quad \tau = 0,4 \quad r_e = 1$$



DiscoMads : un algorithme d'éloignement aux discontinuités en optimisation de boîtes noires

- algorithme basé sur l'algorithme de recherche directe Mads
- analyse de convergence
- validation sur des problèmes analytiques et issus du génie





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Analyse mécanique

Solution proposée

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Conclusion

① Introduction

② Algorithme d'optimisation

③ Pertinence industrielle

④ Outil de modélisation

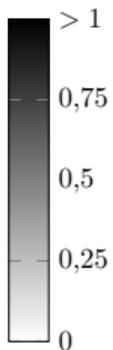
⑤ Reconception d'aubes industrielles

⑥ Conclusion

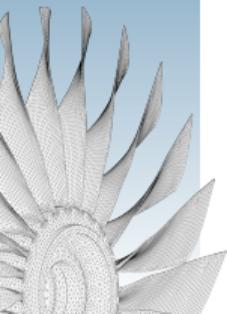




Analyse mécanique

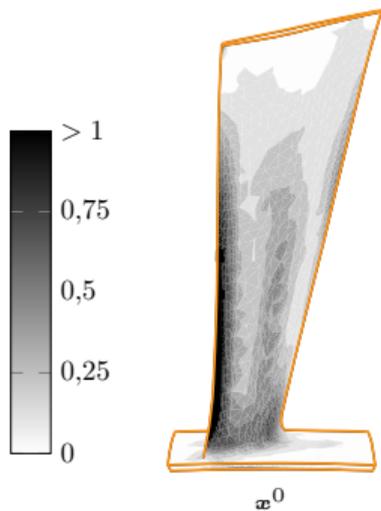


- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)





Analyse mécanique

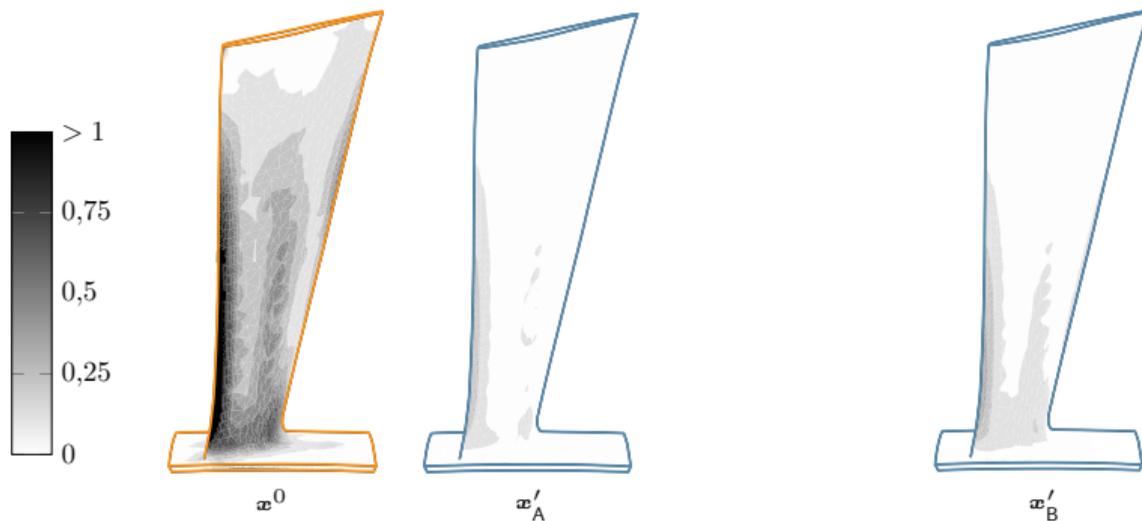


- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)
 - ▶ (—) configuration initiale → critique





Analyse mécanique



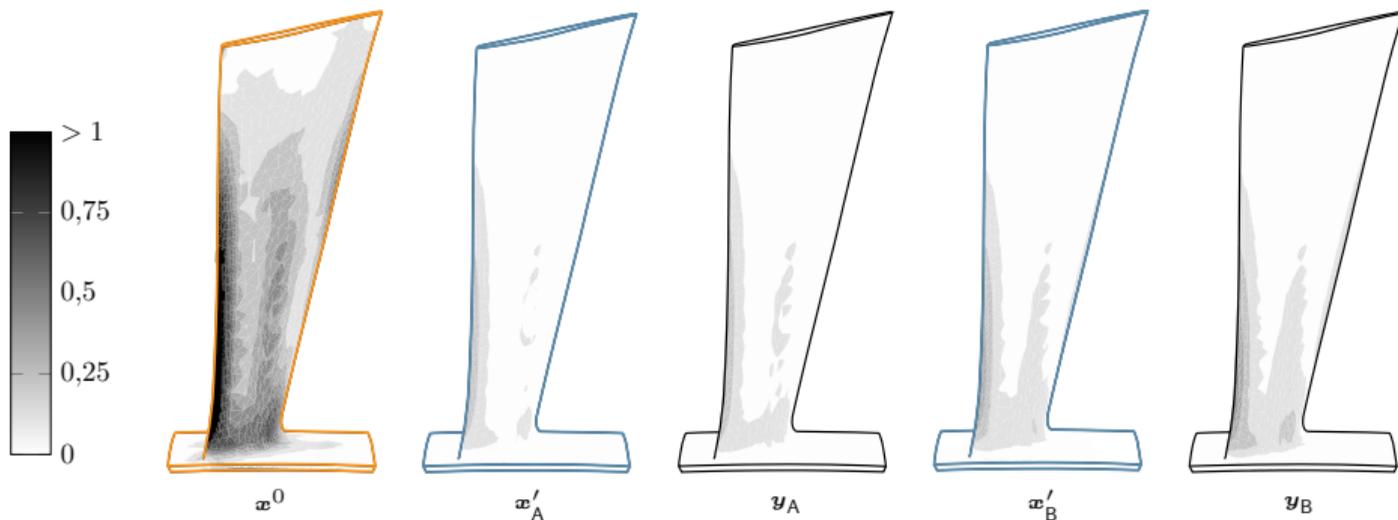
- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)

- ▶ (—) configuration initiale → critique
- ▶ (—) configurations optimisées → pertinentes





Analyse mécanique



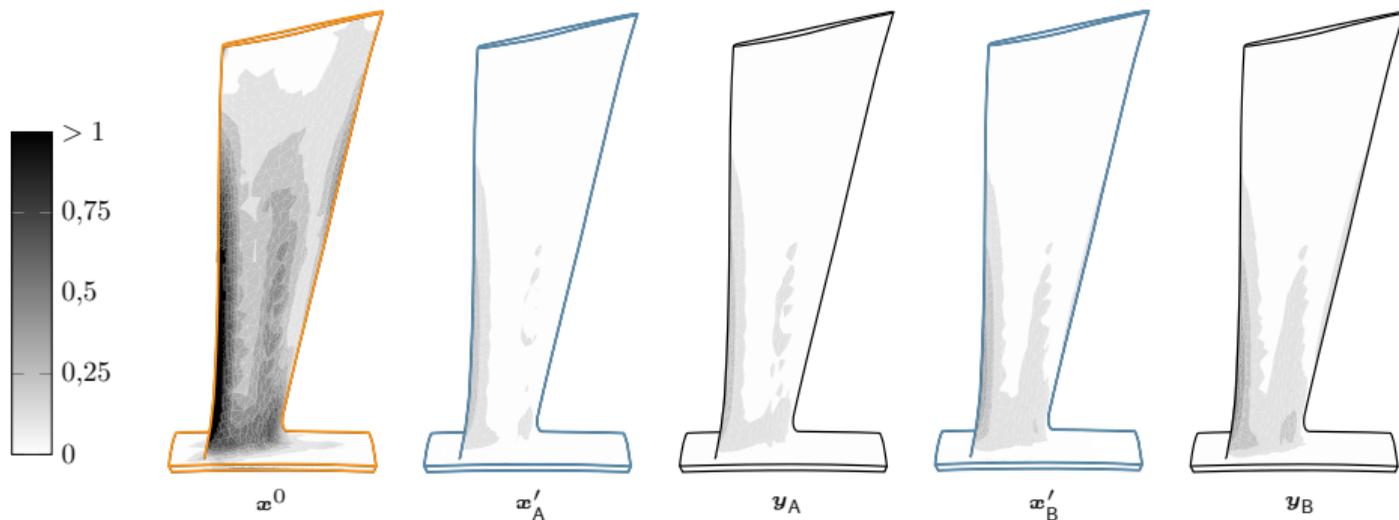
- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)

- ▶ (—) configuration initiale → critique
- ▶ (—) configurations optimisées → pertinentes
- ▶ (—) configurations voisines → pertinentes





Analyse mécanique

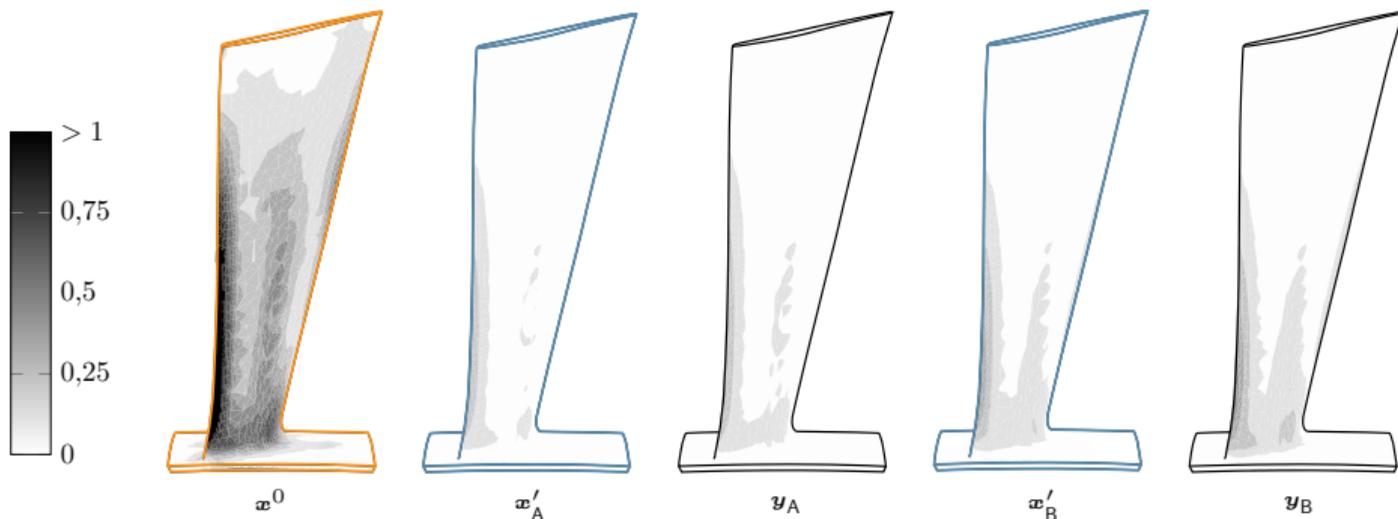


- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)
 - ▶ (—) configuration initiale → critique
 - ▶ (—) configurations optimisées → pertinentes
 - ▶ (—) configurations voisines → pertinentes
- fort potentiel d'amélioration de la robustesse au contact





Analyse mécanique

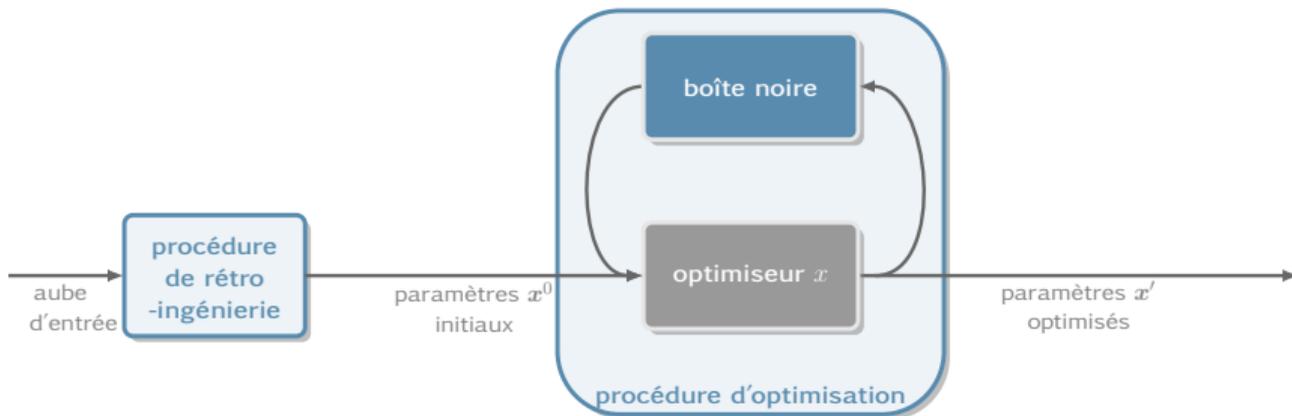


- niveau de contraintes par configuration (jeu, vitesse)
 - ▶ (—) configuration initiale → critique
 - ▶ (—) configurations optimisées → pertinentes
 - ▶ (—) configurations voisines → pertinentes
- fort potentiel d'amélioration de la robustesse au contact

Comment améliorer la robustesse au contact
des aubes en variant leur géométrie ?

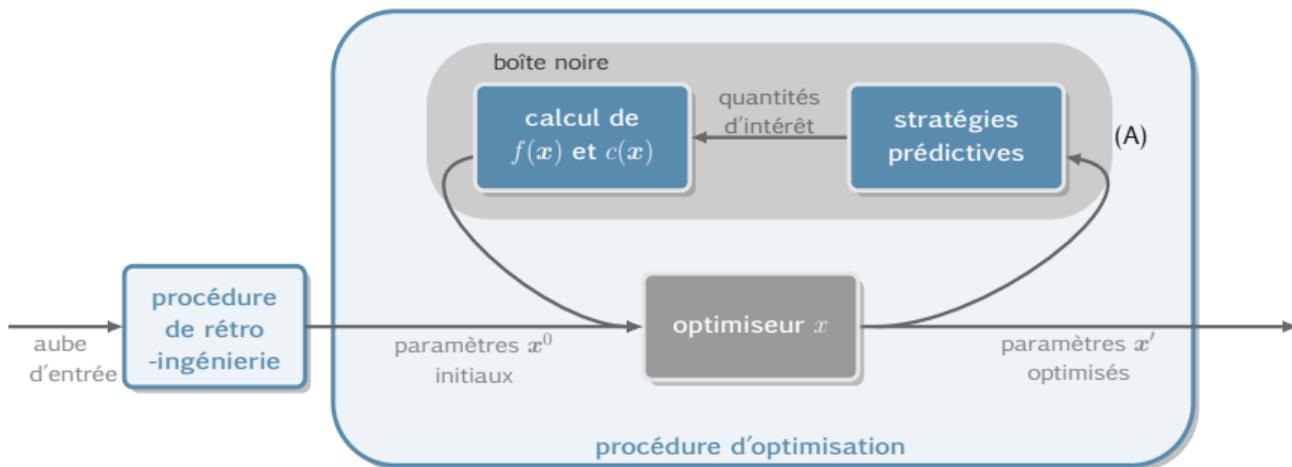


Processus de reconception proposé



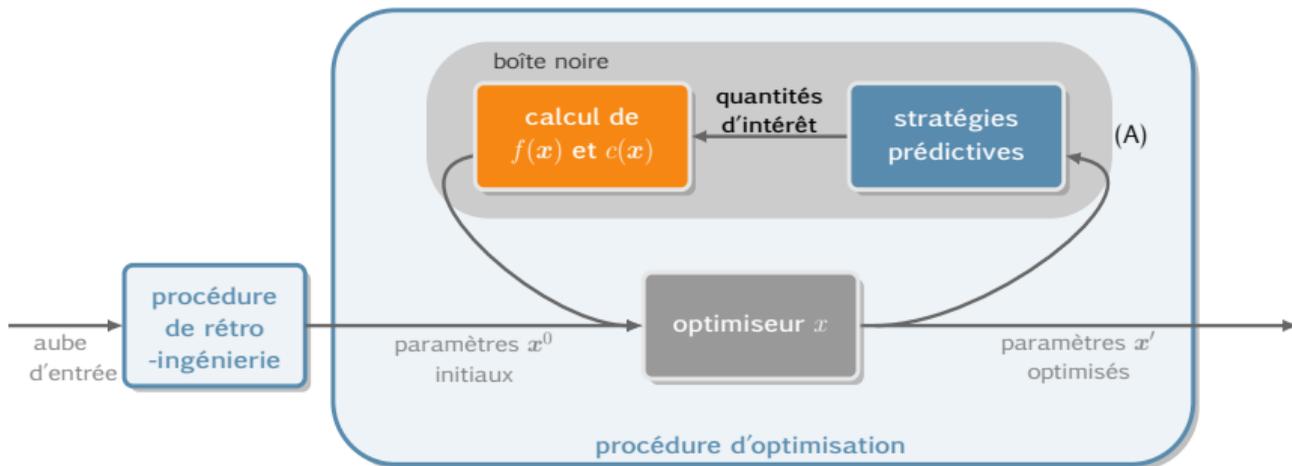


Processus de reconception proposé





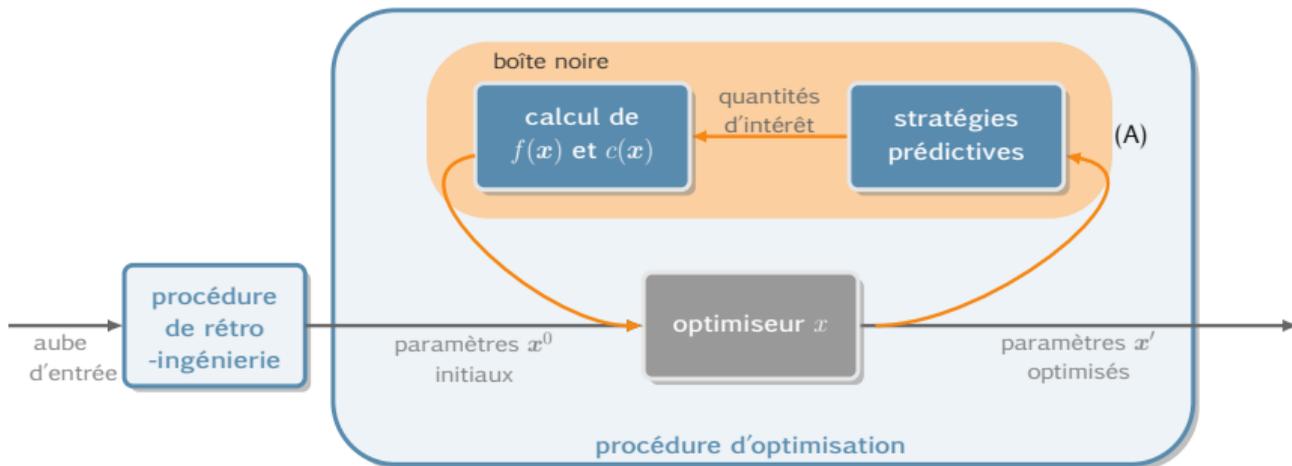
Processus de reconception proposé



- verrou scientifique : **absence de critères de conception établis**



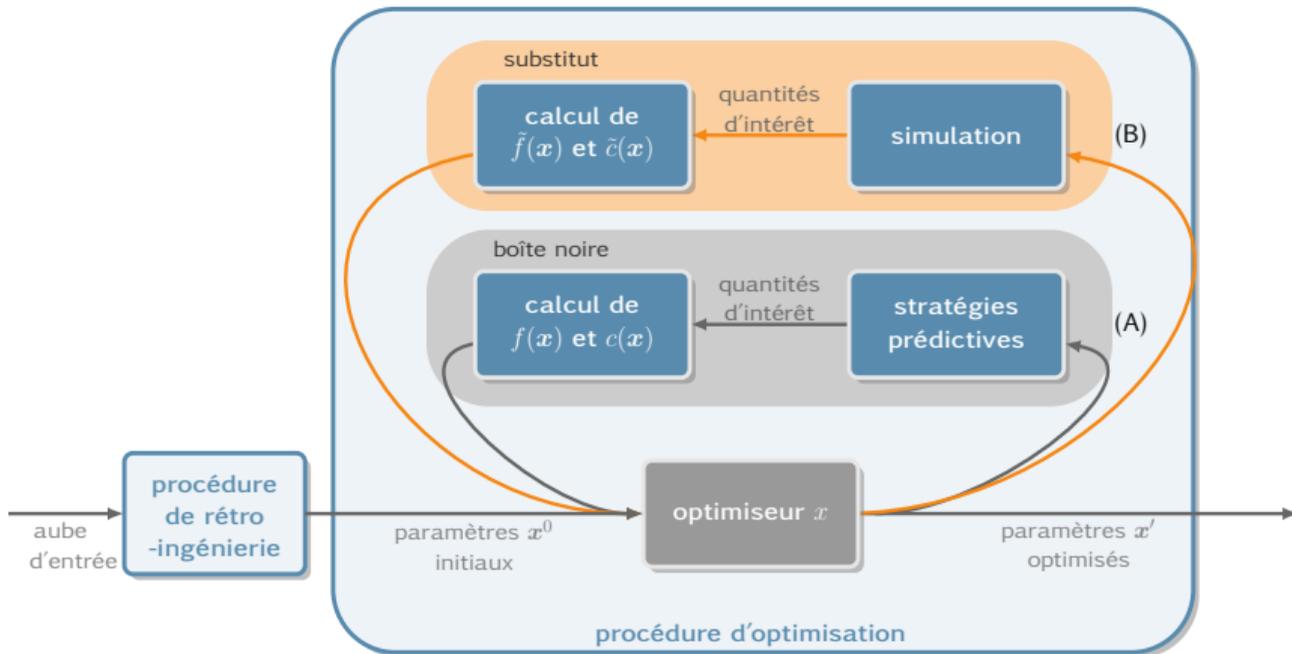
Processus de reconception proposé



- verrou scientifique : **absence de critères de conception établis**
- stratégies
 - Ⓐ recherche de quantités d'intérêt pertinentes



Processus de reconception proposé



- verrou scientifique : **absence de critères de conception établis**
- stratégies
 - A recherche de quantités d'intérêt pertinentes
 - B définition de fonction objectif et contraintes substitués \implies **efficacité numérique**



Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

Méthodologie

Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

Conclusion

① Introduction

② Algorithme d'optimisation

③ Pertinence industrielle

④ Outil de modélisation

⑤ Reconception d'aubes industrielles

⑥ Conclusion

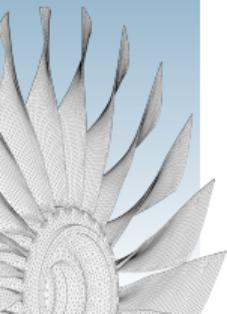




Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé

outil de
modélisation
pour la
reconception
d'aubes





Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé

cadre
d'application

outil de
modélisation
pour la
reconception
d'aubes

- étapes de reconception

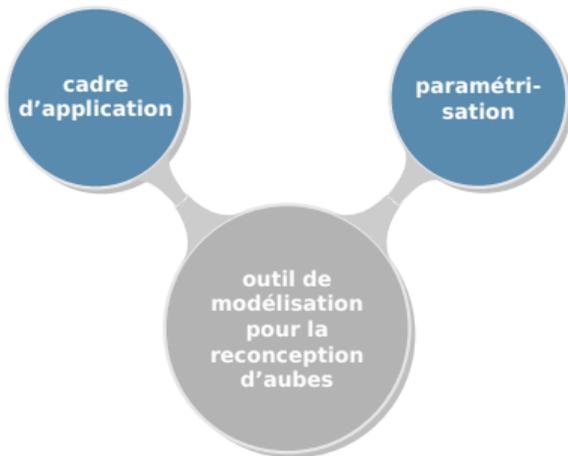
- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse





Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



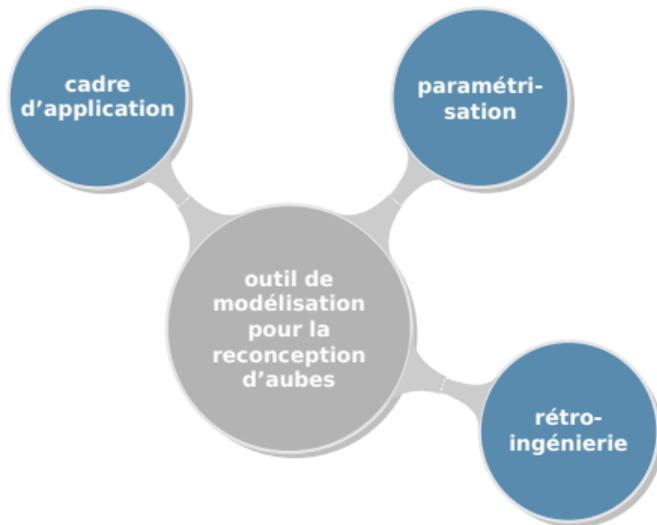
- étapes de reconception
 - ① rétro-ingénierie
 - ② optimisation
 - ③ analyse





Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



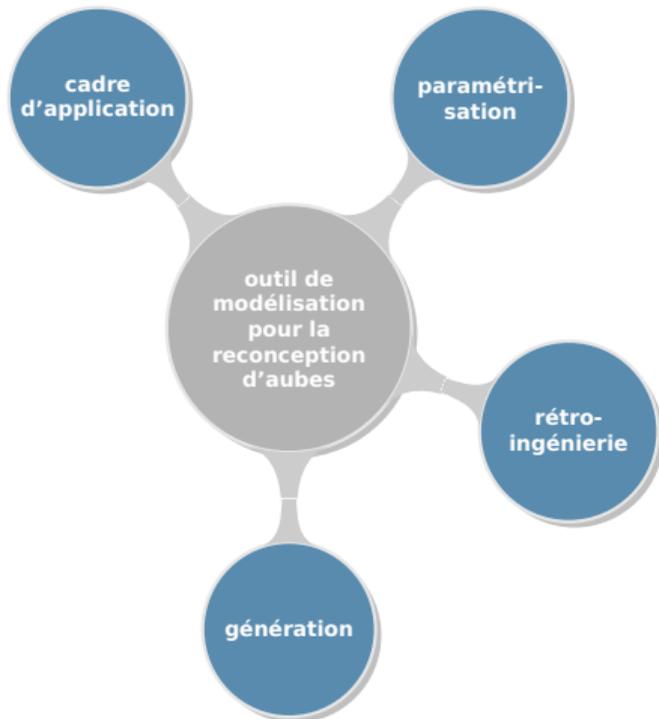
- étapes de reconception
 - ① rétro-ingénierie
 - ② optimisation
 - ③ analyse





Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception

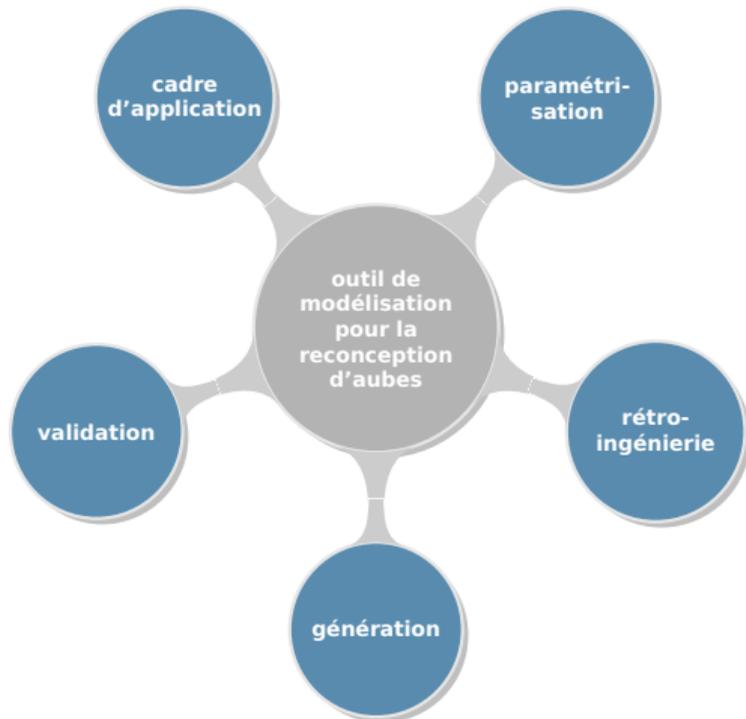
- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse





Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



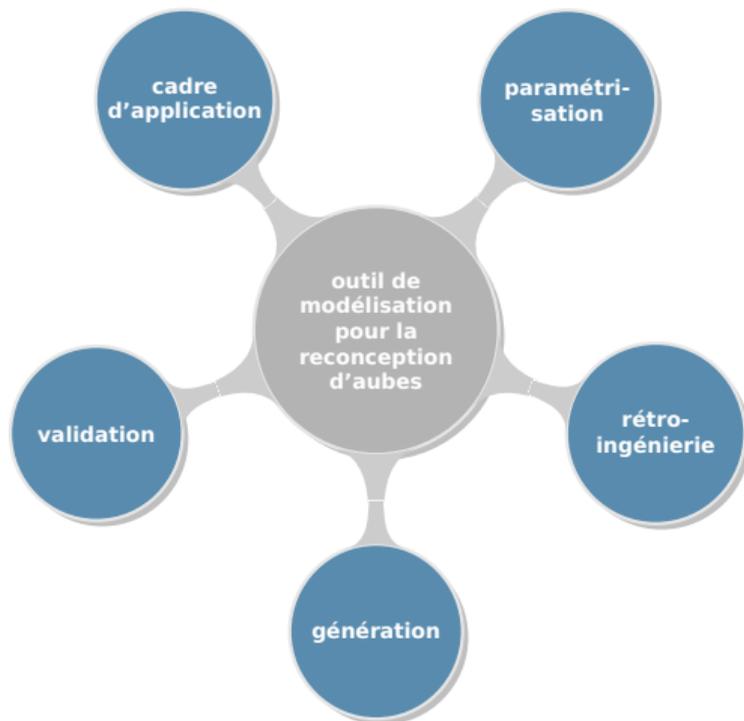
- étapes de reconception

- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception
 - ① rétro-ingénierie
 - ② optimisation
 - ③ analyse
- exigences pour l'outil



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé

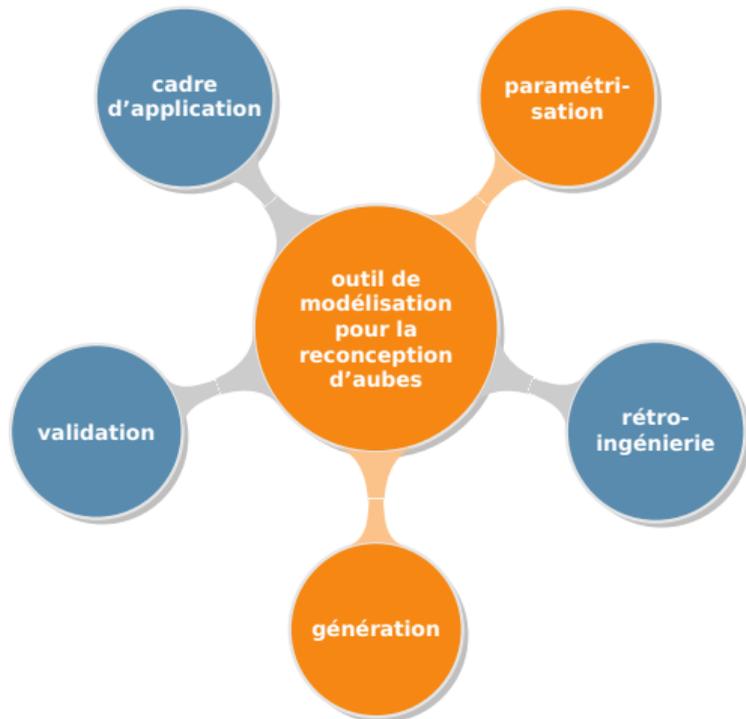


- étapes de reconception
 - ① rétro-ingénierie
 - ② optimisation
 - ③ analyse
- exigences pour l'outil
 - ▶ polyvalence
 - ▶ interprétabilité



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception

- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse

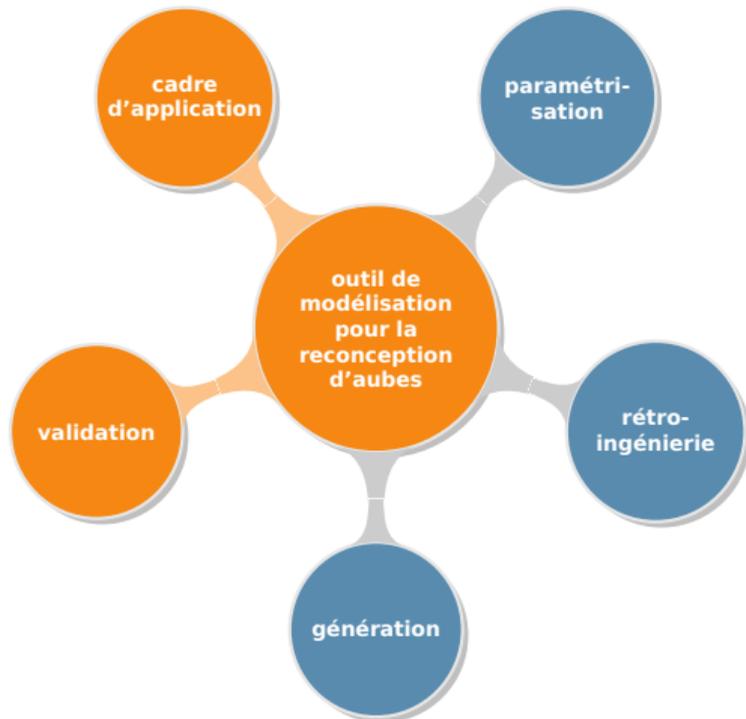
- exigences pour l'outil

- ▶ polyvalence
- ▶ interprétabilité
- ▶ résolution



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception

- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse

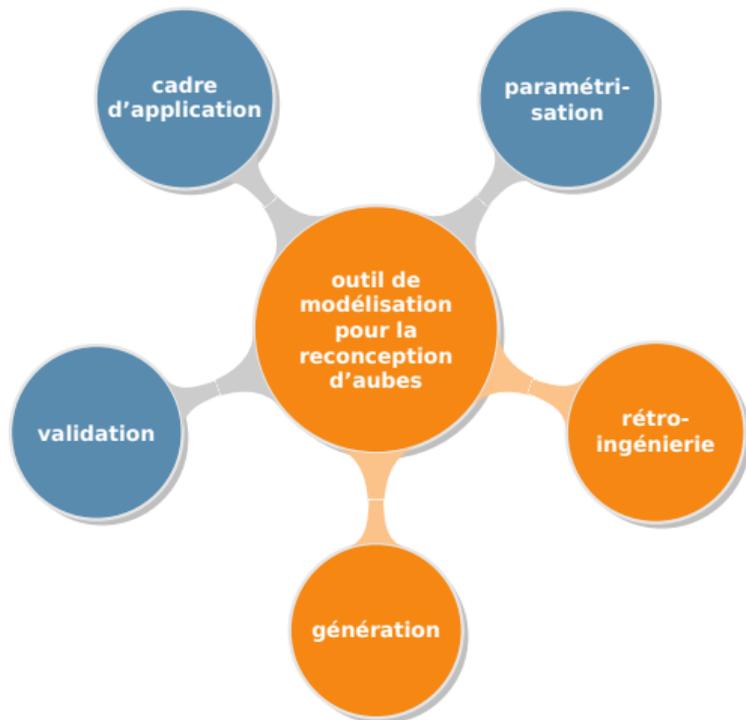
- exigences pour l'outil

- ▶ polyvalence
- ▶ interprétabilité
- ▶ résolution
- ▶ fidélité



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception

- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse

- exigences pour l'outil

- ▶ polyvalence
- ▶ interprétabilité
- ▶ résolution
- ▶ fidélité
- ▶ robustesse



Contexte et exigences

Développer un outil de modélisation adapté
au processus de reconception proposé



- étapes de reconception

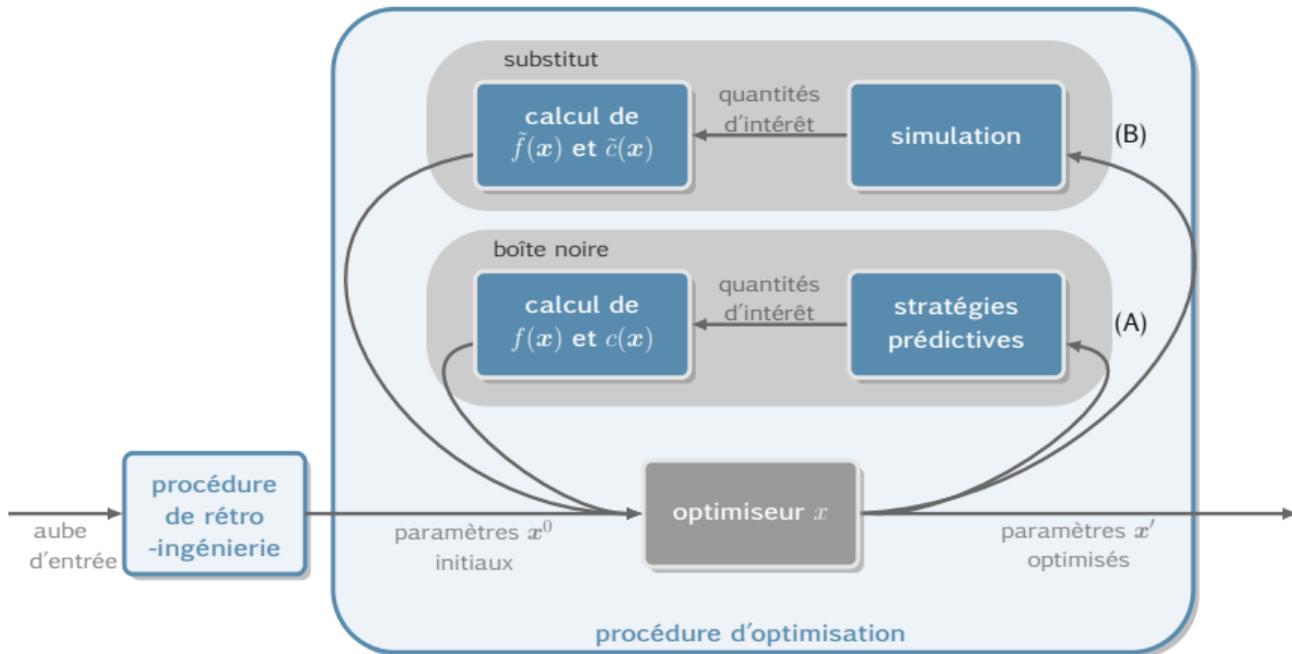
- ① rétro-ingénierie
- ② optimisation
- ③ analyse

- exigences pour l'outil

- ▶ polyvalence
- ▶ interprétabilité
- ▶ résolution
- ▶ fidélité
- ▶ robustesse
- ▶ efficacité numérique

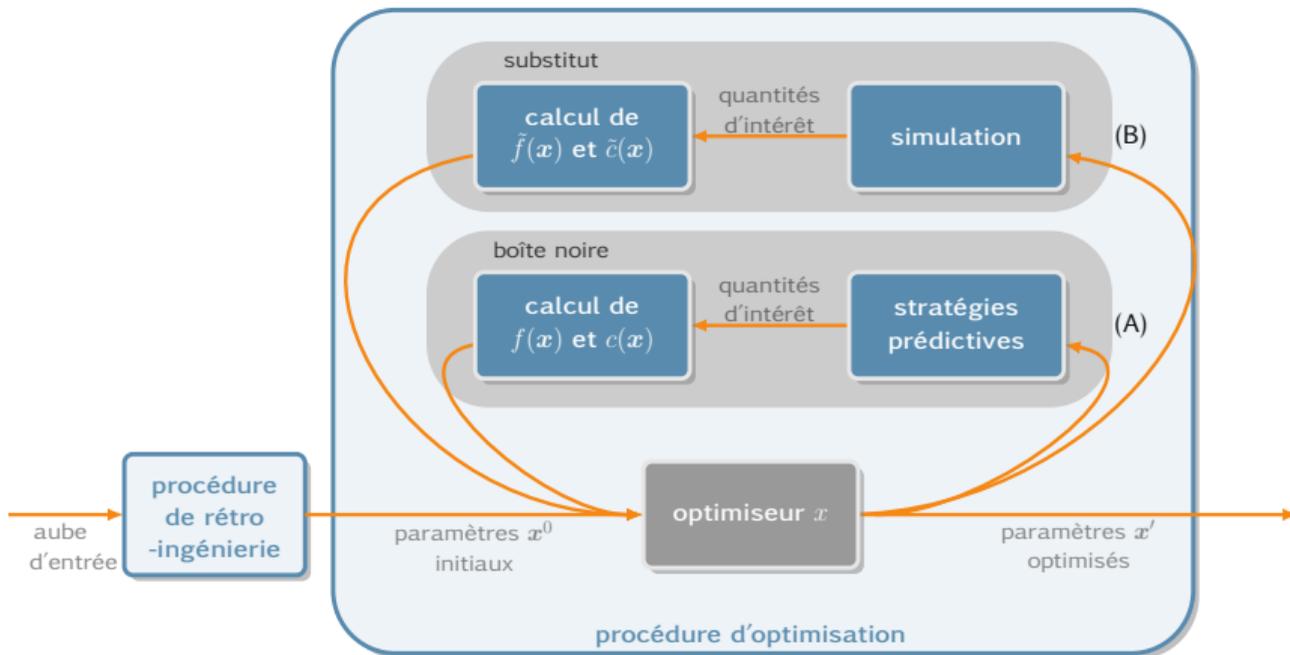


Outil de modélisation développé





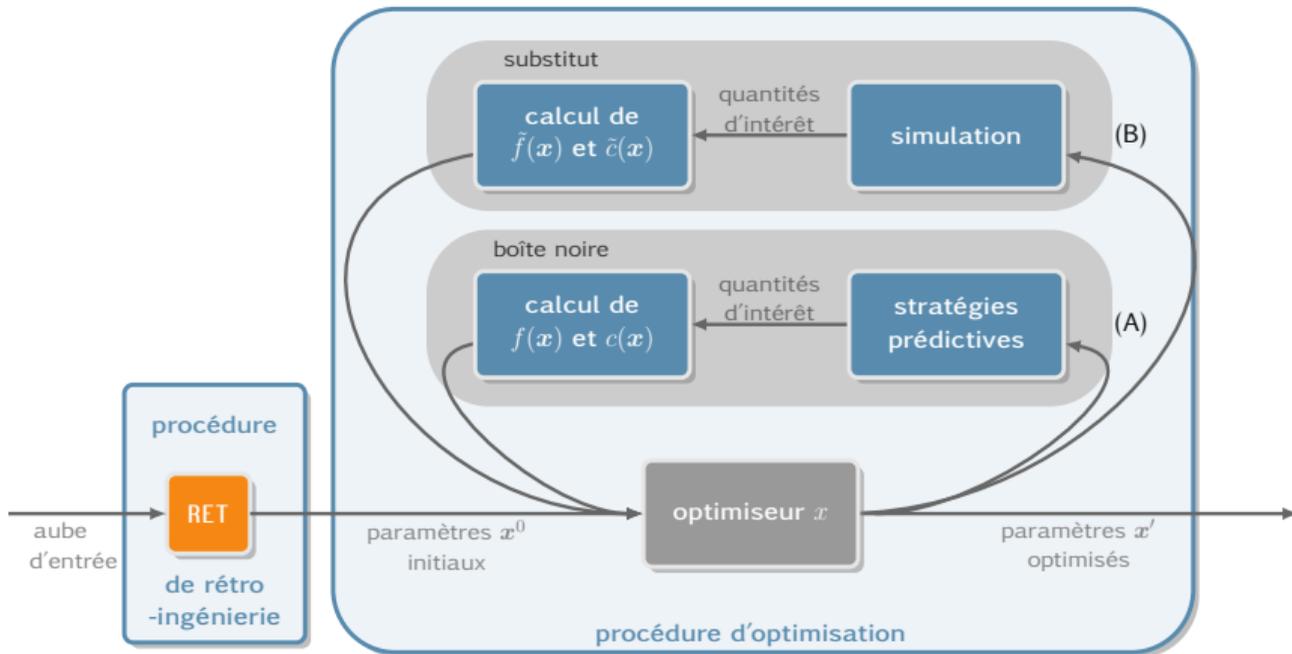
Outil de modélisation développé



- paramétrisation



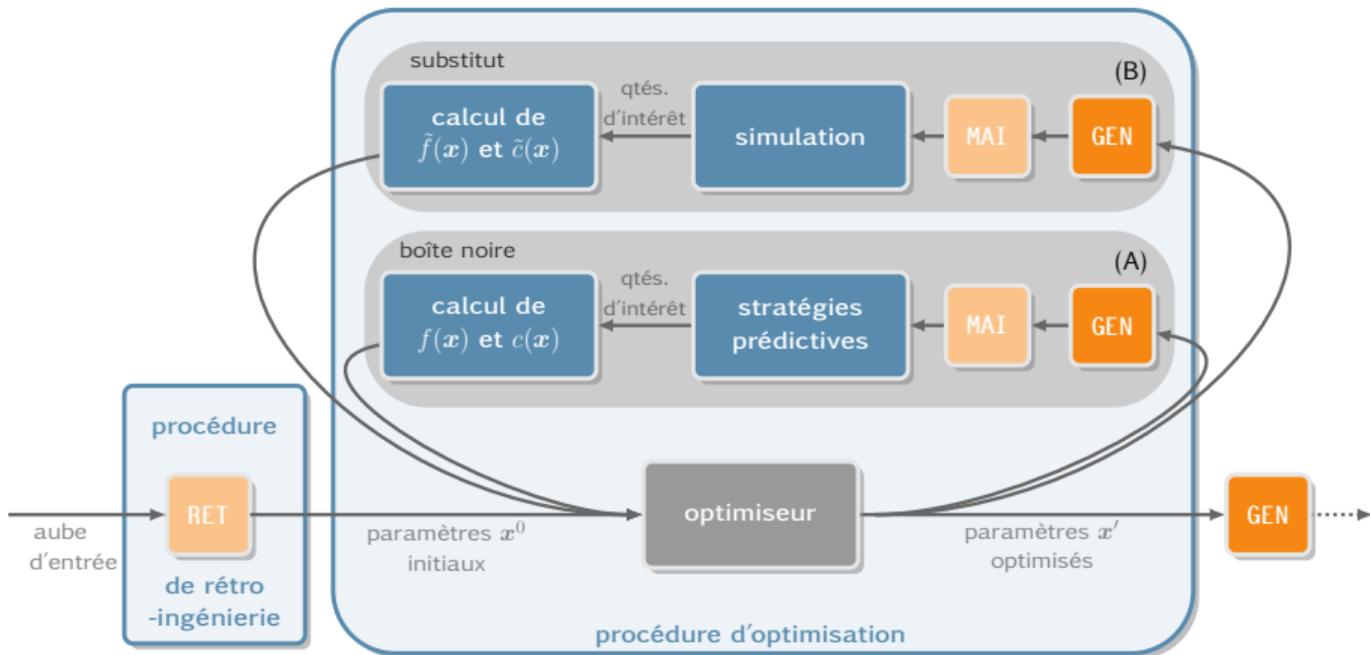
Outil de modélisation développé



- paramétrisation
- module de rétro-ingénierie : CAO \rightarrow paramètres



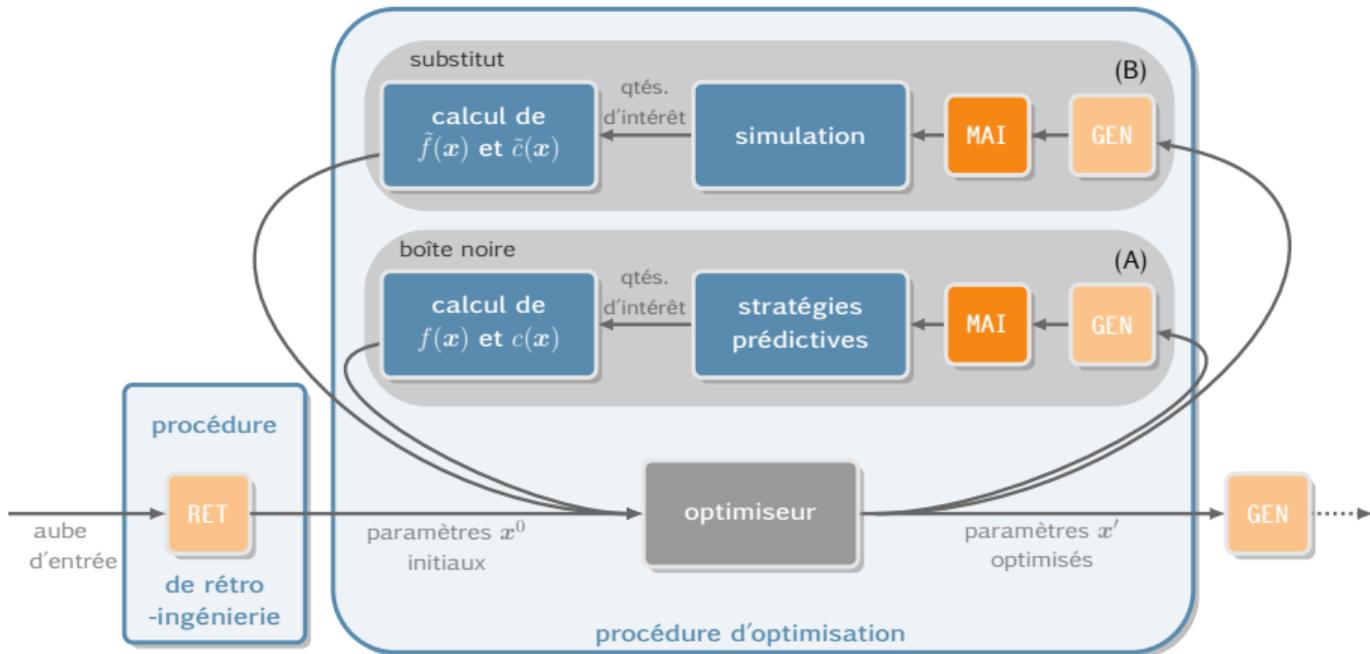
Outil de modélisation développé



- paramétrisation
- module de rétro-ingénierie : CAO \rightarrow paramètres
- module de génération de CAO : paramètres \rightarrow CAO



Outil de modélisation développé



- paramétrisation
- module de rétro-ingénierie : CAO \rightarrow paramètres
- module de génération de CAO : paramètres \rightarrow CAO
- module de maillage : CAO \rightarrow maillage



Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

Méthodologie

Validation

Bilan

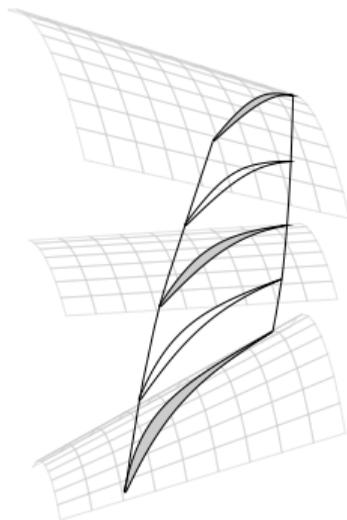
Reconception
d'aubes

Conclusion



Paramétrisation

- n_{sec} sections
coniques

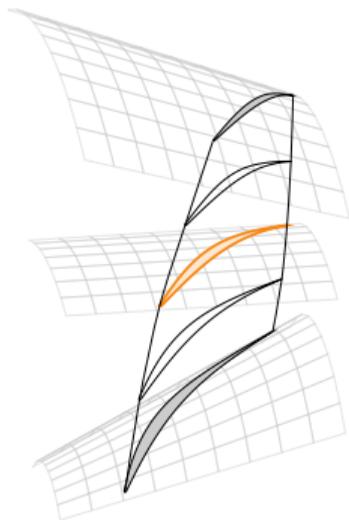




Paramétrisation

- paramètres de section

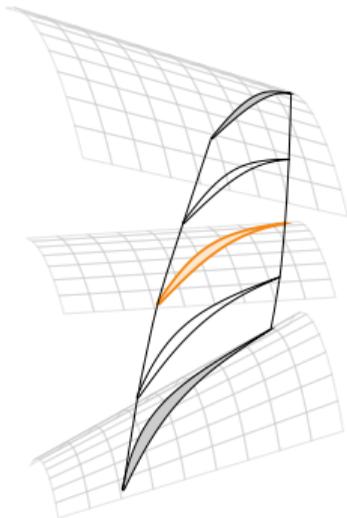
- n_{sec} sections
coniques



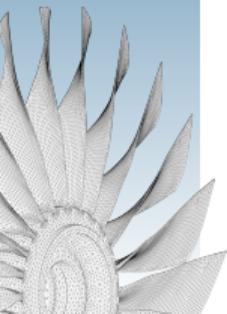
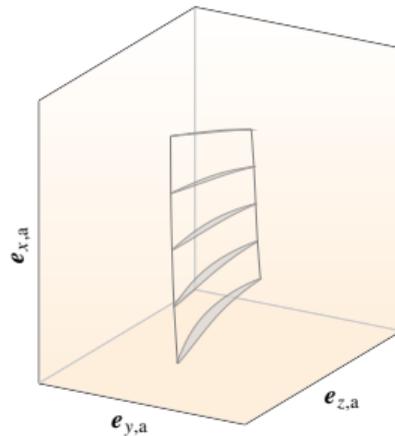


Paramétrisation

- n_{sec} sections coniques



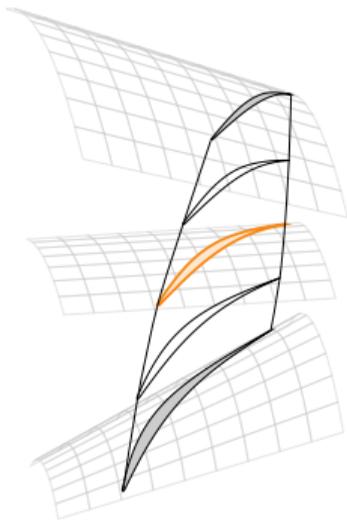
- paramètres de section
 - ▶ 5 paramètres d'empilement



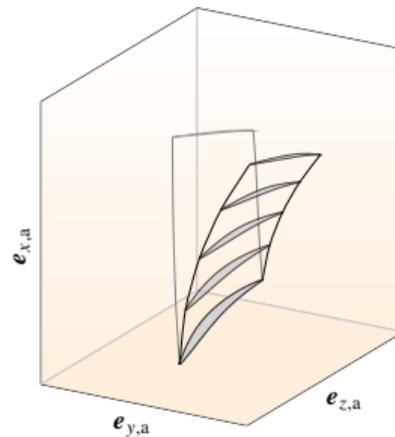


Paramétrisation

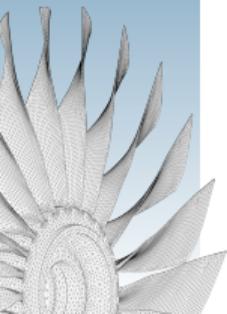
- n_{sec} sections coniques



- paramètres de section
 - ▶ 5 paramètres d'empilement



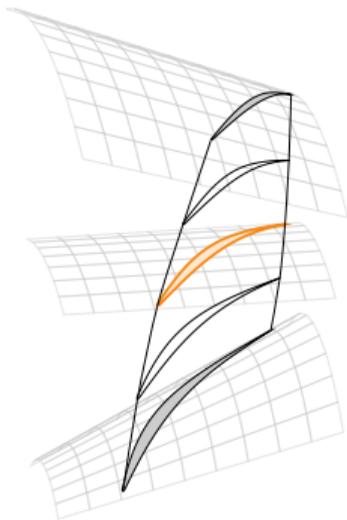
- ▶ angle d'inclinaison



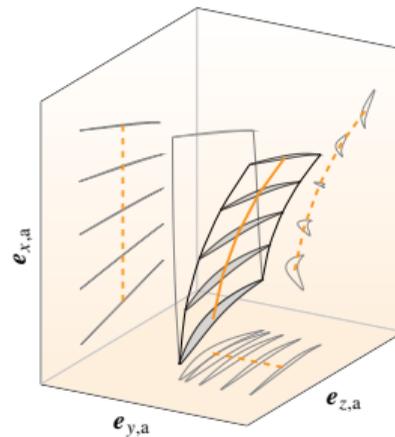


Paramétrisation

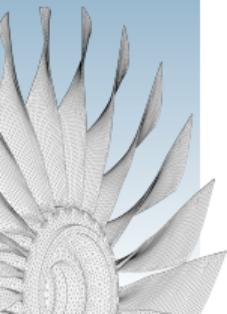
- n_{sec} sections coniques



- paramètres de section
 - ▶ 5 paramètres d'empilement



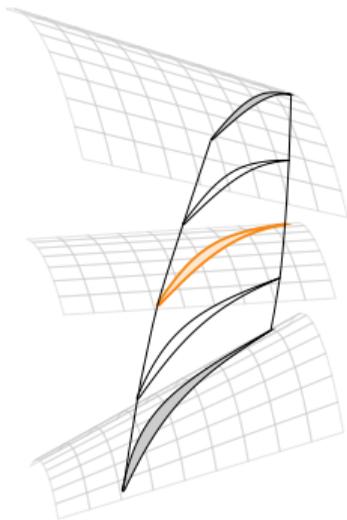
- ▶ angle d'inclinaison



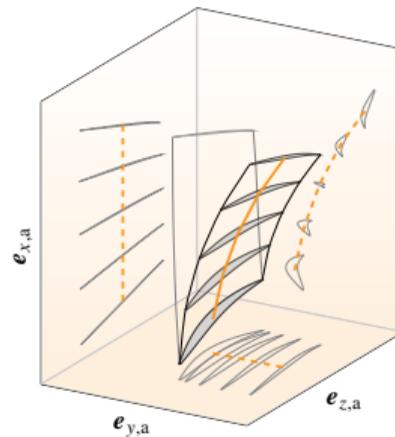


Paramétrisation

- n_{sec} sections coniques

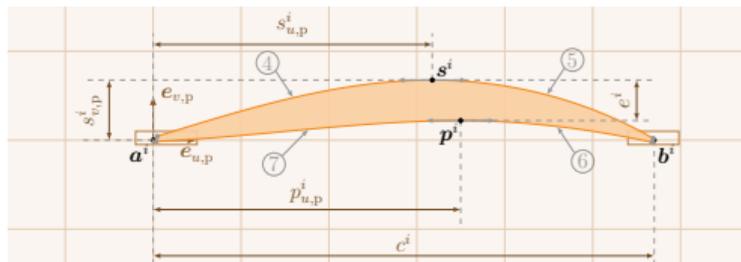


- paramètres de section
 - ▶ 5 paramètres d'empilement



- ▶ angle d'inclinaison

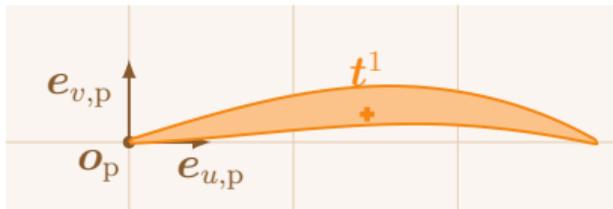
- ▶ 14 paramètres de profil





Modules de génération de CAO et maillage

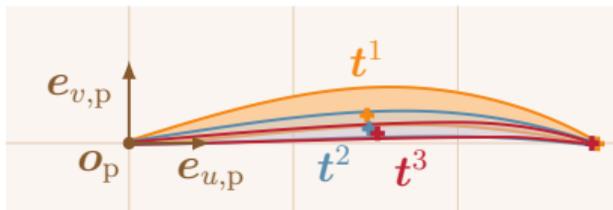
paramètres
de profil





Modules de génération de CAO et maillage

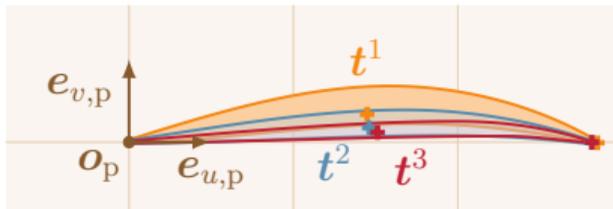
paramètres
de profil



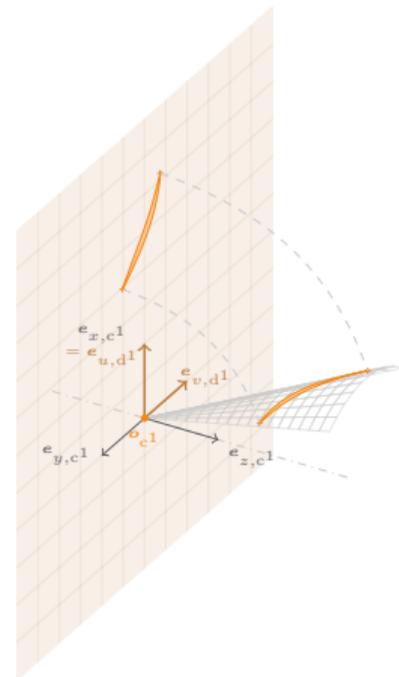


Modules de génération de CAO et maillage

paramètres
de profil



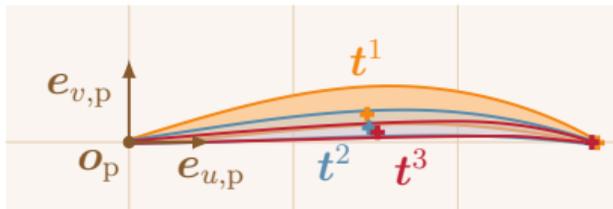
paramètres
d'empilement



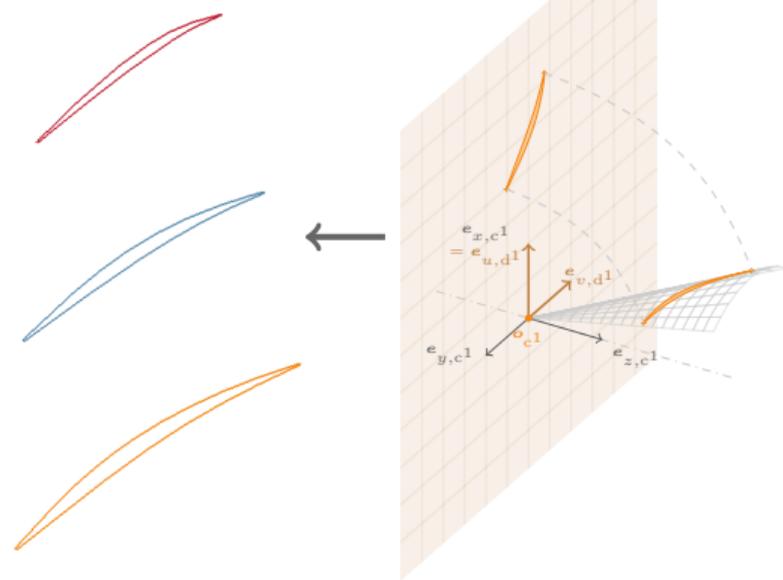


Modules de génération de CAO et maillage

paramètres
de profil



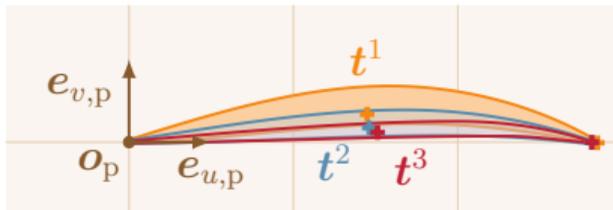
paramètres
d'empilement



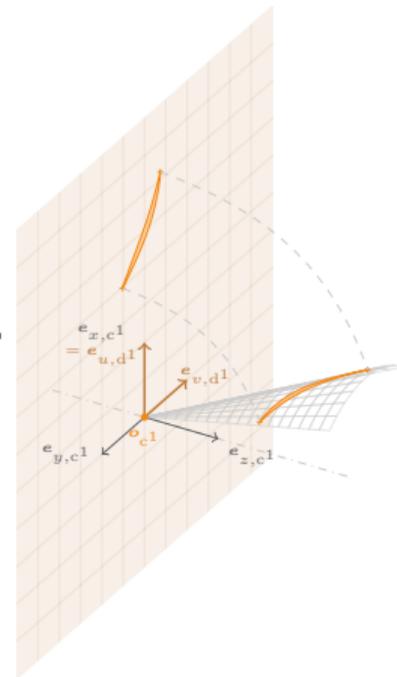
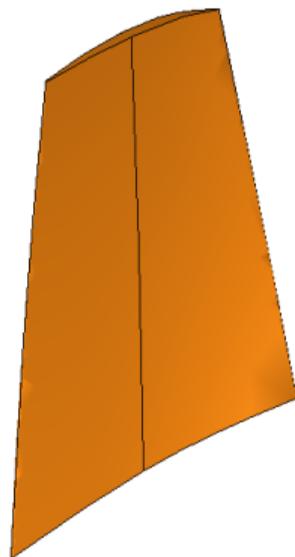


Modules de génération de CAO et maillage

paramètres
de profil



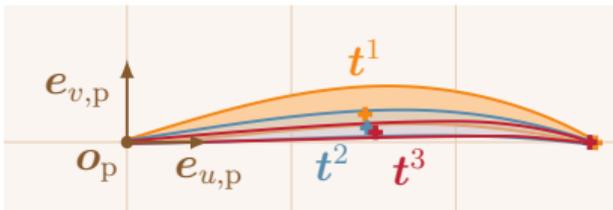
paramètres
d'empilement



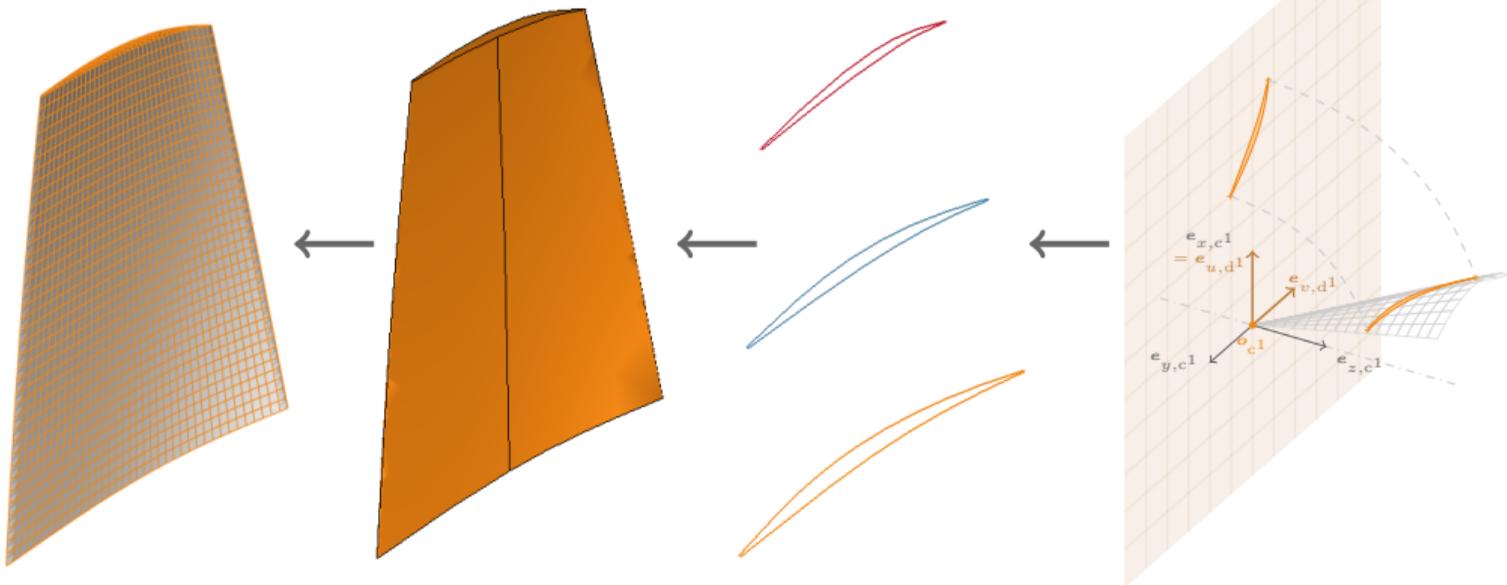


Modules de génération de CAO et maillage

paramètres
de profil



paramètres
d'empilement





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

Méthodologie

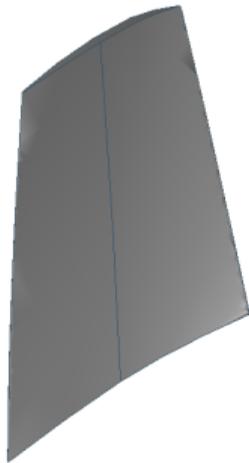
Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

Conclusion

Module de rétro-ingénierie





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

Méthodologie

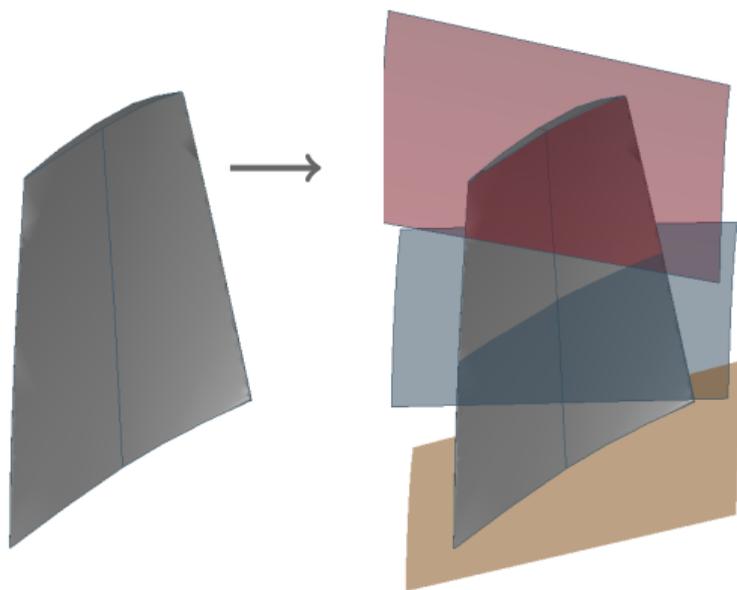
Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

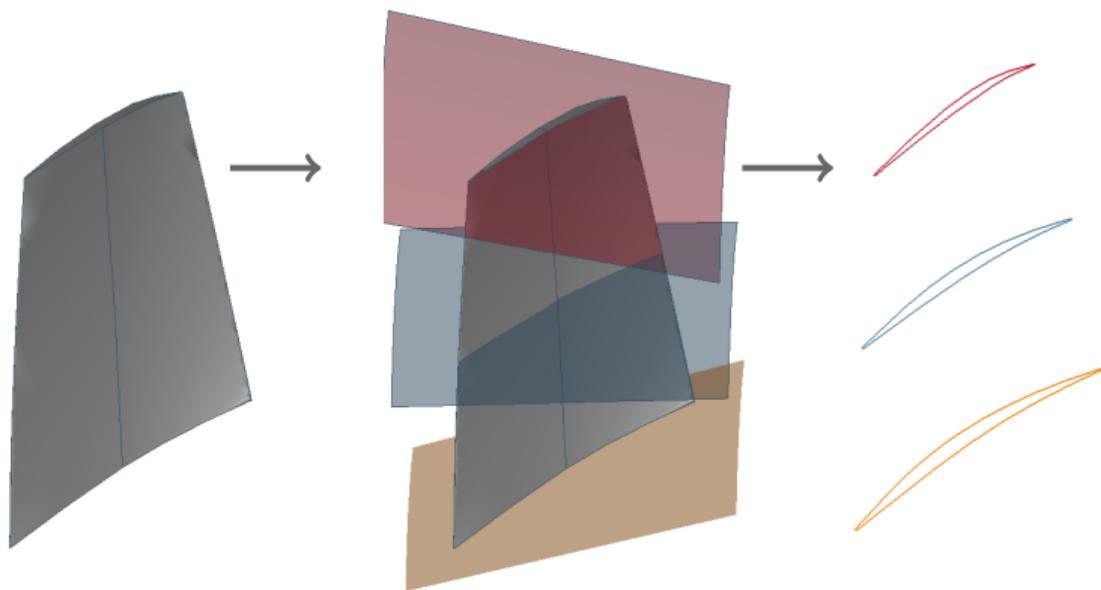
Conclusion

Module de rétro-ingénierie





Module de rétro-ingénierie





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

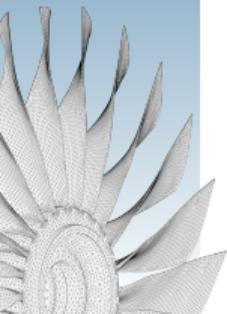
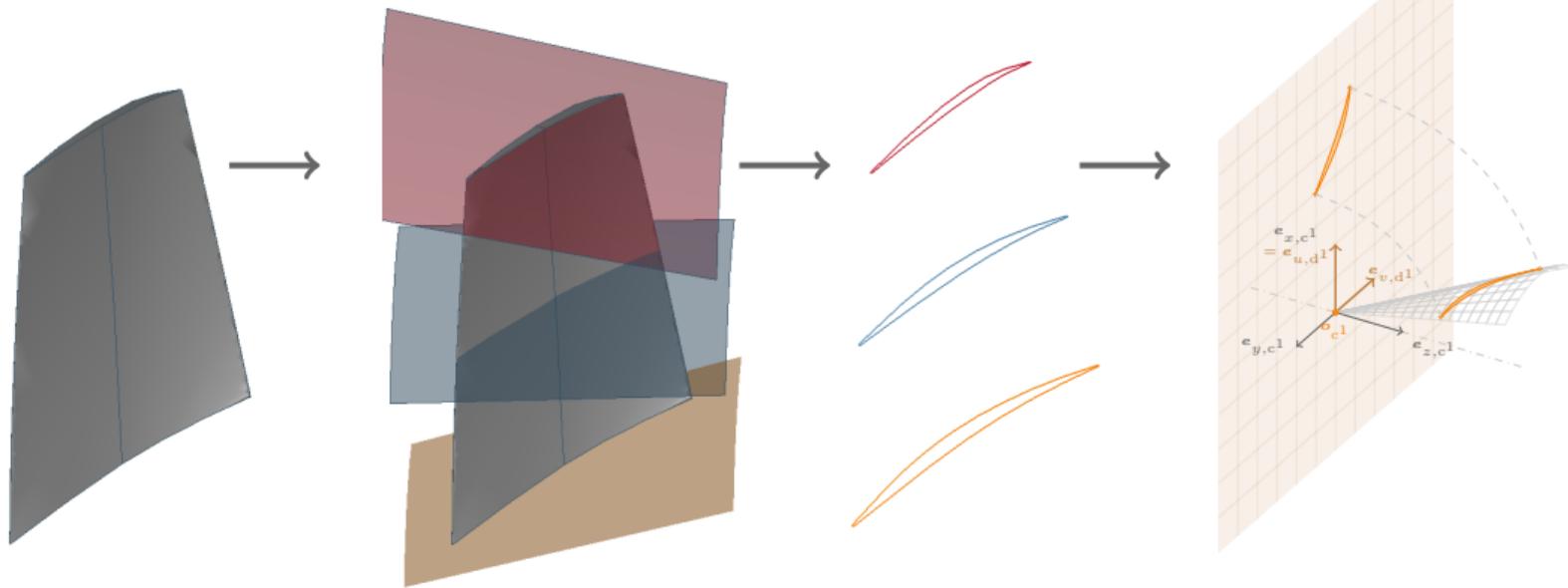
Méthodologie

Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

Conclusion





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

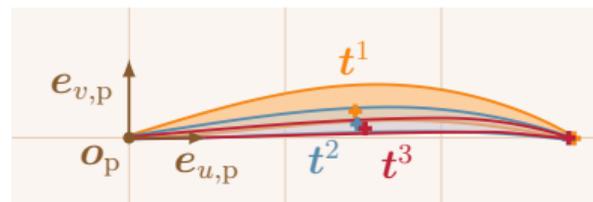
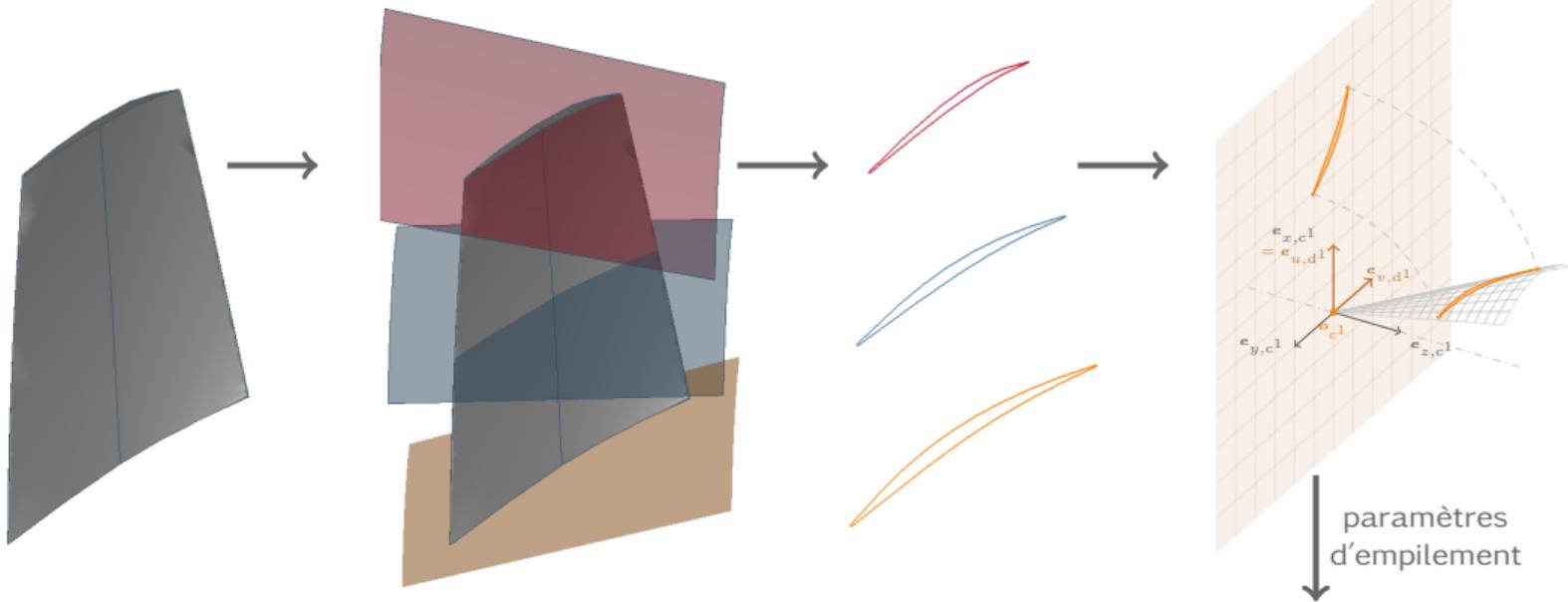
Méthodologie

Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

Conclusion





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Contexte

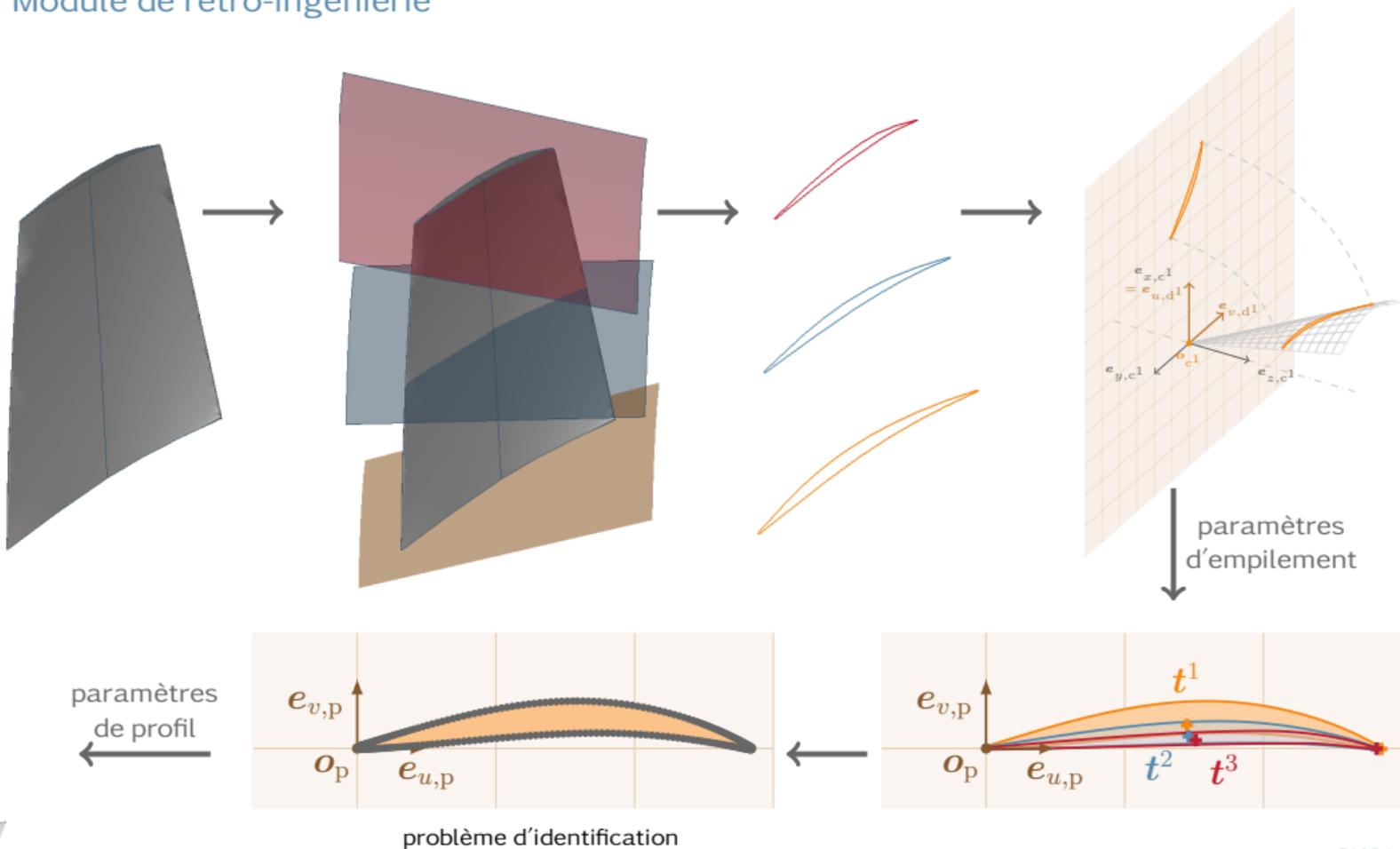
Méthodologie

Validation

Bilan

Reconception
d'aubes

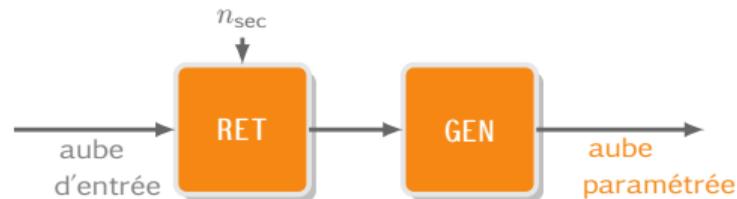
Conclusion





Validation de la fidélité

- méthodologie

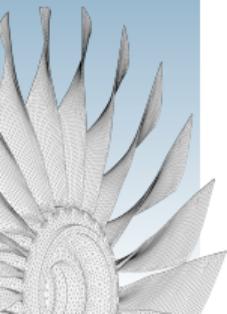
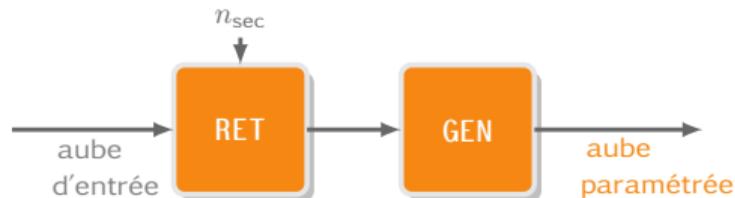




Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{\text{sec}} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$

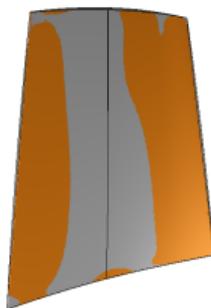
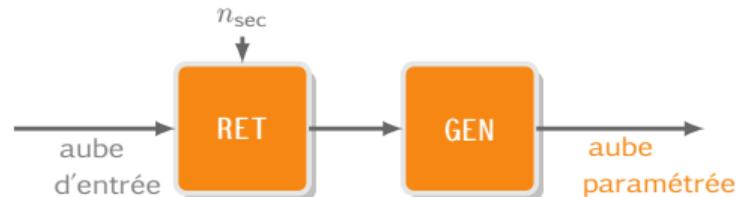




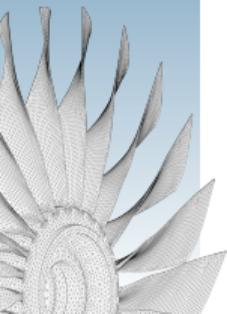
Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{\text{sec}} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{\text{sec}} = 2$

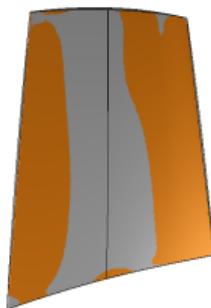
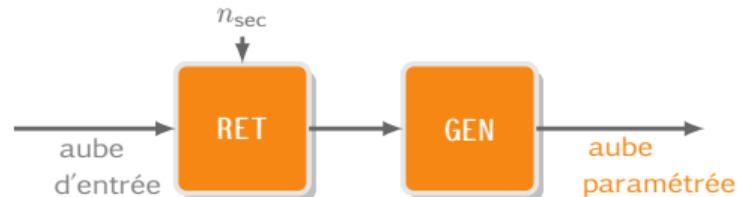




Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{\text{sec}} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{\text{sec}} = 2$



rotor 67, $n_{\text{sec}} = 2$

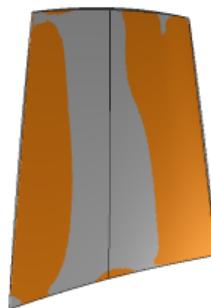
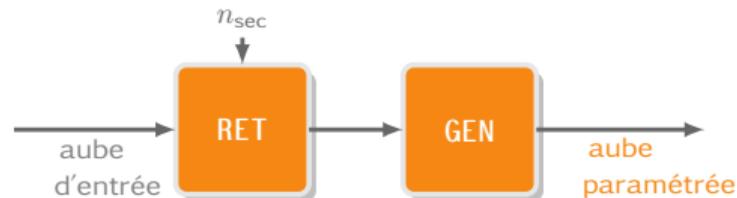




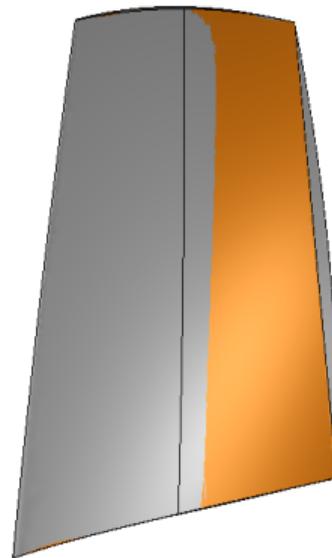
Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{\text{sec}} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{\text{sec}} = 2$

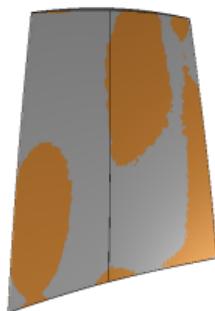
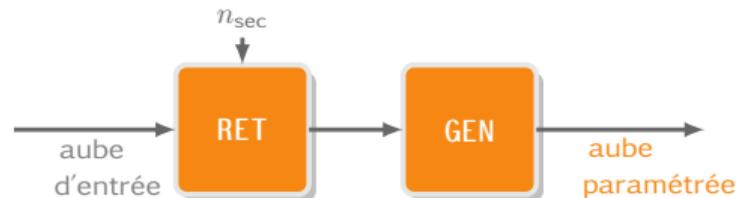




Validation de la fidélité

- méthodologie

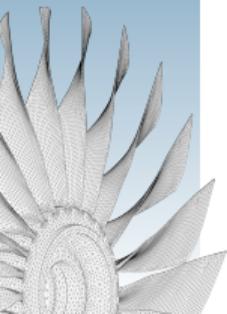
- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{\text{sec}} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{\text{sec}} = 3$



rotor 67, $n_{\text{sec}} = 3$

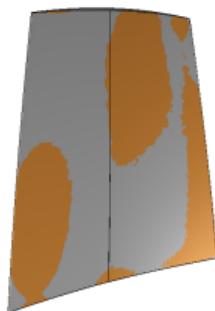
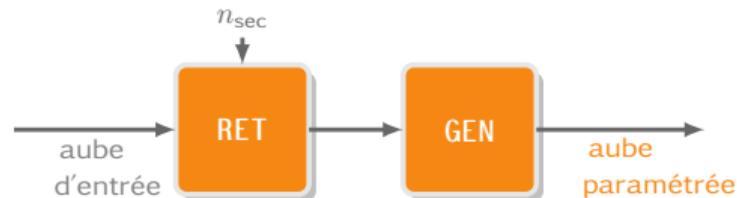




Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{sec} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{sec} = 3$



rotor 67, $n_{sec} = 3$

- critères géométriques

- ▶ volumes
- ▶ similitude des profils

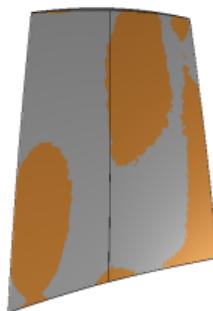
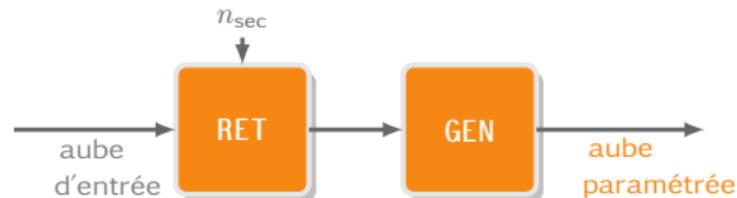




Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{sec} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{sec} = 3$



rotor 67, $n_{sec} = 3$

- critères géométriques

- ▶ volumes
- ▶ similitude des profils

- critères dynamiques

- ▶ fréquences propres
- ▶ consommation de jeu
- ▶ réponse à un scénario de contact

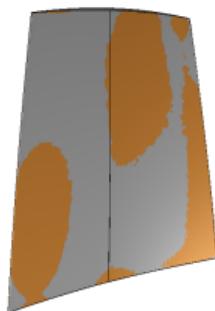
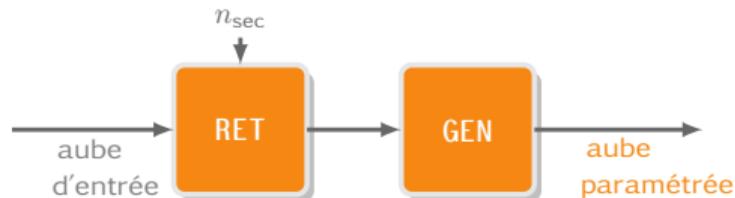




Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{sec} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{sec} = 3$



rotor 67, $n_{sec} = 3$

- critères géométriques

- ▶ volumes
- ▶ similitude des profils

- critères dynamiques

- ▶ fréquences propres
- ▶ consommation de jeu
- ▶ réponse à un scénario de contact

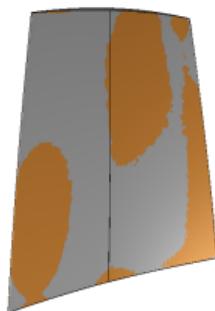
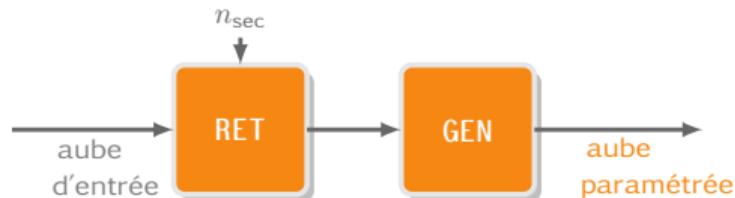
Haute fidélité des modèles paramétrés obtenus ≥ 5 sections



Validation de la fidélité

- méthodologie

- ▶ aubes rotor 37 et rotor 67
- ▶ $n_{sec} \in \{2, 3, 5, 9, 17\}$



rotor 37, $n_{sec} = 3$



rotor 67, $n_{sec} = 3$

- critères géométriques

- ▶ volumes (volume perdu < 0, 12%)
- ▶ similitude des profils

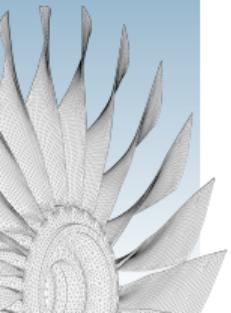
- critères dynamiques

- ▶ fréquences propres (erreur sur $f_1 < 1\%$)
- ▶ consommation de jeu
- ▶ réponse à un scénario de contact

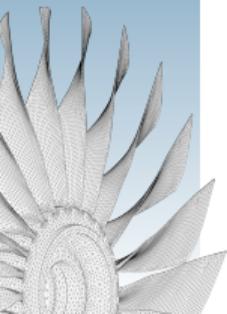
Haute fidélité des modèles paramétrés obtenus ≥ 5 sections



Outil de modélisation pour la reconception d'aubes de compresseur

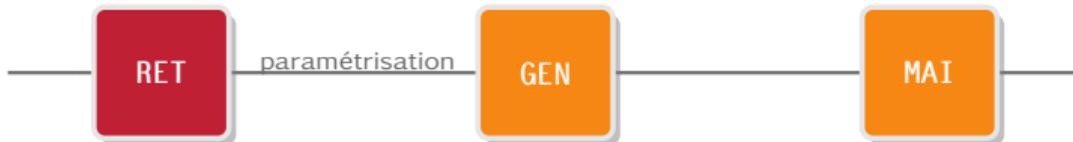


Outil de modélisation pour la reconception d'aubes de compresseur

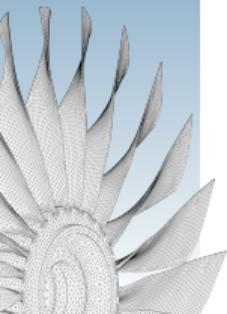




Outil de modélisation pour la reconception d'aubes de compresseur



- validation sur rotor 37 et rotor 67
 - ▶ fidélité : critères géométriques et **critères dynamiques**

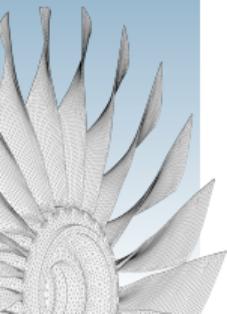
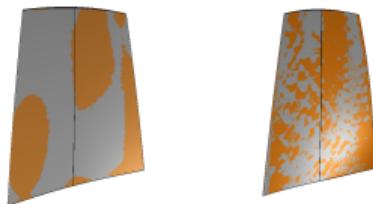




Outil de modélisation pour la reconception d'aubes de compresseur



- validation sur rotor 37 et rotor 67
 - ▶ fidélité : critères géométriques et **critères dynamiques**
 - ▶ **robustesse** par rapport aux paramètres
 - ▶ **efficacité numérique**

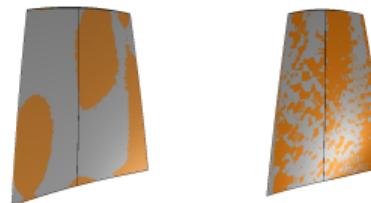




Outil de modélisation pour la reconception d'aubes de compresseur



- validation sur rotor 37 et rotor 67
 - ▶ fidélité : critères géométriques et **critères dynamiques**
 - ▶ **robustesse** par rapport aux paramètres
 - ▶ **efficacité numérique**



- **excellente fidélité** des modèles paramétrés
- compatibilité avec le processus de reconception





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Méthodologie

Rotor 37

Rotor 67

Bilan

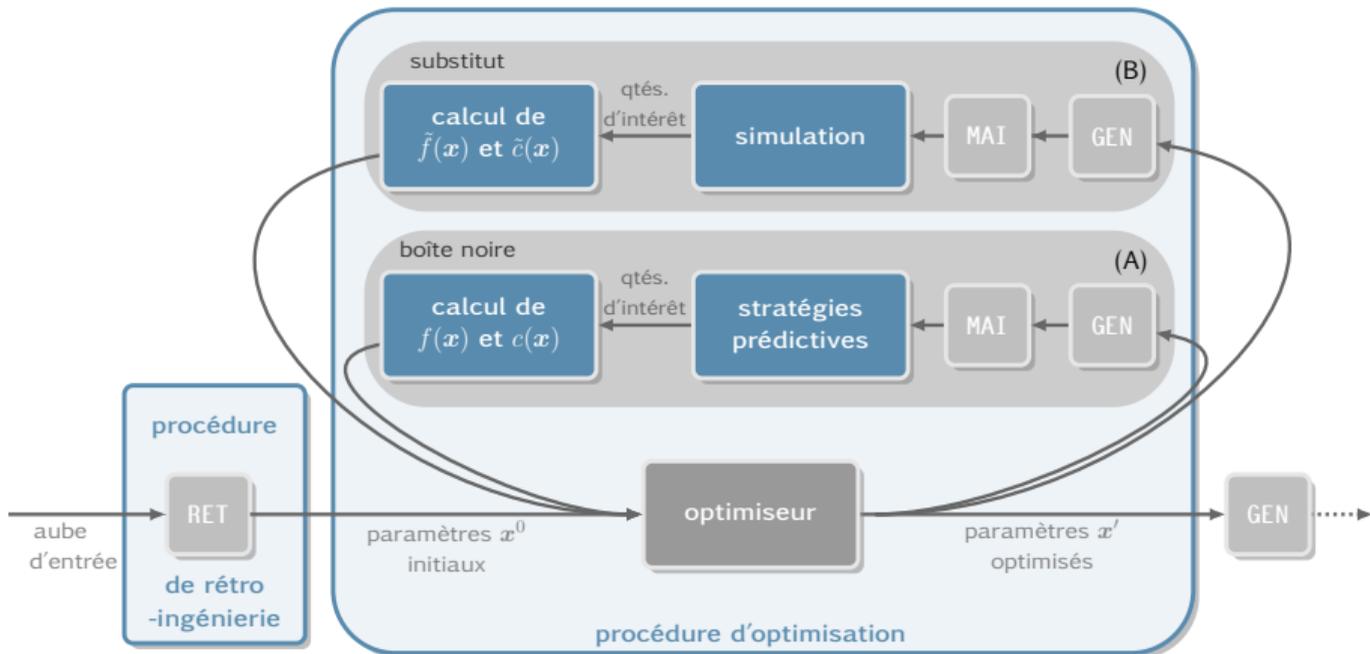
Ouverture

Conclusion

- 1 Introduction
- 2 Algorithme d'optimisation
- 3 Pertinence industrielle
- 4 Outil de modélisation
- 5 Reconception d'aubes industrielles**
- 6 Conclusion

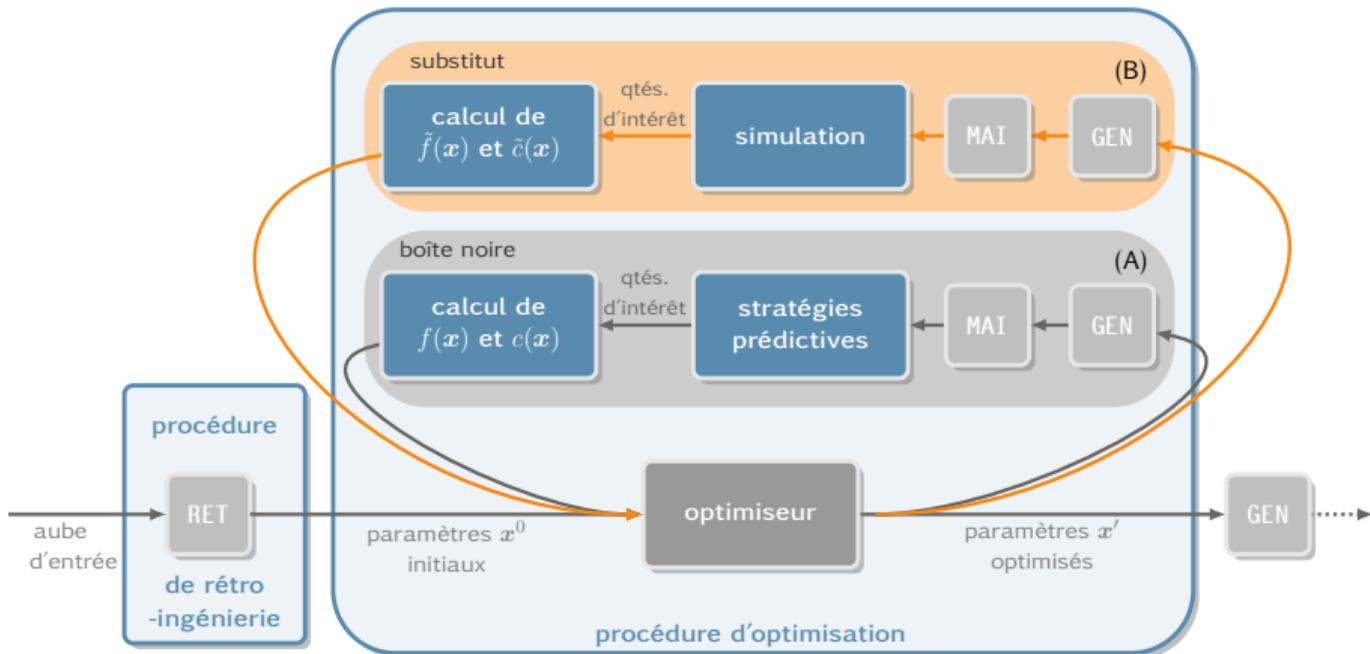


Reconcevoir des aubes industrielles pour améliorer leur robustesse au contact



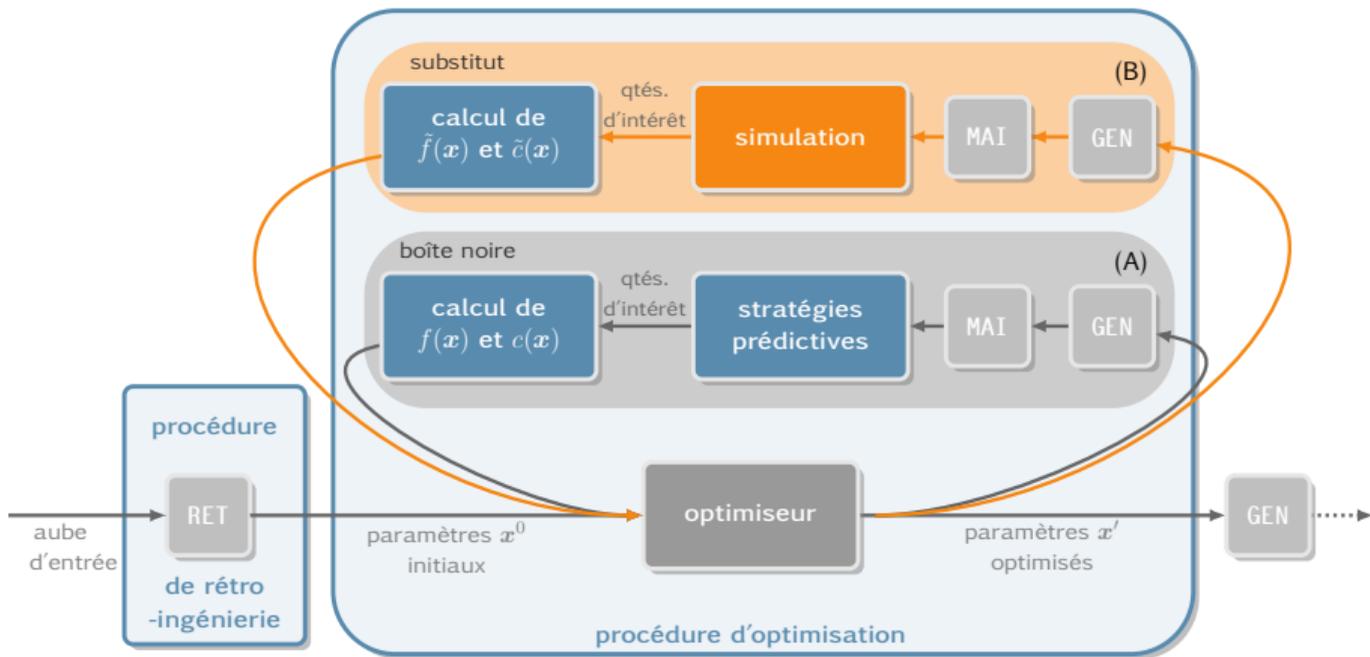


Reconcevoir des aubes industrielles pour améliorer leur robustesse au contact



- résolution du problème substitut

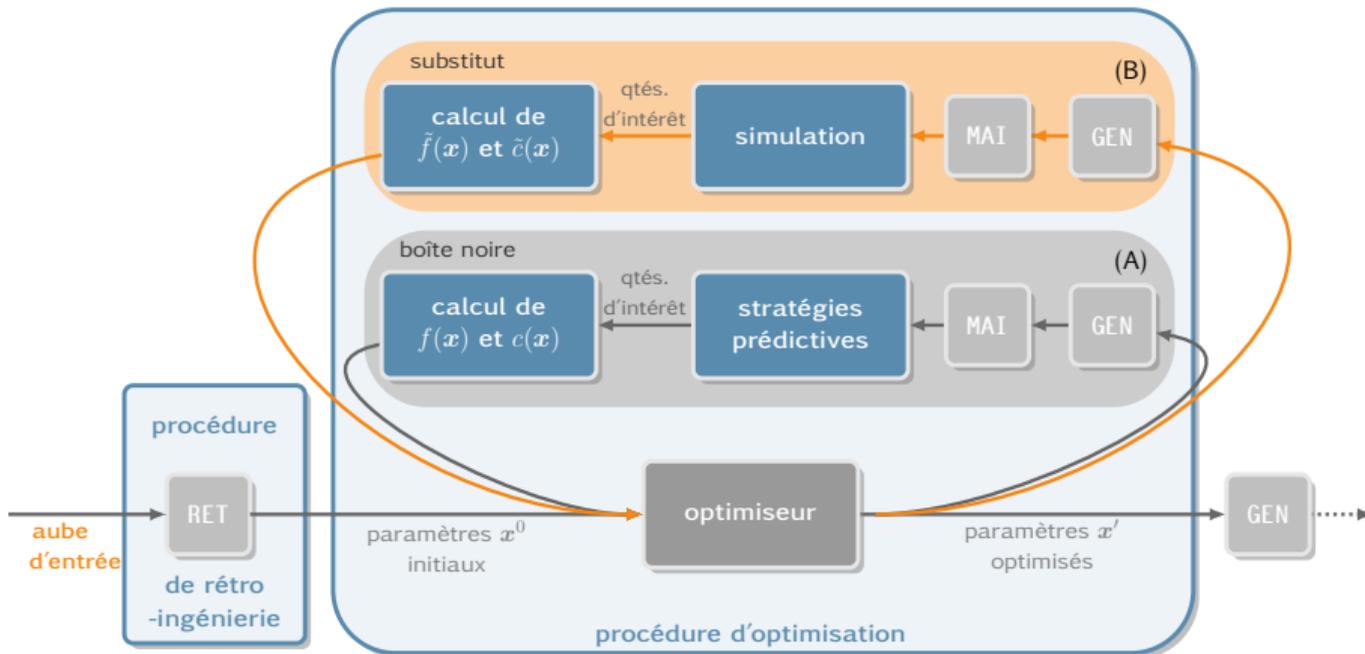
Reconcevoir des aubes industrielles pour améliorer leur robustesse au contact



- résolution du problème substitut \Rightarrow consommation de jeu



Reconcevoir des aubes industrielles pour améliorer leur robustesse au contact



- résolution du problème substitut \Rightarrow consommation de jeu
- aubes NASA rotor 37 et rotor 67



Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

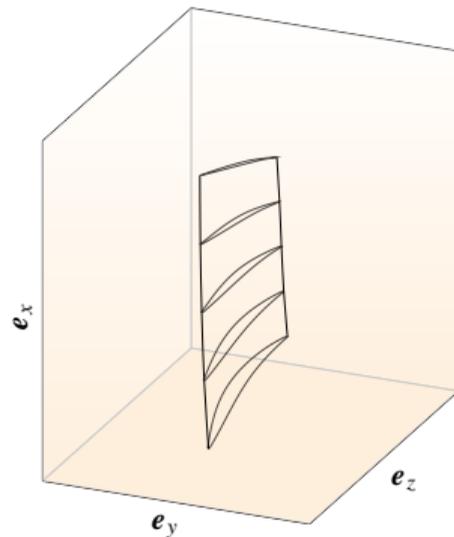




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \tilde{f}(x) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{c}(x) \leq \mathbf{0} \\ & l \leq x \leq u \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections

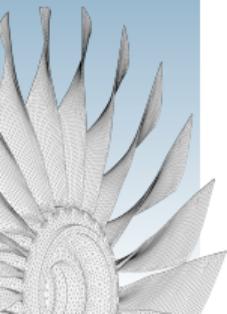
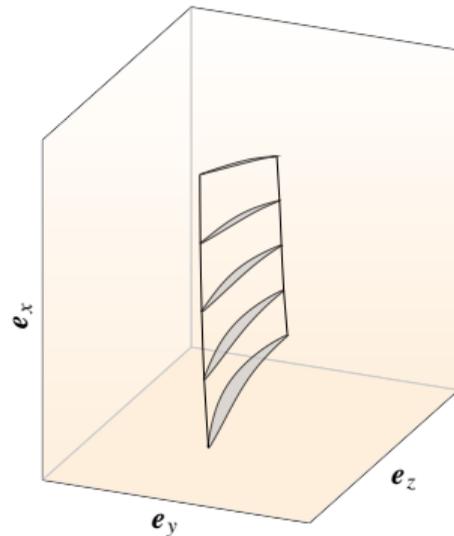




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{x}} \quad & \tilde{f}(\boldsymbol{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \boldsymbol{l} \leq \boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation \boldsymbol{x}



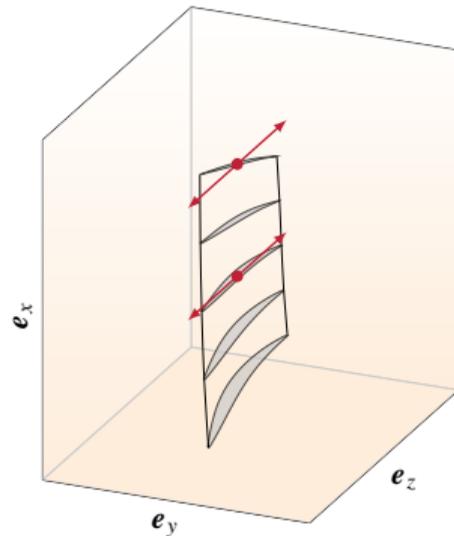


Procédure d'optimisation

Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{x}} \quad & \tilde{f}(\boldsymbol{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\boldsymbol{c}}(\boldsymbol{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \boldsymbol{l} \leq \boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation \boldsymbol{x}

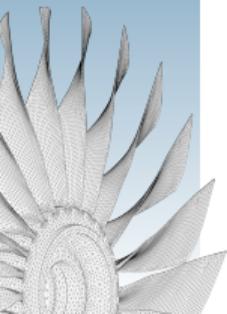
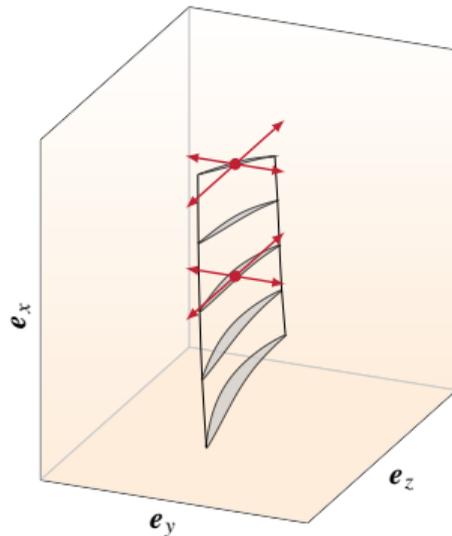




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$
 - ▶ flèche axiale et angle d'inclinaison des sections à mi-hauteur et en sommet d'aube

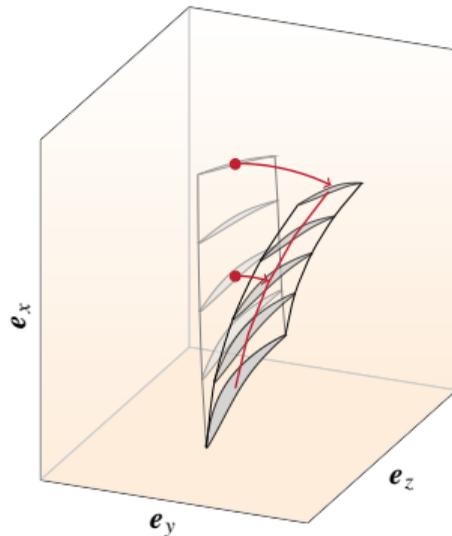




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$
 - ▶ flèche axiale et angle d'inclinaison des sections à mi-hauteur et en sommet d'aube

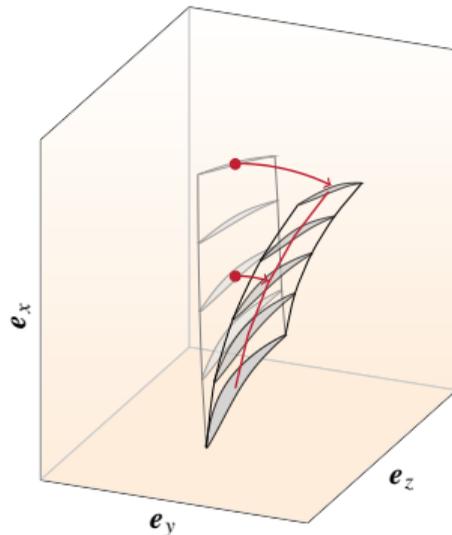




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$
 - ▶ flèche axiale et angle d'inclinaison des sections à mi-hauteur et en sommet d'aube
- substitut $\tilde{f}(\mathbf{x})$
 - ▶ consommation de jeu

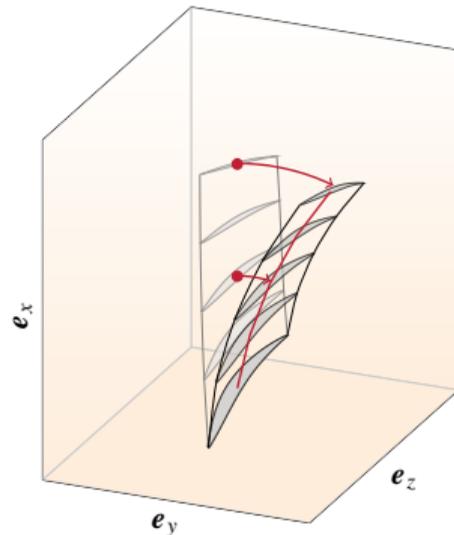




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$
 - ▶ flèche axiale et angle d'inclinaison des sections à mi-hauteur et en sommet d'aube
- substitut $\tilde{f}(\mathbf{x})$
 - ▶ consommation de jeu
- sans contraintes $\tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x})$

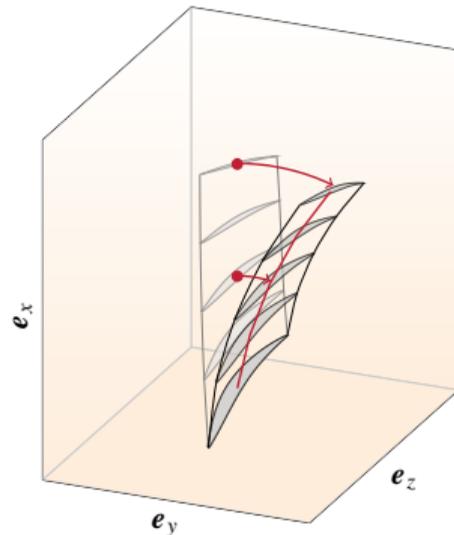




Problème substitut

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \tilde{f}(\mathbf{x}) \\ \text{sujet à} \quad & \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned}$$

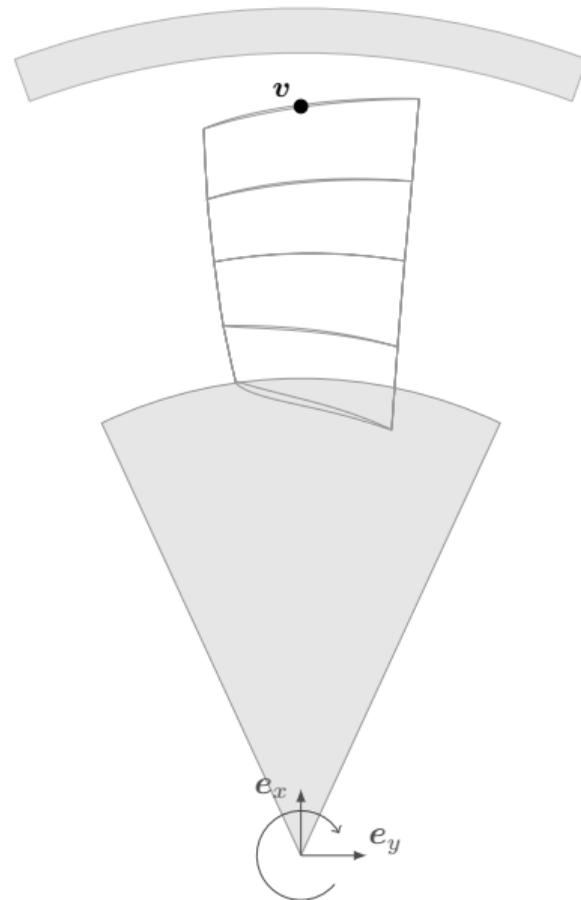
- aube initiale
 - ▶ modèle paramétré à 5 sections
- variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^4$
 - ▶ flèche axiale et angle d'inclinaison des sections à mi-hauteur et en sommet d'aube
- substitut $\tilde{f}(\mathbf{x})$
 - ▶ consommation de jeu
- sans contraintes $\tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x})$
- résolution
 - ▶ algorithme Mads
 - ▶ optimiseur NOMAD





Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

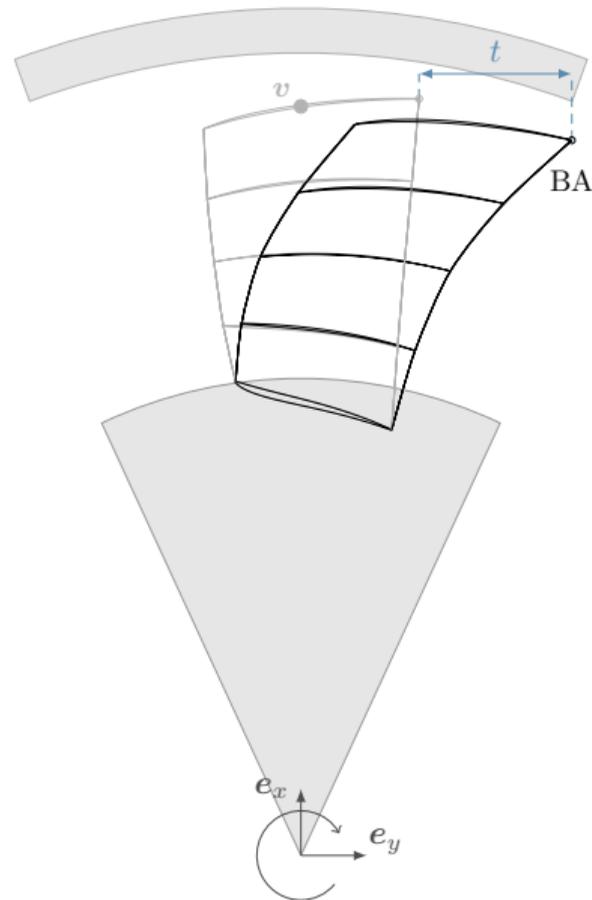
- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p





Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

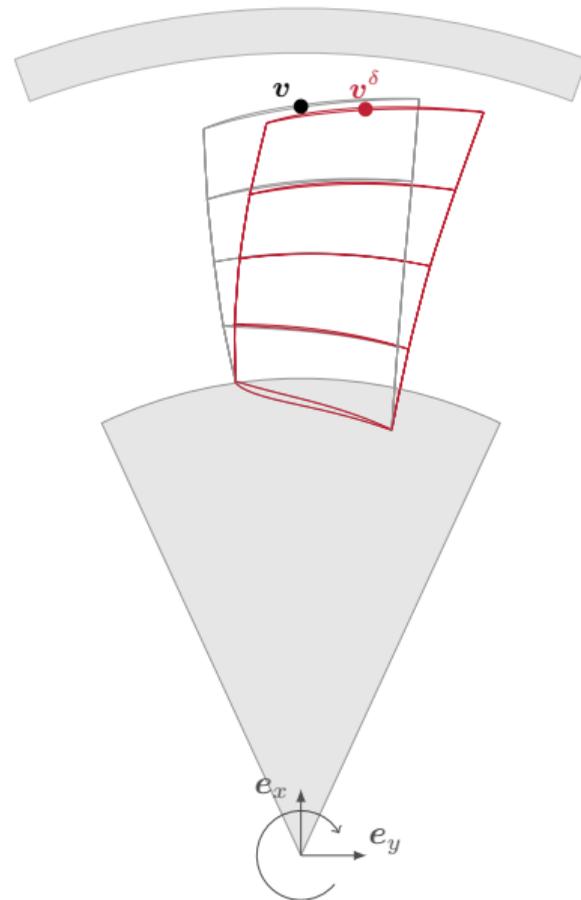
- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul
 - 1 mode propre normalisé p





Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul
 - ① mode propre normalisé p
 - ② déformée modulée par δ

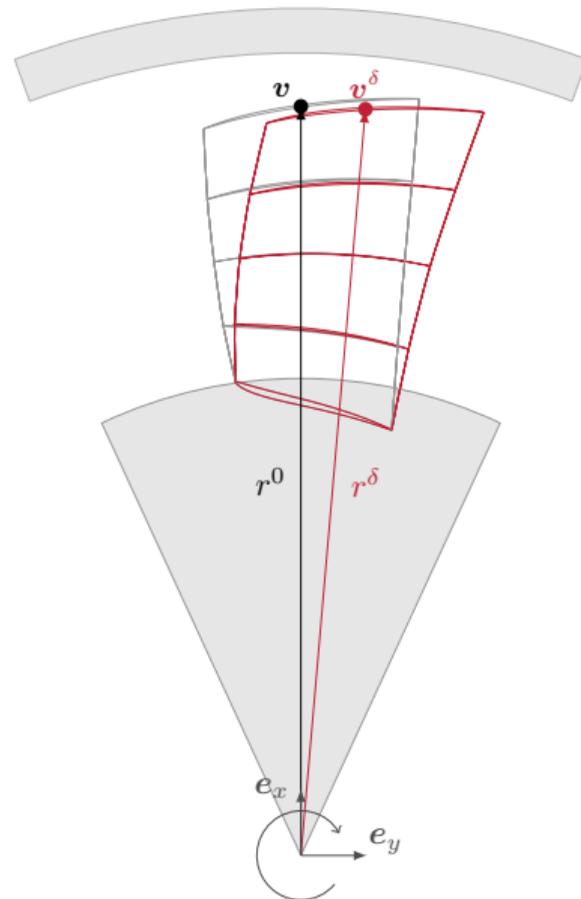




Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul
 - 1 mode propre normalisé p
 - 2 déformée modulée par δ
 - 3 consommation de jeu pour δ

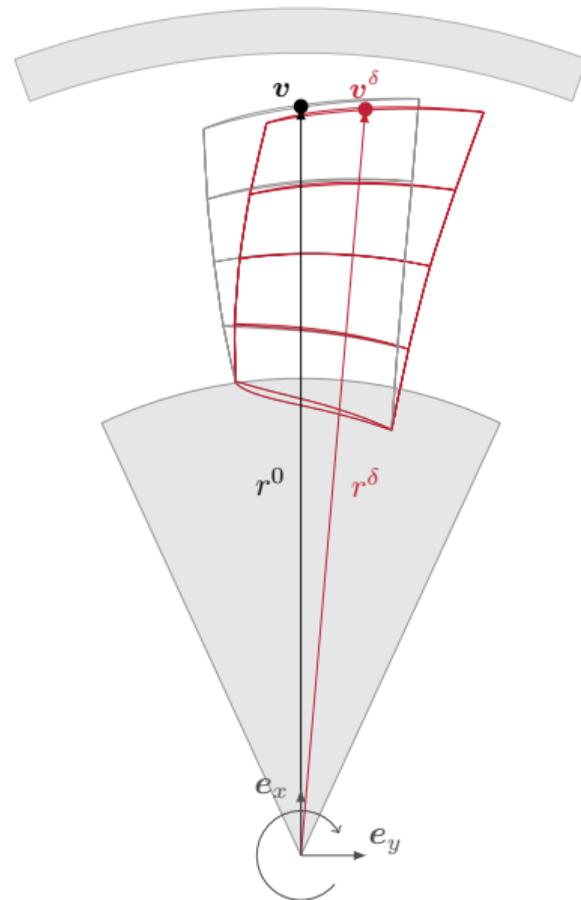
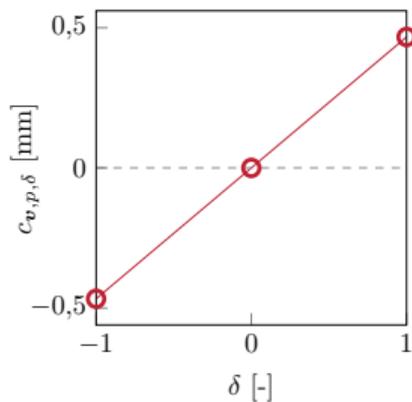
$$c_{v,p,\delta} = r^\delta - r^0$$



Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul
 - 1 mode propre normalisé p
 - 2 déformée modulée par δ
 - 3 consommation de jeu pour δ

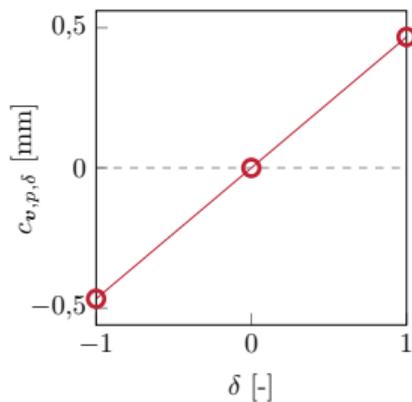
$$c_{v,p,\delta} = r^\delta - r^0$$



Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

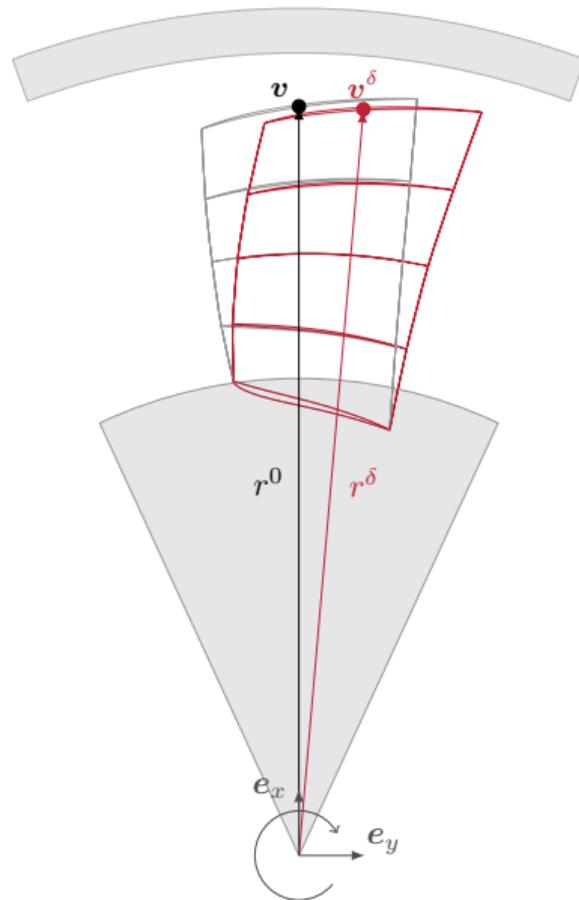
- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul
 - 1 mode propre normalisé p
 - 2 déformée modulée par δ
 - 3 consommation de jeu pour δ

$$c_{v,p,\delta} = r^\delta - r^0$$



- pertinence

▶ consommation $> 0 \iff$ aube se rapproche du carter



Simulation substitut : consommation de jeu ¹³

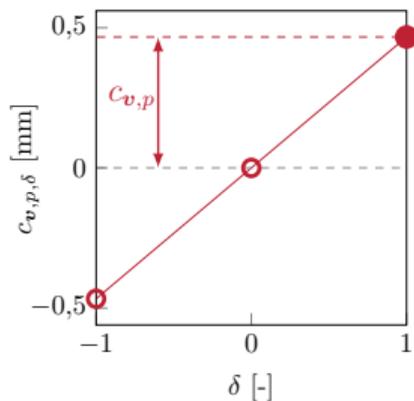
- variation de jeu pour un nœud v et un mode propre p
- calcul

- 1 mode propre normalisé p
- 2 déformée modulée par δ
- 3 consommation de jeu pour δ

$$c_{v,p,\delta} = r^\delta - r^0$$

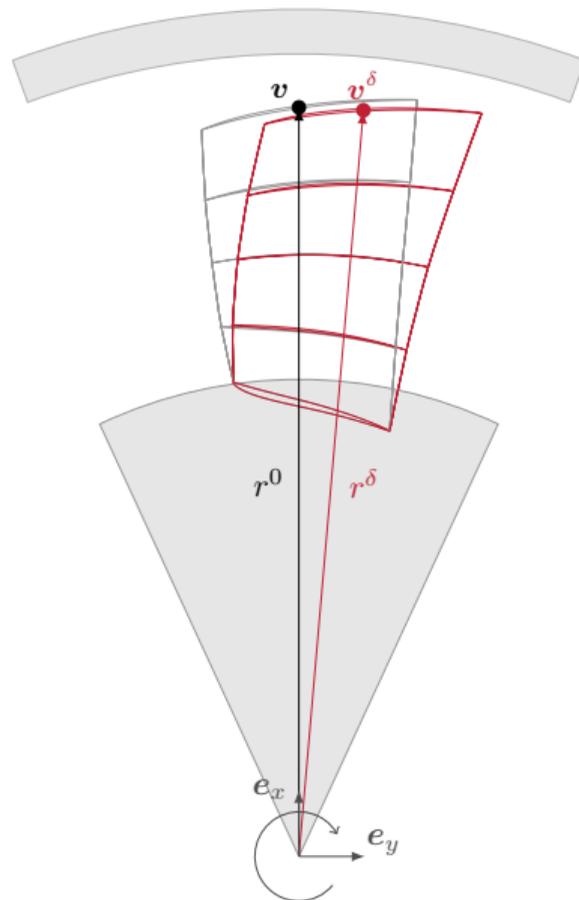
- 4 consommation de jeu maximale

$$c_{v,p} = \max_{\delta} c_{v,p,\delta}$$



- pertinence

▶ consommation $> 0 \iff$ aube se rapproche du carter





Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Méthodologie

Rotor 37

Rotor 67

Bilan

Ouverture

Conclusion

Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction $1F/4N^{14}$





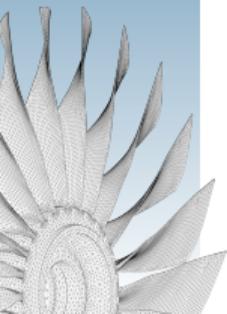
Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

- instances du problème substitut

- $\tilde{f} := c_{BA,1F}$

- $\tilde{f} := c_{BA,1T}$





Résultats : aube rotor 37

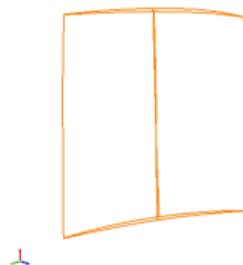
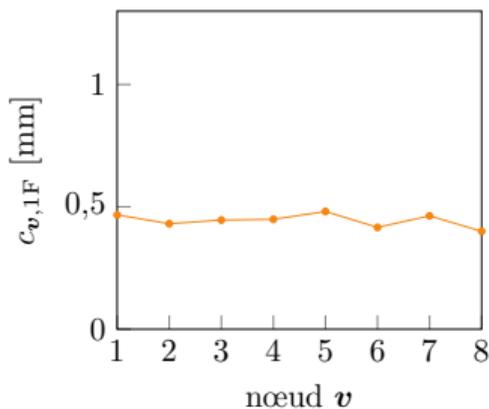
Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

● instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$

● consommations de jeu





Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

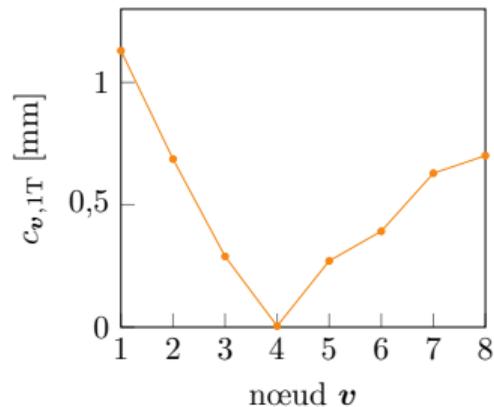
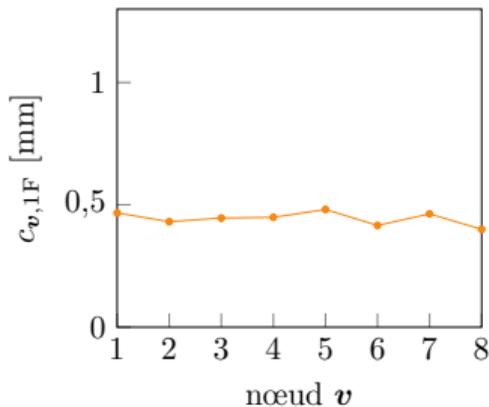
● instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$



● consommations de jeu





Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

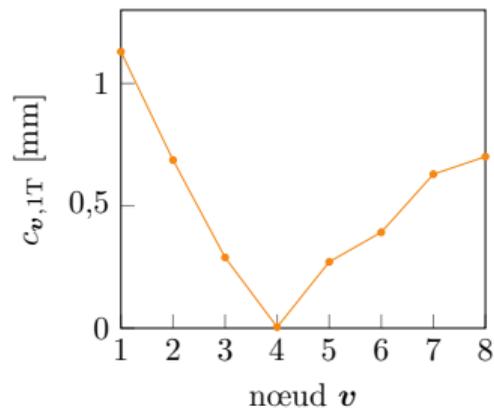
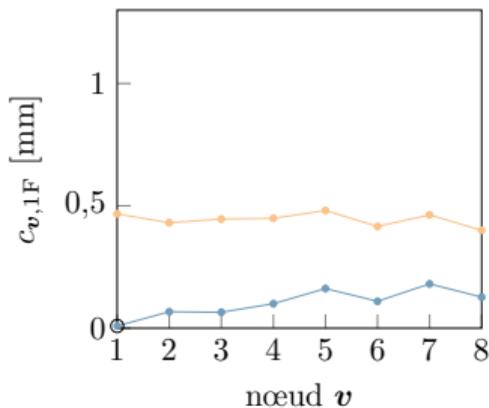
● instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$



● consommations de jeu





Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

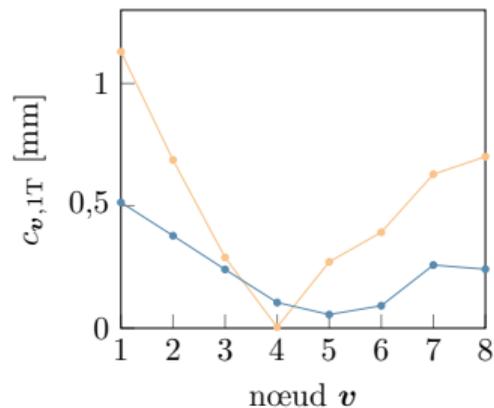
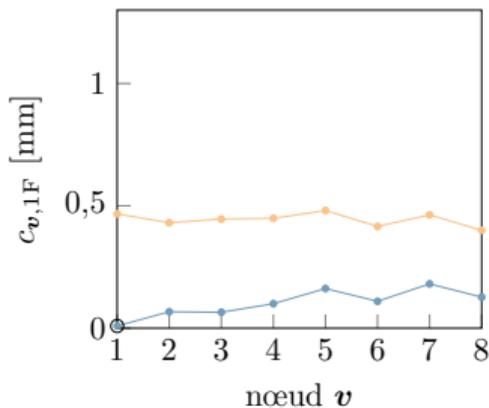
● instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$



● consommations de jeu





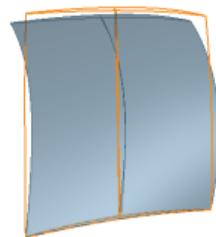
Résultats : aube rotor 37

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/4N¹⁴

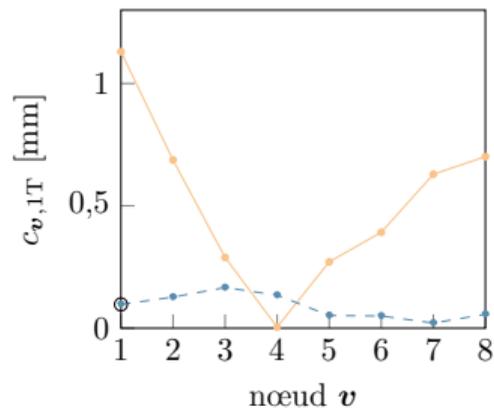
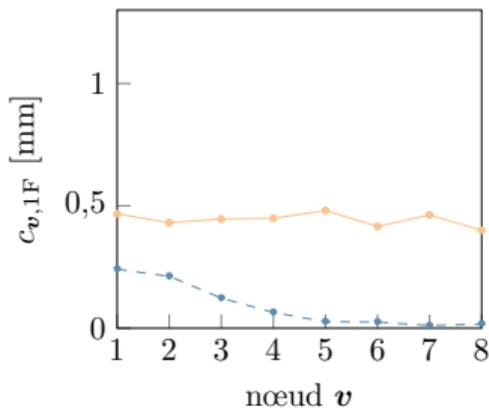
● instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$ (- - -)



● consommations de jeu





Analyse dynamique

- stratégie prédictive de la réponse au contact ¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé





Analyse dynamique

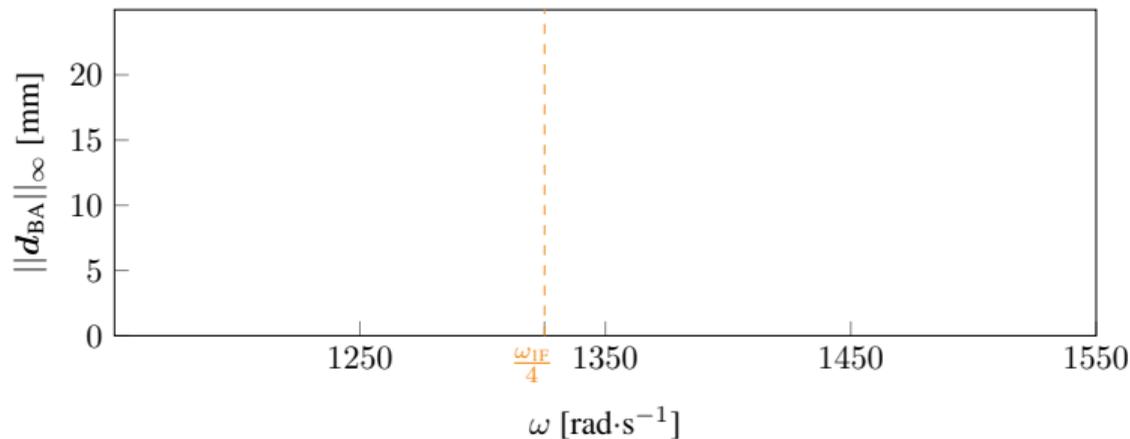
- stratégie prédictive de la réponse au contact¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}





Analyse dynamique

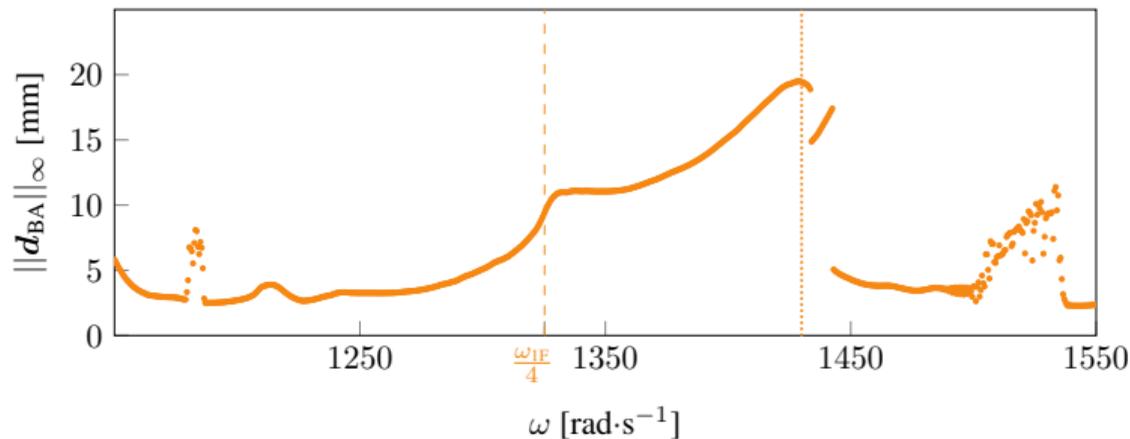
- stratégie prédictive de la réponse au contact¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}
- résultats : CRF





Analyse dynamique

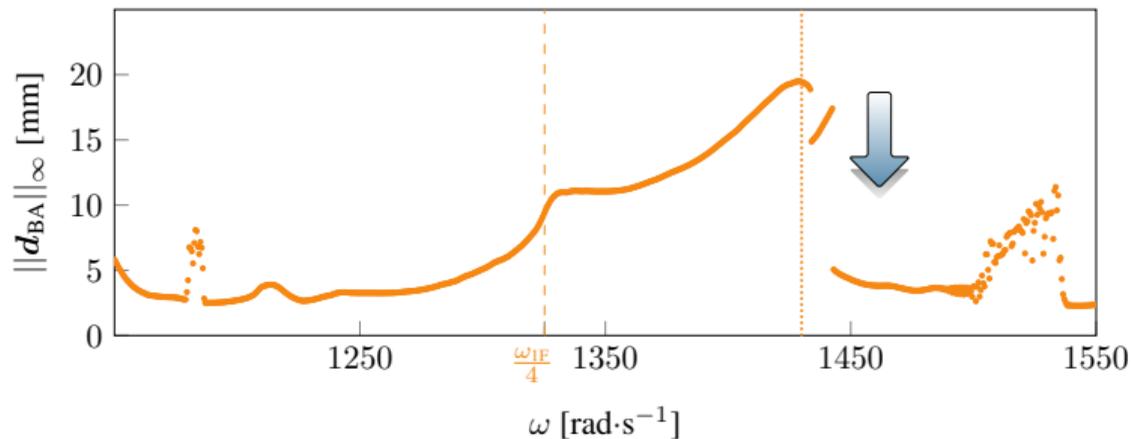
- stratégie prédictive de la réponse au contact ¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}
- résultats : CRF
 - ▶ aube initiale (—)





Analyse dynamique

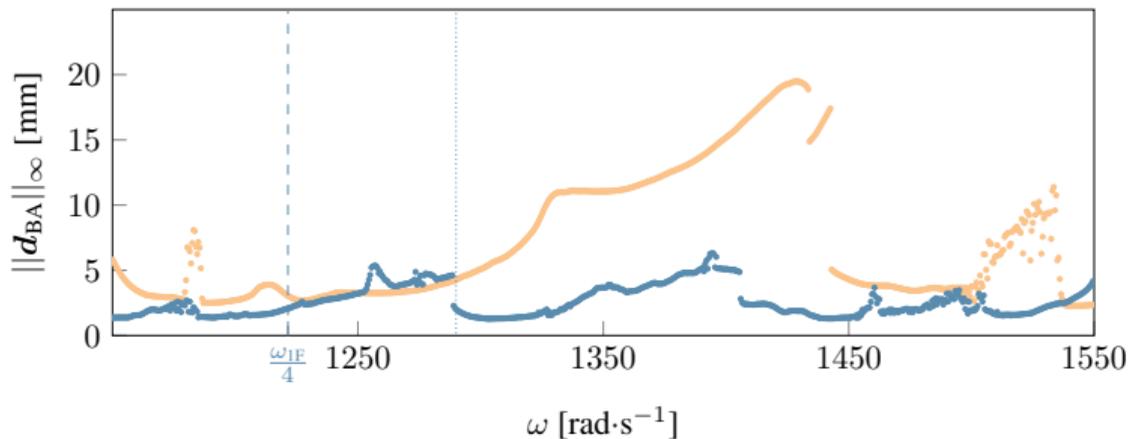
- stratégie prédictive de la réponse au contact ¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}
- résultats : CRF
 - ▶ aube initiale (—)





Analyse dynamique

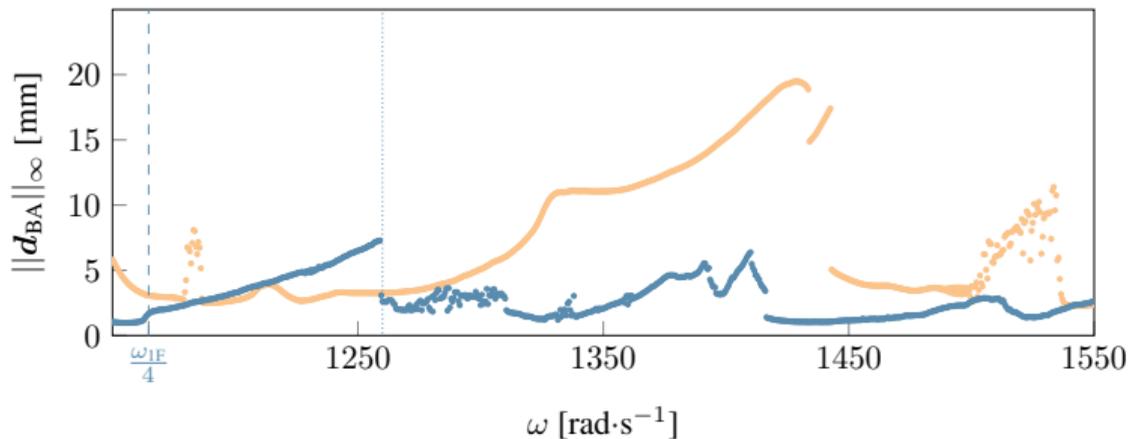
- stratégie prédictive de la réponse au contact¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}
- résultats : CRF
 - ▶ aube initiale (—)
 - ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)





Analyse dynamique

- stratégie prédictive de la réponse au contact¹⁵
 - ▶ modèle réduit de type Craig-Bampton
 - ▶ simulations d'intégration temporelle
 - ▶ carter rigide ovalisé
- quantité d'intérêt
 - ▶ déplacement maximal au BA sur le dernier tour : d_{BA}
- résultats : CRF
 - ▶ aube initiale (—)
 - ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1F}$
 - ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1T}$ (—)





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction $1F/2N^{16}$

- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction $1F/2N$ ¹⁶

- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T
- instances du problème substitut
 - ▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$
 - ▶ $\tilde{f} := c_{BA,2F}$
 - ▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/2N¹⁶

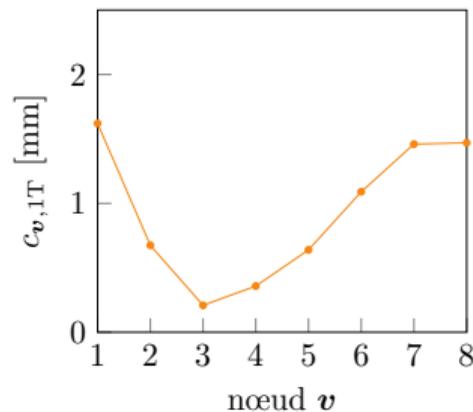
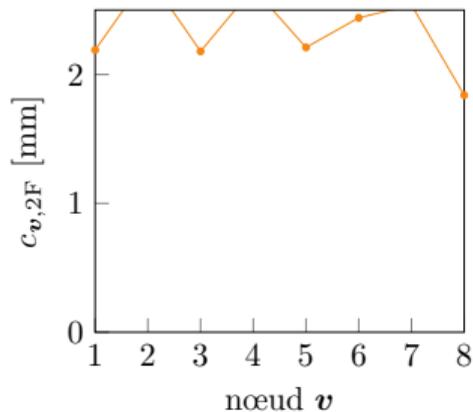
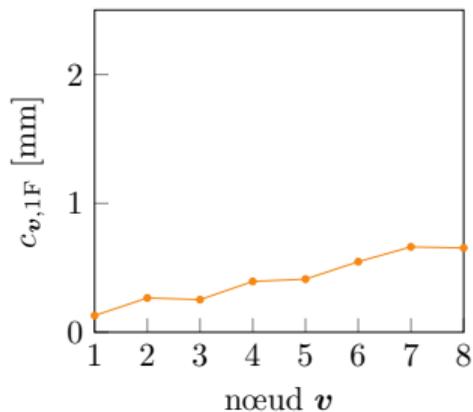
- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T
- instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$

▶ $\tilde{f} := c_{BA,2F}$

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$

- consommations de jeu





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/2N¹⁶

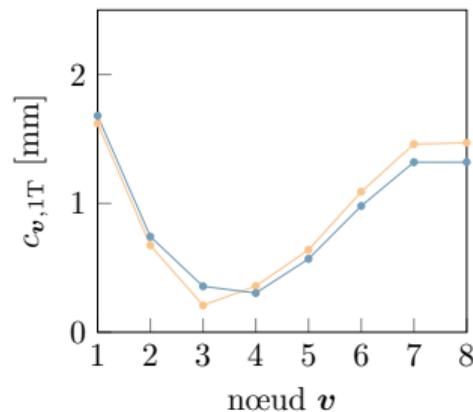
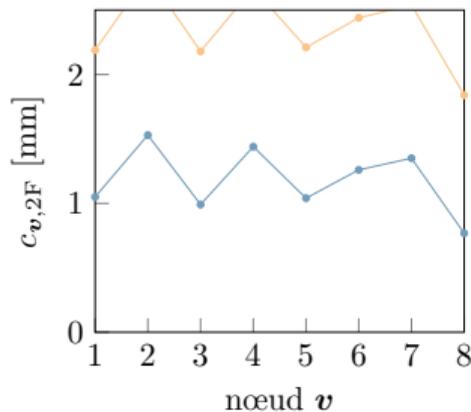
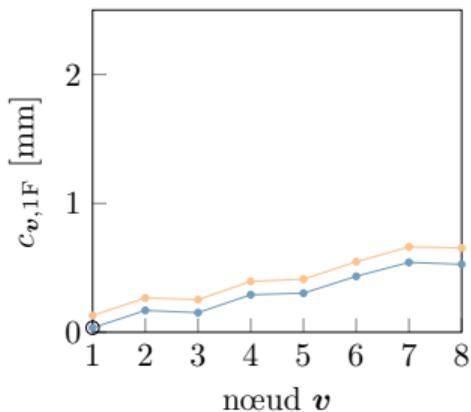
- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T
- instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,2F}$

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$

- consommations de jeu





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/2N¹⁶

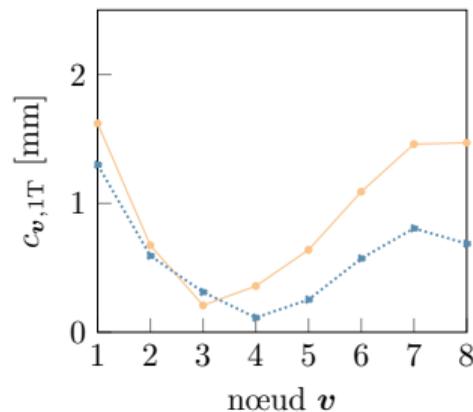
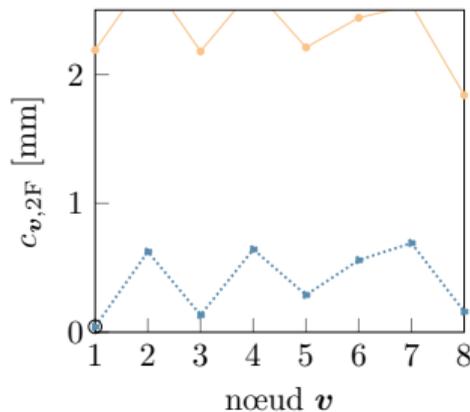
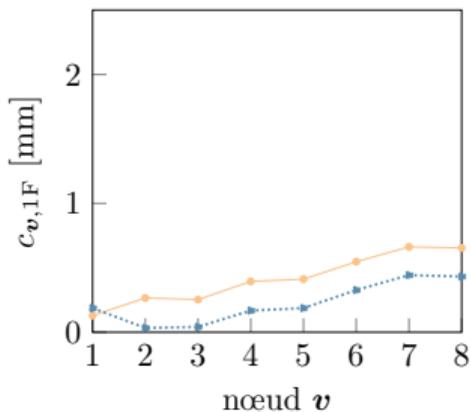
- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T
- instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,2F}$ (⋯)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$

- consommations de jeu





Résultats : aube rotor 67

Diminuer les amplitudes de réponse liées à l'interaction 1F/2N¹⁶

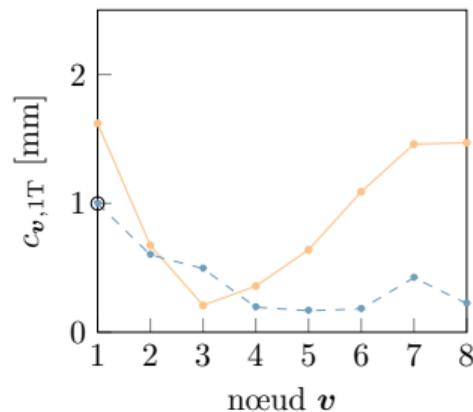
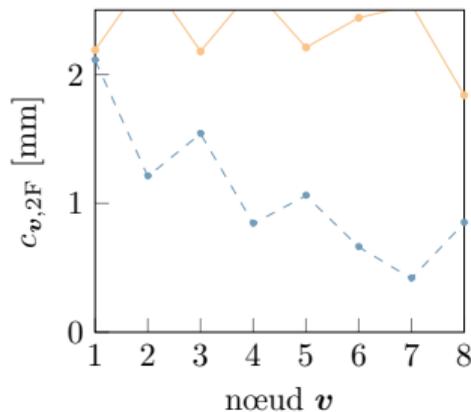
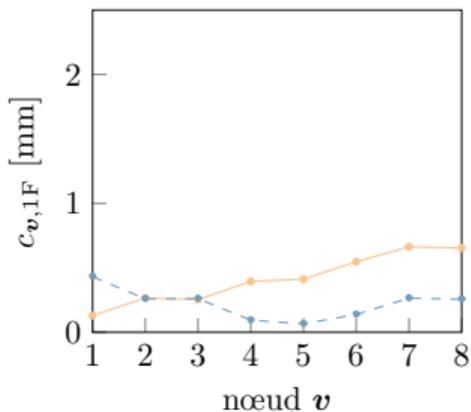
- contributions modales : 1F dominant, 2F, 1T
- instances du problème substitut

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,2F}$ (⋯)

▶ $\tilde{f} := c_{BA,1T}$ (- - -)

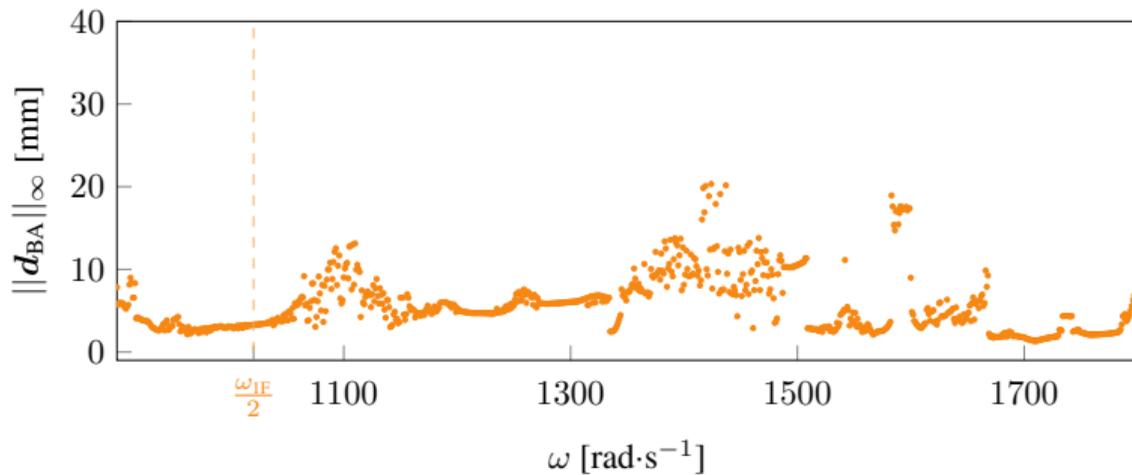
- consommations de jeu





Analyse dynamique

- réponse vibratoire au scénario de contact
 - ▶ aube initiale (—)

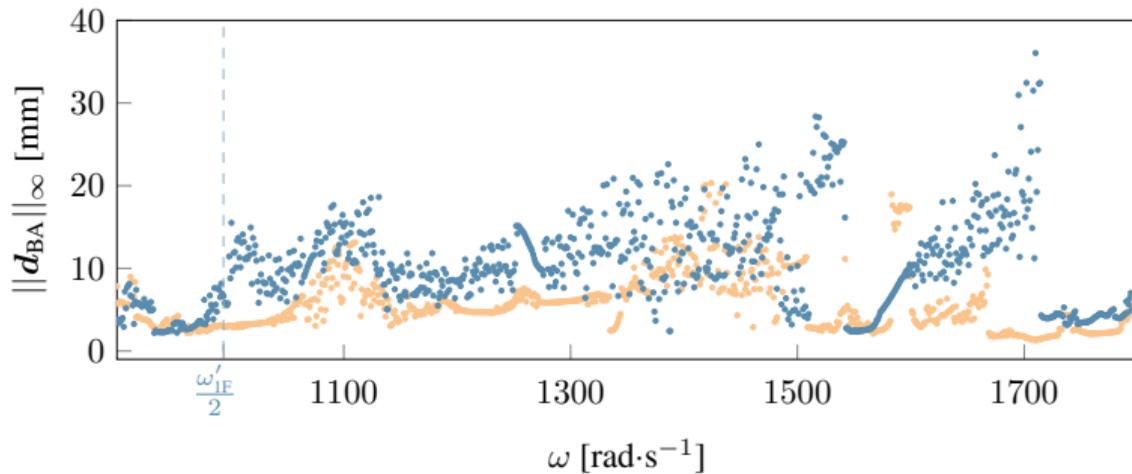




Analyse dynamique

- réponse vibratoire au scénario de contact

- ▶ aube initiale (—)
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1F}$ (—)

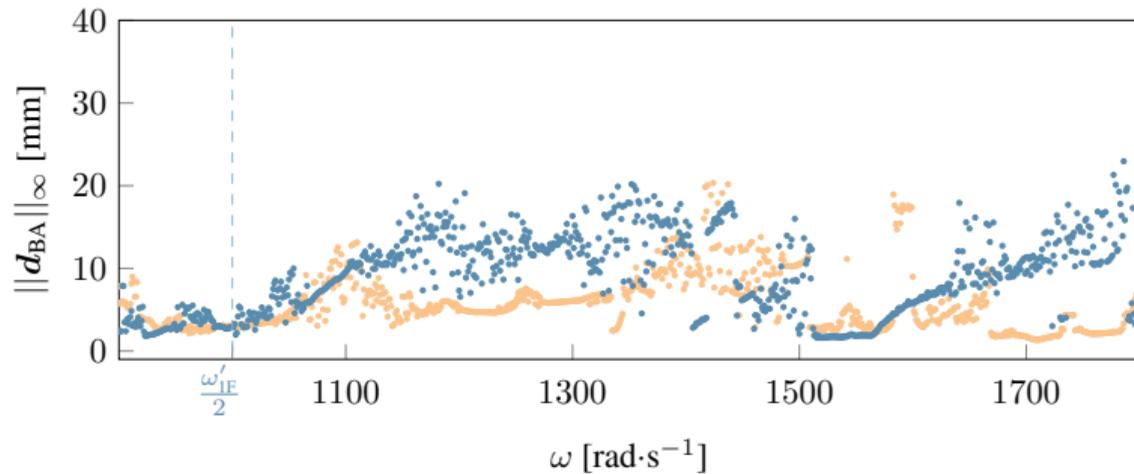




Analyse dynamique

● réponse vibratoire au scénario de contact

- ▶ aube initiale (—)
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1F}$
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,2F}$ (—)

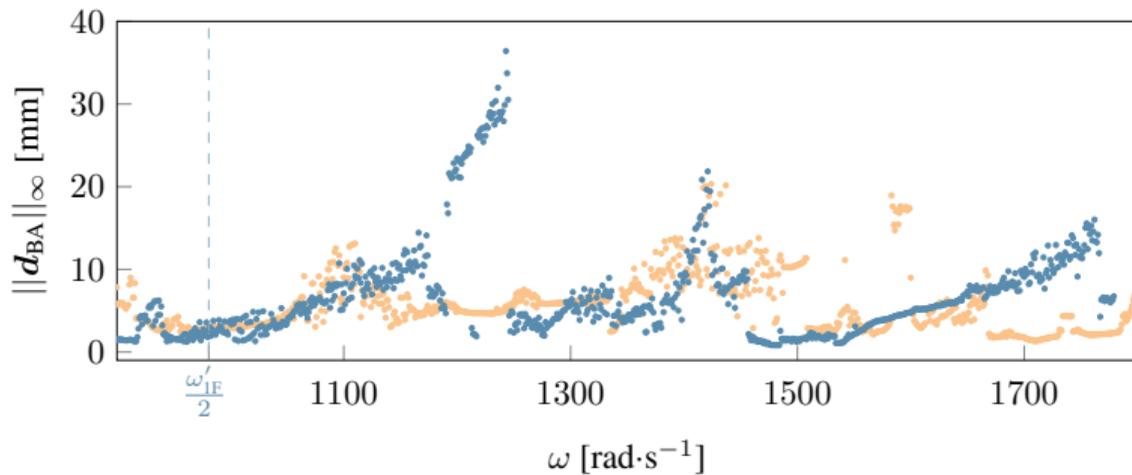




Analyse dynamique

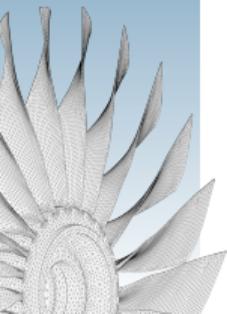
● réponse vibratoire au scénario de contact

- ▶ aube initiale (—)
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1F}$
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,2F}$
- ▶ aube optimisée $\tilde{f} := c_{BA,1T}$ (—)





Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin
d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires





Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative





Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative

- conjecture
 - ▶ caractéristiques des aubes initiales

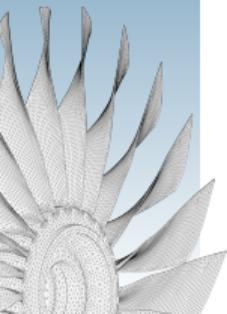




Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative
- conjecture
 - ▶ caractéristiques des aubes initiales

consommation de jeu \ réponse dynamique	1 mode	plusieurs modes
faible		
élevée		





Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative
- conjecture
 - ▶ caractéristiques des aubes initiales

consommation de jeu \ réponse dynamique	1 mode	plusieurs modes
faible		
élevée	rotor 37	



Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative
- conjecture
 - ▶ caractéristiques des aubes initiales

consommation de jeu \ réponse dynamique	1 mode	plusieurs modes
faible		rotor 67
élevée	rotor 37	



Preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles afin d'améliorer leur réponse dynamique à des interactions structurelles non linéaires

- minimisation de la consommation de jeu au BA sur un mode
 - ▶ rotor 37 ⇒ diminution significative des amplitudes de réponse
 - ▶ rotor 67 ⇒ pas d'amélioration significative
- conjecture
 - ▶ caractéristiques des aubes initiales

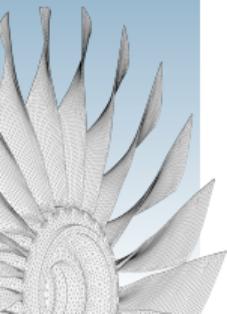
consommation de jeu \ réponse dynamique	1 mode	plusieurs modes
faible	?	rotor 67
élevée	rotor 37	?





Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

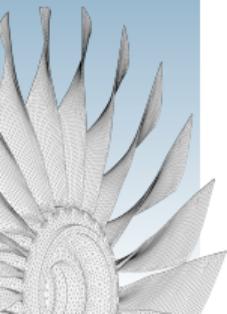




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode

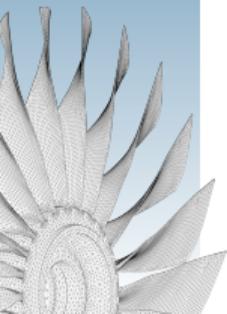




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes

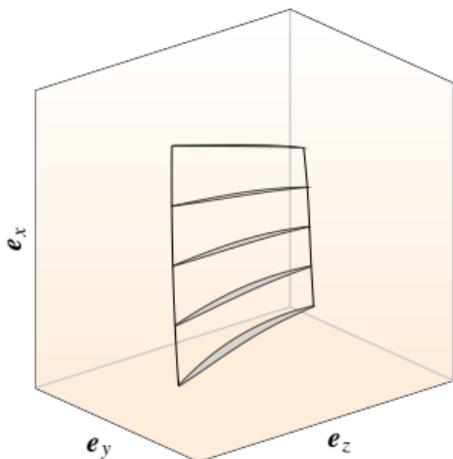




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques

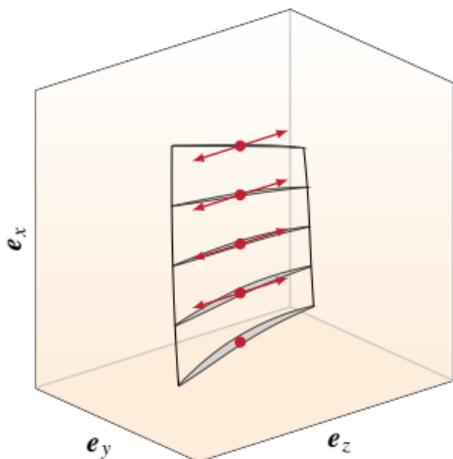




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale

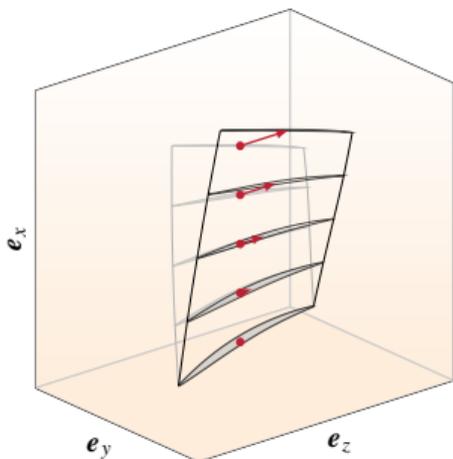




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale

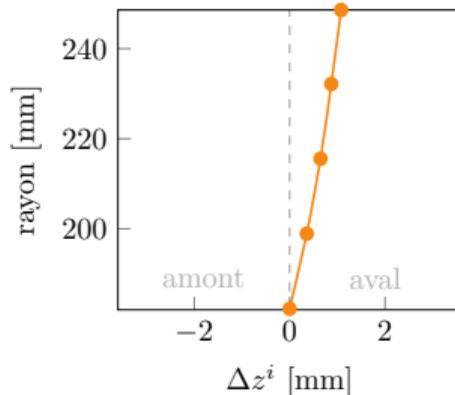
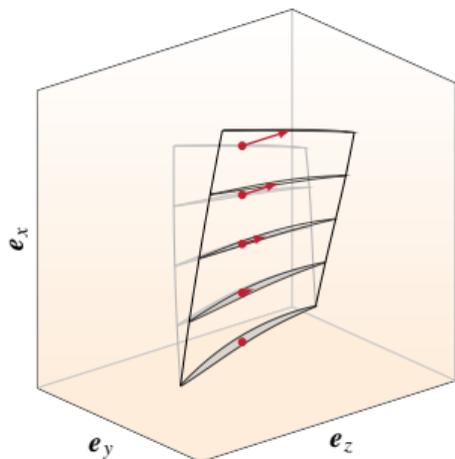




Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale



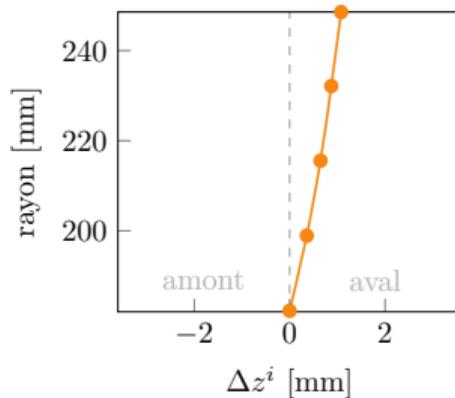
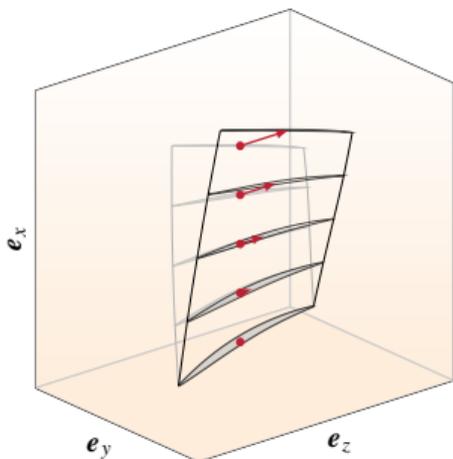
▶ rotor 37



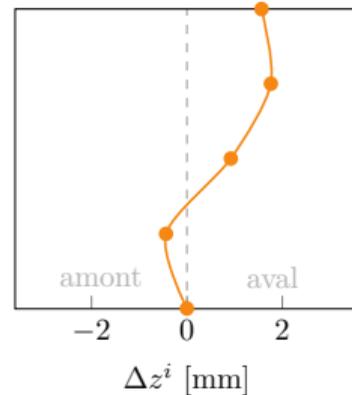
Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale



▶ rotor 37



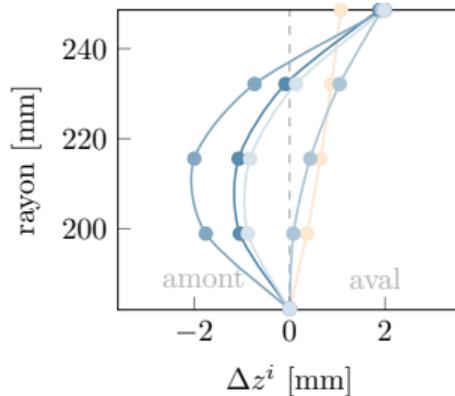
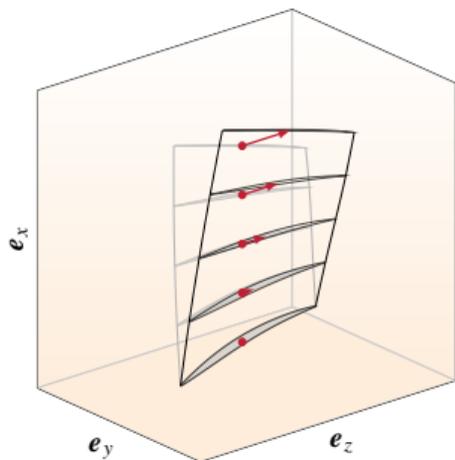
▶ rotor 67



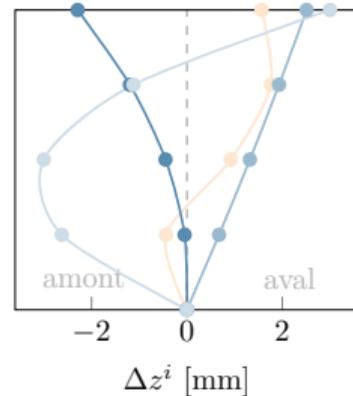
Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale \Rightarrow flèche arrière



▶ rotor 37



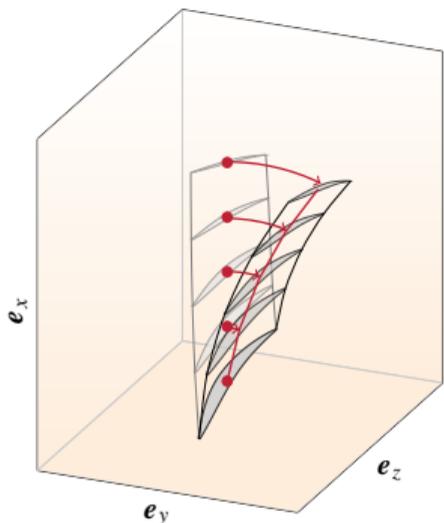
▶ rotor 67



Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale \Rightarrow flèche arrière
 - ▶ angle d'inclinaison

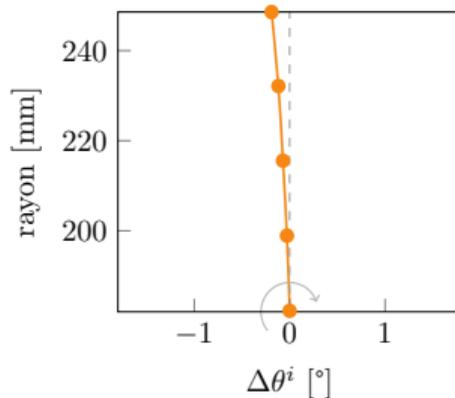
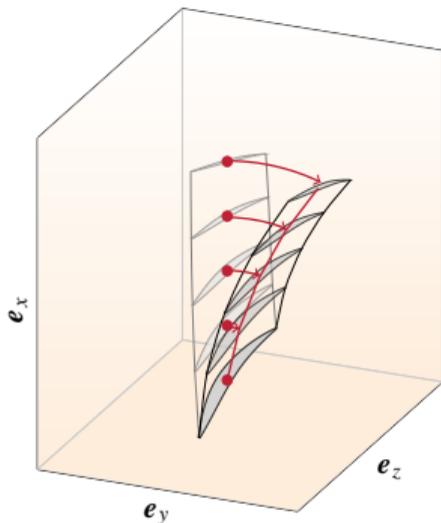




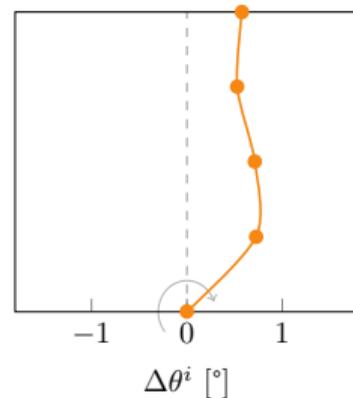
Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale \Rightarrow flèche arrière
 - ▶ angle d'inclinaison



▶ rotor 37



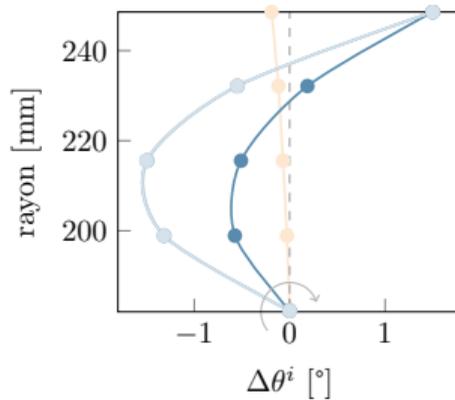
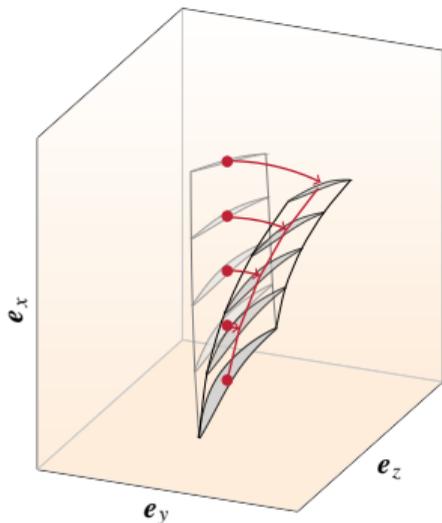
▶ rotor 67



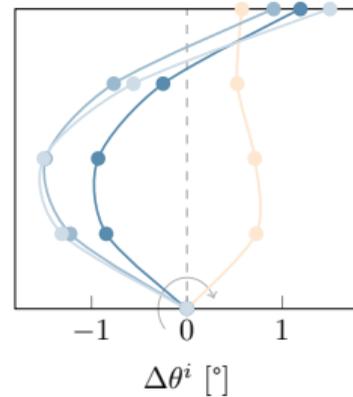
Ouverture

Identifier des critères de conception relatifs
aux interactions structurelles non linéaires

- validité de la consommation de jeu comme substitut
 - ▶ consommation de jeu localisée en un nœud et un mode
 - ▶ enrichissement de \tilde{f} avec plusieurs nœuds et modes
- analyse des tendances géométriques
 - ▶ flèche axiale \Rightarrow **flèche arrière**
 - ▶ angle d'inclinaison \Rightarrow **inclinaison avant**



▶ rotor 37



▶ rotor 67



Introduction

Algorithme
d'optimisation

Pertinence
industrielle

Outil de
modélisation

Reconception
d'aubes

Conclusion

- 1 Introduction
- 2 Algorithme d'optimisation
- 3 Pertinence industrielle
- 4 Outil de modélisation
- 5 Reconception d'aubes industrielles
- 6 Conclusion**





Contributions

- mathématiques appliquées

- ① algorithme d'éloignement aux discontinuités

- ▶ article accepté dans *SIAM Journal On Optimization*¹⁷

17. C. AUDET et al. *SIAM Journal on Optimization* (). Escaping unknown discontinuous regions in blackbox optimization. eprint : <https://www.gerad.ca/fr/papers/G-2020-46>.

18. S. КОЛТУЧ et al. Methodology for the Redesign of Compressor Blades Undergoing Nonlinear Structural Interactions : Application to Blade-Tip/Casing Contacts.



Contributions

- mathématiques appliquées

① algorithme d'éloignement aux discontinuités

- ▶ article accepté dans *SIAM Journal On Optimization*¹⁷

- génie mécanique

② outil de modélisation d'aubes industrielles

- ▶ article soumis : « Two-way blade modeling method for the structural redesign of compressor blades », S. Kojtych, C. Audet et A. Batailly

17. C. AUDET et al. *SIAM Journal on Optimization* (). Escaping unknown discontinuous regions in blackbox optimization. eprint : <https://www.gerad.ca/fr/papers/G-2020-46>.

18. S. KOJTYCH et al. Methodology for the Redesign of Compressor Blades Undergoing Nonlinear Structural Interactions : Application to Blade-Tip/Casing Contacts.



Contributions

- mathématiques appliquées

① algorithme d'éloignement aux discontinuités

- ▶ article accepté dans *SIAM Journal On Optimization*¹⁷

- génie mécanique

② outil de modélisation d'aubes industrielles

- ▶ article soumis : « Two-way blade modeling method for the structural redesign of compressor blades », S. Kojtych, C. Audet et A. Batailly

③ preuve de concept pour la reconception d'aubes industrielles

④ critères de conception

- ▶ acte de conférence ASME Turbo Expo 2022, recommandé pour publication dans le *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*¹⁸

17. C. AUDET et al. *SIAM Journal on Optimization* (). Escaping unknown discontinuous regions in blackbox optimization. eprint : <https://www.gerad.ca/fr/papers/G-2020-46>.

18. S. KOJTYCH et al. Methodology for the Redesign of Compressor Blades Undergoing Nonlinear Structural Interactions : Application to Blade-Tip/Casing Contacts.



Perspectives

- algorithme d'optimisation
 - ▶ détection de contraintes cachées
 - ▶ modèles substituts discontinus





Perspectives

- algorithme d'optimisation
 - ▶ détection de contraintes cachées
 - ▶ modèles substituts discontinus
- processus de reconception
 - ▶ campagne de reconception d'aubes
 - ▶ utilisation de DiscoMads sur des quantités d'intérêt discontinues
 - ▶ résolution du problème d'optimisation principal





Perspectives

- algorithme d'optimisation
 - ▶ détection de contraintes cachées
 - ▶ modèles substituts discontinus
- processus de reconception
 - ▶ campagne de reconception d'aubes
 - ▶ utilisation de DiscoMads sur des quantités d'intérêt discontinues
 - ▶ résolution du problème d'optimisation principal

Merci pour votre attention!





Annexes

DiscoMads

Outil de modélisation

Reconception d'aubes

7 Annexes



Recherche sur treillis adaptatif (Mads)

Une itération de Mads sans contraintes

- 1 **étape de recherche** : points définis par l'utilisateur sur le maillage
- 2 **étape de sonde** : points donnés par des directions de sonde
 - ▶ paramètre de sonde Δ^k
- 3 **mise à jour** de Δ^k , δ^k et h_{\max}^k selon l'itération
 - ▶ succès : itération dominante ou améliorante
 - ▶ échec

Résolution de problèmes contraints

$$\min_{\mathbf{x} \in X \subseteq \mathbb{R}^n} \{f(\mathbf{x}) : c(\mathbf{x}) \leq 0\}$$

- approche de barrière progressive
- fonction d'agrégation des contraintes
 - ▶ seuil de rejet h_{\max}^k

$$h(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{j=1}^m (\max(c_j(\mathbf{x}), 0))^2 & \text{si } \mathbf{x} \in X, \\ \infty & \text{sinon.} \end{cases}$$

DiscoMads : mécanisme d'exclusion

- ensemble de points révélateurs D^k à l'itération k
- contrainte d'exclusion d^k à l'itération k

$$d^k(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 - \frac{\text{dist}(\mathbf{x}, D^k)}{r_e} & \text{si } D^k \cap B_{r_e}(\mathbf{x}) \neq \emptyset, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- problème résolu à l'itération k :

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in X} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.c.} \quad & \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \text{et } d^k(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$

- prise en compte de la contrainte d^k
 - ▶ fonction d'agrégation des contraintes h^k

$$h^k(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \max(c_j(\mathbf{x}), 0)^2 + \max(d^k(\mathbf{x}), 0)^2 & \text{si } \mathbf{x} \in X \\ \infty & \text{sinon} \end{cases}$$

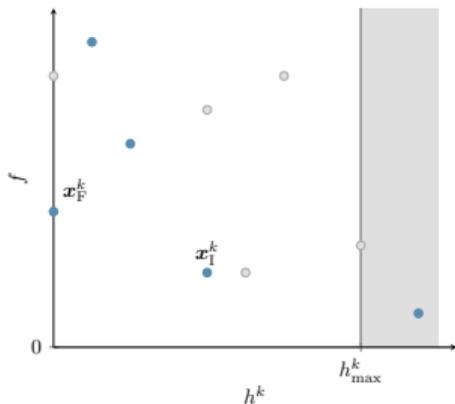
- ▶ barrière progressive basée sur f et h^k



DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{\text{lim}}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{\text{lim}} \}$



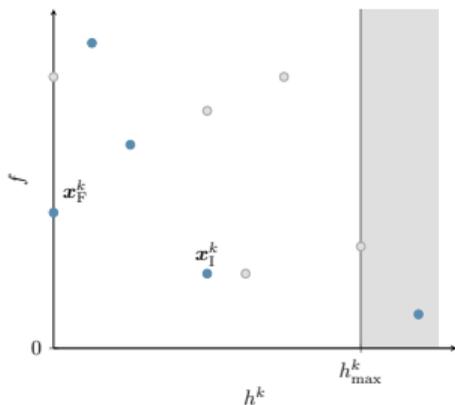
$$\#U^k = 4, N(k, h_{\text{max}}^k) = 3$$



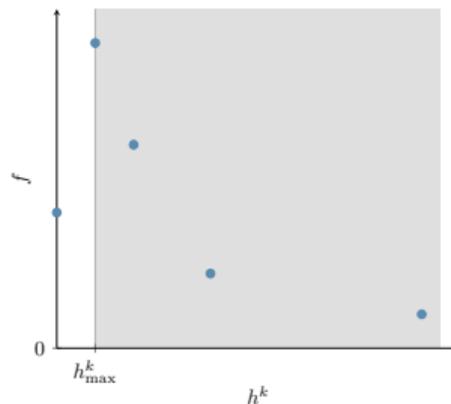
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{lim}) = \# \{ \boldsymbol{x} \in U^k : h(\boldsymbol{x}) \leq h_{lim} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{max}^k) = 3$$



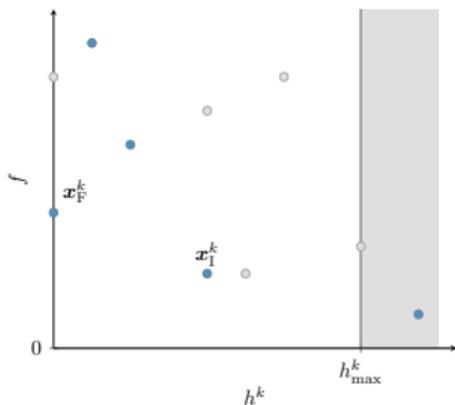
$$\#U^k = 4, N(k, h_{max}^k) = 0$$



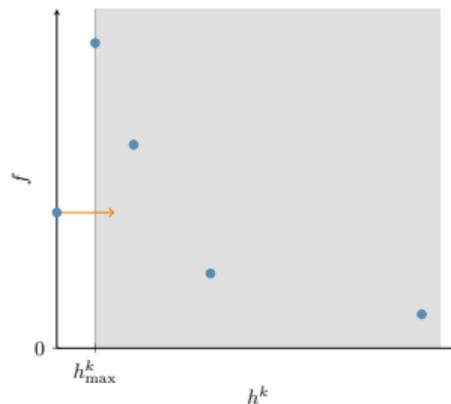
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{lim}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{lim} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{max}^k) = 3$$



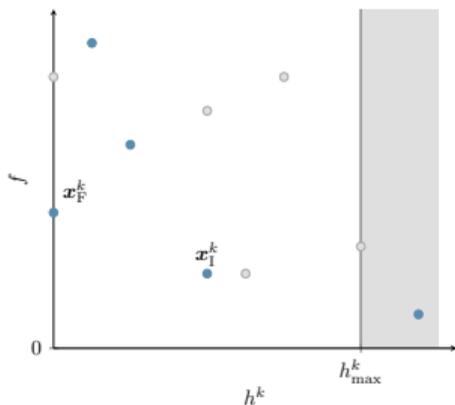
$$\#U^k = 4, N(k, h_{max}^k) = 0, U^{k+1} = 4$$



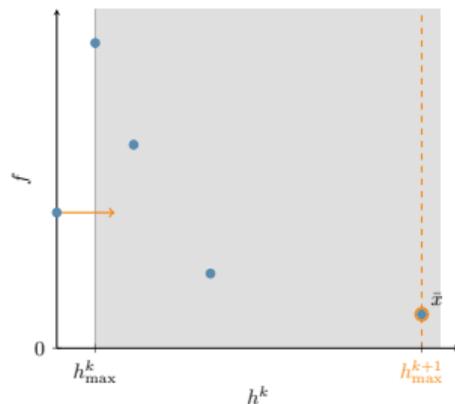
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{\text{lim}}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{\text{lim}} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\max}^k) = 3$$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\max}^k) = 0, U^{k+1} = 4$$

- règle de mise à jour de la barrière \Rightarrow attaché à un point $\bar{x} : h_{\max}^{k+1} = h^k(\bar{x})$

- ▶ choix de \bar{x} :

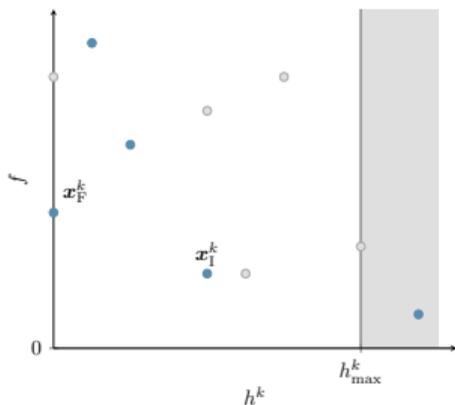
$$N(k+1, h(\bar{x})) = \begin{cases} \min(N(k, h_{\max}^k), \#\{U^{k+1}\}) & \text{si } N(k, h_{\max}^k) \neq 0, \\ \#\{U^{k+1}\} & \text{si } N(k, h_{\max}^k) = 0 \end{cases}$$



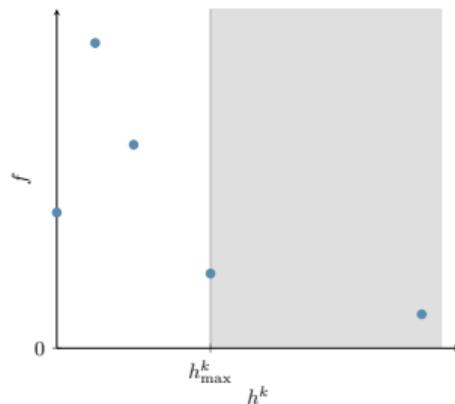
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{\text{lim}}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{\text{lim}} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\text{max}}^k) = 3$$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\text{max}}^k) = 3$$

- règle de mise à jour de la barrière \Rightarrow attaché à un point $\bar{\mathbf{x}} : h_{\text{max}}^{k+1} = h^k(\bar{\mathbf{x}})$

- ▶ choix de $\bar{\mathbf{x}}$:

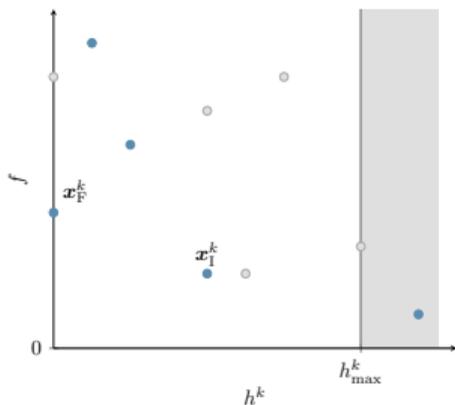
$$N(k+1, h(\bar{\mathbf{x}})) = \begin{cases} \min(N(k, h_{\text{max}}^k), \#\{U^{k+1}\}) & \text{si } N(k, h_{\text{max}}^k) \neq 0, \\ \#\{U^{k+1}\} & \text{si } N(k, h_{\text{max}}^k) = 0 \end{cases}$$



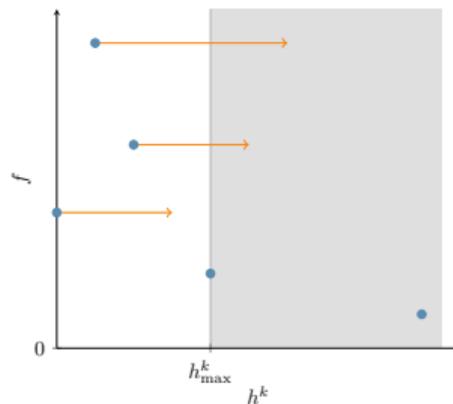
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{\text{lim}}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{\text{lim}} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\text{max}}^k) = 3$$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\text{max}}^k) = 3, U^{k+1} = 3$$

- règle de mise à jour de la barrière \Rightarrow attaché à un point $\bar{\mathbf{x}} : h_{\text{max}}^{k+1} = h^k(\bar{\mathbf{x}})$

- ▶ choix de $\bar{\mathbf{x}}$:

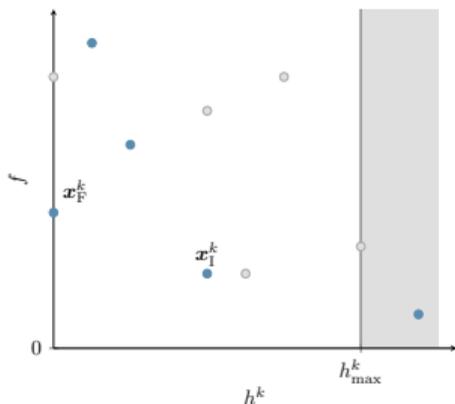
$$N(k+1, h(\bar{\mathbf{x}})) = \begin{cases} \min(N(k, h_{\text{max}}^k), \#\{U^{k+1}\}) & \text{si } N(k, h_{\text{max}}^k) \neq 0, \\ \#\{U^{k+1}\} & \text{si } N(k, h_{\text{max}}^k) = 0 \end{cases}$$



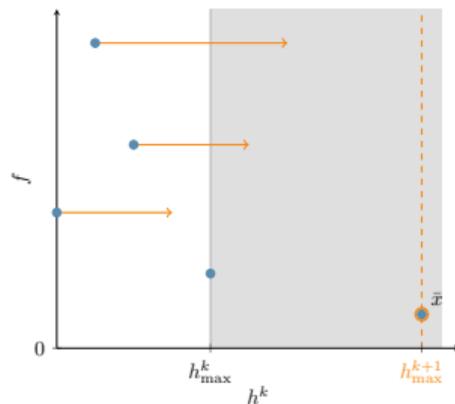
DiscoMads : mise à jour du seuil de la barrière

• notations

- ▶ Points non dominés (●) et dominés (○)
- ▶ U^k : points non réalisables non dominés au début de l'itération k :
- ▶ $N(k, h_{\text{lim}}) = \# \{ \mathbf{x} \in U^k : h(\mathbf{x}) \leq h_{\text{lim}} \}$



$$\#U^k = 4, N(k, h_{\max}^k) = 3$$



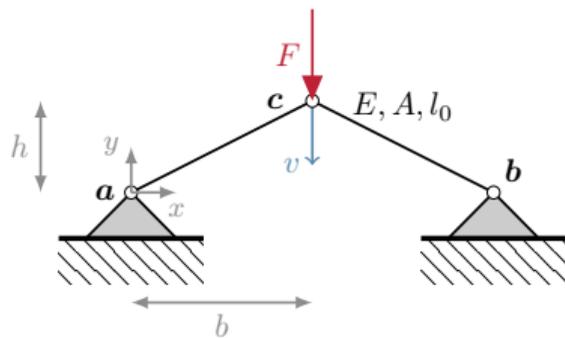
$$\#U^k = 4, N(k, h_{\max}^k) = 3, U^{k+1} = 3$$

- règle de mise à jour de la barrière \Rightarrow attaché à un point $\bar{x} : h_{\max}^{k+1} = h^k(\bar{x})$

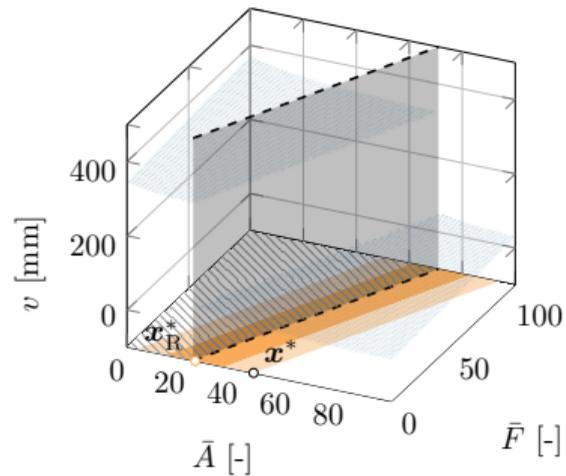
- ▶ choix de \bar{x} :

$$N(k+1, h(\bar{x})) = \begin{cases} \min(N(k, h_{\max}^k), \#\{U^{k+1}\}) & \text{si } N(k, h_{\max}^k) \neq 0, \\ \#\{U^{k+1}\} & \text{si } N(k, h_{\max}^k) = 0 \end{cases}$$

Problème de flambement



(a) modèle

(b) v en fonction de \bar{A} et \bar{F}

► Caractéristiques du treillis à deux barres.

- problème d'optimisation \Rightarrow éloignement à la discontinuité

$$\min_{(\bar{A}, \bar{F}) \in X} f(\bar{A}, \bar{F})$$

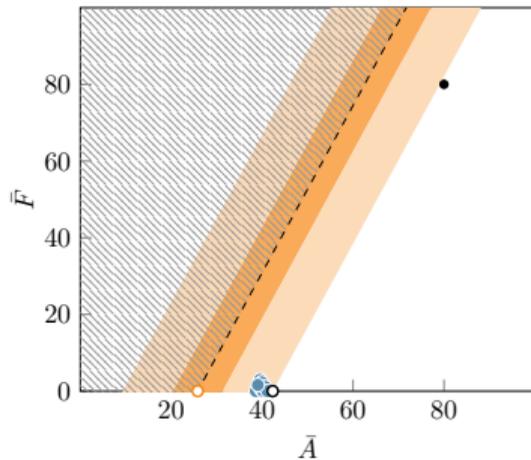
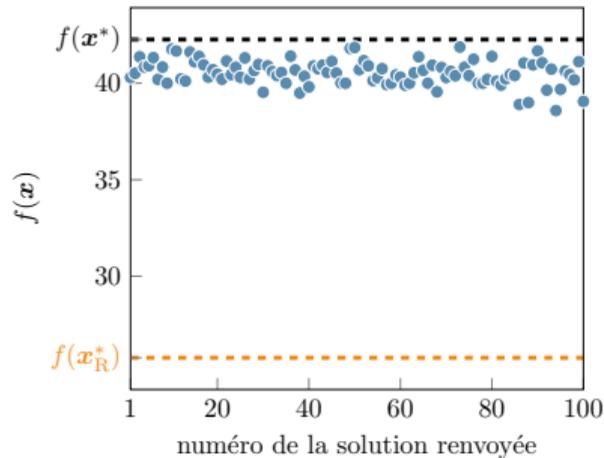
$$\text{sujet à } c(\bar{A}, \bar{F}) \leq 0$$

$$\text{et } d(\bar{A}, \bar{F}) \leq 0,$$

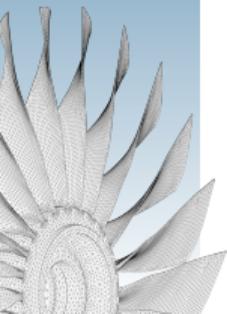
(2)



Problème de flambement

(a) solutions de DiscoMads (●), \mathbf{x}^* (○), \mathbf{x}_R^* (○) et \mathbf{x}_A^0 (●)(b) valeurs de f pour chaque solution renvoyée par DiscoMads (●)

- Caractéristiques des solutions renvoyées par DiscoMads pour 100 exécutions à partir du point de départ Ω -réalisable $\mathbf{x}_A^0 = (80, 80)$.





Problème de production de styrène

- problème de production de styrène¹⁹ \implies boîte noire STYRENE²⁰
 - ▶ 8 variables (entre 0 et 100), 11 contraintes
 - ▶ échec de simulation pour certains $\boldsymbol{x} \implies$ contraintes cachées

- DiscoMads pour s'éloigner des zones de contraintes cachées
 - ▶ échecs $\implies f = 10^{20} \implies$ discontinuités faibles de f

- comment savoir si d est satisfaite en \boldsymbol{x} ?
 - ▶ estimation de la sévérité des contraintes cachées au voisinage de \boldsymbol{x} :

$$H(\boldsymbol{x}, \sigma) := \#\{y^i \in B_\sigma(\boldsymbol{x}), i \in \{1, \dots, 1000\}, \text{ l'évaluation en } y \text{ échoue}\}$$

19. C. AUDET et al. *J. Global Optim.* (2008). DOI: 10.1007/s10898-007-9234-1.

20. <https://github.com/bbopt/styrene>

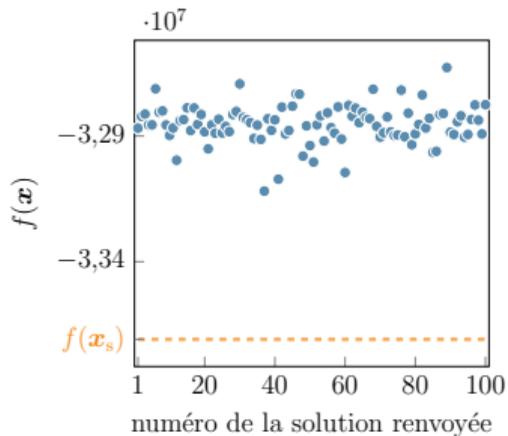


Problème de production de styrène

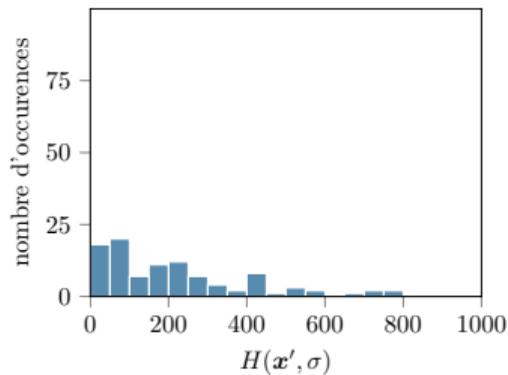
- choix de paramètres

- ▶ x^0 est une des meilleures solutions connues : $f(x^0) = -33\,709\,000$
- $H(x^0, 15) = 435 \implies x^0$ dans une zone de contraintes cachées
- ▶ $r_d = 5, \tau = 10^{15}, r_e = 10$

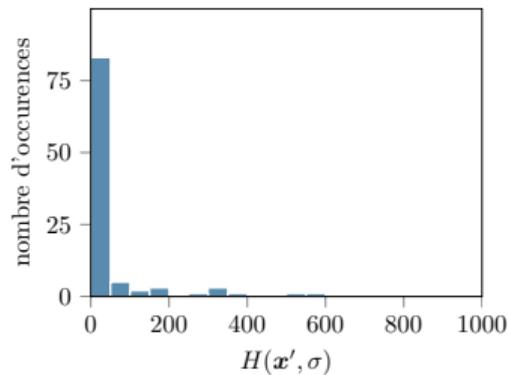
- résultats de 100 exécutions avec 100 graines aléatoires



▶ valeurs de f



▶ $\sigma = r_d + r_e$

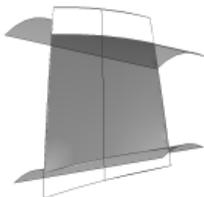


▶ $\sigma = r_d$



Validation de la fidélité : critères géométriques

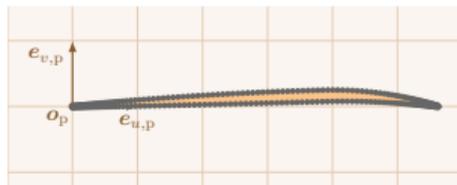
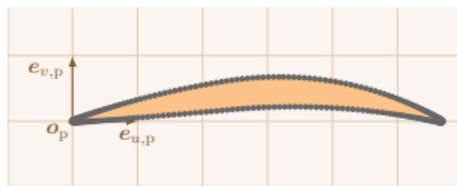
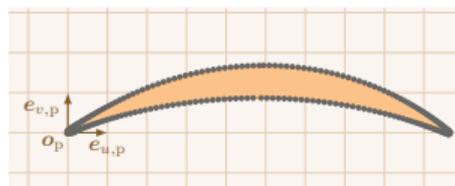
- variations de volume



aube	ΔV_{per}^e [%]	ΔV_c [%]				
		$n_{\text{sec}} = 2$	$n_{\text{sec}} = 3$	$n_{\text{sec}} = 5$	$n_{\text{sec}} = 9$	$n_{\text{sec}} = 17$
rotor 37	0,12	-0,5	1,04	0,79	0,96	0,81
rotor 67	négli.	-10,04	-0,1	-0,1	-0,8	0,25

- erreurs sur les profils

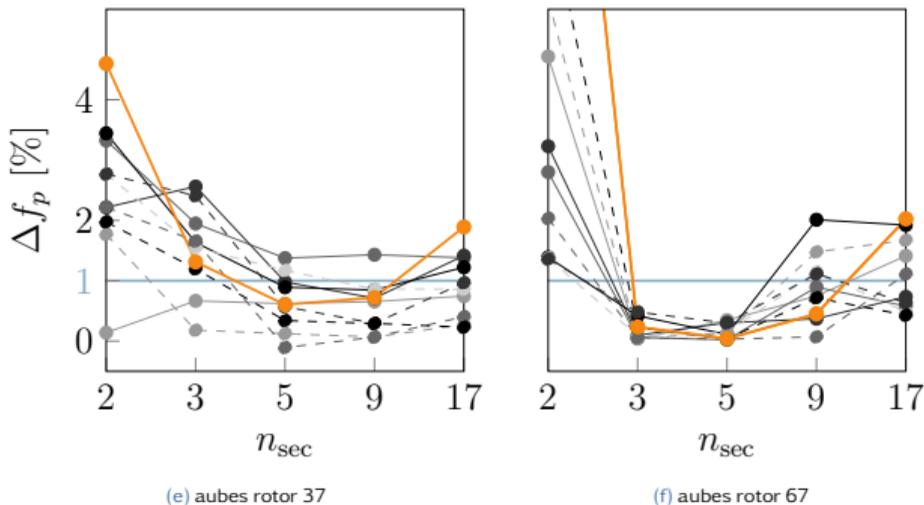
- ▶ $e(\boldsymbol{x}) \leq 0,05$ pour tous les profils
- ▶ profils cibles (●) et profils paramétrés (■)

(a) rotor 37, sommets : $e(\boldsymbol{x}) \simeq 0,026$ (b) rotor 67, sommets : $e(\boldsymbol{x}) \simeq 0,033$ (c) rotor 37, pied : $e(\boldsymbol{x}) \simeq 0,022$ (d) rotor 67, pied : $e(\boldsymbol{x}) \simeq 0,037$



Validation de la fidélité : critères dynamiques

- erreurs sur les fréquences propres



► Erreurs sur les fréquences propres des aubes paramétrées par rapport à l'aube d'entrée : Δf_1 (—●—), Δf_2 (—●—), Δf_3 (—●—), Δf_4 (—●—), Δf_5 (—●—), Δf_6 (—●—), Δf_7 (—●—), Δf_8 (—●—), Δf_9 (—●—), Δf_{10} (—●—).

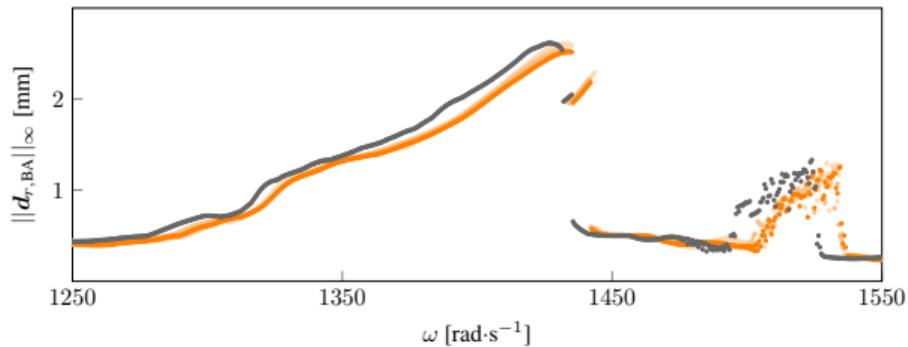
- erreurs sur la consommation de jeu au bord d'attaque pour le premier mode de flexion

aube	Δc [%]				
	$n_{sec} = 2$	$n_{sec} = 3$	$n_{sec} = 5$	$n_{sec} = 9$	$n_{sec} = 17$
rotor 37	6,23	0,24	-0,09	-0,14	0,27
rotor 67	-22,08	-1,03	-0,94	-0,94	-3,72

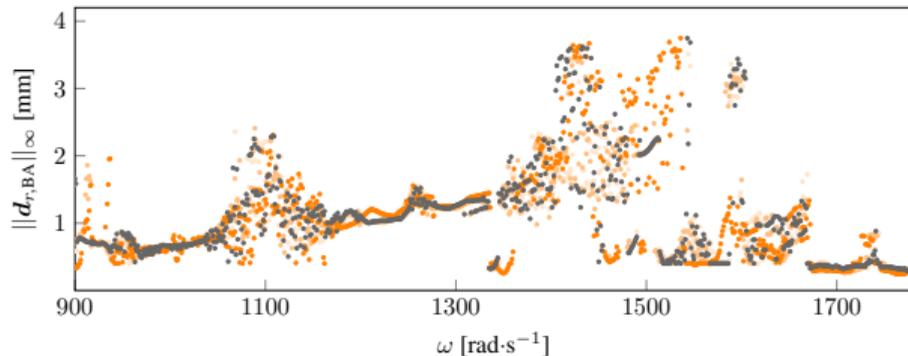


Validation de la fidélité : critères dynamiques

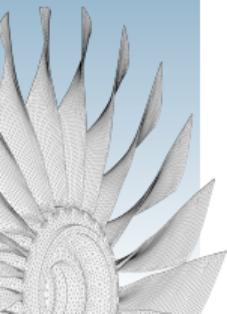
- réponse à un scénario de contact



(a) aubes rotor 37



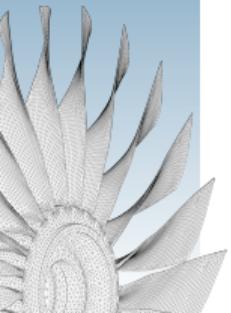
(b) aubes rotor 67





Validation des performances

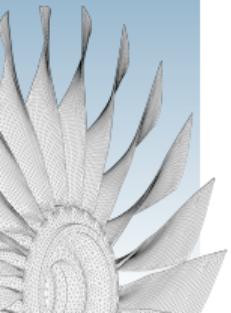
- robustesse





Validation des performances

- robustesse
 - ▶ par rapport au nombre de sections $n_{\text{sec}} \leq 17$

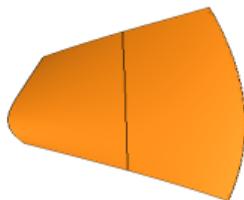




Validation des performances

- robustesse

- ▶ par rapport au nombre de sections $n_{\text{sec}} \leq 17$
- ▶ par rapport aux variations des paramètres



conicité



inclinaison tangentielle



flèche axiale



village

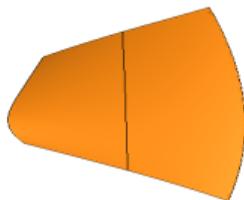




Validation des performances

- robustesse

- ▶ par rapport au nombre de sections $n_{\text{sec}} \leq 17$
- ▶ par rapport aux variations des paramètres



conicité



inclinaison tangentielle



flèche axiale



village

- efficacité numérique

- ▶ génération de CAO et maillage \implies 15 secondes (5 sections)





Modèles d'aubes ouverts de la NASA

- rotor 37²¹(1978)

- ▶ étage de compresseur transsonique
- ▶ 36 aubes



▶ Rotor 37²³

- rotor 35²¹(1978)

- ▶ étage de compresseur transsonique
- ▶ 36 aubes



▶ Rotor 35.²⁴

- rotor 67²²(1979)

- ▶ étage de soufflante
- ▶ 22 aubes



▶ Rotor 67.²⁵

21. L. REID et al. (1978). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780025165>.

22. D. C. URASEK et al. (1979). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790015796>.

23. URL : <https://catalog.archives.gov/id/17468389>.

24. URL : <https://catalog.archives.gov/id/17466807>.

25. URL : <https://catalog.archives.gov/id/17500556>.