
Les grands enjeux de la recherche en calcul des structures à Snecma Moteurs

Jérôme Bonini

*Snecma Moteurs, Site de Villaroche
F-77550 Moissy Cramayel
jerome.bonini@snecma.fr*

RÉSUMÉ. Snecma Moteurs a fixé ses axes de recherche autour de deux grandes orientations majeures : la dynamique des structures et les calculs de durée de vie. Les différents thèmes présentés dans cet article sont liés par le projet fédérateur Méca2000 qui s'est achevé fin 2003. Il est suivi d'un nouveau projet orienté autour de la recherche à long terme en partenariat avec les laboratoires du CNRS et de l'ONERA : MAIA.

ABSTRACT. This paper presents a review of the main research activities of the project Méca2000 of Snecma Moteurs Inc. They were focused on two essential fields : structural dynamic and life prediction. Méca2000 will be followed by MAIA, the new mechanical reserch project of Snecma Group in association with ONERA and CNRS.

MOTS-CLÉS : dynamique des structures, ingestion d'oiseau, perte d'aube, aéroélasticité, calcul des durées de vie.

KEYWORDS : structural dynamic, bird ingestion, blade-loss, aeroelasticity, life prediction.

1. Introduction

L'objectif majeur du Bureau d'études est aujourd'hui la réduction des coûts et des délais de conception. Si la réduction de cycle passe par une amélioration des temps calculs et des environnements de pré et post-traitement, la qualité des dimensionnements ne doit pas être oubliée. Les spécifications moteurs sont en effet toujours plus contraignantes en termes de performances, de consommation, de tenue mécanique, de température de fonctionnement ou de durée de vie des pièces. Il s'agit donc de concevoir de mieux en mieux en réduisant le nombre d'essais de développement. Snecma Moteurs doit également garder sa capacité à innover en proposant des ruptures technologiques.

La recherche à Snecma Moteurs est ainsi directement inspirée par les problèmes rencontrés en conception. Ses axes de recherche en calcul des structures s'orientent autour de deux grands thèmes : la dynamique non linéaire des structures et le calcul des durées de vie en fatigue. Elle est aujourd'hui structurée autour du projet Méca2000 qui s'est achevé fin 2003.

2. La dynamique non linéaire des structures

La recherche en dynamique des structures s'oriente autour de trois thèmes : la dynamique d'ensemble du moteur, la dynamique rapide liée aux événements accidentels et la vibration des roues aubagées.

2.1. Dynamique d'ensemble du moteur

Un moteur d'avion, par rapport aux rotors des turbines terrestres, présente la spécificité de posséder des stators déformables et non symétriques, nécessitant la réalisation de calculs éléments finis 3D. Différents types d'analyse sont utiles à l'étude de son comportement dynamique (Bonini, 1999) : la calcul des vitesses critiques permettant de déterminer les phases de stabilité du rotor, la réponse harmonique à un balourd modéré, ou la réponse transitoire dans le cas des forts balourds occasionnés, notamment par la perte d'une aube de soufflante. Ces différents événements mettent en jeu des non-linéarités de contact ou la dégradation des matériaux. De manière à optimiser les temps calculs, les différents composants 3D de la structure sont réduits en super-éléments dynamiques. De manière à pouvoir réaliser des études d'influence rapides, une méthode permettant l'utilisation de modèles réduits paramétrés a été développée (Masson *et al.*, 2002). Les différents composants sont assemblés au moyen d'éléments de jonctions non linéaires (éléments de contact, brides, fusibles...) (Arnoult *et al.*, 2000). Le code de calcul SAMCEF est utilisé pour ces analyses.

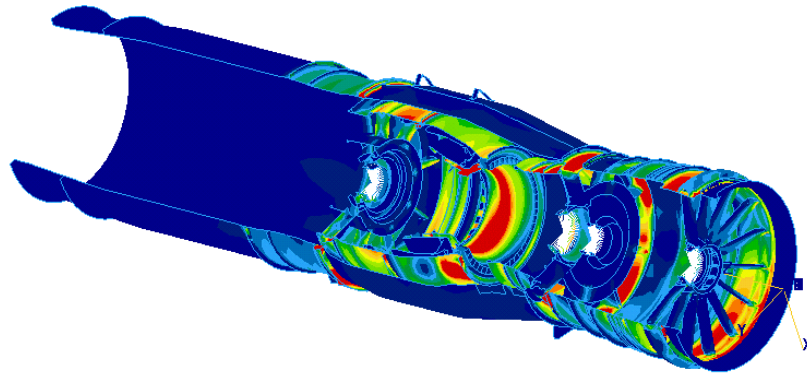


Figure 1. Restitution des contraintes après un calcul moteur complet

Un banc d'essai bi-rotor est actuellement à l'étude pour comprendre les phénomènes rencontrés lors du passage du mode. Ce banc servira également à l'étude de l'effet des non-linéarités liées aux jeux dans les roulements sur la dynamique d'ensemble. Cet effet a été étudié sur le plan théorique au travers de deux approches : la méthode de tir et la méthode des éléments finis en temps (Demailly et Bonini, 2001). Le passage d'un mode ne peut être réalisé qu'en présence d'amortissement. Sur un moteur, l'amortissement structurel est faible car limité aux dissipations de contact dans les assemblages. Il nous faut donc ajouter des dispositifs amortissants, comme des squeeze-films (Laurant et Defaye, 2003).

2.2. Dynamique rapide

Deux phénomènes accidentels peuvent compromettre l'intégrité du moteur : l'ingestion d'oiseaux et la perte d'une aube fan. Ces deux événements doivent être impérativement validés par des essais sur moteur complet pour que le moteur soit certifié par les autorités. La modélisation de ces incidents permet de réduire sensiblement les délais et coûts de conception par la réduction du nombre d'essais de validation. Le code de calcul PLEXUS est utilisé pour les analyses de dynamique rapide.

Lors d'une ingestion d'oiseau au décollage, les aubes fan ne doivent pas rompre et leur déformée doit permettre au moteur de garder une poussée suffisante pour que l'avion puisse se poser. Il est donc nécessaire de calculer avec précision la déformée des aubes après impact. L'oiseau est modélisé par un essaim de billes au travers de la méthode SPH (Galon *et al.*, 2001). La loi d'état de l'oiseau est recalée sur des essais réalisés à Snecma Moteurs. Les aubes sont modélisées par des éléments finis coques épaisses ou coques volumiques. Le lien entre les deux méthodes est réalisé

au moyen d'un algorithme de contact nœud/surface. Cette méthode est aujourd'hui couramment utilisée au Bureau d'études. Elle conduit à des résultats prédictifs en termes de déformée finale des aubes fan pleines des moteurs civils (erreur maximale sur la déformée inférieure à 10 %). Elle est actuellement étendue aux aubes fan creuses.

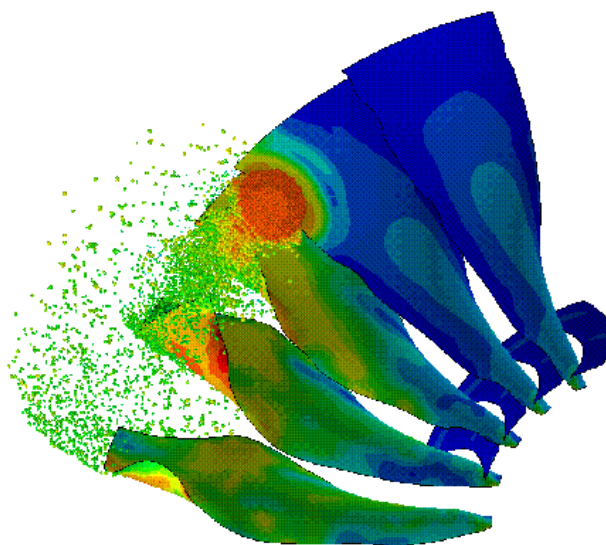


Figure 2. *Ingestion d'oiseau sur un fan*

La perte d'une aube fan cause de graves dommages au moteur, nécessitant son arrêt en vol. Trois grandes phases, faisant intervenir des échelles de temps différentes, caractérisent cet événement. La première phase est très courte (100 ms) : sous l'effet de l'impact sur le carter et les aubes adjacentes, l'aube lâchée se fragmente et les différents morceaux sont centrifugés par le fan pour venir impacter à leur tour le carter. Il est indispensable de prédire avec précision l'instant de rupture et la forme de ces fragments, car ils conditionnent la cinématique de l'événement. Un critère de rupture indépendant de la taille du maillage est à l'étude (Suffis et Combescure, 2002). Le problème couplant le comportement d'ensemble du moteur au comportement local des aubes et des carters, plusieurs échelles de modélisation sont utilisées et le nombre de degrés de liberté des modélisations est aujourd'hui supérieur à un million. Les calculs étant réalisés au moyen d'un code de calcul explicite, le pas de temps est lié au pas du maillage au travers de la condition de stabilité de courant, ce qui conduit à des pas de temps utilisateurs très petits (inférieurs à 10^{-8} s). De manière à réduire sensiblement les temps calcul, nous avons adopté une approche multi-domaine et multi-échelle en temps (Faucher *et al.*, 2003 ;

Cosme *et al.*, 2002). Chaque domaine est indépendant et gère son propre pas de temps. La jonction entre les domaines est réalisée au moyen d'un algorithme de collage. Un domaine peut également être remplacé par un super-élément dynamique (Craig-Bampton) si son comportement reste élastique linéaire tout au long du calcul. Cette technique offre l'avantage d'être assez naturellement parallélisable sur un grand nombre de processeurs. La deuxième phase (25 s) consiste en la décélération du moteur cassé. Elle est modélisée en utilisant le code de calcul EF dynamique implicite SAMCEF/Mécano. La décélération entraîne le passage des modes à bas régimes générant des efforts de contacts qui ne doivent pas endommager le moteur. Ces non-linéarités de contact font chuter le pas de temps implicite à des valeurs proches du pas de temps explicite. Le passage automatique d'un schéma d'intégration implicite à un schéma explicite est à l'étude pour réduire le temps calcul et faciliter la convergence de l'algorithme (Noels *et al.*, 2002). La dernière phase (plusieurs minutes à plusieurs heures), actuellement en cours d'analyse, concerne l'autorotation du moteur cassé sous l'effet de la vitesse de l'avion. Le régime n'est pas stabilisé et les différentes non-linéarités de contact peuvent conduire à exciter des modes de l'avion.

2.3. Aéroélasticité

Sous l'effet des efforts aérodynamiques, différents modes de roues aubagées (ensemble aubes + disques) peuvent être excités et modifier en retour les pressions stationnaires du fluide. Une approche orientée autour d'un couplage faible aéromécanique est développée pour prédire la réponse et la stabilité (flottement) des roues aubagées à une telle excitation. Nous commençons par calculer les modes d'un secteur aube + disque en utilisant des conditions de répétitivités cycliques. Des calculs aérodynamiques correspondant aux différents modes de la roue sont ensuite réalisés. Le calcul de la réponse forcée est finalement conduit en utilisant une technique de synthèse modale. Différents types d'amortisseurs non linéaires peuvent être introduits au sein de la modélisation (frottement dans le pied des aubes, frotteurs sous les plates-formes des aubes...) (Nacivet *et al.*, 2001 ; Poudou *et al.*, 2003). La résolution multiharmonique est alors couplée à une résolution transitoire pour chaque fréquence balayée (AEROMECA).

Chaque aube n'est pas parfaitement identique à sa voisine du fait des dispersions de fabrication et d'assemblage. Ces différences minimales (de l'ordre de 1 % en écart type) peuvent entraîner un comportement désaccordé de la roue aubagée, où une aube peut avoir une amplitude de réponse bien supérieure à celle de ses voisines. Cette aube va ainsi consommer le jeu en sommet d'aube, réduisant ainsi les performances du moteur. Le problème est que nous ne connaissons pas a priori le désaccordage de la roue aubagée. Il s'agit donc de réaliser un ensemble de calculs en prenant un désaccordage aléatoire en fréquence sur les aubes : l'amplitude maximale de réponse est alors calculée. Si nous supposons que l'amplification due au désaccordage suit une distribution de Weibull (ce que nous avons démontré), nous

pouvons réduire sensiblement le nombre de calculs à réaliser et estimer une amplification maximale par rapport à la réponse accordée valable dans 99 % des cas (Seinturier *et al.*, 2000). Une méthodologie expérimentale d'identification du désaccordage a été parallèlement développée pour valider cette approche (Pichot *et al.*, 2001).

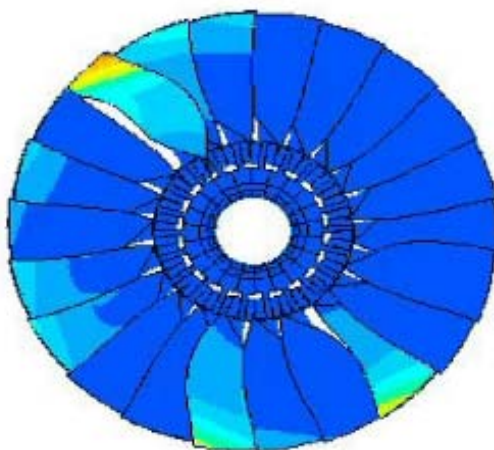


Figure 3. Mode 1F 4 diamètres désaccordé d'une roue aubagée

3. La prédiction de la durée de vie des structures

La prédiction de la durée de vie revêt un caractère essentiel pour la sécurité des avions. Il s'agit de prédire le nombre d'heures de fonctionnement avant une défaillance éventuelle pouvant conduire à l'arrêt du moteur. La durée de vie des pièces est aujourd'hui déterminée par l'amorce d'une microfissure. Si une extension de durée de vie est demandée, des calculs de propagation de fissure sont réalisés.

3.1. La durée de vie des structures chaudes

Les structures chaudes d'un moteur sont situées autour de la chambre de combustion, ainsi que dans la turbine. L'augmentation des performances des moteurs associée à la réduction des émissions polluantes a pour conséquence l'élévation des températures de fonctionnement des moteurs. Les pièces tournantes sont également fortement sollicitées en mécanique sous l'effet des efforts centrifuges. Pour résister à ces conditions extrêmes de chargement, l'utilisation des monocristaux se généralise pour les aubes des turbines hautes pressions. Ces pièces

disposent également d'un refroidissement permanent interne et externe par circulation d'air frais prélevé à l'avant du moteur. Elles sont également aujourd'hui revêtues de barrières thermiques réfractaires pour augmenter leur durée de vie, notamment à l'oxydation. La prédiction des durées de vie nécessite des calculs EF 3D thermiques suivis de calculs EF élastoviscoplastiques utilisant des lois de comportement anisotropes (ABAQUS couplé à ZEBULON) pour localiser les zones critiques et déterminer les contraintes maximales (Foerch *et al.*, 2000). Ces dernières servent au calcul de l'endommagement des aubes et des barrières thermiques (Caliez *et al.*, 2002) puis à la détermination des durées de vie à amorçage. Le calcul des durées de vie nécessite une bonne connaissance des missions que l'avion va devoir réaliser, donc des cycles de charge-décharge des aubes.

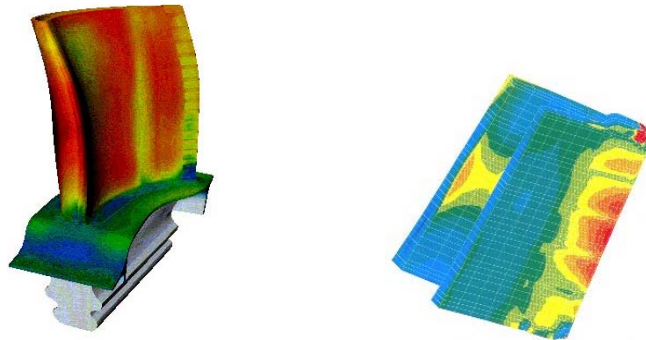


Figure 4. Calculs thermiques puis zoom EVP sur une aube de turbine

3.2. La durée de vie des disques

Les calculs des durées de vie des disques à amorçage sont réalisés de manière similaires aux calculs des durée de vie des aubes. Si leur comportement reste majoritairement élastique, les matériaux constitutifs sont sensiblement différents en termes de comportement (titane, acier...) ou de procédé d'élaboration (forgeage, métallurgie des poudres...). Dans le cas de la MDP ou de la présence d'inclusions, il est indispensable de prendre en compte une répartition statistique de défauts. La prévision de la durée de vie devient alors probabiliste.

Les calculs en propagation de fissures deviennent aujourd'hui une nécessité pour accroître la durée de vie des pièces (Gallerneau *et al.*, 2001 ; Desquines *et al.*, 2001 ; Flouriot *et al.*, 2003). Dans ce cas, nous avons développé une technique permettant d'introduire des fissures libres ou réglées au sein du maillage 3D des pièces (Burgardt *et al.*, 2003). En fond de fissure, la technique du barreau équivalent (boîte à fissure) est utilisée. Ce barreau représente une éprouvette de fissuration dont la cinétique de propagation est connue. Le calcul EF est alors réalisé et les facteurs de concentration de contraintes calculées en fond de fissure.

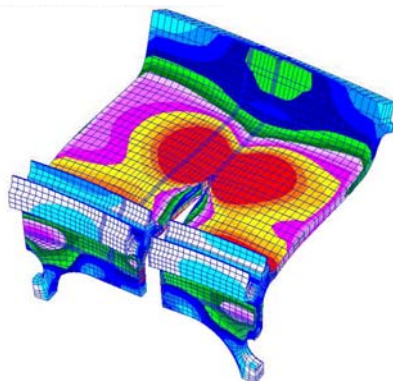


Figure 5. *Calculs des facteurs d'intensité de contraintes 3D en fond de fissure*

La connaissance de l'endommagement des pièces en contact est également essentielle. Prenons le cas des contacts entre les aubes et le disque. Sous l'effet des efforts centrifuges, le pied des aubes entre en contact avec les alvéoles du disque. Le passage des modes de roues aubagées génère des déplacements dans le pied pouvant causer l'usure des pièces, l'écaillage des revêtements ou encore l'apparition de fissures dans le disque. Les calculs éléments finis modélisant ces contacts nécessitent une bonne connaissance des lois de frottements locales (Fridrici *et al.*, 2001 ; Cheick *et al.*, 2002).

4. Conclusions. Travaux futurs

Cet article résume l'ensemble des travaux de recherche entrepris lors du projet Méca2000 qui touche à sa fin. Il sera suivi du projet MAIA visant à structurer la recherche court, moyen et long terme du groupe Snecma en mécanique des matériaux et des structures. Ce projet, en partenariat avec le CNRS et l'ONERA doit débiter en 2004. Un premier bilan sera réalisé en 2008 et conditionnera la prolongation de projet. L'objectif de ce projet est de préparer les ruptures technologiques à 10 ans des moteurs et équipements aéronautiques et spatiaux. Il regroupera autour de Snecma une vingtaine de laboratoires de recherche partenaires qui auront pour missions de proposer des avancées significatives autour des sept thèmes suivants :

- conception robuste, optimisation et recalage calculs essais ;
- dynamique vibratoire des structures, aéroélasticité et amortissement ;
- dynamique transitoire des structures, crash ;
- comportement et endommagement des composites (CMM, CMC et CMO) ;
- durée de vie des structures chaudes ;

- durée de vie des disques ;
- comportement et endommagement des pièces en contact.

5. Bibliographie

- Arnoult E., Guilloteau I., Peseux B., Bonini J., "A new contact finite element coupled with an analytical search of contact", *ECCOMAS*, Barcelona, 2000.
- Bonini J., Berthillier M., « Méthodes en dynamique non linéaire des rotors pour l'étude du comportement d'un moteur d'avion », *Revue Française de Mécanique*, Vol 3, p. 221-226, 1999.
- Burgardt B., Soria D., Soniak F., « Méthode d'insertion automatique de fissure dans un modèle EF sain : application à un composant de turbomachine », *Giens 2003*, vol. 3, p. 323-330, 2003.
- Caliez M., Feyel F., Kruch S., Chaboche J.L., « Simulation numérique de l'écaillage d'une barrière thermique », *Giens 2001, Revue européenne des éléments finis*, vol 11 n° 2-3-4/2002, p. 527-540.
- Cheick M., Quilici S., Cailletaud G., "Modeling of variable friction in contact with fretting", *29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Leeds, 2002.
- Cosme N., Chevrolet D., Bonini J., Peseux B., Cartraud P., "Prediction of transient engine loads and damage due to hollow fan blade-off", *Revue Européenne des Eléments Finis*, Vol 11, p. 651-666, 2002.
- Demilly D., Bonini J., "Non Linear analysis of rotor systems including a bearing clearance by the multiple shooting method", *ASME/DETC*, Pittsburgh, 2001.
- Desquines J., Soria D., Bassot A., Romero J.-L., "Development and validation of stress intensity factors under 2D gradients solutions", *ICAF*, Toulouse, 2001.
- Faucher V., Combescure A., "A time and space mortar method for coupling linear modal subdomains and nonlinear subdomains in explicit structural dynamics", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 (5-6), p. 509-533, 2003.
- Flouriot S., Forest S., Remy L., "Strain Localization Phenomena under Cyclic Loading : Application to Fatigue of Single Crystals", *Computational Materials Science*, vol. 26, p. 61-70, 2003.
- Foerch R., Gros V., Mounoury V., Quilici S., Cailletaud G., "Cyclic calculations and life predictions in thermomechanical fatigue using the Zmat library", *Abaqus users Conference*, Rhode Island (US) 2000.
- Fridrici V., Fouvry S., Kapsa P., "Effect of shot peening on the fretting wear of Ti-6Al-4V", *Wear of Materials Conference*, p. 642-649, 2001.
- Gallerneau F., Kruch S., "Extension of a crack growth model with fatigue-creep-environment interaction to non isothermal loading", *CAPE 2001*, Capetown, april 30-may 04, 2001.

- Galon P., Bung H., Berthillier M., Bonini J., "Sensitivity of SPH parameters on SPH/FE computation : application to bird impact on rotating fan blade analysis", *ASME Pressure Vessels Conference*, Atlanta, 2001.
- Laurant F., Defaye C., « Modélisation d'un élément utilisateur squeeze-film dans Rotor », *Conférence Utilisateur SAMCEF*, 2003.
- Masson G., Cogan S., Bouhaddi N., Lombard J.P., Bonini J. "Parameterized reduced models for efficient optimization of structural dynamic behavior", *AIAA/ASME Conference*, 2002.
- Nacivet S., Pierre C., Thouverez F., Jezequel L., "Analysis of Periodic Frictional Contact in Finite Elements Problems", *18th Conference on Mechanical Vibration and Noise, ASME*, Pittsburgh, Pennsylvania, DETC2001/VIB, 2001.
- Noels L., Stainier L., Ponthot J.P., Bonini J., "Combined implicit-explicit algorithms for non linear structural dynamics", *Revue Européenne des Eléments Finis*, Vol 11, p. 565-591, 2002.
- Poudou O., Pierre C., "Hybrid Frequency-Time Domain Methods for the Analysis of Complex Structural Systems with Dry Friction Damping", *44th AIAA/ASME Structural Dynamics and Materials Conference*, Norfolk, 2003.
- Seinturier E., Dupont C., Berthillier M., Dumas M., "A new method to predict flutter in presence of structural mistuning : application to a wide chord fan stage", *9th ISUAAT*, p. 739-749, Lyon, 2000.
- Suffis A., Combescure A., « Modèle d'endommagement à effet retard. Etude numérique et analytique de l'évolution de la longueur caractéristique », *Revue Européenne des Eléments Finis*, Hermes-Lavoisier, Vol 11, p. 593-619, 2002.
- Pichot F., Thouverez F., Jezequel L., Seinturier E., "Mistuning Parameters Identification of a Bladed Disk", *4th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Cardiff, Wales, p. 123-132, UK, 2001.