

Modélisation thermomécanique du contact aube-abradable dans les turboréacteurs.

Q. AGRAPART^{1,3}, J.F. BRUNEL¹, Y. DESPLANQUES², P. DUFRENOY¹,
A. MILLECAMPS³

a. Univ. Lille, FRE 3723 - LML - Laboratoire de Mécanique de Lille, F-59000 Lille, France

b. Centrale Lille, FRE 3723 - LML - Laboratoire de Mécanique de Lille, F-59000 Lille, France

c. Safran Aircraft Engines, Villaroche, 77550 Moissy-Cramayel, France

Résumé :

Un modèle thermomécanique en éléments finis est proposé afin d'étudier l'influence des dilatations thermiques sur la dynamique du contact rotor-stator. L'application est l'étude des conditions de divergence pouvant être observées dans les turboréacteurs. Les approches thermiques et thermomécaniques sont découplées pour s'assurer de maîtriser précisément le partage de flux après la résolution du contact dynamique. La participation des phénomènes thermomécaniques est mise en évidence avec la simulation d'essais d'interaction types. L'objectif est d'étudier les échelles spatiales et temporelles des phénomènes thermomécaniques pour optimiser le cycle de mise à jour des dilatations thermiques dans le contact dynamique.

Mots clés : Revêtement abradable, interaction aube-carter, modélisation thermomécanique, bilan énergétique, partage de flux, dilatations thermiques

1 Introduction

Pour répondre aux challenges des motoristes aéronautiques concernant l'optimisation des performances des turboréacteurs, il est nécessaire de s'intéresser à la maîtrise des jeux entre rotor et stator. Une solution technologique couramment employée consiste à déposer un revêtement, dit abradable, par projection thermique sur les parois internes du carter. L'objectif est de réduire le jeu à l'extrémité des aubes tournantes tout en garantissant la fiabilité de la turbomachine en cas de contact. Le matériau utilisé offre des propriétés d'abradabilité, jouant le rôle de fusible afin de préserver les étages mobiles du moteur lors d'éventuelles interactions. Cependant, certaines conditions de fonctionnement défavorables peuvent conduire à l'endommagement des structures suite à des phénomènes vibratoires divergents résultants des interactions.

Des essais ambitieux de contact aube-carter ont été réalisés par Safran pour identifier les phénomènes mis en jeu dans des situations d'interaction préjudiciable. Une aube du stator légèrement en sur-longueur vient frotter sur le carter d'un étage de compresseur basse pression, proche de la configuration échelle

une, sous l'action de l'allongement centrifuge. Une analyse détaillée de ces essais est proposée par [1] et [2]. L'objectif est double avec l'établissement d'un scénario d'interaction et la mise en place de méthodes numériques de prédiction en situation de contact aube-carter recalées expérimentalement. Il est montré que des incidents majeurs peuvent intervenir du fait d'un couplage de phénomènes dynamiques et thermomécaniques, ayant conduit à une réponse vibratoire significative de l'aube, visible sur le graphique temps-fréquences Figure 1, et à une usure importante de l'abradable.

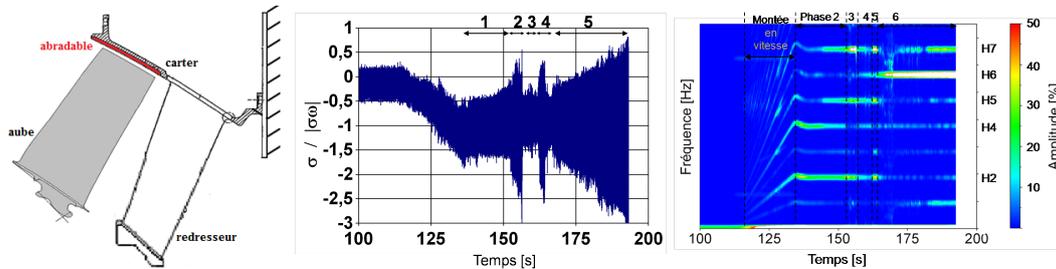


FIGURE 1 – Essai d'interaction échelle une : Réponse dynamique de l'aube en sur-longueur, et représentation temps-fréquences de son contenu vibratoire.

Cet essai présente un contenu harmonique riche pendant les premières phases vibratoires, mais au bout d'un certain temps, l'installation des phénomènes dynamiques conduit à la vibration forcée de l'aube sur un de ses mode dont la fréquence est une harmonique de la vitesse de rotation du rotor. L'amplitude vibratoire augmente pendant la phase 5 jusqu'à divergence et ruine de l'aube. L'usure du revêtement post-mortem témoigne bien du comportement dynamique de l'aube. On retrouve 6 lobes d'usure creusés au Bord de Fuite (BF) et qui correspondent au mouvement synchrone de flexion d'aube excitée sur sa première fréquence propre. Cette divergence vibratoire est a priori possible du fait de la participation de phénomènes tribologiques et thermomécaniques à l'origine d'échauffements (Figure 2). En effet, les phénomènes dynamiques sont couplés aux phénomènes thermomécaniques [1], les dilatations thermiques résultent directement des échauffements et peuvent modifier à la fois les géométries, mais aussi les mécanismes physiques au contact. L'objectif est de proposer des outils de modélisation numériques pour représenter les physiques thermiques et mécaniques mises en jeu. Il convient de construire une stratégie de modélisation pour appréhender les problèmes multi-échelles et multi-physiques de phénomènes qui évoluent sur quelques milliers de révolution du rotor. Ces travaux doivent notamment introduire le comportement thermomécanique dans l'étude des conditions de contact aube-abradable.

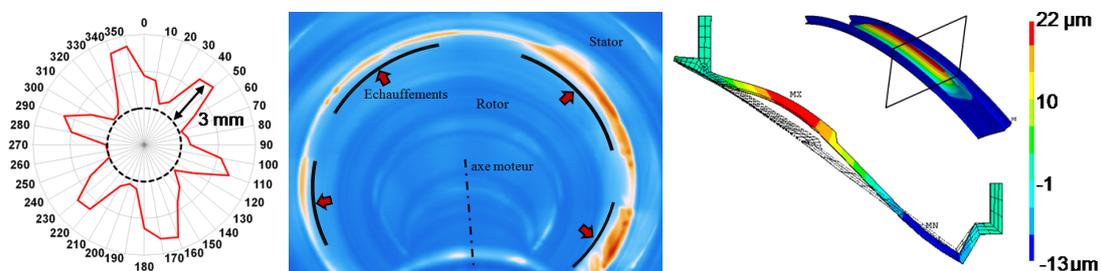


FIGURE 2 – Profil d'usure au bord de fuite, localisation des échauffements en imagerie infrarouge, résultats EF de dilatations thermomécaniques

2 Etude locale des interactions

La compréhension des phénomènes thermomécaniques suggère une approche énergétique locale de l'interaction [3],[4] pour quantifier notamment la part d'énergie générée qui est convertie en chaleur. Les premiers éléments de réponse ont été apportés avec la réalisation d'essais expérimentaux pour reproduire une configuration simplifiée d'interaction entre une aube en titane et un tambour rotatif recouvert d'abradable [5]. Des méthodes directes de recalage en flux permettent de remonter aux quantités de chaleur et de suivre la partition des flux entre les deux corps en interaction Figure 3. Différentes configurations d'interaction ont été étudiées pour prédire l'influence des paramètres procédés et matériaux qui pilotent la distribution de flux de chaleur et qui sont à considérer dans le cadre de simulations thermomécaniques. A la différence des précédentes études, l'intégralité de l'énergie mécanique d'interaction n'est pas convertie en chaleur. 10% de l'énergie totale de friction participent aux échauffements dans l'aube pour 80% dans l'abradable. Les 10% restants participent aux dissipations mécaniques ou thermiques et dépendent des paramètres d'incursion et de l'activation des mécanismes physiques aux contacts [6]. Les quantités d'énergie coté aube et coté abradable sont déterminées à partir des mesures thermiques par thermistances mises en place sur l'aube et par mesure thermographique sur la face latérale de la piste abradable respectivement. Le partage de flux pourra être ajusté en accord avec ses observations expérimentales.

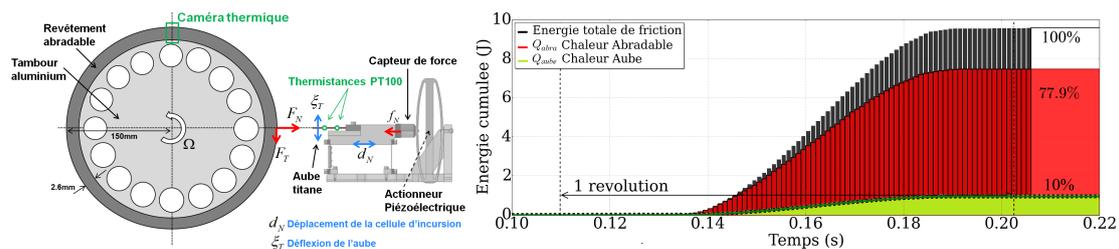


FIGURE 3 – Banc d'essai d'interaction simplifiée aube-abradable (ONERA), et distribution des quantités de chaleur estimées pour un essai d'incursion type.

3 Démarche numérique globale

La démarche numérique globale, schématisée Figure 4, doit intégrer la notion de couplage entre les grandeurs dynamiques et thermiques. Le modèle reprend les géométries d'aube et d'abradable du banc d'interaction simplifiée. L'objectif est de reproduire les observations expérimentales à partir de la réponse dynamique d'une aube en contact donnée sur une révolution du rotor. La résolution implicite du problème dynamique de l'interaction avec une gestion du contact basée sur une formulation de type Lagrangien augmenté permet de simuler la réponse vibratoire du système et la détermination des efforts au contact. Le tambour est entraîné en rotation, alors que le déplacement radial du pied d'aube est piloté pour simuler l'incursion expérimentale.

A l'issue de cette résolution, les flux thermiques coté aube et coté abradables sont déterminés via le partage proposée précédemment. Les résolutions thermiques puis thermiques permettent la détermination des dilatations thermiques, qui sont réintégrées dans les simulations dynamiques des tours suivant à travers la mise à jour des géométries.

Les mises à jour sont effectuées avec le déplacement des nœuds en périphérie du tambour et en pied d'aube pour traduire les déformations thermomécaniques et complexifier l'évolution de la consommation

de jeux à l'extrémité des aubes.

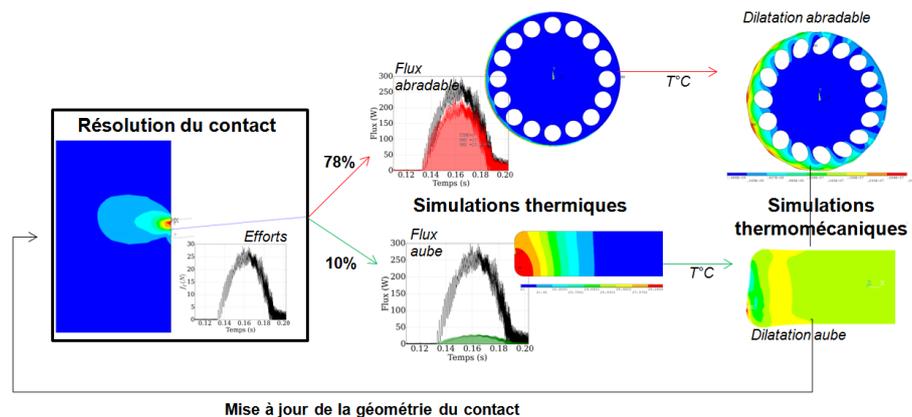


FIGURE 4 – Démarche numérique globale pour la modélisation thermomécanique du contact aube-abradable

Pour la simulation thermique coté tambour revêtu d'abrasable, un modèle thermique de flux mobile est réalisé par l'activation/désactivation d'une distribution de flux glissant step by step en périphérie du tambour. Le modèle est représenté en 2D et suppose une distribution uniforme des températures dans la direction axiale, cohérente avec les précautions prises au rodage des pistes. Une bande de flux parcourt la surface extérieure du revêtement sur une portion angulaire relative à la longueur de frottement d'environ 1mm estimée précédemment. Pour assurer la continuité de température sur la circonférence, il est nécessaire de choisir un pas de temps relativement faible $dt = 5e^{-5}\text{s}$. La distribution d'énergie peut, dans ces conditions, évoluer fidèlement suivant la dynamique de l'aube. Les propriétés thermiques choisies proviennent d'une campagne de caractérisation expérimentale. La convection est considérée sur les faces à l'air libre. La résolution du problème thermique côté aube est d'autant plus simple car la zone d'application du flux n'évolue pas au cours du temps.

4 Résultats

4.1 A l'échelle de la touche

Les essais proposés en configuration d'impact couvrent $2/3$ de la circonférence du tambour. La résolution du contact dynamique dans un premier temps, conduit à une estimation des efforts d'interaction réaliste par rapport aux mesures expérimentales Figure 5. Les élévations de températures instantanées sous le contact ou températures « flash » sont de l'ordre des 50°C coté abrasable au maximum d'incursion. Les échauffements localisés en surface d'abrasable vont conduire a posteriori à des déformations d'ensemble résultantes de la diffusion du gradient thermique dans le reste du carter. Les courbes de refroidissement montrent que la température en surface chute à hauteur de 95% de sa valeur maximale en une révolution, au profil des échauffements en sous-couche.

Le résultat Figure 6 des simulations thermomécaniques présente les déplacements radiaux en sortie d'incursion et au bout de 2s de refroidissement, un temps suffisamment long pour que les gradients thermiques diffusent dans la profondeur du tambour.

Il vient que les dilatations thermomécaniques ne sont pas nécessairement maximales sous le contact et leur influence à une échelle locale est négligeable. En revanche, l'installation du gradient thermique

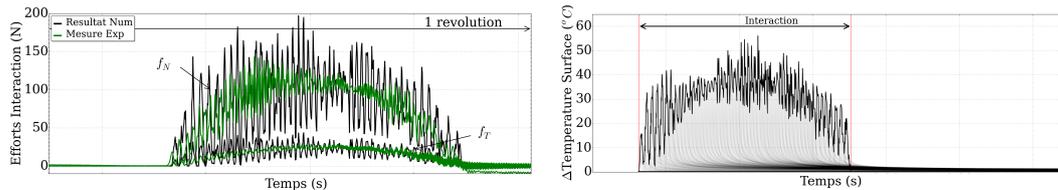


FIGURE 5 – Efforts normaux et tangentiels des simulations numériques (—) et des mesures expérimentales (—), estimation des variations de températures en surface d’abrasable et cinétiques de refroidissement

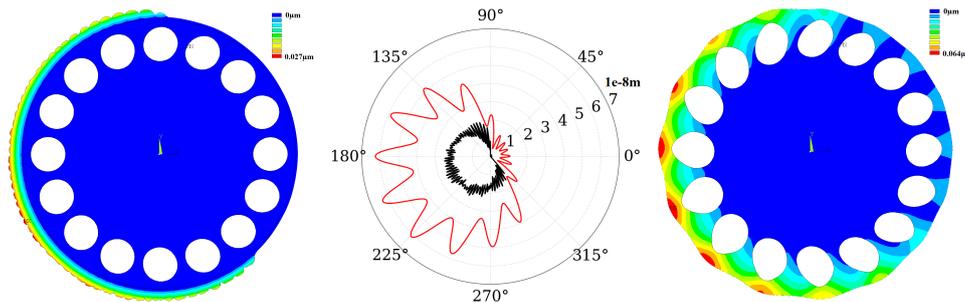


FIGURE 6 – Déplacements radiaux dus aux déformations thermomécaniques en sortie d’incursion (—) et après 2s de refroidissement (—)

en profondeur montre que le tambour se dilate dans sa globalité en fonction de sa géométrie et de ses conditions aux limites, pouvant devenir préjudiciable lors des cycles de contacts successifs. La présence des 16 perçages pour alléger le tambour modifie fortement l’allure de la déformée thermomécanique.

A la différence des grandeurs dynamiques, l’installation des phénomènes thermiques perdure dans le temps à travers les mécanismes de diffusion dans le volume. Les conséquences sur les dilatations à l’échelle d’une interaction semblent négligeables, conformément aux déplacements radiaux en périphérie du tambour $< 0.03\mu m$, au bout d’une révolution. Les effets lents des phénomènes thermomécaniques doivent être pris en compte pour des essais d’interaction plus longs sur plusieurs révolutions.

4.2 Contact cyclique

L’étude thermique sur un tour a un intérêt limité car la problématique est plus globale et liée au stockage d’énergie dans le revêtement abrasable et dans son carter. Avant de porter la méthodologie sur l’étude des essais d’interaction échelle 1 mettant en jeu les géométries réelles, il est envisagé un cas de touche cyclique pour mettre au point la méthode de recalage. On modélise une succession de touches identiques à chaque révolution, i.e. avec la même dynamique d’interaction pilotée en pied d’aube. L’objectif est d’étudier les échelles spatiales et temporelles des dilatations dans une configuration de contact répété, car ces dernières n’ont pas d’influence sur la dynamique d’interaction à l’échelle du tour. On cherche à identifier les conditions en nombre de cycles ou en quantité d’énergie qui sont nécessaires pour modifier de manière significative les géométries et donc la mise à jour des efforts de contact.

La Figure 7 présente les résultats des simulations thermomécaniques avec la représentation du déplacement radial (induit par les dilatations thermiques), et l’allongement de l’aube qui se dilate de plus en plus à chaque révolution. La localisation des dilatations thermiques en périphérie du tambour montre bien la problématique de déformation d’ensemble qui s’accroît à chaque tour, et qui affecte également les géométries loin de la zone contact (repérée par les traits verticaux). Deux cas d’étude sont proposés

avec (—) la mise à jour des conditions de contact à chaque révolution, et sans mise à jour des géométries (- -). Comme attendu, l'introduction des dilatations thermiques dans la mise à jour du contact est négligeable sur les premières révolutions.

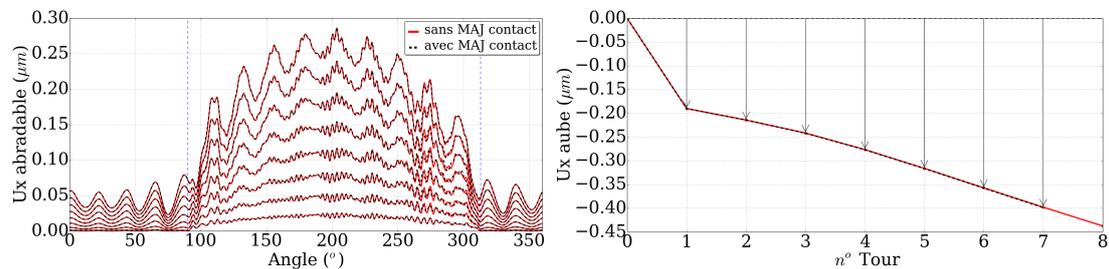


FIGURE 7 – Déplacements radiaux en surface d'abradable et en pied d'aube, avec et sans mise à jour des dilatations thermiques dans la résolution du contact.

Le calcul précédent est étendu à un nombre de révolutions plus important. Pour réduire le temps de simulations, le nombre de cycles thermiques avant la mise à jour du calcul dynamique et des efforts d'interaction est fixé à 50 tours. Après 200 révolutions, et les 200 cycles de chauffe correspondants, il est observé un déplacement radial maximale en périphérie du tambour d'environ $10\mu m$, et jusqu'à $2\mu m$ hors de la zone de contact. De même, les échauffements dans l'aube conduisent à des dilatations de l'ordre $2\mu m$ directement répercutées sur la fermeture du jeu. La Figure 8 laisse apparaître les modulations des efforts d'interaction, par rapport au premier calcul dynamique (en noir), lorsque les dilatations thermiques sont réintroduites.

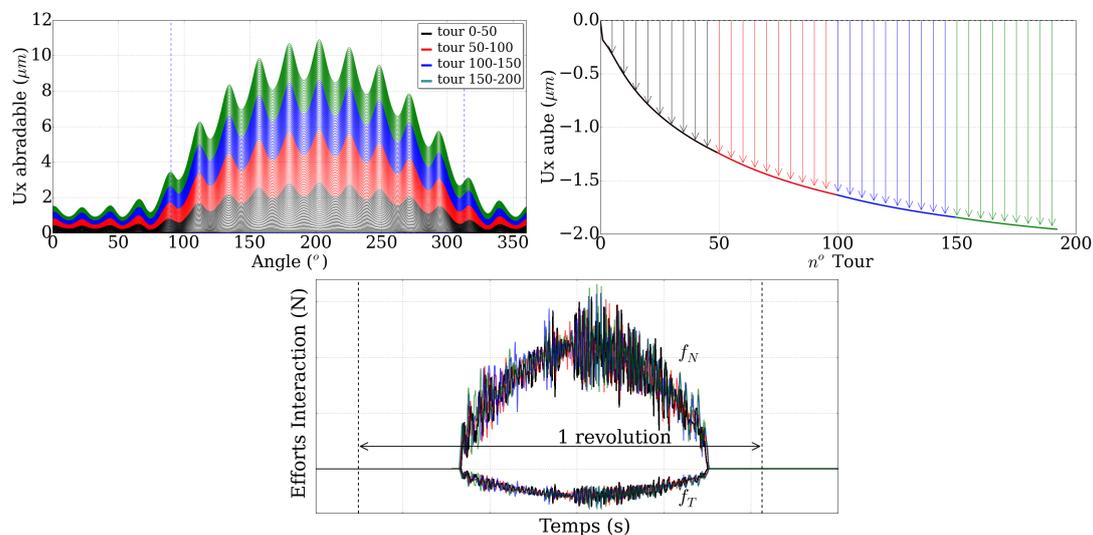


FIGURE 8 – Déplacements radiaux en surface d'abradable et en pied d'aube, avec mise à jour des dilatations thermiques dans la résolution du contact tous les 50 tours, effets sur les efforts d'interaction.

Les effets des dilatations thermiques sur les efforts d'interaction ne permettent pas en l'état d'évaluer l'utilité du cycle de mise à jour proposé. La fermeture du jeu a certes une répercussion sur les efforts d'interaction, mais aussi sur la puissance de friction, et naturellement sur l'énergie totale dissipée dans le système. L'influence de l'ouverture et la fermeture du jeu sur la réponse dynamique à iso-paramètres d'incursion est représentée Figure 9, en efforts et en énergie équivalente pour des jeux qui évoluent entre $\pm 15\mu m$. Pour une consommation de jeu de $10\mu m$, 10% d'énergie en plus sont dissipés par le travail des efforts d'interaction, par rapport à l'incursion de référence (—). La puissance de friction instantanée

augmente aussi à hauteur de +10% lorsque les dilatations thermiques ferment le jeu de $10\mu m$, au bout de 200 cycles par exemple. Les quantités de flux distribuées entre l'aube et l'abrasable évolueront dans les mêmes proportions. Dans ces conditions d'interaction particulières, il vient que la mise à jours des géométries dans la résolution du contact tous les 50 cycles thermiques est suffisante pour assurer une continuité énergétique logique.

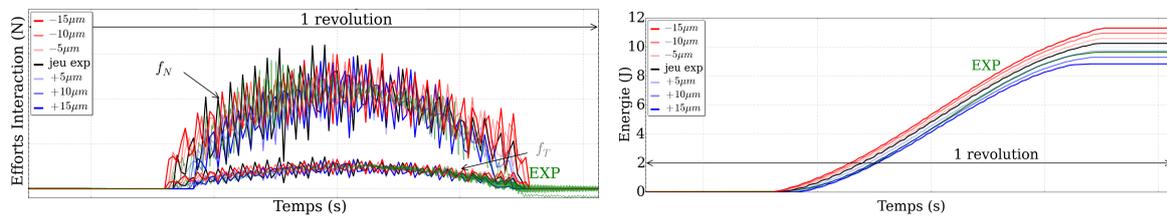


FIGURE 9 – Etude de consommation de jeu sur la distribution des efforts d'interaction et sur le travail cumulé de ces efforts.

5 Perspectives

Ces travaux ont pour objectif d'appréhender les notions de couplage des grandeurs mécaniques et thermiques appliqués au contact aube-abrasable. L'étude des essais d'interactions sur le banc simplifié a permis la mise au point d'une stratégie de modélisation thermomécanique découplée pour s'intéresser aux échelles de temps des phénomènes thermique et dynamique. Les dilatations thermiques qui résultent des échauffements n'ont pas des effets immédiats sur la dynamique d'interaction. Il est suffisant de considérer les mises à jour des géométries à partir du moment où les corps en interaction ont accumulé une certaine quantité d'énergie. Les effets des mécanismes de déformations irréversibles et de l'usure ne sont pas considérés, et seront envisagés dans un second temps.

L'objectif à terme est d'essayer d'expliquer les conditions qui différencient les cas d'interaction divergents et non-divergents transposés sur les régimes vibratoires des essais sur géométries réelles de compresseur. Les échelles spatiales et temporelles des dilatations thermiques seront étudiées sur des dynamiques plus complexes mettant en jeu des essais d'interaction entre un disque aubagé et son carter. En référence au graphique temps-fréquences de la Figure 1, la dualité d'échelle des phénomènes dynamiques et thermomécaniques paraît évidente et justifie l'adaptation de la méthodologie de modélisation proposée. D'un côté, le temps caractéristique des grandeurs dynamiques est de l'ordre du tour ou d'un sous-multiple du tour (exemple H6), et en parallèle les déformations thermomécaniques s'installent sur toute la durée de l'essai, i.e. des milliers de tours en 80s. Le couplage de ces phénomènes doit permettre d'expliquer l'apparition du scénario d'interaction avec un contenu fréquentiel riche qui évolue à travers différentes phases vibratoires.

Une résolution du problème thermomécanique sous un chargement à 6 lobes d'usure est présenté Figure 10. La localisation du contact sur un sous-harmonique de la vitesse de rotation conduit à une localisation des échauffements en circonférence du revêtement abrasable sur un motif à 3 diamètres. L'échelle spatiale des dilatations thermiques est d'autant plus intéressante car la consommation de jeu apparaît comme une problématique tridimensionnelle : la localisation du contact dans les directions axiale et circonférentielle dépend à la fois des déformations thermomécaniques du carter et des déformées modales d'aube complexes qui peuvent alterner bord d'attaque et bord de fuite.

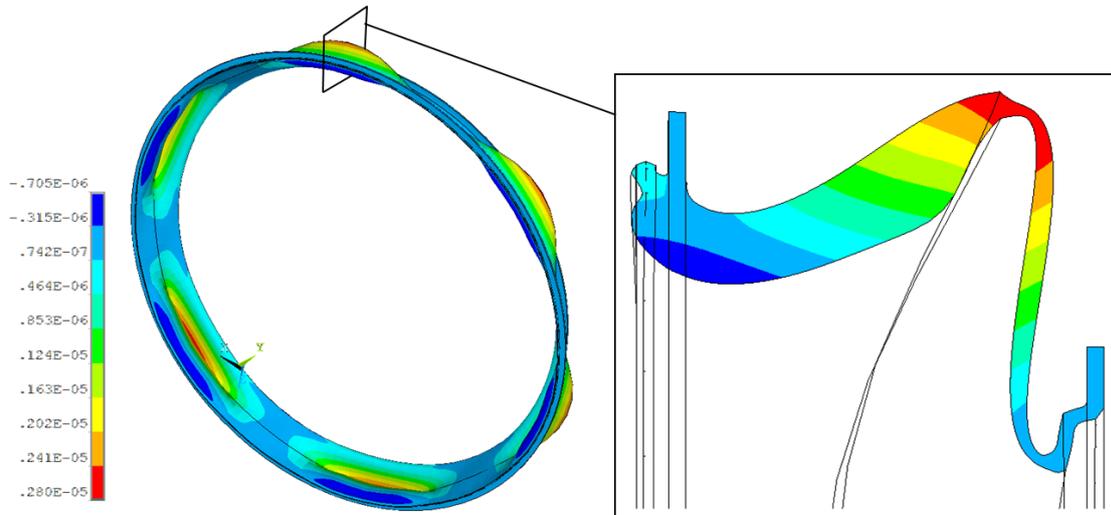


FIGURE 10 – Déplacements radiaux dus aux dilatations thermiques dans une configuration d'interaction d'aube en flexion H6.

Références

- [1] A. Millecamps et al. (2009). Influence of thermal effects during blade-casing contact experiments. In *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 855–862. American Society of Mechanical Engineers
- [2] A. Batailly et al. (2016). Experimental and numerical simulation of a rotor/stator interaction event localized on a single blade within an industrial high-pressure compressor. *Journal of Sound and Vibration*, 375, 308-331.
- [3] W.F. Laverly (1982). Rub energetics of compressor blade tip seals. *Wear*, 75(1) :1–20
- [4] M. Banjac et al. (2014). Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach. *Tribology in Industry*, 36(4).
- [5] R. Mandard et al. (2015). Identification expérimentale des mécanismes d'accommodation de l'incursion aube-abradable. *JIFT 2015*
- [6] Q. Agrapart et al. (2016). An energy balance of blade-casing interaction. *ISROMAC 2016 - 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*