



**HAL**  
open science

## Modélisation de revêtements abrasables pour l'industrie aéronautique

François Peyraut, Jean-Louis Seichepine, Houda-Imène Faraoun, Manuel  
Hertter, Dieter Sporer, Noël Hopkins, Christian Coddet

► **To cite this version:**

François Peyraut, Jean-Louis Seichepine, Houda-Imène Faraoun, Manuel Hertter, Dieter Sporer, et al.. Modélisation de revêtements abrasables pour l'industrie aéronautique. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495621

**HAL Id: hal-01495621**

**<https://hal.science/hal-01495621v1>**

Submitted on 25 Mar 2017

**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.

Public Domain

---

# Modélisation de revêtements abradables pour l'industrie aéronautique

François Peyraut \* — Jean-Louis Seichepine \* — Houda Imène Faraoun \* — Manuel Hertter \*\* — Dieter Sporer \*\*\* — Noël Hopkins \*\*\*\* — Christian Coddet \*

\* *Laboratoire de Recherche et d'Etude sur les Matériaux, les Procédés et les Surfaces (LERMPS), Université de Technologie de Belfort-Montbéliard  
90010 Belfort cedex, France*

*{francois.peyraut, jean-louis.seichepine, christian.coddet}@utbm.fr*

\*\* *MTU Aero Engines GmbH, Dachauer Straße 665, 80995 München, Germany*

\*\*\* *Sulzer Metco (Canada) Inc, Fort Saskatchewan, Canada*

\*\*\*\* *Rolls-Royce plc, Derby, United Kingdom*

---

*RÉSUMÉ. Les matériaux abradables sont utilisés dans l'industrie aéronautique pour minimiser le jeu entre les extrémités d'ailette et le carter, ce qui a pour effet de diminuer la consommation de carburant en augmentant le rendement du moteur. Pour obtenir le jeu le plus faible possible, le principe consiste à utiliser les ailettes elles mêmes pour enlever une épaisseur minimale de revêtement. Plusieurs modèles prédictifs aux éléments finis ont été développés à l'aide des logiciels ANSYS, OOF et ImageJ pour simuler le comportement de ces matériaux. Ce travail de recherche a été réalisé de mai 2002 à mai 2006, dans le cadre du projet européen SEALCOAT inscrit dans le « FP5 Growth Program » financé par la Commission Européenne.*

*ABSTRACT. Abradable materials are used to decrease the gas consumption of aircraft engines by trying to find the minimum gap between the blade tips and the stator. To provide the minimum gap, the gap is machined by the blades themselves. To simulate the behaviour of abradable coatings, several finite elements models were developed thanks to ANSYS, OOF and ImageJ software. This research work was completed from May 2002 to May 2006 within the Seal-Coat project funded by the European Commission under the FP5 Growth Program.*

*MOTS-CLÉS : matériaux abradables, approches multi-échelles, modélisation éléments finis, modélisation multi-physiques, industrie aéronautique.*

*KEYWORDS: abradable materials, multi-scales approach, finite element model, multi-physics model, aeronautical industry.*

---

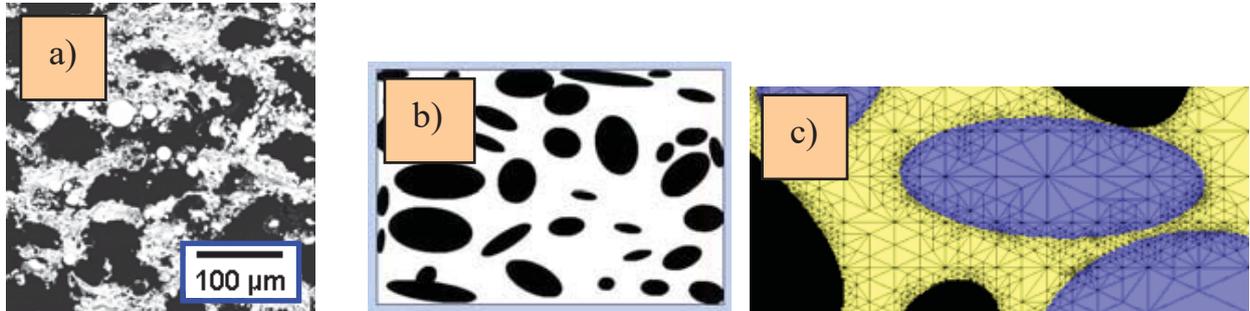
## 1. Introduction

Les matériaux abrasables sont utilisés dans l'industrie aéronautique pour minimiser le jeu entre les extrémités d'ailette et le carter, ce qui a pour effet de diminuer la consommation de carburant en augmentant le rendement du moteur (Schmid, 2000). Pour obtenir le jeu le plus faible possible, le principe consiste à utiliser les ailettes elles mêmes pour enlever une épaisseur minimale de revêtement. Ces revêtements sont fabriqués par projection thermique d'une poudre métallique composite mélangée à un dislocateur afin de favoriser la fragmentation lors d'un contact. Le résultat est un matériau hétérogène possédant une distribution aléatoire de matière. Ce matériau doit être optimisé pour éviter l'usure de l'ailette d'une part et pour prévenir l'érosion du revêtement par les gaz chargés de particules d'autre part. Les paramètres élastiques du revêtement ont été déterminés à l'aide d'une approche multi-échelle permettant de prendre en compte les inclusions de très petite taille (Faraoun *et al.*, 2006), le micron étant la taille caractéristique des hétérogénéités et le millimètre celle du revêtement. Une procédure d'identification inverse a été utilisée pour déterminer les propriétés plastiques du revêtement. Cette procédure consiste à connecter directement les algorithmes d'optimisation au modèle éléments finis d'un essai d'indentation (Bouzakis *et al.*, 2001). Elle a été développée avec le logiciel ANSYS (ANSYS, 2004). Sa validation a été réalisée en corrélant les valeurs de duretés mesurées et calculées pour des épaisseurs de revêtement variables. Un modèle élément fini du contact entre l'ailette et le revêtement a également été développé à l'aide d'ANSYS pour simuler les phénomènes de contact se produisant au cours d'un essai d'abrasabilité. Ce modèle utilise comme donnée d'entrée les paramètres élasto-plastiques précédemment identifiés. Il permet d'étudier l'influence des conditions de fonctionnement (épaisseur d'ailette, vitesse de rotation et vitesse d'incursion) sur les niveaux de contraintes et sur l'élévation de température dans le revêtement. Une bonne cohérence a été observée entre les calculs et l'usure mesurée de l'ailette. Ce travail de recherche a été réalisé de mai 2002 à mai 2006, dans le cadre du projet européen SEALCOAT (Abradable Seal Coatings and Claddings for Compressor Applications) inscrit dans le « FP5 Growth Program » et financé par la Commission Européenne. Il a impliqué 9 partenaires de 6 nationalités différentes. L'UTBM, leader du projet, a consacré un effort de recherche de 87 homme-mois pendant quatre ans pour un budget de 3.3 M€, dont 2 M€ provenant de l'Union Européenne.

## 2. Identification des paramètres élastiques

La caractérisation des propriétés élastiques d'un revêtement abrasable nécessite une approche spécifique car ils sont constitués de matériaux composites fortement hétérogènes contenant des porosités avec une distribution aléatoire de matière (fig. 1a). Le micron étant l'échelle caractéristique des hétérogénéités et le millimètre celle du revêtement, la caractérisation du comportement a été réalisée par une

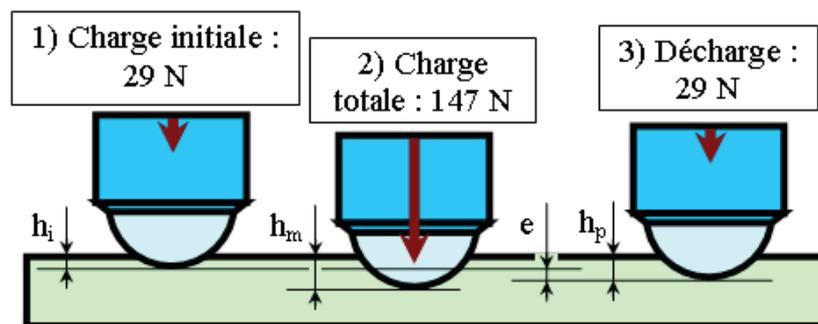
approche à l'échelle des hétérogénéités. Pour cela, le logiciel d'analyse d'image ImageJ (ImageJ software documentation) a été employé pour créer une image équivalente de la micrographie dans laquelle les hétérogénéités de taille significative sont remplacées par des ellipses (fig. 1b). L'image équivalente est ensuite maillée (fig. 1c) en utilisant le code de calcul aux éléments finis OOF. Ce code est dédié à la détermination de propriétés macroscopiques à partir d'images réelles ou simulées de la microstructure (OOF: Object Oriented Finite Element).



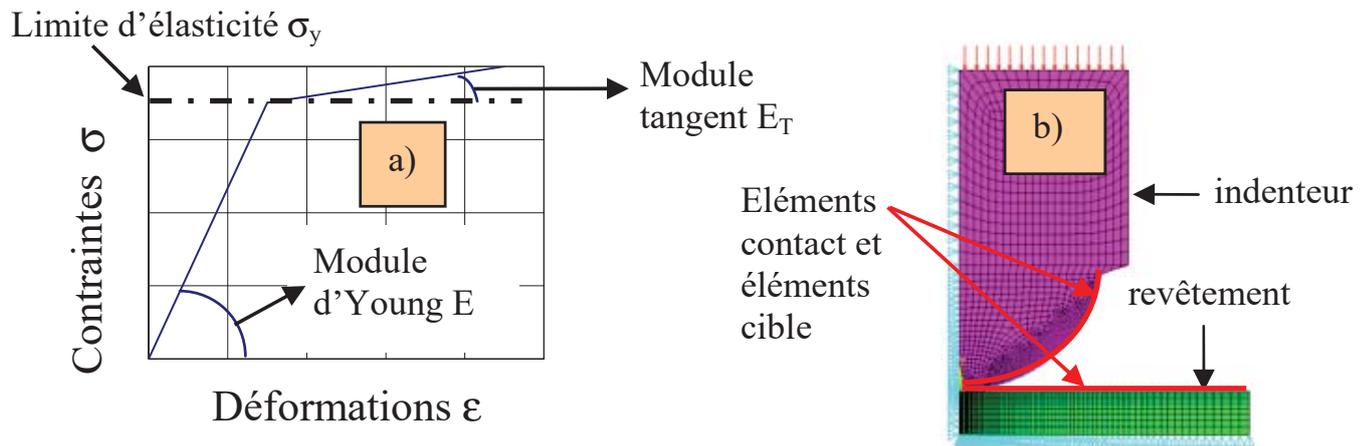
**Figure 1.** a) micrographie d'une section de revêtement abrasable (CoNiCrAlY - BN) – b) Ellipses équivalentes avec ImageJ – c) Maillage des ellipses avec OOF

### 3. Identification des paramètres de plasticité

L'identification des paramètres plastiques du revêtement (limite d'élasticité  $\sigma_y$  et module tangent  $E_T$ , fig. 3a) a été réalisée en minimisant l'écart entre les duretés mesurées et les duretés calculées par éléments finis. Pour mesurer les duretés, le test HR15Y a été utilisé comme référence car il est largement employé par les fabricants pour tester la qualité des revêtements abrasables obtenus par projection thermique (ASTM International, 2005). La mesure s'effectue avec une bille en acier de 12.70 mm de diamètre et un chargement en trois étapes (fig. 2). Un modèle élément fini bidimensionnel de ce test a été développé à l'aide du code de calcul ANSYS (fig. 3b). Le maillage a été généré avec des éléments axisymétriques à 4 nœuds. Des éléments cible et contact sont utilisés pour modéliser le contact entre le revêtement et l'indenteur. On suppose le contact sans frottement puisqu'il a été démontré que l'effet produit par le frottement sur la courbe d'indentation en fonction du chargement est négligeable (Lee *et al.*, 2005).



**Figure 2.** Test de dureté HR15Y

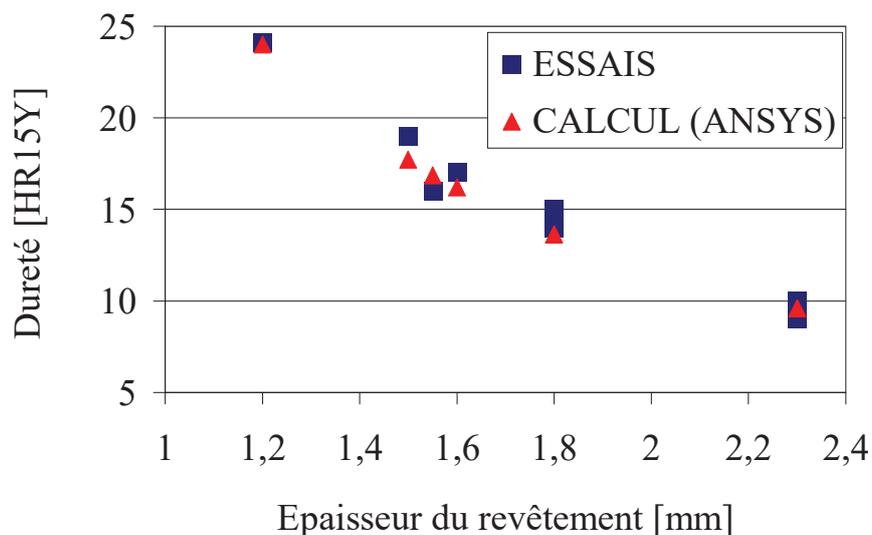


**Figure 3.** a) Loi élasto-plastique bilinéaire – b) Modèle éléments finis du test de dureté HR15Y

Pour mettre en œuvre l'identification inverse de  $\sigma_y$  et  $E_T$ , la plus grande et la plus petite épaisseur utilisées aux essais ont été considérées (1.2 et 2.3 mm, fig.4). Les duretés mesurées et calculées sont stockées dans deux vecteurs  $\mathbf{H}^m$  et  $\mathbf{H}^c$ . La fonction objectif  $D$  est l'écart relatif en norme entre les duretés mesurées et calculées. Le problème d'optimisation se formule alors de la manière suivante :

$$\text{Min}_{\sigma_y, E_T} [D] ; D = 100 \times \frac{\|\mathbf{H}^c - \mathbf{H}^m\|}{\|\mathbf{H}^m\|} ; \mathbf{H}^m = \begin{Bmatrix} 24.1 \\ 10 \end{Bmatrix} ; \mathbf{H}^c = \begin{Bmatrix} H_{1.2}^c \\ H_{2.3}^c \end{Bmatrix}$$

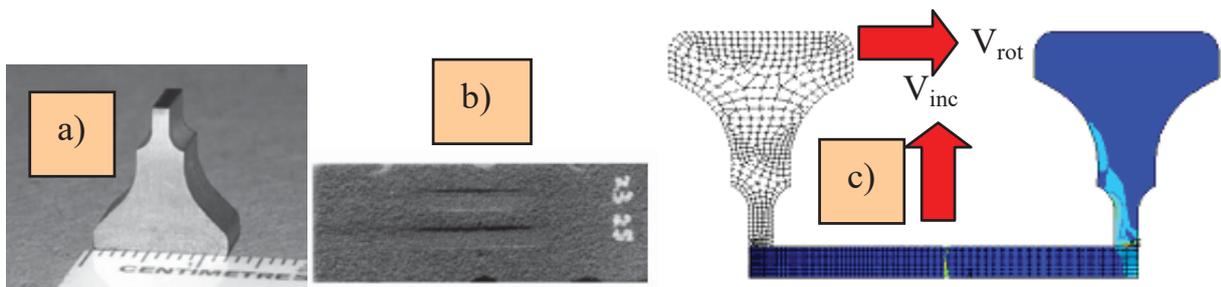
Les résultats obtenus sont cohérents comme le montre la comparaison entre les duretés mesurées et calculées pour un revêtement de type Durabrade 2673 (fig. 4).



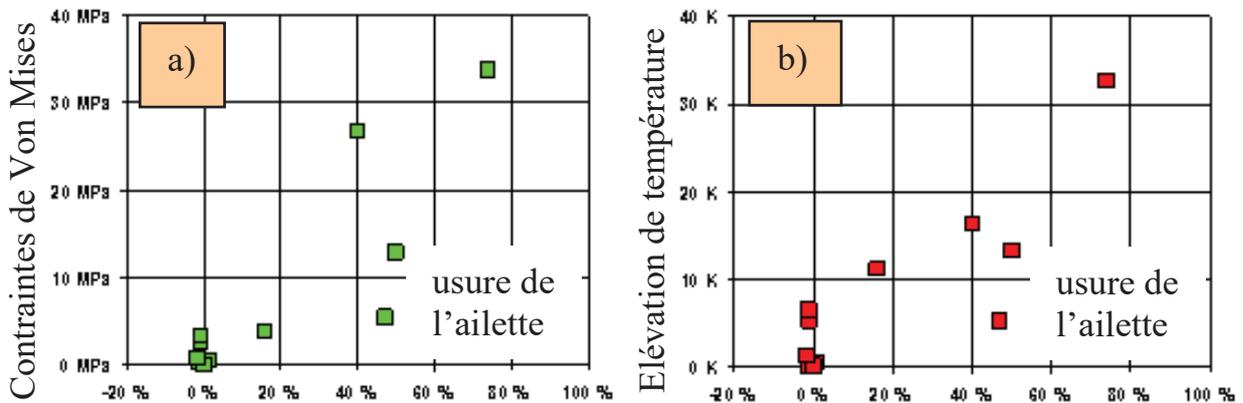
**Figure 4.** Comparaison essais-calculs de la dureté en fonction de l'épaisseur

#### 4. Modélisation du contact ailette-revêtement

Les phénomènes de contact dans un moteur d'avion sont reproduits aux essais à l'aide d'une ailette et d'un échantillon de revêtement (fig. 5a et 5b). L'installation est équipée de deux systèmes de guidage indépendants, l'un pour entraîner l'ailette avec une vitesse de rotation  $V_{rot}$  et l'autre pour déplacer verticalement le revêtement vers le rotor avec une vitesse d'incursion  $V_{inc}$ . Un modèle éléments finis représentant ces conditions a été réalisé avec ANSYS (fig. 5c). Le modèle comporte une loi matérielle élasto-plastique, une prise en compte du contact dynamique entre l'ailette et le revêtement et un couplage entre la mécanique et la thermique. Les paramètres matériaux sont déterminés grâce aux approches présentées dans les deux paragraphes précédents. Des calculs éléments finis impliquant plusieurs revêtements, plusieurs géométries d'ailette et plusieurs conditions cinématiques ont été réalisées. La figure 6 montre la corrélation entre ces calculs et l'usure de l'ailette mesurée. On observe que les usures maximum sont associées aux contraintes et aux températures les plus élevées. Bien que ce résultat ait été attendu, il permet de montrer la cohérence du modèle éléments finis.



**Figure 5.** Contact ailette-revêtement – a) Ailette ; b) Trace du passage de l'ailette sur le revêtement ; c) Modèle éléments finis



**Figure 6.** Résultat des calculs en fonction de l'usure mesurée de l'ailette – a) Contraintes ; b) Températures

## 5. Conclusions et perspectives

Trois modèles éléments finis ont été développés pour simuler le comportement des revêtements abrasables utilisés dans l'industrie aéronautique. Le premier utilise une approche multi-échelle permettant de déterminer les propriétés élastiques du revêtement. Le second modèle permet de déterminer les propriétés plastiques à l'aide d'une identification inverse basée sur le test de dureté HR15Y. Le troisième modèle représente le contact entre l'ailette et le revêtement pour simuler les phénomènes se produisant au cours d'un essai d'abrasabilité. Des comparaisons entre les duretés mesurées et calculées ont permis de valider le modèle d'identification inverse des paramètres plastiques. La comparaison entre l'usure mesurée des ailettes d'une part et les niveaux de contraintes et de températures relevées numériquement d'autre part a montré la cohérence du modèle éléments finis représentant le contact entre l'ailette et le revêtement.

Ce travail de recherche a été réalisé de mai 2002 à mai 2006, dans le cadre du projet européen SEALCOAT (Abradable Seal Coatings and Claddings for Compressor Applications). Aujourd'hui, le LERMPS est impliqué dans le nouveau projet Européen NEWAC (New Aeroengine Concepts) qui inclut également une approche théorique du comportement des matériaux abrasables. Ce projet, d'une durée de 4 ans, a démarré le 1<sup>er</sup> mai 2006.

## 6. Bibliographie

ANSYS HTML Online Documentation, 2004, Release 8.1.

ASTM International, « Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials », E18-05e1, 2005.

Bouzakis K.D., Michailidis N., Erkens G., « Thin hard coatings stress-strain curve determination through a FEM supported evaluation of nanoindentation test results », *Surface and Coatings Technology*, 142-144, 2001, p. 102-109.

Faraoun H.I., Seichepine J.L., Coddet C., Aourag H., Zwick J., Hopkins N., Sporer D., Hertter M., « Modelling route for abradable coatings », *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, Issues 22-23, 2006, p. 6578-6582.

ImageJ software documentation, National Institutes of Health (NIH), (<http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/>).

Lee H., Lee J.H., Pharr G.M., « A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, 2005, p. 2037-2069.

OO: Object Oriented Finite Element, Analysis of Real Material Microstructures, National Institute of Standards and Technology (NIST), (<http://www.ctcms.nist.gov/oof/>).

Schmid R.K., Gharispor F., Dorfman M., Wei X., « An Overview of Compressor Abradables », *International Thermal Spray Conference 2000*, Montréal, p. 1087-1093.