



HAL
open science

Modélisation simplifiée de l'usure dans les liaisons à contact conforme – Application aux aubes à calages variables

Vivien Fouquet, Pierre-Alain Guidault, François Louf, Pierre-Alain Boucard,
Jean-Hilaire Lexilus, Amakoe Ahyee, Nathalie Serres

► **To cite this version:**

Vivien Fouquet, Pierre-Alain Guidault, François Louf, Pierre-Alain Boucard, Jean-Hilaire Lexilus, et al.. Modélisation simplifiée de l'usure dans les liaisons à contact conforme – Application aux aubes à calages variables. 26ème Congrès Français de Mécanique 2025 (CFM 2025), Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3 - UMR CNRS 7239), Aug 2025, Metz, France. <hal-05220984>

HAL Id: hal-05220984

<https://hal.science/hal-05220984v1>

Submitted on 24 Aug 2025

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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Modélisation simplifiée de l'usure dans les liaisons à contact conforme

—

Application aux aubes à calages variables

V. FOUQUET^{a,b}, P.-A. GUIDAULT^a, F. LOUF^a, P.-A. BOUCARD^a,
J.-H. LEXILUS^b, A. AHYEE^b, N. SERRES^b

a. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS,
LMPS - Laboratoire de Mécanique de Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France
{vivien.fouquet, pierre-alain.guidault, francois.louf, pierre-alain.boucard}@ens-paris-saclay.fr
b. Safran Group, Safran Aircraft Engines, site de Villaroche, 77550, Moissy-Cramayel, France
{vivien.fouquet, jean-hilaire.lexilus, amakoe.ahyee, nathalie.serres}@safrangroup.com

Résumé :

La maîtrise des maintenances moteur est un enjeu primordial pour les compagnies de transport aérien. Pour éviter une immobilisation des appareils trop longue et coûteuse, il est stratégique de pouvoir prévoir les cycles de maintenance, et donc l'usure des systèmes. Dans ce contexte, on s'intéresse plus précisément aux systèmes VSV (Variable Stator Vane, ou aubes à calages variables) qui jouent un rôle déterminant dans l'efficacité des compresseurs haute pression. Ces systèmes intègrent plusieurs composants critiques, dont les douilles. Le guidage d'une aube par rapport au stator est réalisé par deux douilles avec collerette et est sollicité radialement et axialement par des efforts induits par le flux d'air sur l'aube. Ce chargement, couplé aux mouvements du système génère une usure localisée des douilles, sur les zones de contact cylindriques comme sur les zones planes. La maîtrise de ces phénomènes d'usure est essentielle pour garantir la fiabilité et l'efficacité des moteurs de nouvelle génération. L'objectif de ce travail est de réaliser un outil de prédiction rapide et fiable de l'usure de ces composants sur un grand nombre de cycles de vol.

Abstract :

Mastering engine maintenance is a key issue for airline companies. To avoid aircraft being grounded for extended and costly periods, it is strategically important to anticipate maintenance cycles, and therefore the wear of systems. In this context, we focus specifically on VSV (Variable Stator Vane) systems, which play a critical role in the efficiency of high-pressure compressors. These systems include several critical components, among which the bushings are particularly important. The guidance of a vane relative to the stator is achieved using two flanged bushings, which are subjected to both radial and axial loads due to the airflow forces acting on the vane. This loading, combined with the movements of the system, leads

to localized wear on the bushings, affecting both cylindrical and flat contact surfaces. Understanding and controlling these wear phenomena is therefore essential to ensure the reliability and efficiency of next-generation engines. The objective of this work is to develop a fast and reliable tool for predicting the wear of these components over a large number of flight cycles.

Mots clefs : usure, prédimensionnement, VSV, douille, méthodes numériques

1 Introduction

L'usure des éléments de guidage, comme les douilles dans un turboréacteur est l'une des causes de limitation de leur durée de vie. L'enjeu de ce travail est de disposer d'un outil permettant de prédire l'usure des douilles pour garantir la durée de vie et anticiper les maintenances stratégiques. Cet outil devant être capable de simuler rapidement des milliers de cycles de vol standard (décollage/croisière/atterrissage), il doit s'appuyer sur des modèles simplifiés. Le cadre d'application est le système VSV (*Variable Stator Vanes* [1]) situé dans le compresseur haute pression, qui permet de redresser le flux d'air. Ce dispositif permet d'assurer une meilleure efficacité générale du compresseur et de limiter les risques de pompage. Ce système intègre des douilles qui réalisent une liaison pivot entre l'aube du stator et le bâti moteur (Figure 1).

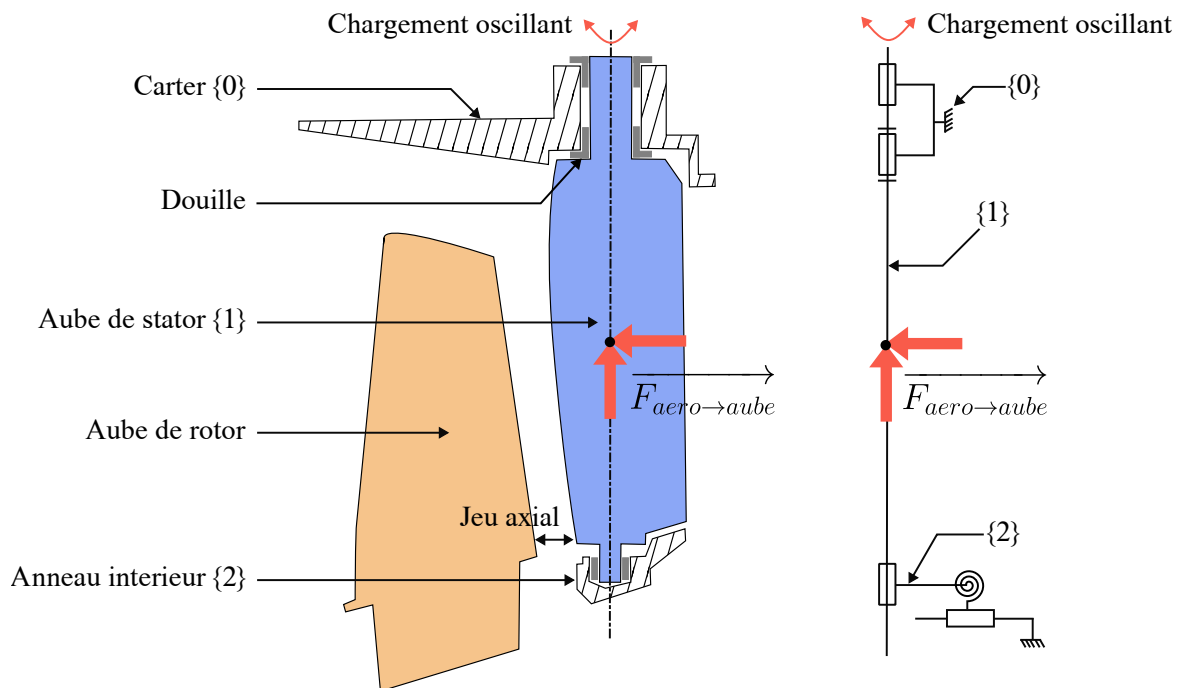


FIGURE 1 – Exemple de configuration de mécanisme VSV, avec deux douilles supérieures possédant deux collerettes et une douille inférieure dans un anneau libre en translation. La modélisation cinématique associée est celle de deux liaisons pivots glissantes et d'une liaison pivot. L'action de l'anneau (non étudiée ici) est modélisée par une liaison glissière avec une raideur en torsion.

Les aubes de calages sont soumises durant les cycles de vol à des efforts aérodynamiques qui conduisent à des oscillations de faibles amplitudes de celles-ci provoquant ainsi des usures localisées sur les surfaces de guidage cylindriques et planes des douilles. L'usure de ces douilles peut accentuer le déversement de l'aube de stator et entraîner des contacts non prévus avec d'autres pièces : le plus critique étant le

contact rotor-stator (annulation du jeu axial représenté en Figure 1) pouvant amener à un feu titane et à des accidents de pompage.

La résolution des problèmes d'usure présente de nombreuses difficultés. Ce sont des problèmes de contact avec une configuration géométrique et un chargement évoluant au cours d'un temps long. En se basant sur des approches 2D, pour simplifier le problème [2] [3], il est possible d'obtenir des résultats compatibles avec des temps de développement de bureaux d'études mais qui s'appuient sur des hypothèses restrictives en termes de types de chargement pris en compte. Les formulations tridimensionnelles sont plus intéressantes pour leur description plus précise de la géométrie, mais que ce soit les modèles éléments finis [4] ou des modèles s'appuyant sur de nombreux paramètres (rugosité par exemple) [5], elles conduisent à des temps de calcul trop importants en phase de pré-dimensionnement pour une utilisation en bureaux d'étude. Fort de ces constats, afin de pouvoir réaliser des simulations de milliers heures de vol en quelques minutes, nous proposons une formulation basée sur un modèle simplifié tridimensionnel avec une hypothèse de petits déplacements, et une usure décrite par la loi d'Archard [6].

2 Formulation tridimensionnelle du problème d'usure dans un arrêt axial

L'approche adoptée pour résoudre ce problème est celle d'une approche globale-locale dans le cadre des petits déplacements [7]. Cette approche déjà adaptée par [8] pour l'usure des liaisons cylindriques est étendue ici au cas des liaisons planes. En effet, certaines douilles possèdent des collerettes permettant de réaliser un arrêt axial du guidage en rotation (voir Figure 1 et Figure 2). Le contact de la collerette avec l'épaule de l'arbre est considéré comme plan.

2.1 Calcul de l'interpénétration dans une couronne

L'interpénétration d'un solide (a) représentant l'aube dans un autre (c) représentant la collerette est calculée dans le cadre des petits déplacements (voir Figure 2). Le mouvement relatif de l'aube par rapport à la collerette est représenté par un torseur des petits déplacements. On cherche le déplacement normal à la surface de contact. Les petites rotations et petits déplacements non compatibles avec une liaison appui plan s'expriment sous la forme du torseur des petits déplacements suivant :

$$\{\mathcal{D}_{a/c}(t)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\alpha}_{a/c}(t) = \alpha_x \vec{x}_0 + \alpha_y \vec{y}_0 \\ \vec{d}_{a/c}(C_0, t) = d_z \vec{z}_0 \end{array} \right\}_{(C_0, \mathcal{R}_0)} \quad (1)$$

Le déplacement relatif peut être calculé en tout point M de la surface plane :

$$\vec{d}_{a/c}(M, t) = \vec{d}_{a/c}(C_0, t) + \overrightarrow{MC_0} \wedge \vec{\alpha}_{a/c}(t) \quad (2)$$

Ce champ de déplacement relatif peut être projeté sur la normale \vec{z}_0 et comparé au champ de jeu $g_0(M, t)$ à l'aide du paramétrage en Figure 2, pour obtenir l'interpénétration entre les solides (a) et (c) :

$$\left\langle \vec{d}_{a/c}(M, t) \cdot \vec{z}_0 - g_0(M, t) \right\rangle_+ = \left\langle d_z + r \cos(\theta - \varphi) \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} - g_0(M, t) \right\rangle_+ \quad (3)$$

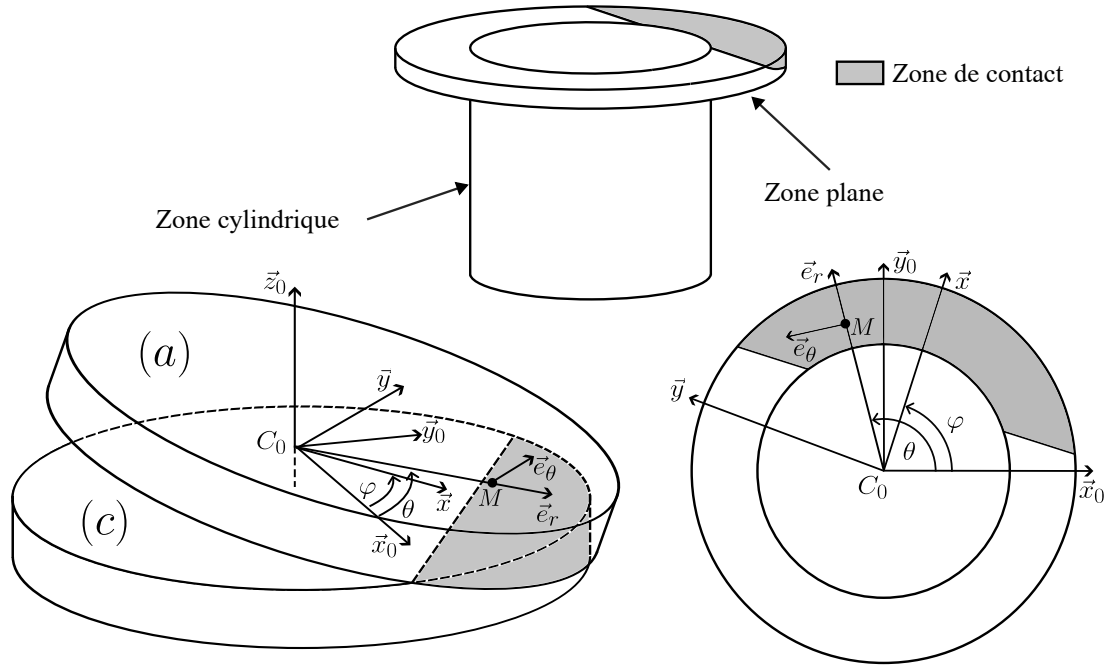


FIGURE 2 – Paramétrage du déplacement de la section de centre C_0 .

où $\langle \bullet \rangle_+$ désigne la partie positive de \bullet et où la position du point M est donnée dans un repère cylindrique $(C_0, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z}_0)$ où $\theta = (\vec{x}_0, \vec{e}_r) = (\vec{y}_0, \vec{e}_\theta)$ et $\overline{C_0M} = r\vec{e}_r$. L'angle φ est l'angle permettant de repérer la direction principale de l'interpénétration par rapport à $R_0(C_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, il est défini comme suit :

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{\alpha_x}{\alpha_y}\right)$$

2.2 Modélisation de l'usure

D'après les observations de [9] s'appuyant sur la loi d'Archard, le volume usé est proportionnel à l'énergie dissipée par frottement dans le mouvement relatif d'un solide sur un autre. On peut écrire le volume usé par unité de surface comme $V = u dS$ avec u la profondeur d'usure et dS un élément de surface infinitésimal. la profondeur d'usure est alors proportionnelle à l'énergie dissipée spécifique :

$$u(M, t) = \int_t \gamma \mu p(M, t) |v_g(M, t)| dt \quad (4)$$

où γ est un coefficient de proportionnalité, μ le coefficient de frottement utilisé par le modèle de Coulomb, $p(M, t)$ la pression de contact locale et $|v_g(t)|$ la valeur absolue de la vitesse de glissement.

Le champ g_0 précédemment introduit dans (3) résulte du champ de jeu d'assemblage initial et du champ d'usure courant :

$$g_0(M, t) = j + u(M, t) \geq 0 \quad (5)$$

L'interpénétration (3) entre les deux solides n'étant physiquement pas possible, on cherche le champ d'usure $u(M, t)$ qui l'annule :

$$u(M, t) = \vec{d}_{a/c}(M, t) \cdot \vec{z}_0 - j \quad (6)$$

En dérivant cette relation par rapport au temps et à l'aide de (4), on obtient :

$$\frac{\partial u(M, t)}{\partial t} = \frac{\partial \left(\vec{d}_{a/c}(M, t) \cdot \vec{z}_0 - j \right)}{\partial t} = \gamma \mu p(M, t) |v_g(M, t)| \quad (7)$$

Cela montre que la pression p évolue en fonction de la variation de saut de déplacement au cours du temps.

Cette loi d'évolution de l'usure est intégrée par un schéma d'Euler implicite :

$$\frac{\partial u(M, t)}{\partial t} \approx \frac{u(M, t) - u(M, t - \Delta t)}{\Delta t} = \gamma \mu p(M, t) |v_g(M, t)| \quad (8)$$

L'incrément d'usure est défini par : $\Delta u = u(M, t) - u(M, t - \Delta t)$. Cela permet de relier l'incrément d'usure à l'interpénétration et à la pression. L'incrément d'usure étant toujours positif au contact, on utilise la partie positive :

$$\begin{cases} \Delta u(M, t) = \gamma \mu p(M, t) |v_g(M, t)| \Delta t \\ \Delta u(M, t) = \left\langle \vec{d}_{a/c}(M, t) \cdot \vec{z}_0 - j - u(M, t - \Delta t) \right\rangle_+ \end{cases} \quad (9)$$

Finalement, on peut écrire la relation de comportement locale :

$$\begin{aligned} p(M, t) &= \frac{1}{\gamma \mu |v_g(M, t)| \Delta t} \left\langle \vec{d}_{a/c}(M, t) \cdot \vec{z}_0 - j - u(M, t - \Delta t) \right\rangle_+ \\ &= K(M, t) \Delta u(M, t) \end{aligned} \quad (10)$$

Au bilan, on en déduit que la pression et donc l'incrément d'usure sont reliées aux éléments de réduction du torseur des petits déplacements (1) via (10).

2.3 Torseur des efforts transmissibles par la liaison appui-plan

Le torseur des actions mécaniques de contact de la collerette sur l'arbre au centre de la liaison C_0 est alors défini comme suit :

$$\{\mathcal{T}(c \rightarrow a)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{c \rightarrow a}(t) = \int_S p(M, t) \vec{z}_0(M, t) + \tau(M, t) \vec{e}_\theta \, dS \\ \vec{M}_{c \rightarrow a}(C_0, t) = \int_S \overrightarrow{C_0 M} \wedge (p(M, t) \vec{z}_0(M, t) + \tau(M, t) \vec{e}_\theta) \, dS \end{array} \right\}_{(C_0, R_0)} \quad (11)$$

Pour déterminer ce torseur, il est nécessaire de connaître la distribution de la pression normale de contact $p(M, t)$ ainsi que la composante tangentielle $\tau(M, t) \vec{e}_\theta(M, t)$. Pour cette dernière, on utilise généralement le modèle de Coulomb.

En utilisant la loi de comportement locale au contact $p(M, t) = K(M, t) \Delta u(M, t)$ défini en (10) et en introduisant la grandeur ε symbolisant le signe de la vitesse de glissement qui s'oppose à l'effort

tangentiel, on peut écrire :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{c \rightarrow a}(t) &= \int_S K(M, t) \Delta u(t) (\vec{z}_0 + \varepsilon \mu \vec{e}_{\theta}) dS \\ \vec{M}_{c \rightarrow a}(C_0, t) &= \int_S K(M, t) \Delta u(t) \overline{C_0 M} \wedge (\vec{z}_0 + \varepsilon \mu \vec{e}_{\theta}) dS\end{aligned}\tag{12}$$

L'intégration numérique de ces quantités est réalisée en distribuant les points d'intégration radialement et circonférentiellement de manière régulière sur l'ensemble de la collerette. Les points ont ensuite un poids linéairement dépendant du rayon pour respecter la contribution de chaque surface infinitésimale.

2.4 Problème inverse

Les données connues du problème sont des données de type effort. Le problème inverse consiste ainsi à trouver le torseur des petits déplacements permettant de vérifier l'équilibre entre les actions mécaniques extérieures et les actions transmissibles par la liaison. On note le vecteur contenant les composantes de translations et de rotations de l'aube par rapport à la collerette : $\{q\} = \{d_z, \alpha_x, \alpha_y\}$.

$$\{\mathcal{T}(c \rightarrow a)\}(\{q\}) = -\{\mathcal{T}(ext \rightarrow a)\}\tag{13}$$

Le système d'équations d'équilibre étant non linéaire, on utilise une méthode numérique de Newton-Raphson pour le résoudre. Il est nécessaire de régulariser le problème pour éviter les problèmes de modes rigides associés aux petits mouvements possibles à l'initialisation dû au fait qu'un jeu j initial (positif) est introduit. La régularisation est réalisée en introduisant des ressorts de faibles raideurs assurant des forces de rappel minimales associées aux composantes d_z , α_x et α_y du torseur des petits déplacements. Le critère d'arrêt de l'algorithme prend en référence le résidu normé par les efforts extérieurs [8].

Dans le but d'accélérer les calculs, une attention particulière est donnée à l'obtention du jacobien. En effet, il est possible de trouver une approximation analytique du jacobien en négligeant l'usure et en considérant une vitesse de glissement uniforme dans le cas d'une surface cylindrique [8]. La même méthode est appliquée dans celui d'une surface plane (non détaillé ici). En complément, un jacobien calculé numériquement permet d'aider à la convergence des itérations dans le cas où le chargement est réorienté.

3 Application à un système VSV

Le système VSV est composé de plusieurs douilles dont certaines possèdent une collerette. Une configuration retenue est présentée en Figure 1, celle-ci possède deux douilles supérieures avec collerettes et une douille inférieure dans un anneau libre de translation. La modélisation proposée du problème d'usure se concentre sur l'ensemble des douilles supérieures qui subissent le plus l'usure et contribuent le plus à lutter contre le déversement de l'aube, l'anneau étant flottant. L'usure ne peut intervenir que lors d'un mouvement relatif entre deux pièces. Les mouvements considérés ici sont ceux de l'aube par rapport au carter. Le cas d'étude retenu sera un montage composé de deux douilles, dont une possédant une collerette, modélisé en Figure 1. Le chargement est composé d'un effort radial représentant l'effort aérodynamique exercé sur l'aube et d'un effort axial représentant la pression de veine créée par le flux d'air parcourant le compresseur haute pression (voir Figure 1).

L'assemblage de ces liaisons élémentaires avec usure est réalisé en assemblant la contribution à l'opérateur tangent et à l'effort intérieur de chaque liaison pour obtenir le système à résoudre. Cependant, pour obtenir leurs contributions, le nombre de points d'intégration total du système complet augmente avec le nombre de liaisons et avec lui le temps de calcul. L'utilisation d'un opérateur tangent sans usure analytique permet de s'affranchir d'une partie du problème mais le résidu d'équilibre de (13) ne peut s'obtenir que de manière numérique car il doit intégrer l'évolution non uniforme de l'usure intervenant dans le champ de pression (10).

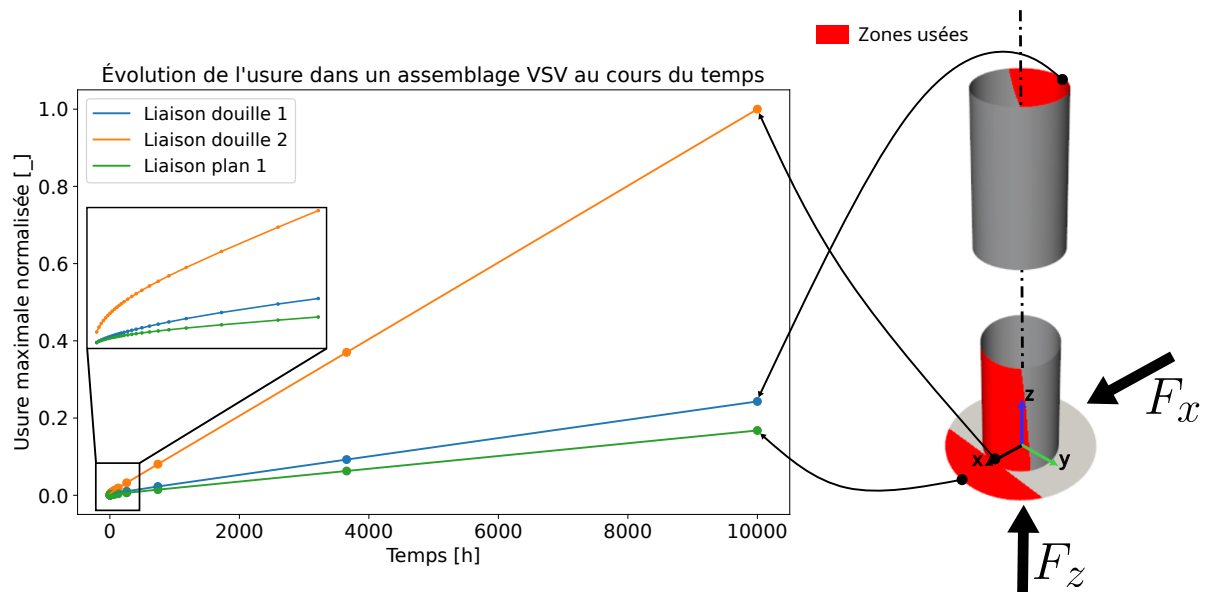


FIGURE 3 – Évolutions de l'usure maximale au cours du temps (10000h) au niveau de chaque zone de contact cylindrique et plane. Zoom sur la période temporelle où l'évolution de l'usure maximale est non-linéaire.

On observe sur la Figure 3 que l'usure est répartie sur 3 zones distinctes. L'usure maximale la plus importante est située sur la zone de contact cylindrique de la douille basse, c'est la douille qui reprend le plus d'effort dans le système. La collerette semble également s'user plus faiblement que la douille basse car sa contribution à la reprise du moment est très faible.

	Jacobien analytique	Jacobien numérique
Sans pas adaptatif	767.824 s	2020.506 s
Avec pas adaptatif	3.786 s	17.205 s

TABLE 1 – Temps CPU obtenus avec les différentes stratégies développées pour simuler 10000h d'usure sur une configuration type de VSV (script de calcul réalisé en python).

Un algorithme de calcul de pas adaptatif Δt est ajouté pour accélérer la résolution. En effet, comme visible dans la Figure 3, l'usure est non-linéaire au début de la simulation mais devient linéaire assez rapidement. L'évolution non-linéaire contraint le choix de pas de temps Δt à être assez fin.

Dans la Table 1, on peut constater que l'utilisation d'un jacobien analytique sans usure permet de diviser le temps de calcul entre 4.5 (respectivement 2.5) avec (respectivement sans) pas adaptatif. L'ajout de l'algorithme de pas adaptatif permet de réduire considérablement les temps de calcul par un facteur 100. Ce tableau montre qu'il est possible de simuler un cycle d'usure de 10000h en seulement quelques secondes permettant ainsi aux bureaux d'études d'itérer plus rapidement sur leur conception.

4 Conclusion

Les travaux présentent une méthodologie générale permettant de construire des liaisons élémentaires avec usure : cette démarche est mise en oeuvre dans le cas d'une liaison plane, le cas de liaisons cylindriques ayant été traité dans [8]. L'assemblage de liaisons est simple, permettant de simuler aisément des assemblages technologiques réalistes. Cependant le nombre de points d'intégration augmente avec le nombre de liaisons considérées. Aussi, pour limiter l'augmentation du coût de calcul, un soin particulier a été apporté au calcul analytique de l'opérateur tangent approché. L'adaptation du pas de calcul permet aussi de réduire considérablement le temps de simulation en permettant de réaliser moins de calculs lorsque l'évolution de l'usure est linéaire. Cette rapidité sera à terme utilisée pour réaliser des études de sensibilités aux défauts de positionnement et d'orientation des liaisons dans un assemblage complexe. Pour réaliser ces études, l'implémentation de ce modèle de liaison avec usure sous la forme d'un élément utilisateur dans un code commercial éléments finis est envisagé.

Références

- [1] D. Kato, G. Pallot, A. Sugihara, M. Aotsuka, Research and development of a high performance axial compressor, *IHI Engineering Review*, 2014, 47(1), 49-56.
- [2] A. Zhu, S. He, J. Zhao, W. Luo, A nonlinear contact pressure distribution model for wear calculation of planar revolute joint with clearance, *Nonlinear Dynamics*, July 21, 2010, 88, 315-328.
- [3] S. Mukras, N. H. Kim, N. A. Mauntler, T. Schmitz, W. G. Sawyer, Comparison Between Elastic Foundation and Contact Force Models in Wear Analysis of Planar Multibody System, *ASME. J. Tribol*, July 2010, 132(3), 031-604.
- [4] A. A. Schmidt, T. Schmidt, O. Grabherr, H. D. Barte, Transient wear simulation based on three-dimensional finite element analysis for a dry running tilted shaft-bushing bearing, *Wear*, 2018, 408, 171-179.
- [5] S. Cheng, X. Meng, R. Li, R. Liu, R. Zhang, A rough surface damping contact model and its application in spatial variable stator vane mechanism with dry friction joint, 2021.
- [6] J. Archard, Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of applied physics*, 1953, 24(8), 981-988.
- [7] M. Aublin, R. Boncompain, M. Boulaton, *Systèmes mécaniques : théorie et dimensionnement*, Dunod, 2005.
- [8] M. Harnafi, P. A. Guidault, P. A. Boucard, C. Paleczny, A simplified model for the wear prediction of plain bearings in the variable stator vane system, *Tribology International*, 2024, 196, 109667.
- [9] S. Fouvry, P. Kapsa, L. Vincent, Quantification of fretting damage, *Wear*, 1996, 200(1-2), 186-205.