



**HAL**  
open science

## Modélisation macroscopique des différents mécanismes d'usure d'un matériau abradable

Bérenger Berthoul, Alain Batailly, Laurent Stainier, Mathias Legrand, Patrice Cartraud

► **To cite this version:**

Bérenger Berthoul, Alain Batailly, Laurent Stainier, Mathias Legrand, Patrice Cartraud. Modélisation macroscopique des différents mécanismes d'usure d'un matériau abradable. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA; GeM; LMBS; LaSIE; LIMatB; LAMPA; LGCGM, May 2015, Giens, France. hal-01402723

**HAL Id: hal-01402723**

**<https://hal.science/hal-01402723>**

Submitted on 25 Nov 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Modélisation macroscopique des différents mécanismes d'usure d'un matériau abrasable

Bérenger Berthoulet<sup>1</sup>, Alain Batailly<sup>2</sup>, Laurent Stainier<sup>1</sup>, Mathias Legrand<sup>2</sup>, Patrice Cartraud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, École Centrale de Nantes, FRANCE

<sup>2</sup>Laboratoire de dynamique des structures et vibrations, département de génie mécanique, université McGill, Montréal, QUÉBEC

**Résumé** — On cherche à modéliser l'usure d'un matériau abrasable lorsqu'une aube de turbomachine rentre en contact avec le carter sous l'effet d'une ovalisation de ce dernier. Le but est d'utiliser ce modèle d'usure dans une simulation explicite par éléments finis de l'interaction aube/carter. On propose d'intégrer les phénomènes microscopiques de l'usure dans des lois utilisables à l'échelle de l'aube. L'usure peut se produire selon différents mécanismes, suivant les paramètres d'interaction. La modélisation de ces mécanismes est présentée et les résultats analysés en fonction des résultats expérimentaux.

**Mots clés** — interaction rotor/stator, matériau abrasable, usure, modèle phénoménologique.

## 1 Contexte de l'étude

L'augmentation du rendement des turbomachines aéronautiques conduit à la réduction des jeux entre les parties tournantes (telles que les roues aubagées) et le carter environnant, favorisant ainsi l'apparition de contacts structuraux qui sont dorénavant considérés comme des événements normaux, bien qu'indésirables. Afin de limiter les conséquences de ces contacts sur l'intégrité structurelle des composants, il est fréquent d'utiliser un revêtement abrasable, déposé sur le carter et satisfaisant le compromis suivant : être suffisamment friable pour ne pas endommager les aubes lors des contacts mais également suffisamment résistant à son environnement (érosion, haute température, corrosion...).

Longtemps vus comme une solution robuste pour empêcher l'apparition de hauts niveaux de vibrations lors de contacts structuraux, les matériaux abrasables n'empêchent toutefois pas certains phénomènes d'interaction de se produire. Des observations expérimentales [8] ont notamment mis en évidence une résonance de l'aube sous l'effet du contact avec le revêtement abrasable, pouvant conduire à une fissuration de l'aube. Le phénomène a été prédit par une simulation numérique [1] en considérant une modélisation simplifiée de l'arrachement du revêtement abrasable. Le but de ce travail est de présenter une révision du modèle d'usure, cf. figure 1, afin d'assurer une meilleure cohérence avec plusieurs observations expérimentales [10, 7, 3].

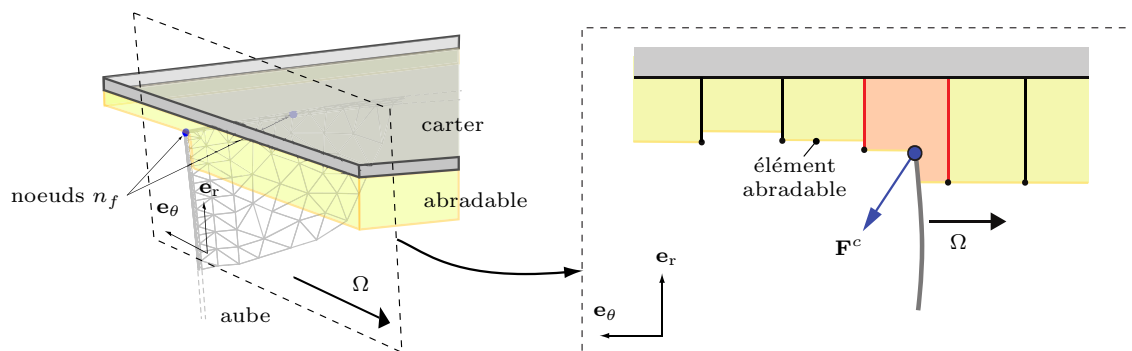


FIGURE 1 – Modèle numérique de l'interaction aube/abrasable, d'après [6].  $\Omega$  est la vitesse de rotation,  $F^c$  la force de contact exercée par l'abrasable, et  $n_f$  les nœuds pour lesquels le contact est pris en compte.

## 2 Modélisation des différents mécanismes

L'analyse des expériences [10] permet de distinguer plusieurs mécanismes d'usure, activés ou non en fonction de trois variables d'interaction : la vitesse de rotation des aubes (de 100 à 500 m/s), la pénétration de l'aube dans l'abradable (entre 1 µm et 1 mm) et la température (entre 0 et 1500°C). La phénoménologie de l'usure nous permet d'isoler trois mécanismes présentés ci-dessous. On cherche un modèle nous permettant de calculer  $F_t^X$  et  $\Delta h^X$ , respectivement la force exercée sur l'aube et l'usure de l'abradable, pour le mécanisme  $X$ .

### 2.1 Friction et usure par adhésion

Les phénomènes de friction et usure par adhésion sont les conséquences d'un même mécanisme physique d'interaction entre deux surfaces, à savoir la plasticité aux jonctions [9]. Ils sont modélisés par les classiques lois de Coulomb et d'Archard [9], pour une approximation correcte et un nombre réduit de paramètres à mesurer expérimentalement :

$$\begin{aligned} F_t^{\text{fr}} &= \mu \cdot F_n \\ \Delta h^{\text{ad}} &= k^{\text{ad}} \cdot e_b \cdot \sigma_n \end{aligned} \quad (1)$$

où  $k^{\text{ad}}$  est le coefficient de la loi d'Archard,  $e_b$  l'épaisseur de l'aube, et  $\sigma_n$  la contrainte normale. La force normale  $F_n$  exercée par l'abradable sur l'aube peut être calculée à partir du comportement volumique de l'abradable. Ces deux mécanismes sont toujours présents dans une interaction, même s'ils deviennent progressivement négligeables devant d'autres phénomènes lors de pénétrations plus importantes dans le revêtement.

### 2.2 Usure par usinage

Lors d'une forte incursion de l'aube dans le revêtement, et avec des températures élevées, l'interaction s'assimile à un usinage de l'abradable. Les expériences montrent alors la formation d'un copeau continu [7]. Une modélisation simple de l'usure par usinage consiste à utiliser le modèle "jeu de cartes", cf. figure 2, couplé à un modèle d'élasto-plasticité parfaite pour le comportement volumique de l'abradable :

$$\begin{aligned} F_t^{\text{us}} &= \tau_y \cdot \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \cdot \Delta h^{\text{us}} \\ \Delta h^{\text{us}} &= I - I_e \end{aligned} \quad (2)$$

où  $\tau_y$  est la limite d'élasticité en cisaillement, et  $I_e$  l'accommodation élastique de l'abradable lors d'une pénétration.

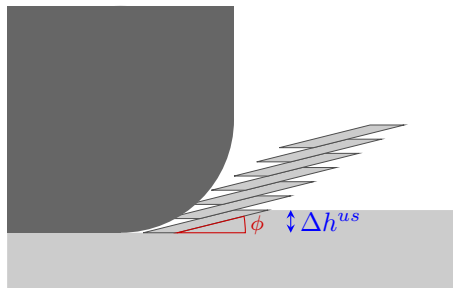


FIGURE 2 – Modèle "jeu de cartes" pour l'usinage [4]

Pour prendre en compte le fait que le mécanisme n'est pas toujours actif, une pondération  $p^{\text{ma}}$  représente la proportion de surface d'abradable effectivement usée par usinage, en fonction des paramètres d'interaction. Ainsi, si l'incursion est nulle, il faut que  $p^{\text{ma}} = 0$ .

### 2.3 Usure par micro-rupture

L'abradable est relativement fragile et un mode d'usure possible est la rupture fragile de particules d'abradable, appelé micro-rupture dans la littérature [10]. Sous certaines hypothèses (relatives par exemple à la forme des particules), il est possible de calculer l'énergie dissipée en moyenne lorsqu'une particule est détachée :

$$\begin{aligned} F_t^{\text{mr}} &= k^{\text{mr}} \cdot \gamma \\ \Delta h^{\text{mr}} &= l_{\text{pa}} \end{aligned} \quad (3)$$

où  $k^{\text{mr}}$  est un facteur dépendant de la forme de la particule. Dans le cas d'une plaque,  $k^{\text{mr}} = 2$ , et s'il s'agit d'un cube, alors  $k^{\text{mr}} = 6$ .  $\gamma$  est l'énergie de surface du matériau, et  $l_{\text{pa}}$  est la taille des particules usées.

De même que pour l'usure par usinage, une pondération  $p^{\text{mr}}$  donne la proportion de surface usée par micro-rupture. L'usure en un point donné est supposée liée soit à l'usinage ou soit la micro-rupture ce qui implique :  $0 \leq p^{\text{ma}} + p^{\text{mr}} \leq 1$ .

### 2.4 Bilan

Puisque tous les mécanismes ont des causes physiques indépendantes, l'énergie transférée de l'aube à l'abradable est la somme des énergies de chaque mécanisme (on néglige l'énergie cinétique des particules détachées). Cette décomposition reste vraie pour les forces, d'où :

$$F_t = F_t^{\text{fr}} + F_t^{\text{us}} + F_t^{\text{mr}} \quad (4)$$

où  $F_t$  est la force tangentielle exercée par l'abradable.

## 3 Intégration temporelle et algorithme d'usure

La simulation s'effectue dans le cadre de la stratégie numérique présentée en [1]. Le carter est considéré comme rigide, l'aube est modélisée par éléments finis avec réduction de Craig-Bampton [2]. L'abradable est modélisé par des éléments surfaciques 1D disposés sur le carter. Un élément est associé aux comportements volumique et surfacique de l'abradable, qui permettent de déterminer respectivement les forces normale et tangentielle à exercer sur l'aube en cas de pénétration. Et chaque élément possède une hauteur qui est mise à jour lorsqu'il y a usure.

Le schéma de contact est explicite alterné. Une prédiction de la position de l'aube sans contact est faite à chaque pas de temps. Lorsque des pénétrations sont détectées, les forces exercées par l'abradable sur l'aube sont calculées et l'épaisseur de l'abradable est mise à jour. Enfin, la position de l'aube en considérant les forces exercées par l'abradable est corrigée.

## 4 Résultats

Les premiers résultats sont analysés à partir de *cartes d'usures* : l'usure du revêtement abradable sur toute la circonférence du carter est représentée sur chaque colonne avec le code couleur suivant : blanc quand il n'y a pas d'usure, et noir lorsque l'usure est maximale. Chaque colonne représente un vitesse de rotation différente. On s'intéresse ici à l'usure du revêtement faisant face au bord de fuite de l'aube, où sont observés les motifs d'usure les plus complexes.

La première étape consiste à comparer, sur une même configuration d'interaction, de la loi phénoménologique avec la loi d'usure existante [5], avec laquelle il a été possible de reproduire correctement la dynamique de l'aube dans les expériences [8]. Les paramètres de la loi de référence sont les mêmes que dans [1]. Pour la loi phénoménologique, nous utilisons les données sur les matériaux abradables de notre partenaire industriel et de la littérature [10, 9]. On observe des motifs d'usure similaires pour les deux lois, cf. figure 3.

## 5 Conclusion

Les premiers résultats montrent qu'une calibration grossière de la loi d'usure phénoménologique permet de retrouver des résultats expérimentaux. Une étude paramétrique est en cours pour mesurer la sensibilité des différents paramètres du modèle sur la dynamique de l'aube. L'objectif final de ce travail est de prédire quelles caractéristiques du matériau abrasable doivent être modifiées de manière à obtenir des niveaux de vibration de l'aube les plus faibles possibles.

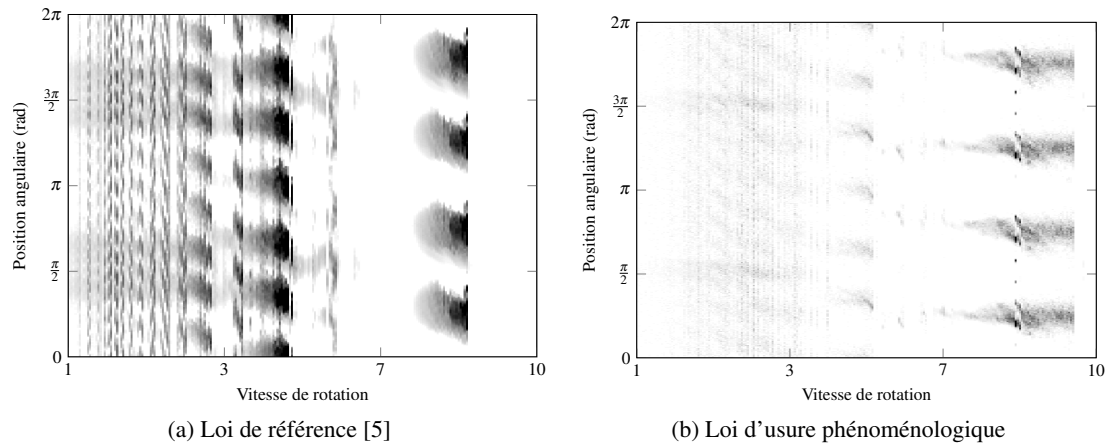


FIGURE 3 – Cartes d'usure (les données, confidentielles, sont normalisées)

## Références

- [1] A. BATAILLY, M. LEGRAND, A. MILLECAMPS et F. GARCIN : Numerical-experimental comparison in the simulation of rotor/stator interaction through blade-tip/abrasable coating contact. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012.
- [2] R. CRAIG et C. BAMPTON : Coupling of substructures for dynamics analyses. *AIAA Journal*, 6(7):1313–1319, 1968.
- [3] M. CUNY : *Contribution à la caractérisation locale des couples de matériaux mis en jeu lors du contact rotor/stator dans une turbomachine*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [4] M. P. GROOVER : *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [5] M. LEGRAND, A. BATAILLY et C. PIERRE : Numerical investigation of abrasable coating removal in aircraft engines through plastic constitutive law. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 7(1), 2011.
- [6] M. LEGRAND, A. BATAILLY et C. PIERRE : Numerical investigation of abrasable coating removal through plastic constitutive law in aircraft engine. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 7, 2011.
- [7] R. MANDARD : *Identification des mécanismes d'interaction aube-abrasable à l'aide d'essais instrumentés sur banc d'essai rotatif et corrélation avec les forces d'interaction*. Thèse de doctorat, 2014.
- [8] A. MILLECAMPS : *Interaction aube-carter : contribution de l'usure de l'abrasable et de la thermomécanique sur la dynamique d'aube*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2010.
- [9] E. RABINOWICZ : *Friction and wear of materials*. Wiley-Interscience, 1995.
- [10] R. K. SCHMID : *New high temperature abrasables for gas turbines*. Thèse de doctorat, Swiss federal institute of technology Zurich, 1997.