

## Lois de comportement des matériaux de chambres de combustion

Résumé de l'article qui a reçu le prix EREA 2014 de la meilleure publication scientifique  
*"Viscoplastic constitutive equations of combustion chamber materials including cyclic hardening and dynamic strain aging"*

« Lois de comportement viscoplastique des matériaux de chambres de combustion, avec prise en compte du durcissement cyclique et du vieillissement dynamique »

Jean-Louis Chaboche, Anaïs Gaubert,  
Pascale Kanouté, ONERA

Arnaud Longuet - Safran Group

Farrida Azzouz, Matthieu Mazière  
Centre des Matériaux – Mines ParisTech

Ce prix EREA a été remis à Pascale Kanouté (photo), coauteure de l'article, à Bruxelles le 9 décembre 2014.

L'EREA, association des Établissements de recherche européens en aéronautique, est une organisation à but non lucratif regroupant une douzaine d'établissements de recherche à finalité aéronautique (ex : ONERA, DLR allemand, CIRA italien, TSAGI russe...). Voir [erea.org](http://erea.org)



Les chambres de combustion des moteurs d'avion, militaires comme civils, subissent des chargements thermomécaniques cycliques très sévères à l'origine de l'apparition et de la propagation de fissures importantes. Bien que non critiques du point de vue de la sécurité de l'appareil, ces dégradations peuvent nuire au bon fonctionnement, et nécessiter des remplacements périodiques. Pour améliorer les méthodes de dimensionnement et de calcul de la durée de vie, il est indispensable de mieux décrire leurs comportements mécaniques non linéaires, en particulier sous sollicitations thermomécaniques cycliques.

La Figure 1 montre un essai mécanique et des résultats de calcul sur des structures multiperforées reproduisant les trous de refroidissement des chambres. Jusqu'à présent, les chambres de combustion n'étant pas des pièces critiques engageant la sécurité (car pièces non tournantes), les analyses de dimensionnement se limitaient à l'emploi de lois de comportement assez simples. Aujourd'hui les objectifs de fiabilité et de réduction des coûts nécessitent des évaluations poussées et des méthodes de dimensionnement plus réalistes.



Figure 1 : en haut, l'éprouvette multiperforée sollicitée en traction-compression isotherme – en bas, résultats du calcul correspondant

Une étude a donc été menée sur ce sujet dans le cadre du PRC (Programme de Recherches Concertées) « Durée de Vie des Structures Chaudes », sur la période 2009-2013, programme

financé par la DPAC (Direction des Programmes de l'Aviation Civile), en regroupant les compétences de Safran Snecma, Safran Turboméca, l'Onera, et d'un certain nombre de laboratoires académiques dont le Centre des Matériaux de Mines ParisTech.

Comme l'ont montré les essais mécaniques réalisés par Snecma et DGA Techniques Aéronautiques (ex CEAT), le comportement des matériaux pour chambres (en l'occurrence Ha 188 ou Ha 230, base Cobalt, et Hastelloy X, base Nickel), s'avère très complexe, combinant et faisant interagir des phénomènes tels que :

- durcissement cyclique très prononcé, sur un très grand nombre de cycles, dans la gamme de température allant de 300 à 700°C,
- avec influence de l'amplitude de déformation (effet d'histoire ou de mémoire du chargement antérieur),
- effet inverse de la vitesse dans le même domaine de température, conduisant à des instabilités de type PLC (Portevin-Le Châtelier),
- effet de viscosité normal à haute température mais accompagné d'effets de restauration statique, à prendre en compte lors des maintiens de longue durée.

Depuis longtemps l'ONERA développe des lois de comportement de viscoplasticité cyclique, en suivant une approche macroscopique, par une théorie dite « unifiée », et en utilisant des combinaisons variées de ce que l'on appelle écrouissage isotrope et écrouissage cinématique. Celles-ci ont été appliquées depuis dans de nombreux domaines, aussi bien sur des matériaux et pièces de turbomachines, dans certaines applications spatiales, que dans le nucléaire ou même dans l'automobile. Ce type de formalisme a été réutilisé par de nombreuses équipes dans le monde, et les lois correspondantes sont introduites dans la plupart des grands codes industriels.

Cependant aucune tentative n'avait été faite jusqu'à présent sur les matériaux utilisés dans les chambres de combustion. L'objet de l'article a donc été de proposer des extensions des formalismes précédents et d'y incorporer tout ce qui est nécessaire pour décrire l'ensemble des phénomènes listés ci-dessus, et d'exploiter cette nouvelle loi de comportement sur l'alliage base Cobalt Ha 188.

En particulier, afin de modéliser l'effet inverse de la vitesse on s'est appuyé sur des modèles de vieillissement dynamique issus de la physique (décrivant les effets de traînage collectif des dislocations par les atomes en solution solide). Initiés par McCormick, Kubin et Estrin (on retrouve l'ONERA/LEM en la personne de Ladislav Kubin), ceux-ci ont été exploités depuis quelques années pour les sollicitations monotones par Matthieu Mazière du Centre des Matériaux de Mines-ParisTech, entre autres dans le cadre de la résistance de disques de turbocompresseur de Turboméca.

L'une des originalités du modèle présenté dans l'article a donc été de mettre en œuvre des approches similaires du vieillissement dynamique dans le contexte de lois de comportement cycliques (avec écrouissage multi-cinématique et restauration statique associée). Ceci est réalisé par combinaison avec des effets de durcissement cyclique à mémoire, qui traduisent l'augmentation de la densité de dislocations, en interactions avec les effets du vieillissement dynamique.

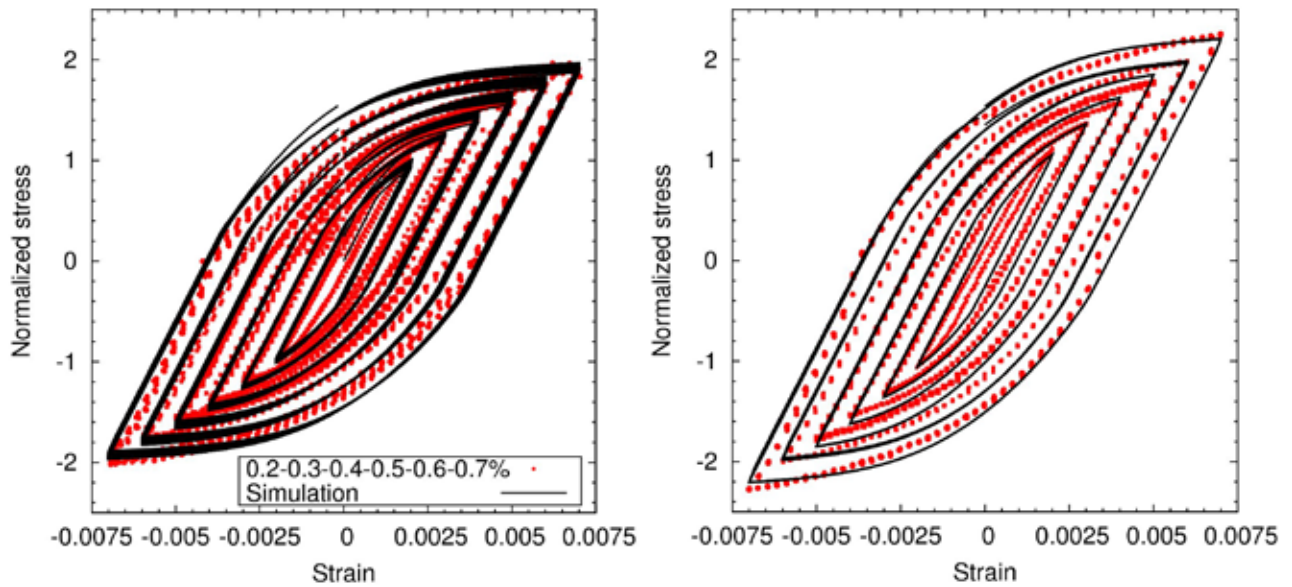


Figure 2 : comparaison calcul – essai pour des chargements cycliques incrémentaux, à deux vitesses de déformation  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (à gauche),  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (à droite)

La figure 2 illustre à la fois les résultats expérimentaux et la capacité du modèle à les décrire correctement. Il s'agit d'essais cycliques en déformation imposée (en abscisse), avec des cycles de niveaux croissant. La réponse est en contrainte (axe vertical). A gauche on voit la réponse pour une vitesse de déformation élevée ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), à droite pour une vitesse faible ( $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Il faut noter que pour un matériau en fonctionnement classique, sans vieillissement dynamique, l'ordre serait totalement inversé, avec une résistance plus forte à vitesse élevée.

La figure 3 illustre le durcissement cyclique, par la contrainte maximale du cycle en fonction du nombre de cycles successifs appliqués, le durcissement se prolongeant de façon inhabituelle (sur plus de 50000 cycles pour deux des essais), ceci pour des états initiaux différents (effets du forgeage initial).

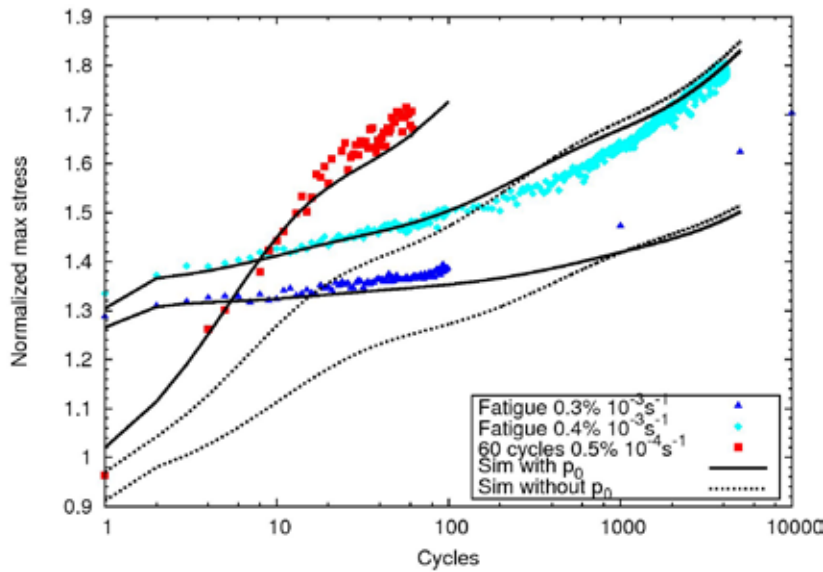


Figure 3 : comparaisons calcul-essai pour des chargements cycliques continus sur un grand nombre de cycles. Deux états initiaux sont simulés par un effet de déformation plastique cumulée initiale.

Ainsi, la collaboration permanente entre l'Onera, les industriels des turbomachines et le Centre des Matériaux a permis d'aboutir assez rapidement à une nouvelle formulation de loi de comportement, plus réaliste et décrivant assez finement l'ensemble des phénomènes. Celle-ci est évidemment introduite dans le code Z-set/Zébulon (développé conjointement par Mines ParisTech et l'Onera), ainsi que dans les codes industriels ANSYS et Abaqus, grâce aux interfaces Z-ansys et Z-aba. Le déploiement industriel de ces outils est en cours.

Il est intéressant de noter ici l'apport que peut avoir un PRC tel que celui qui a soutenu, parmi de nombreux autres, le sujet de recherche ayant conduit à l'article primé par l'EREA. Bien que portant sur des besoins industriels assez clairement identifiés, des recherches amont permettent, de répondre à ces besoins de façon utile, tout en donnant une latitude très ouverte pour publier. Ce genre de Programme, qui finance à la fois les partenaires industriels et les équipes académiques serait à promouvoir dans d'autres domaines.

#### Référence de l'article primé :

CHABOCHE, J.-L., GAUBERT, A., KANOUTÉ, P., LONGUET, A., AZZOUZ, F., MAZIÈRE, M., *Viscoplastic constitutive equations of combustion chamber materials including cyclic hardening and dynamic strain aging*, International Journal of Plasticity, Vol. 46, pp. 1-22 (2013)