Méthodes Avancées en Ingénierie MécAnique

Un système de propulsion, un équipement, pour l'aéronautique ou le spatial, doit démontrer une très bonne fiabilité, offrir une performance au meilleur niveau tout en étant soumis à des contraintes de fonctionnement de plus en plus fortes et complexes. Par ailleurs, son prix doit être concurrentiel et il doit avoir un impact sur l'environnement le plus faible possible (matériaux non toxiques, facilement recyclables, procédés de production avec le moins de rejets possibles, fonctionnement aussi économe et aussi peu polluant que possible). Concevoir des produits de haute technologie satisfaisant l'ensemble de ces objectifs nécessite une parfaite maîtrise de la mécanique qui est au cœur des métiers du groupe Snecma.

MAIA est une organisation efficace qui a pour objectifs majeurs :

- préparer les ruptures technologiques
- permettre des progrès incrémentaux pour l'amélioration continue des produits
- faciliter et accélérer le transfert des résultats de la recherche

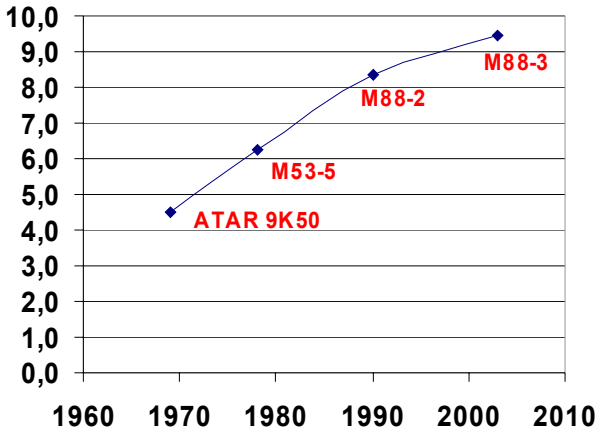
Elle est structurée autour des problématiques essentielles à la maîtrise de la conception mécanique des moteurs et équipements. Pour chacun des sept thèmes de MAIA, vous trouverez une fiche descriptive dans ce dossier :

- Calcul robuste
- Vibrations
- Dynamique transitoire
- Comportement, endommagement des structures composites
- Durée de vie des structures chaudes
- Durée de vie des structures froides
- Contacts

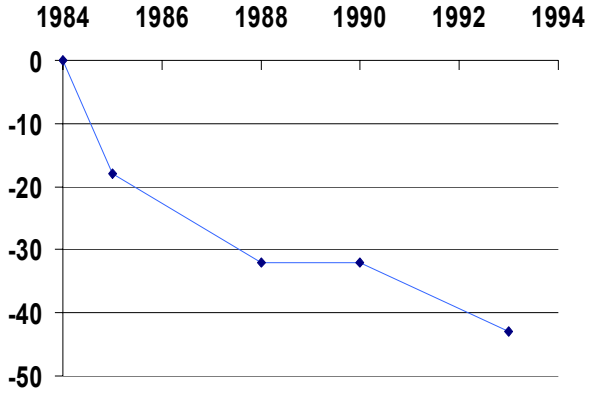
Cette organisation participative préservera l'indépendance de chaque structure impliquée dans le projet. MAIA associera des chercheurs du CNRS et de l'ONERA mais aussi d'autres organismes aux compétences complémentaires, des responsables Recherche et Technologie de l'ensemble des sociétés du groupe Snecma et des responsables des Programmes de la Direction des programmes aéronautiques civils (DPAC), de la Direction générale pour l'armement (DGA), du Centre national d'études spatiales (CNES) ou du ministère de la Recherche et des nouvelles technologies, chacun agissant selon la logique appropriée :

- scientifique, pour favoriser les avancées et la créativité
- technologique, plus convergente, car rattachée à une finalité produit
- «programmatique», destinée à orienter et financer les activités

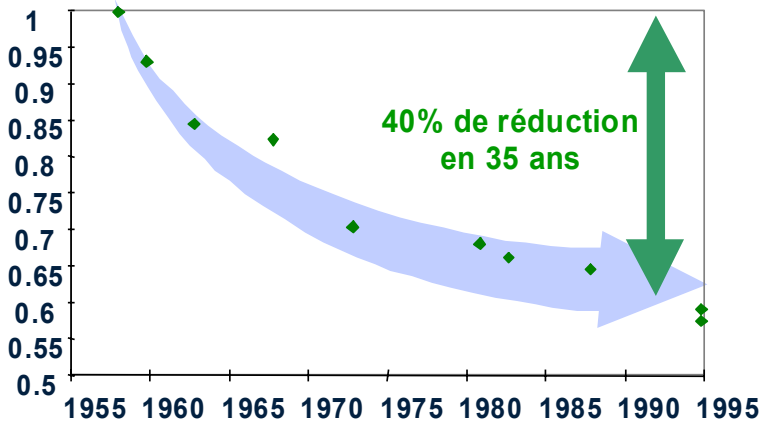
LA MECANIQUE A SNECMA
UN MONDE QUI EVOLUE EN PERMANENCE



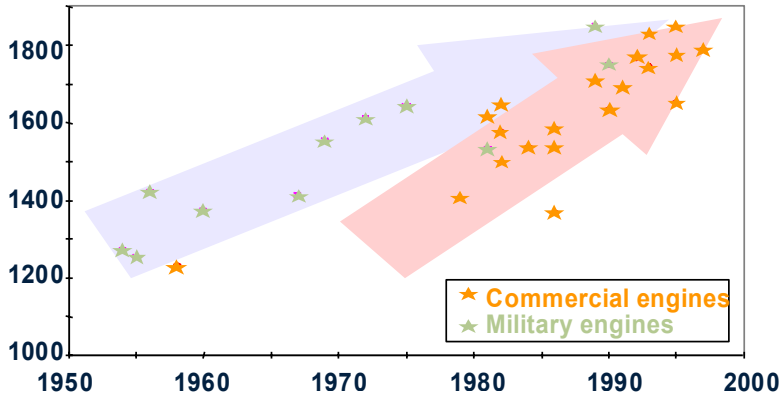
Evolution du rapport poussée/poids



Espacement des grandes visites



Evolution de la consommation des moteurs



Evolution de la température d'entrée turbine des moteurs civils et militaires

PLUS LEGER, PLUS PERFORMANT,
MOINS CHER, MOINS POLLUANT,
TOUT EN AMELIORANT LA SECURITE.

Calcul robuste

1. Objectifs industriels

Concevoir du premier coup un produit conforme aux spécifications, c'est à dire sans le recours à des essais comme moyen de mise au point, est essentiel pour réduire les cycles et coûts de développement. Cet objectif, déjà difficile à atteindre, ne suffit plus.
Les conceptions doivent prendre en compte de plus en plus de contraintes (performance, coût, masse, bruit…) qui doivent faire l'objet de compromis très pointus entre les différentes disciplines physiques et dont les performances sont généralement très sensibles aux dispersions de fabrication et ont tendance à se dégrader rapidement pendant la vie en service.

Les méthodes de dimensionnement doivent donc évoluer pour permettre une conception optimale et robuste des produits, l'enjeu industriel étant de pouvoir garantir des performances sur l'ensemble d'une production et au cours du temps.

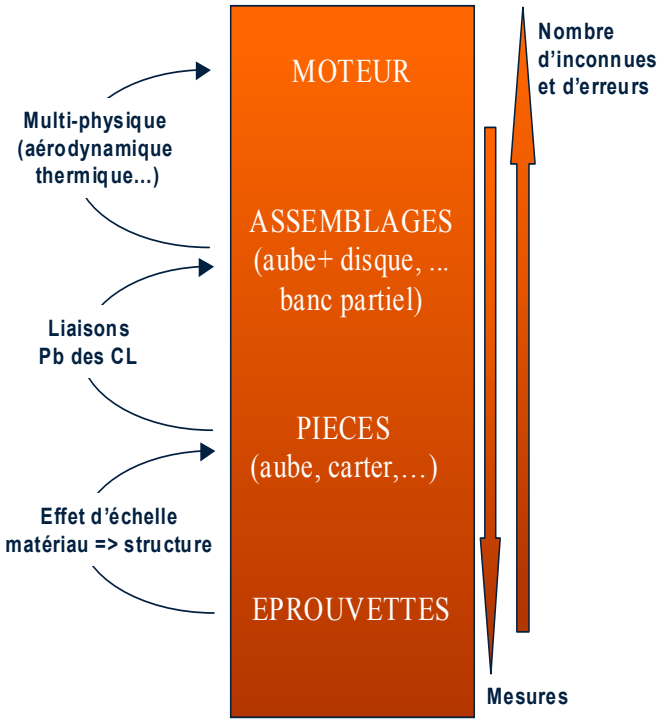
2. Etat de l'art

Les temps de conception ont déjà été drastiquement raccourcis grâce à une utilisation intensive des simulations numériques. Mais si nous sommes passés à un stade qui ne nécessite que très peu de corrélations avec les essais pour la mise au point des nouveaux produits, les processus de conception nécessitent encore de nombreuses itérations entre les différents spécialistes. Le processus de conception incorpore des études de sensibilités qui restent trop partielles et arrivent trop en aval du développement pour permettre une conception réellement robuste.

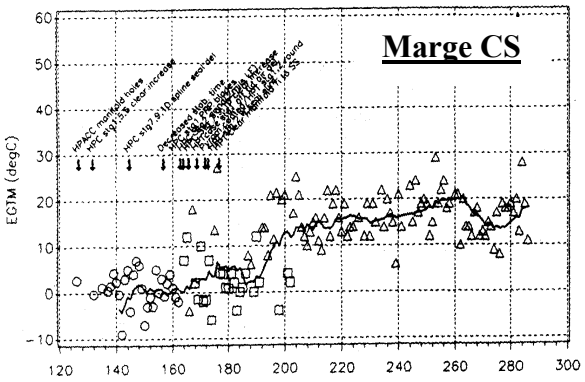
3. Défis scientifiques

Les défis associés sont nombreux car une approche globale du produit devient nécessaire. D'une part, il s'agit de savoir établir le lien entre la dispersion des paramètres sur une pièce et son effet sur la performance globale de la machine, par exemple. Ce lien entre paramètre local et influence globale est difficile car il met en jeu des échelles différentes et des problèmes multiphysiques. D'autre part, d'un point de vue numérique, les approches robustes sont souvent liées à des optimisations très contraintes nécessitant la mise en œuvre de modèles coûteux (voir le point précédent). Compte tenu des délais de développement imposés par le marché aéronautique actuel, ces approches robustes devront être mises en œuvre sans augmentation du temps de conception. Enfin, une part importante de la conception robuste concerne également le recalage entre essais et calculs. Le défi est de positionner un modèle numérique « nominal » par rapport à une population dispersée d'essais qui n'est pas forcément représentative de l'ensemble d'une production.

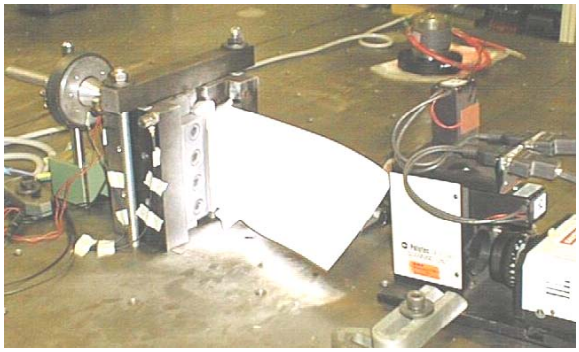
En résumé, les approches robustes nécessiteront de définir des modèles de dispersion en production et de dégradation en service sous une forme adaptée permettant de conserver des temps de calcul réalistes au regard des cycles de développement.

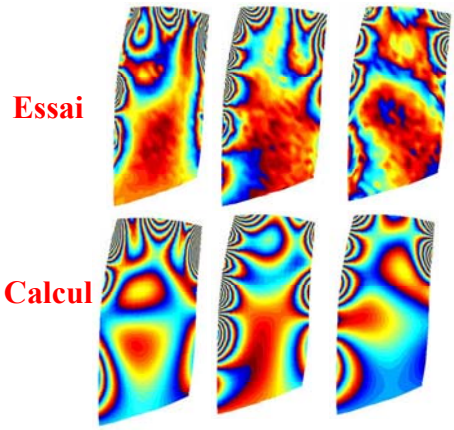


Approches robustes
Problématique

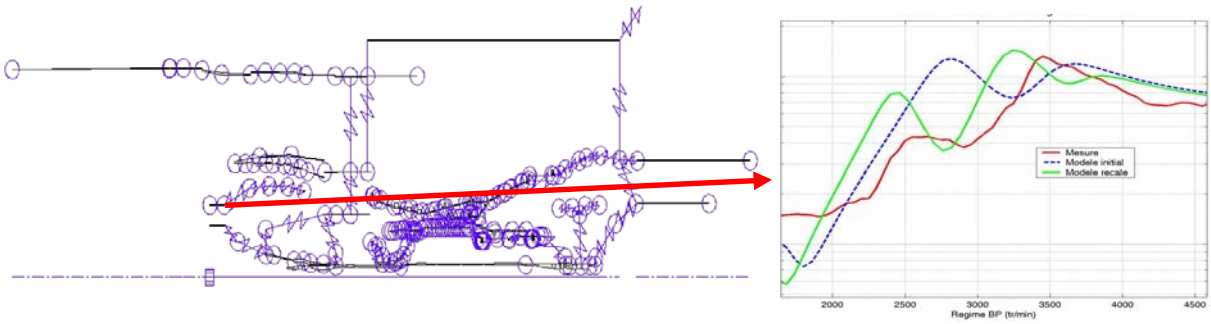


Exemple de dispersion
Marge en consommation
spécifique de carburant





Corrélation essai-calcul : Déformées modales sur une aube
Mesures holographiques au LMARC (CNRS/Université de Franche Comté)



Analyse de sensibilité
Enveloppe de réponse en dynamique d'ensemble

Vibrations

1. Objectifs industriels

Les vibrations des structures concernent potentiellement tout composant moteur ou équipement : roues aubagées (ensemble aubes + disque) dans les turbomachines, engrenages dans les réducteurs et transmissions de puissance, systèmes de freinages, etc. La nécessité de concevoir plus léger et moins coûteux à produire, conduit à réaliser des composants plus optimisés et globalement de plus en plus contraints. Par ailleurs, les pièces monoblocs sont de plus en plus utilisées afin de limiter le nombre de pièces unitaires. Ces composants sont plus sensibles aux problèmes vibratoires.

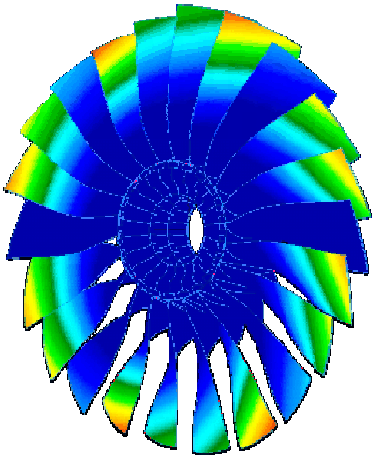
L'objectif principal est de maîtriser le mieux possible le comportement vibratoire des ensembles mécaniques afin d'éviter les approches trop conservatrices qui nuisent à la performance de nos pièces.

2. Etat de l'art

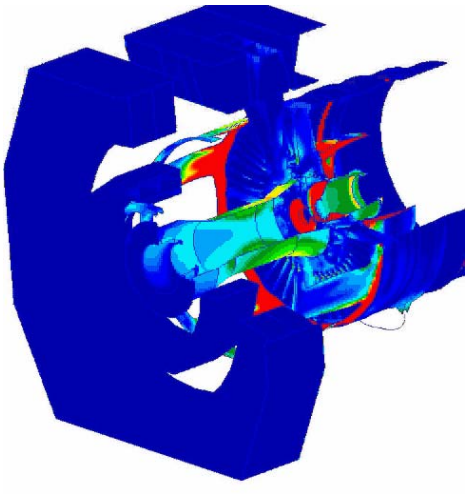
Jusqu'à aujourd'hui, les industriels se sont particulièrement attachés à prédire au mieux les niveaux de réponses vibratoires, sous différents types de chargement (aéroélastique, balourd, etc.). Cet objectif est atteint localement dans la plupart des cas mais l'évolution des technologies conduit à de nouveaux types de sollicitation qui doivent être modélisés. De plus, il est souvent difficile de corréler les résultats des analyses aux essais sur les pièces en rotation : les moyens de mesure des vibrations sont délicats à mettre en œuvre et la modélisation de l'amortissement est mal maîtrisée. Par ailleurs, les pratiques actuelles permettant de déterminer le risque de rupture induite par un niveau vibratoire donné sont très conservatrices. Enfin, peu de technologies d'amortissement sont disponibles pour minimiser les niveaux.

3. Défis scientifiques

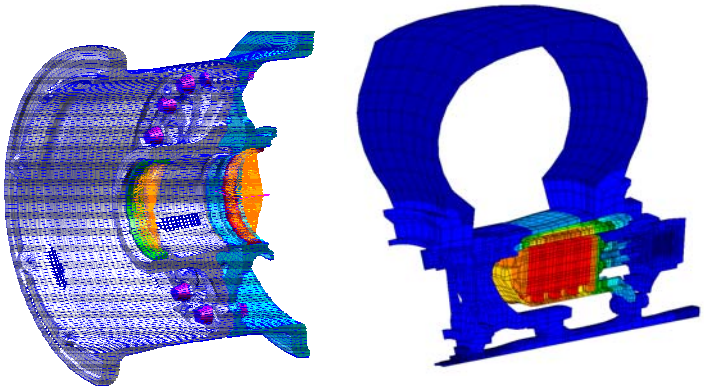
Les défis consistent à mettre à disposition de nouvelles technologies et des méthodes de conception associées, qui seront développées en joignant les approches numériques et expérimentales autour des thèmes suivants :
- Amélioration de la prédiction des niveaux vibratoires pour les nouveaux types d'excitation recensés sur les produits, notamment au niveau des interfaces entre pièces (jonctions, contacts entre pièces, non-linéarités, etc.)
- Développement des technologies d'amortissement plus efficaces, en particulier pour les structures monoblocs et les lignes d'arbres. Ces techniques seront passives ou semi-actives comme les élastomères, la friction, les squeeze films, etc. Il s'agira de plus d'ouvrir la voie au contrôle actif des vibrations pour les applications sur les moteurs et équipements.
- Identification de la nocivité réelle d'un niveau vibratoire vis à vis du risque de rupture afin de permettre de statuer sur la tenue des pièces.
- Etablissement de méthodes de calcul permettant de simuler des ensembles de plus en plus complets afin de pouvoir prendre en compte l'ensemble des interactions entre pièces constituantes de nos ensembles.



Aéroélasticité
Mode à 3 diamètres sur une soufflante



Dynamique d'ensemble
Réponse à balourd 3D moteur



Vibration des structures
Modèle EF de frein et de roue

Amortissement
Technique sandwich métal-élastomère

Banc d'essai
Projet CEE – ADTurB II
Effet de la friction – Dynamique non linéaire – Contrôle vibratoire en rotation
LTDS (CNRS/ECL/Ec. Ing. St Etienne)

Dynamique transitoire

1. Objectifs industriels

La certification des pièces aéronautiques est obtenue par une combinaison d'essais et d'analyses démontrant la bonne tenue mécanique des structures sous différents cas de chargements réglementaires. Parmi ces chargements, certains sont particulièrement violents et sortent du cadre des excitations vibratoires traitées dans le thème précédent. Il s'agit notamment de démontrer la tenue des aubes de soufflante à l'ingestion d'oiseau et de glace et de valider le comportement des moteurs et des équipements moteurs à des incidents extrêmes, bien que la probabilité pour qu'ils se produisent soit très faible, comme la perte d'aube. Ces impacts, outre les dommages immédiats sur les structures de rétention moteur, entraîneraient de forts balourds générant des vibrations importantes lors de la décélération de la machine, dommageables pour la cellule de l'aéronef. Par ailleurs, les équipements comme les freins et les atterrisseurs subissent de fortes charges transitoires, de type thermomécanique pour les premiers et de type choc pour les seconds.

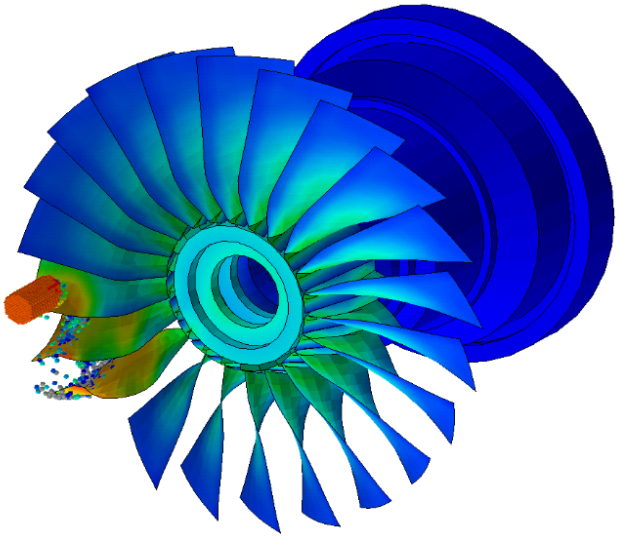
Les essais réalisés dans ce cadre de certification compte tenu de leur sévérité sont souvent très dommageables, voire destructifs et ne peuvent être réalisés que tard dans le cycle de développement. Leur coût est important et les problèmes éventuels tardivement identifiés. L'objectif de MAIA est d'améliorer les méthodes permettant de simuler ces phénomènes afin que les essais exigés par les autorités certifiantes soient réussis du premier coup.

2. Etat de l'art

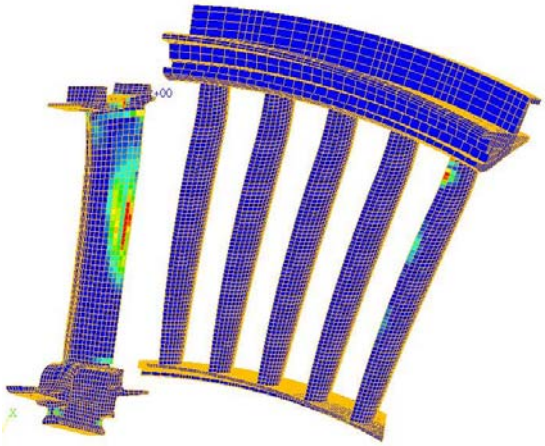
Les méthodes concernant l'ingestion d'oiseau et la perte d'aube sont arrivées, dans la plupart des applications, à un bon niveau de maturité. Il est possible de déterminer les contraintes subies par les structures sous ce type de chargement. Par ailleurs, les outils pour le calcul transitoire non linéaire existent (décélération en dynamique d'ensemble, transitoires sur les équipements). Il est donc souvent possible de modéliser les phénomènes. Par contre, toutes les non linéarités ne sont pas prises en compte, le comportement de certains matériaux est mal connu et il est souvent difficile de conclure sur la tenue des pièces. Enfin, le couplage des phénomènes entre différentes échelles, spatiales comme temporelles n'en est qu'à son début.

3. Défis scientifiques

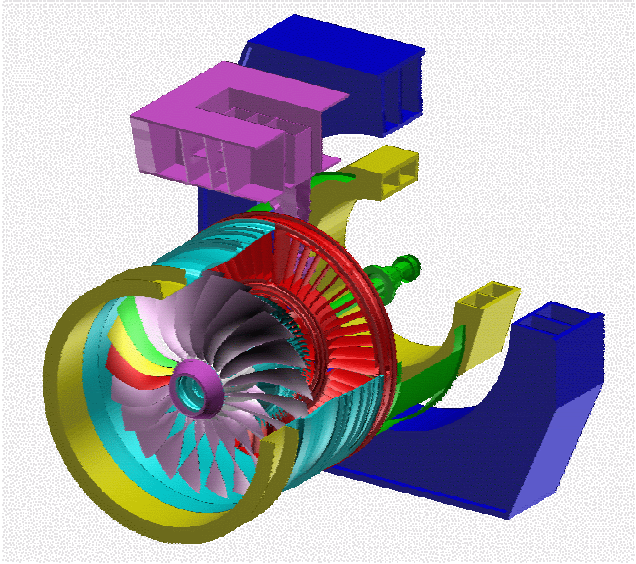
Les défis scientifiques consistent à pouvoir modéliser des structures dans leur globalité, tout en étant capable d'obtenir des informations locales précises pour le dimensionnement mécanique à un coût de calcul raisonnable (une journée). Ensuite, il s'agit de coupler des phénomènes très courts (quelques millisecondes) avec des transitoires plus longs (quelques dizaines de secondes) correspondant à la décélération du moteur cassé. Par ailleurs, la connaissance des matériaux projectiles comme la glace et des matériaux structuraux métalliques sous chargement rapide est à améliorer. Les critères de rupture permettant de statuer sur la tenue des pièces doivent également progresser. Par ailleurs, de nouvelles solutions technologiques doivent être testées pour dissiper l'énergie du choc. Enfin, la prise en compte dans la conception des problèmes de contact entre les rotors et les stators (sommets d'aubes contre carter) sera un sujet important. Cette problématique nouvelle est induite par la tendance à la diminution des jeux en sommets d'aubes, gage de meilleures performances aérodynamiques. Les simulations numériques restent très coûteuses en temps de calcul. Un des enjeux essentiels est de gagner un ou deux ordres de grandeur sur l'efficacité de la simulation.



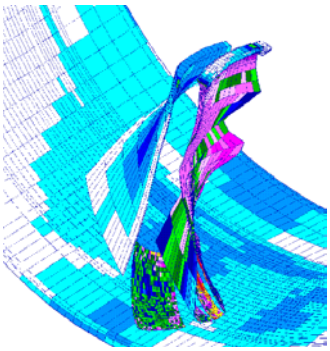
Ingestion d'oiseau
Exemple de modèle FAN
LaMCoS (CNRS/INSA Lyon) & SNECMA



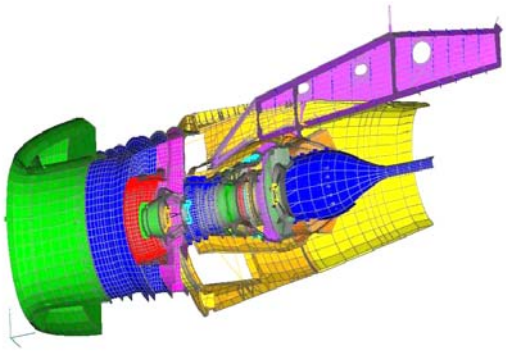
Contact turbine
Contact aube mobile / diffuseur aval



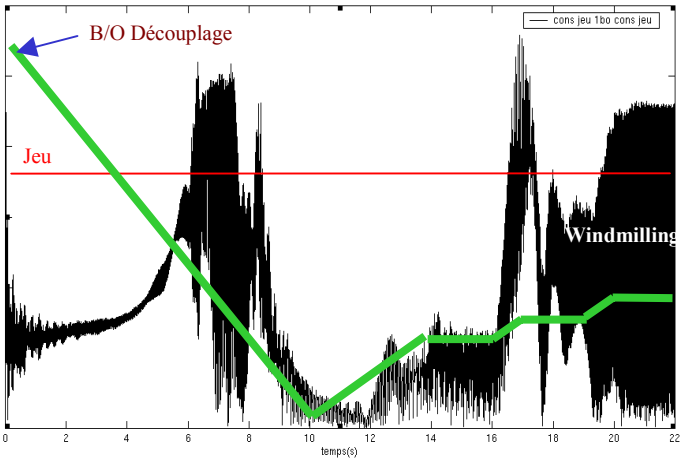
Perte d'aube – Exemple de modèle
LMM (ECN)



Perte d'aube
Impact entre l'aube lachée et le carter



Dynamique d'ensemble
Exemple de modèle 3D de moteur complet



Décélération après perte d'aube
Réponse dynamique

Matériaux composites

1. Objectifs industriels

Les impératifs de masse et de performances exigées pour les pièces aéronautiques ont naturellement incité les industriels à s'intéresser aux matériaux composites, à matrice métallique (CMM - Anneaux aubagés monoblocs), céramique (CMC - parties chaudes, freins carbone/carbone ou C/C) ou organique (CMO pour les OGV, aubes, pièces structurales, nacelles).

L'objectif industriel est d'amplifier l'utilisation de ces matériaux, ce qui implique une parfaite maîtrise de leur comportement mécanique et l'élaboration de règles de conception adaptées. Le comportement mécanique de ces matériaux étant très fortement lié à leur procédé d'élaboration, des interactions fortes entre ces deux aspects sont impératifs.

La chimie des composites ainsi que l'optimisation des procédés sera traitée par ailleurs. L'objectif de MAIA est de faire le lien entre l'élaboration des matériaux et les besoins des concepteurs en mécanique afin de disposer de modèles matériaux, de méthodes de conception et de critères de dimensionnement pour les composites.

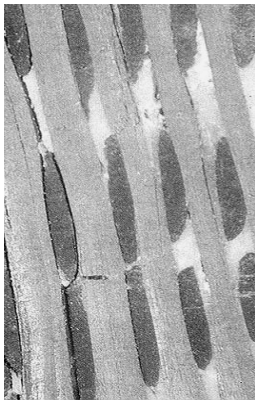
2. Etat de l'art

Aujourd'hui, les composites sont dimensionnés de façon simplifiée en utilisant des lois de comportement élastique. Ces lois sont disponibles pour les CMM et les composites élaborés au moyen du procédé RTM (Resin Transfer Molding).
Dans le cas des CMC et des C/C, utilisés dans des environnements à haute température (chambre de combustion, tuyère, freins), des lois de comportement prototypes sont disponibles en non linéaire, intégrant les effets de l'endommagement. Pour les CMC, un critère de rupture monoaxial simplifié est également disponible. Le calcul de structures composites exige le développement de lois de comportement simplifiées. L'amélioration conjointe des méthodes d'identification des lois de comportement et des méthodes de calcul est donc nécessaire.

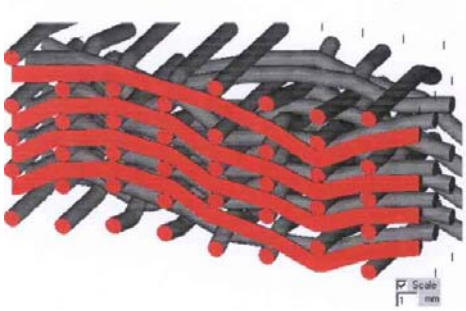
3. Défis scientifiques

Les défis scientifiques résident dans la détermination des lois de comportement des matériaux composites et dans l'identification de leurs paramètres afin de pouvoir mettre en œuvre des analyses élasto-visco-plastiques. Ces lois seront dépendantes notamment du procédé d'élaboration, de la micro-structure, de la physico-chimie du composite et dépendront de la température et de la vitesse de mise en charge. De plus, pour les CMC, des modèles valables en milieu très oxydant sont à développer. Au delà des lois de comportement, des critères de ruptures devront également être identifiés pour prévoir la tenue des pièces, notamment dans des cas de charges complexes comme les charges multiaxiales ou le flambage. Enfin, l'ensemble de ces lois et de ces méthodes de calcul devront être validées, calibrées par rapport à des essais et intégrées dans les chaînes de conception.

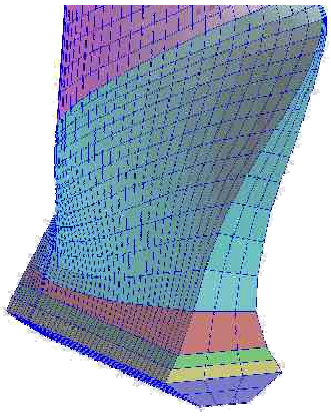
L'effet d'échelle pour les composites



Echelle micro

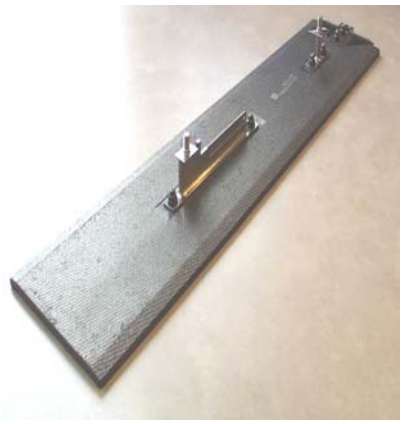


Echelle méso



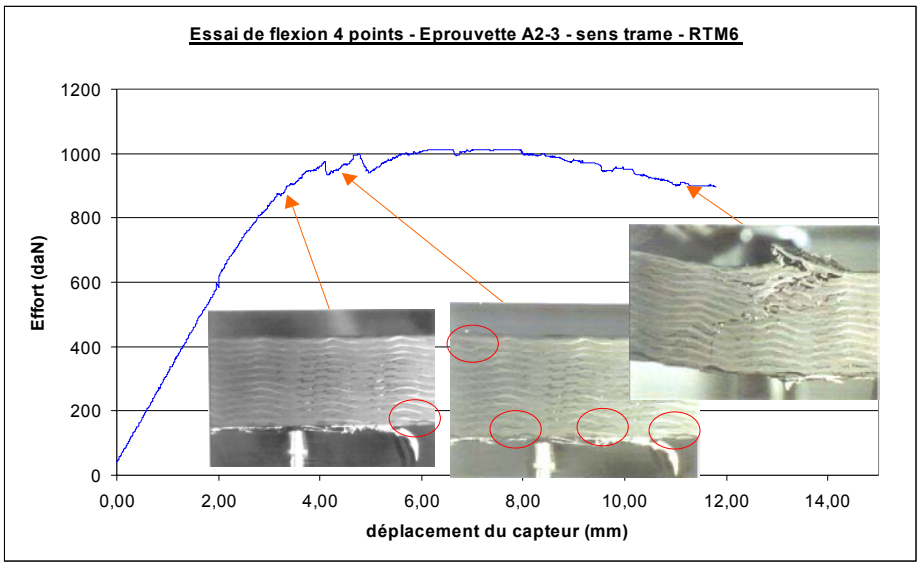
Echelle macro

Anneau aubagé monobloc
Matrice métallique (SiCTi)
ONERA & LMT (CNRS/ENS Cachan)



Volet chaud de tuyère
Matrice céramique (SiC/SiC)
LCTS (CNRS/Univ. Bordeaux I/CEA/SNECMA)
GEMPPM (CNRS/INSA LYON)
LERMAT (CNRS/ISMRA)

FAN en RTM
Matrice organique
UTC



Comportement des composites
Essai de compréhension des modes d'endommagement

Durée de vie
Structures chaudes

1. Objectifs industriels

L'amélioration des performances de nos produits est notamment induite par l'augmentation des températures de fonctionnement. Dans le cas des turbines aéronautiques par exemple, les températures des gaz chauds sont supérieures à 1800°K, bien au-delà des températures critiques pour le comportement des matériaux. Ces pièces doivent par ailleurs supporter des charges énormes dans un environnement, qui en plus d'être chaud, est très agressif vis à vis de l'oxydation et de la corrosion. Cette problématique est similaire pour les chambres et les volets de tuyère.

Les pièces concernées sont souvent mono-cristallines refroidies ou composites (CMC pour les chambres, volets) et revêtues de barrières thermiques, ce qui implique des géométries très complexes et un comportement mécanique anisotrope. Le type de chargement (basse ou haute fréquence, éventuellement couplées) et les différents modes d'endommagement possibles sont deux causes supplémentaires de difficultés. L'objectif industriel est d'améliorer la longévité des pièces chaudes et de prévoir plus précisément leurs durées de vie.

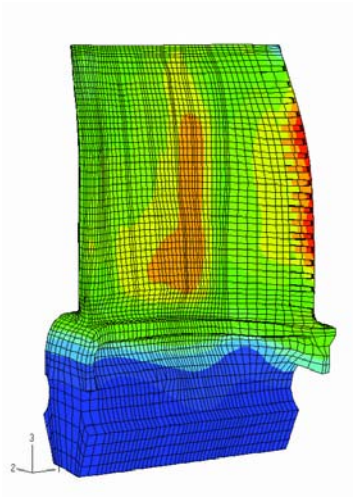
2. Etat de l'art

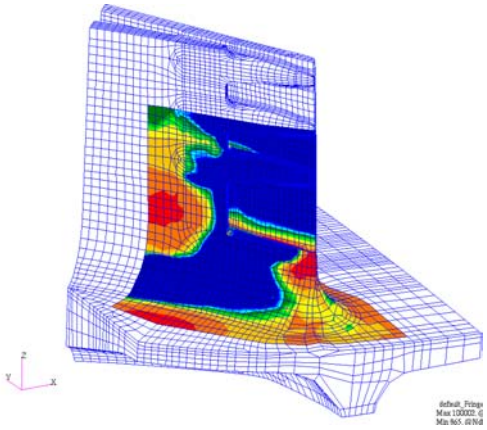
Actuellement, les calculs aérothermiques et les calculs mécaniques sont découplés. Les simulations mettent en œuvre des calculs 3D avec des formulations de matériaux élasto-visco-plastiques. Les outils actuels permettent une bonne prédiction des zones critiques des pièces mais demandent encore un travail de recalage par rapport à l'estimation précise des durées de vie. La prise en compte de barrières thermiques dans le calcul des durées de vie est encore au stade de prototype.

3. Défis scientifiques

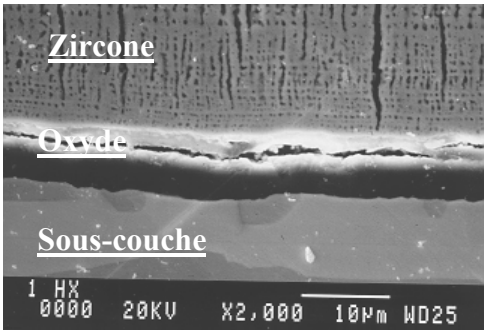
Les défis scientifiques se situent au niveau de la modélisation du comportement des aubes revêtues avec prise en compte de la fatigue, du fluage et de l'oxydation. Il s'agira par ailleurs de modéliser l'endommagement en surface comme en volume en tenant compte des effets d'échelle. De plus, il faudra tenter d'améliorer la modélisation de la propagation des fissures avec la prise en compte de la fatigue vibratoire et du couplage entre sollicitations à haute et basse fréquence. Enfin, un travail devra être mené pour prédire la longévité des barrières thermiques et proposer de nouveaux revêtements.

Calculs : Thermique 3D puis Elasto-Visco-Plastique 3D

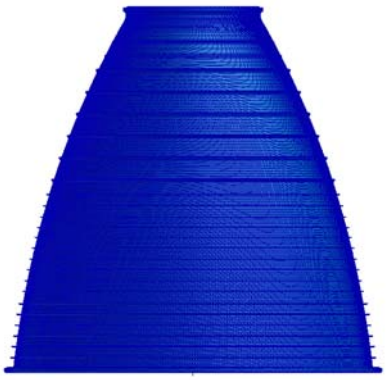


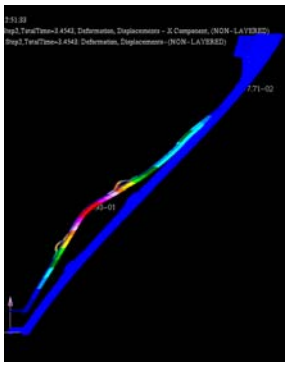


Zones critiques estimées en 3D

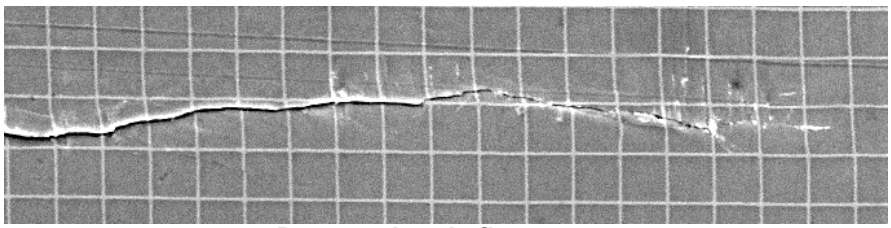


Barrières thermiques





Calcul de durée de vie
Divergent Vulcain



Propagation de fissure
Exemple de propagation en mode de cisaillement (grille de 7 µm)
LMS (CNRS/Ecole Polytechnique)

Durée de vie
Structures froides

1. Objectifs industriels

Les objectifs de ce thème sont similaires à ceux du précédent, c'est à dire améliorer la longévité des pièces froides et garantir une bonne estimation de leur durée de vie ; celle-ci comporte la prédiction de la longévité jusqu'à l'amorçage de fissure puis celle de la propagation de fissure jusqu'à la rupture de la pièce. Les températures restent assez basses (jusqu'à 600°C) mais ces structures froides sont des pièces très chargées.

Si certaines problématiques sont proches du thème précédent, comme les missions et les sollicitations complexes, d'autres sont plus particulières aux structures froides. On citera notamment les approches statistiques nécessaires pour traiter le problème des défauts (métallurgie des poudres, défauts de fonderie, défauts de surface, etc..) et leurs effets sur la durée de vie.

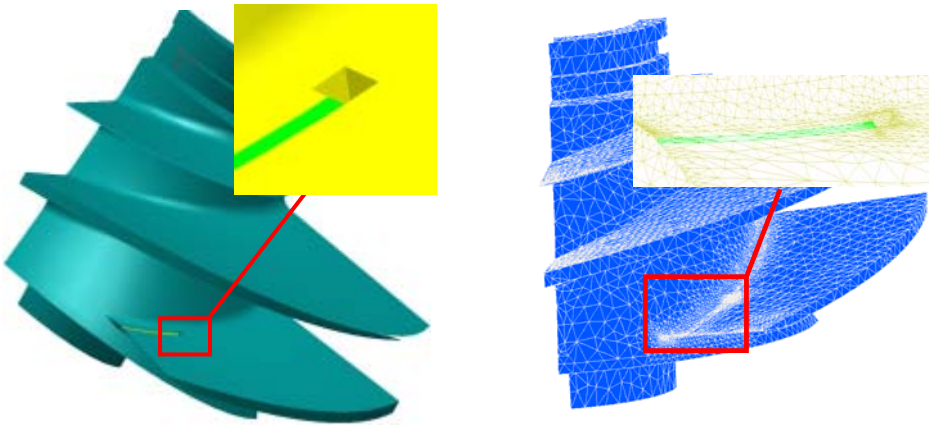
Par ailleurs, pour certaines de ces structures froides (les aubes notamment), il est impératif de s'assurer que leur tenue mécanique n'est pas remise en cause en cas de petits dommages locaux induits par les impacts de corps étrangers survenant lors de l'exploitation des moteurs.

2. Etat de l'art

Les durées de vie à l'amorçage sont aujourd'hui estimées à partir de calculs thermiques puis mécaniques. Il est possible d'intégrer de manière automatisée des fissures au sein d'un modèle mécanique sain (modèle par éléments finis de la pièce nominale). Ensuite, la propagation de fissure est simulée à l'aide de calculs mono-dimensionnels.

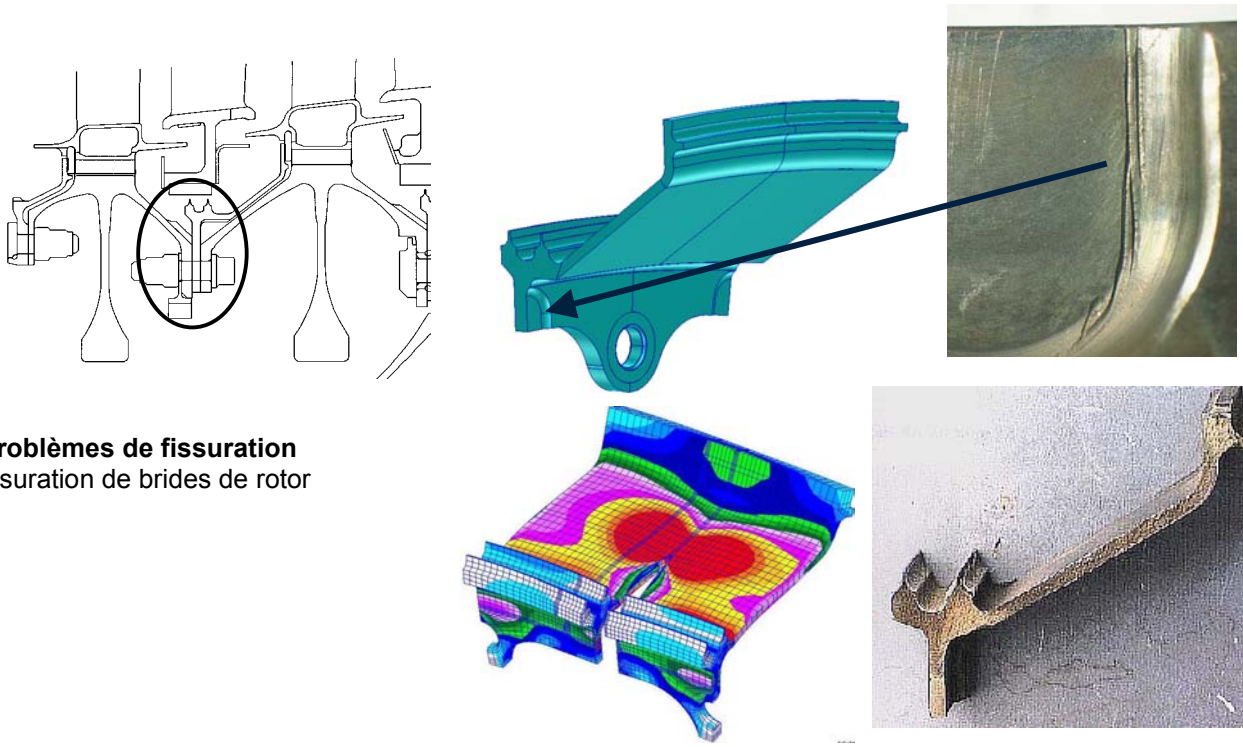
3. Défis scientifiques

Les défis qui seront relevés par MAIA sont l'amélioration de la prédiction de la durée de vie à l'amorçage de fissures des disques. Cette prédiction nécessite une prise en compte probabiliste des défauts, notamment pour les pièces élaborées en métallurgie des poudres. Ensuite, cette prédiction de la durée de vie à l'amorçage devra prendre en compte les chargements vibratoires ainsi que les effets liés à des impacts sur les pièces. L'altération des caractéristiques mécaniques suite à ces dommages locaux devra être identifiée afin de garantir la robustesse de la conception. La modélisation de la propagation des fissures sera menée en 3D afin d'étendre la durée de vie des pièces en service pour lesquelles une amorce de fissure est apparue. Il s'agira notamment de limiter les coûts de calcul pour ce type d'approche qui nécessite des modèles éléments finis assez lourds.



Problèmes de fissuration
Exemple de fissuration sur un rouet

Problèmes de fissuration
Problématique des pièces fortement chargées (Jambe de train)



Problèmes de fissuration
Fissuration de brides de rotor

Contacts

1. Objectifs industriels

Les contacts au niveau des jonctions entre les pièces mécaniques induisent des chargements importants sur celles-ci. Ces chargements associés aux problèmes de frottement peuvent conduire à un endommagement important des pièces mécaniques. Les zones en contact sont nombreuses : attaches entre l'aube et le disque, problème des brides boulonnées, des freins, des roulements, des étanchéités, entre nageoires ou talons des aubes, au niveau des chaînes cinématiques (douilles, rotules, leviers …), des vérins, etc.

Les zones de contact présentent de fortes discontinuités géométriques dans lesquelles l'estimation des pressions, contraintes, chargements n'est pas toujours aisée. Par ailleurs, même dans le cas où les charges sont estimées avec précision, le mode d'endommagement qui peut conduire à la rupture est complexe (écaillage, usure ou fissuration). De plus, le comportement au niveau du contact dépend en premier lieu des revêtements utilisés et des états de surface. Il est donc particulièrement ardu de prédire avec précision la durée de vie des zones en contact.

L'objectif de MAIA est d'améliorer les méthodes de prédiction des charges dans les zones de contacts et d'identifier les critères adaptés pour statuer sur le mode d'endommagement des pièces.

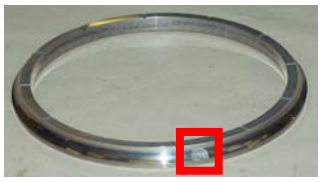
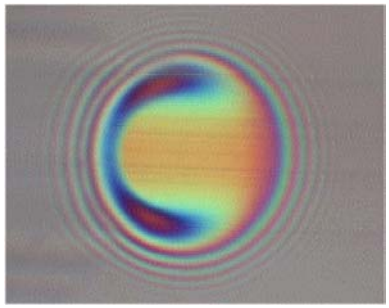
2. Etat de l'art

Les méthodes actuelles permettent des analyses poussées au niveau du contact aube-disque sur les soufflantes. Des calculs cycliques sont réalisés en régime élastique avec contact et frottement. Les effets sont supposés quasi-statiques, le comportement local est donc découplé du comportement global, notamment en ce qui concerne la dynamique. Des méthodes avancées sont également disponibles pour les problématiques liées au freinage et aux roulements.

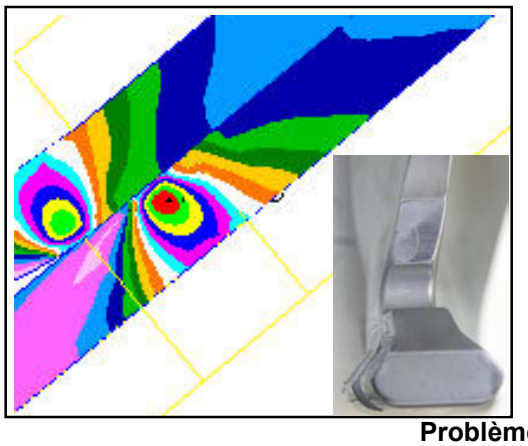
3. Défis scientifiques

Il s'agira dans MAIA, d'améliorer la prédiction des charges dans les zones de contact et de la coupler avec les modèles d'endommagement adaptés. Cela sera possible par le biais d'une meilleure représentation des conditions d'interface, par la mise au point de méthodes de calcul élasto-plastique cyclique avec contact, par le développement des modèles d'endommagements et par la prise en compte de l'oxydation pour les environnements sévères.

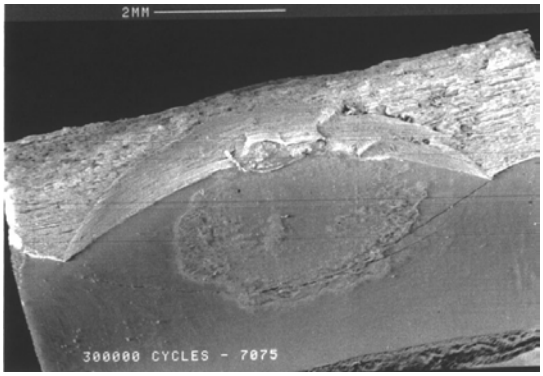
Par ailleurs, les problèmes de contact interagissent souvent avec les comportements vibratoires : les zones de contacts dissipent l'énergie vibratoire ou induisent des non-linéarités dans le comportement des structures sous sollicitation dynamique.

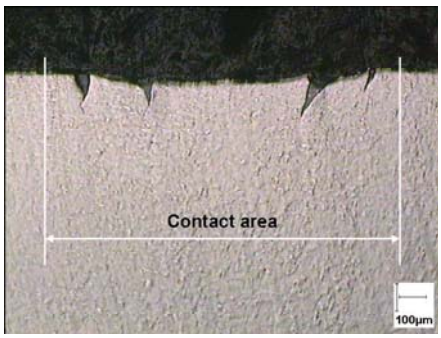
Problèmes de contact dans les roulements
Ecaillage d'une bague de roulement (ci-dessus)
Epaisseurs de lubrifiant (interférométrie →
LTDS (CNRS/ECL/Ec. Ing. St Etienne)

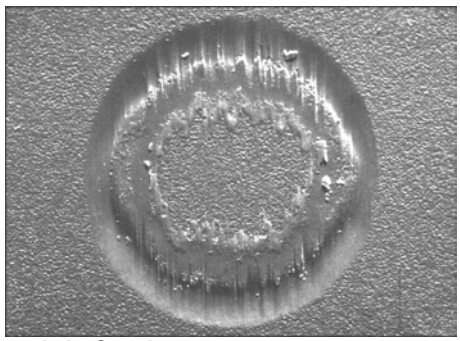


Problème de fretting en pied d'aube
Distribution des contraintes en sortie de zone de contact – usure en pied d'aube



Problème de fretting en pied d'aube
Fissuration consécutive au freeting pendant un essai





Essai de fretting
Observation d'une trace de fretting
LTDS (CNRS/ECL/Ec. Ing. St Etienne)