

Académie de l’Air et de l’Espace
Proposition d’attribution d’une médaille
à
Georges Cailletaud, Jean-Louis Chaboche et Frédéric Feyel
pour leur contribution à la
Modélisation Mathématique des Matériaux Aéronautiques

Résumé

Dans le domaine aéronautique comme ailleurs, la bonne connaissance du comportement des matériaux hors de leur zone élastique est la clé qui permet de mettre en place des conceptions à la fois plus économes et plus sûres pour les pièces les plus critiques travaillant à haute température. Ceci permet pour une bonne part d’ajuster au mieux les coefficients de sécurité, en remplaçant les abattements forfaitaires (marges d’ignorance plutôt que marges d’incertitude, en fait) par des simulations en prise avec la réalité des mécanismes de déformation. C’est dans ce domaine que se sont rejoints Georges Cailletaud et Jean-Louis Chaboche à la fin des années 70. Ils ont contribué depuis au développement de l’Ecole Française de Mécanique des Matériaux, dans la foulée de Paul Germain et Jean Lemaitre, et ils ont réussi à mener les modèles qu’ils ont inventés jusque dans les grands logiciels de simulation. De nombreuses contributions ont permis ces avancées, en particulier celle de Frédéric Feyel, qui est un développeur de référence du code de calcul Z-Set, actuellement utilisé par le groupe Safran comme logiciel de prototypage.

L’apport des méthodes de calcul est illustré dans un premier temps par l’exemple emblématique des aubes de turbines aéronautiques, car il s’agit de pièces critiques pour l’amélioration du rendement des moteurs. Les performances ont été considérablement améliorées au cours des dernières décennies, grâce à l’amélioration des performances de matériaux, grâce aussi à une meilleure conception mécanique qui autorise la montée en température, mais également grâce à une meilleure modélisation de l’ensemble. D’autres composants aéronautiques ont également profité des progrès réalisés. Les méthodes de calcul ont ensuite été transférées à d’autres domaines de pointe, tels que l’automobile, le nucléaire et la micro-électronique.

Un grand nombre d’ingénieurs et de chercheurs ont contribué à l’avancée du domaine de la mécanique des matériaux pour l’aéronautique en général, et au code de calcul Z-Set en particulier. Le trio Chaboche-Cailletaud-Feyel est proposé plus spécifiquement car :

- *Jean-Louis Chaboche est celui qui est au départ du mouvement, par son aura internationale. Il a été avec Jean Lemaitre le co-directeur de thèse de Georges Cailletaud ;*
- *Georges Cailletaud est l’un des premiers développeur du code Z-Set dès 1984, dans sa version fortran, et celui qui a implanté les modèles de plasticité cristalline. Il a été le directeur de thèse de Frédéric Feyel ;*
- *Frédéric Feyel est l’un des principaux artisans de la refonte du code Z-set en C++, du développement de sa version pour machine parallèle, et celui qui l’a porté jusqu’à ses utilisations industrielles.*

Jean-Louis Chaboche

Formé initialement à l’université d’Orsay, Jean-Louis Chaboche a effectué toute sa carrière à l’ONERA, qu’il a rejoint en 1972 après sa thèse de troisième cycle. Il soutient une thèse d’état à l’université Paris VI en 1978, où il pose les fondements de la mécanique des matériaux en ce qui concerne le comportement viscoplastique et les modes d’endommagement des alliages métalliques. Ses recherches ont ensuite très largement dépassé le cadre de l’Office, et lui ont permis de tisser un vaste réseau de collaborations tant dans le milieu industriel que le milieu académique. Certaines lois et démarches originales ont été largement reprises par des chercheurs américains ou japonais, en particulier dans le domaine de la Mécanique de l’Endommagement, qui est maintenant utilisée au-delà des alliages métalliques pour les bétons, les géomatériaux et les composites.

Il a eu un rôle fondamental dans la création et l’animation de groupes qui ont permis de structurer en France le domaine de la Mécanique des Matériaux : coordinateur scientifique et administratif du groupement d’intérêt scientifique « Rupture à chaud » (1980–1987), puis membre fondateur en 1988 du groupement MECAMAT (groupe français de mécanique des matériaux) qui a fait des émules sur la scène européenne et qui continue d’animer le paysage scientifique.

Il a enseigné, notamment comme chargé de cours à l’Ecole Polytechnique Féminine (1973-1976), à l’Ecole Centrale de Paris (1983-1993), à l’UTC (1984-1992), et comme professeur associé à l’université de Troyes (1996-2008). Il est co-auteur de plusieurs livres, le premier d’entre eux (avec Jean Lemaitre) ayant fait l’objet de

nombreuses rééditions. Il a obtenu la médaille d'argent du CNRS en 1998 et a été le premier récipiendaire de la médaille A.S. Khan du *Journal of Plasticity* en 2006.

Georges Cailletaud

Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris, Georges Cailletaud rejoint en 1977 pour son doctorat le groupe de Jean-Louis Chaboche au département Structures de l'ONERA où il devient ingénieur de recherche en 1979 avec pour mission de développer les liens entre les approches métallurgiques et mécaniques pour la modélisation des matériaux à microstructure instable (vieillissement, précipitation). Il obtient en 1984 une position de chercheur au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris, puis de professeur en 1993, après une thèse d'état à l'université de Paris VI en 1987 sur la modélisation micromécanique de comportement inélastique des alliages.

Il a été directeur adjoint du Centre des Matériaux, en charge de l'équipe du CNRS entre 2006 et 2012, et titulaire de la chaire SAFRAN-MINES ParisTech «Matériaux haute température» de 2015 à 2019. Ses principales contributions portent sur la modélisation des matériaux à l'échelle macro, méso et micro, les modèles étant consacrés à la plasticité cyclique, aux chargements non isothermes, aux changements de phase. Il a consacré une grande partie de son temps à l'enseignement et au développement de ressources numériques dans le domaine de la mécanique des matériaux et a encadré plus de cinquante thèses de doctorat. Il est co-auteur de deux livres de Mécanique des Matériaux. Il a reçu le prix du jeune chercheur DRET en 1988 et la médaille A.S. Khan du *Journal of Plasticity* en 2015.

Frédéric Feyel

Ingénieur Civil de l'Ecole des Mines de Paris, Frédéric Feyel a travaillé à l'Onera de 1995 à 2014. Après une thèse de doctorat sur la question de l'utilisation des grands moyens de calcul pour la mécanique multiéchelle des matériaux et structures, il continue ses travaux sur ces thématiques, appliqués aux problèmes aéronautiques. Il obtient une habilitation à diriger les recherches en 2006, et anime une équipe de recherche traitant de mécanique numérique pour les matériaux et les structures. Il est par ailleurs, depuis 2008, enseignant associé à l'Ecole Polytechnique.

Il quitte l'Onera en 2014, pour rejoindre, à sa création, SafranTech, le centre de recherche du groupe Safran. Expert émérite en mécanique, il est Directeur Modélisations et Simulations et anime un département de recherches soutenant les sociétés du groupe Safran pour leur donner accès aux meilleurs outils et méthodes de simulation pour la conception.

Quelques mots d'histoire

Les performances des composants aéronautiques ont toujours progressé grâce à ses matériaux, en particulier pendant quarante années à partir de 1950, ce qui a permis, comme le montre l'image ci-dessous, de passer des aubes polycristallines à des aubes à solidification dirigée, puis des aubes monocristallines. L'ingénierie mécanique a ensuite pris le relais, en concevant des circuits de refroidissement de plus en plus complexes et efficaces. Les constructeurs testent maintenant des barrières thermiques aptes à protéger les matériaux des gaz à très haute température.

Les trois candidats ont permis que ce processus soit pleinement efficace grâce aux modèles qu'ils ont développés, tout en mettant en place des coopérations exemplaires entre l'ONERA, le Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris et Safran. A titre de points de repère, on peut citer, pour ce qui concerne les modèles de matériaux :

- la première formulation dès 1977 de modèles de plasticité et viscoplasticité cyclique qui font maintenant référence dans le monde entier, et qui sont implantés dans pratiquement tous les codes de calcul du commerce ;
- la formulation dès 1987 de modèles de monocristaux basés sur la physique de la déformation. Ces modèles ont été repris et documentés à l'aide de nombreuses études expérimentales ;
- la formulation dès 2006 de modèles capables de représenter le comportement d'alliages à solidification dirigée (DS).

Il est remarquable de noter que les modèles de monocristaux et les modèles pour les alliages DS ont été réalisés en tenant compte de la plasticité cristalline, et que ce cadre fondateur a été très tôt porté à un haut niveau de développement à l'Ecole des Mines, puis rapidement adopté par Safran.

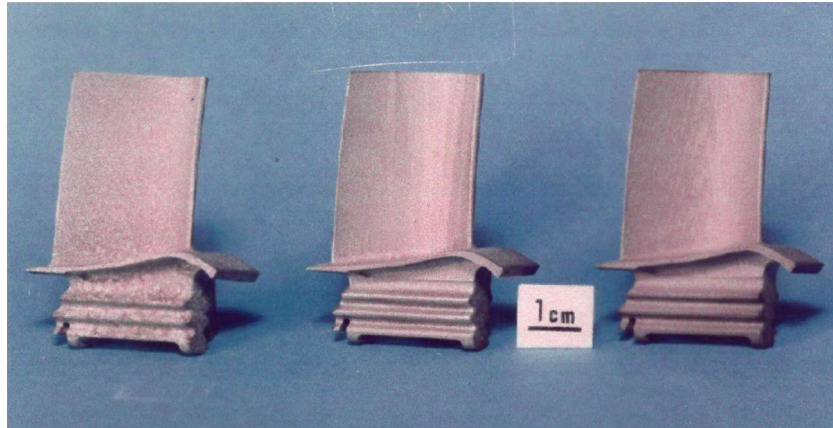
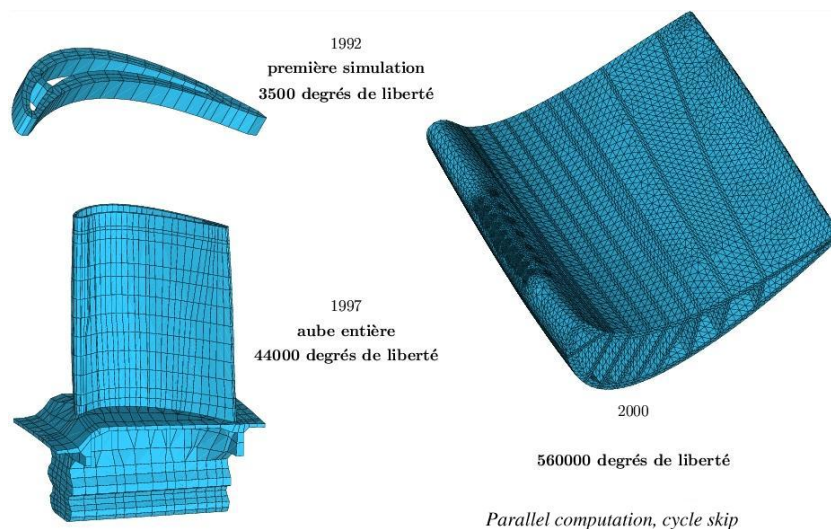


Illustration de l'évolution des alliages base nickel dans les aubes de turbine. De gauche à droite, matériau polycristallin, matériau à solidification dirigée, monocristal (doc. Safran).

Le passage du laboratoire académique au partenaire industriel s'est appuyé sur un code de calcul de structure par éléments finis, Z-Set, initialement développé au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines (depuis 1984). Bien peu de codes de calcul nés dans les années 80 en milieu académique ont survécu. C'est le cas de celui-ci, car il a été rapidement partagé avec plusieurs développeurs, notamment l'ONERA, et parce qu'il a fait l'objet de révisions importantes, permettant de l'inscrire dans une bonne dynamique d'un point de vue informatique :

- réécriture complète en C++ dès le début des années 90 ;
- développement complètement modulaire, permettant en particulier d'isoler (i) une bibliothèque de modèles matériaux (Z-Mat) qui fonctionne avec la plupart des grands codes du commerce, (ii) un module de post-traitement capable d'estimer l'endommagement des composants et leur durée de vie résiduelle (Z-Post). Ce module concentre tous les modèles de prévision de durée de vie nécessaires à Safran ;
- mise en place du parallélisme à mémoire distribuée, autorisant les calculs à très grand nombre de degrés de liberté.

L'image ci-dessous illustre la façon dont ont progressé les calculs d'aube de turbine au cours de la décennie 90. Au début de celle-ci, le concepteur devait se limiter à la simulation d'une «tranche» courante de l'aube, ce qui est devenu rapidement insuffisant en raison de l'apparition de formes de plus en plus complexes. La première aube complète simulée avec un modèle de monocristal est apparue en 1997, assez rapidement suivie par des modèles de géométrie beaucoup plus détaillée, grâce au calcul parallèle (2000).



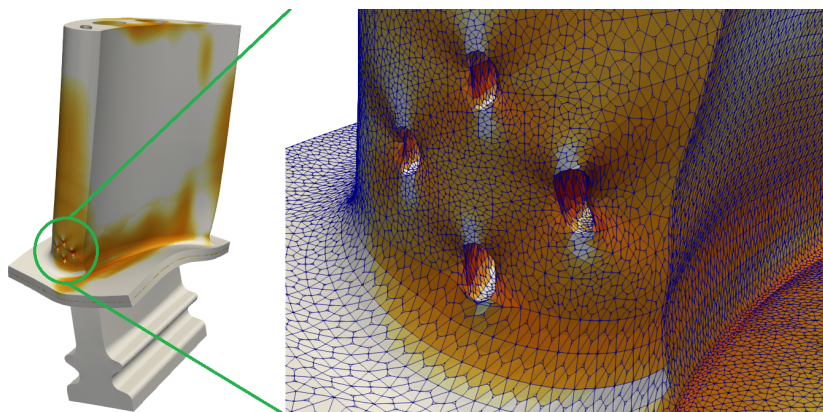
Les progrès des modèles numériques au cours de la dernière décade du XX^e siècle en termes de géométrie et discrétisation.

Une coopération exemplaire entre milieu académique et partenaire industriel

Les candidats ont su établir un climat de coopération exemplaire dans le domaine des matériaux et de la mécanique entre l'Ecole des Mines, l'ONERA et Safran. Cette situation a été rendue possible entre autres par les déplacements des personnes (depuis l'ONERA vers l'Ecole des Mines pour G. Cailletaud ; depuis l'ONERA vers Safran pour F. Feyel). Ceci a permis que les idées percolent d'un établissement à l'autre. D'une part, le milieu académique et l'ONERA sont bien conscients des impératifs industriels. D'autre part, le milieu industriel a bien compris (notamment avec la mise en route de Safran Tech en 2014) qu'il devait héberger un nombre suffisant de personnes à même d'exploiter rapidement les produits des laboratoires. Entre 1980 et aujourd'hui, on dénombre dans les branches matériaux et structures de l'ONERA et au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines plusieurs dizaines de thèses qui ont traité de problèmes directement liés à la conception de composants pour l'aéronautique, en particulier Safran.

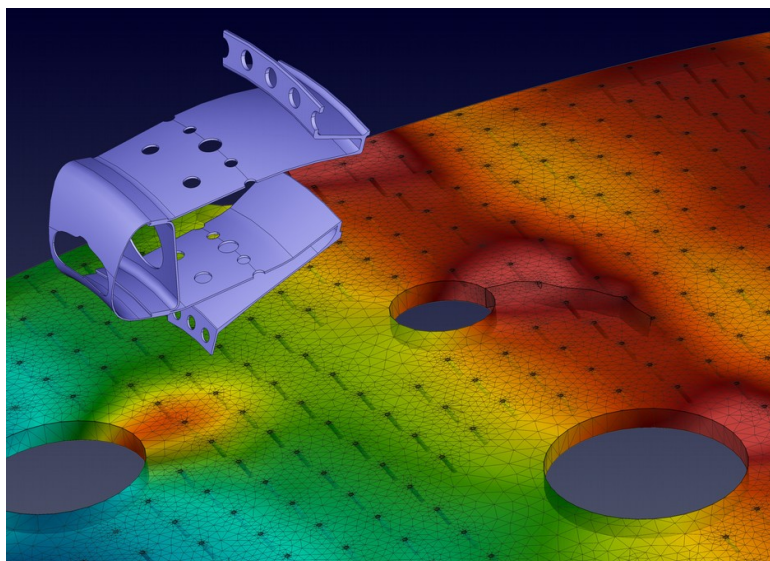
Quelques exemples de réalisations

Les cas pour lesquels les modèles de comportement et d'endommagement à haute température sont critiques se retrouvent dans les pièces chaudes, mobiles ou non, des turbines aéronautiques. Il est maintenant possible, en utilisant plusieurs millions de degrés de liberté, de tester de façon convaincante des solutions proposées par l'ingénierie pour diminuer les endommagements, comme l'illustre l'image ci-dessous pour un pied d'aube de l'étage haute pression.



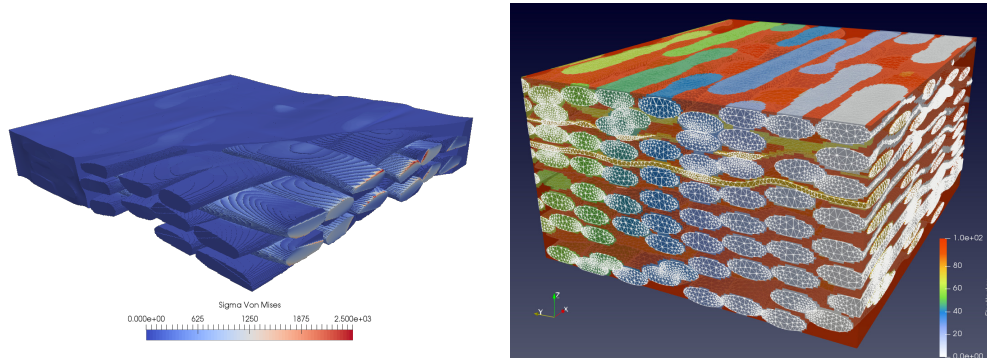
Exemple de prise en compte des perforations sur une aube de turbine modèle.

Les capacités du code sont également exploitées pour les chambres, qui peuvent être entièrement modélisées, avec une représentation explicite du système de perforation, comme le montre l'image ci-dessous.



Modèle numérique d'une chambre de combustion multiperforée.

L'approche macroscopique est souvent inadaptée pour rendre compte des phénomènes d'endommagement. C'est en particulier le cas lorsque la règle de séparabilité des échelles (supposant que l'échelle caractéristique de la microstructure est petite devant celle des gradients de contrainte et déformation) n'est pas vérifiée. L'ingénieur se heurte souvent à ce problème dans le cas des composites, Il faut alors passer par une discrétisation de la microstructure, comme le montrent les images de la planche suivante, où le maillage comporte 90 millions de degrés de liberté.



*Modélisation à l'échelle microscopique d'un composant composite tissé 3D
(90 millions de degrés de liberté)*

Chez Safran, la modélisation et la simulation de ces phénomènes complexes sont vus comme un élément différenciant. Il s'agit d'une part de contribuer à maîtriser et réduire le risque en développement, en apportant aux concepteurs des modèles de complexité croissante adaptés au déroulement du cycle de conception, et d'autre part de venir en appui, lors de crises en service, pour apporter des réponses physiquement pertinentes contribuant à remettre les produits en service. Il s'agit finalement de développer des approches pour «calculer juste, au juste coût», en prenant en compte toute la complexité du comportement mécanique.

Une large influence au-delà du milieu aéronautique

Le code de calcul Z-Set¹ codéveloppé par le Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines et l'ONERA, qui contient les développements spécifiques pour Safran, est librement à disposition du milieu universitaire, mais il est également commercialisé à l'échelle mondiale par un département de la société Transvalor, qui a été créé spécifiquement, et qui gère plus d'une centaine de licences.

Il a notamment été utilisé avec succès par Renault pour améliorer la conception des culasses de moteurs thermiques, et donc réduire la consommation. Il est utilisé dans l'automobile aux USA et en Autriche, mais aussi pour des calculs sur polymères. La structure de la librairie matériau de Z-Set a servi de modèle pour le développement de nouveaux modules de représentation du comportement dans Code_Aster, le code de calcul par éléments finis développé par EDF.

Z-Set reste à la pointe de la recherche pour ce qui concerne les comportements complexes, tels que la représentation de la rupture ductile avec des modèles d'endommagement couplés, les matériaux à microstructure (milieux de Cosserat, modèles à gradient, etc.). Au-delà des classiques problèmes thermomécaniques, il peut résoudre des problèmes multiphysiques, avec des couplages mécanique-diffusion, mécanique-électricité, mécanique-dislocation, et les méthodes de champs de phases. Il inclut également des techniques de réduction de modèles qui permettent de disposer en un temps acceptable d'un point de vue industriel de résultats de calcul avec des modèles à grand nombre de variables.

1. <http://www.zset-software.com/>