

04 AVR 2018


Article de recherche

MATÉRIAUX ET FABRICATION

# Une micromachine de traction à chaud pour l'aéronautique

 James William Chuitcheu

 Damien Texier

 Philippe Bocher



L'image d'en-tête a été achetée sur Istock.com. Des droits d'auteur s'appliquent.

#### RÉSUMÉ:

L'article présente de façon sommaire les résultats obtenus à la suite de la mise en application de la méthodologie de conception. Il fait une brève revue de l'instrumentation (pour la mesure de la déformation locale et la température sans contact sur le corps de l'échantillon) utilisée sur la machine à haute température, tout en mentionnant leurs limites et présente la solution finale. L'article présente la conception réalisée dans le cadre de cette recherche suivie de quelques validations numériques. Et pour terminer il montre les retombées technologiques de la mise en œuvre de cette conception et ces différents domaines d'utilisation.

## Note de l'éditeur

Cet article fait suite à *Déterminer les propriétés des matériaux à haute température*. Il présente la micromachine conçue pour caractériser la réponse mécanique des matériaux à des températures élevées.

## Description sommaire de la micromachine

À la suite de la mise en application de la méthodologie présentée, une machine préliminaire a pu être conçue, répondant aux enjeux énoncés précédemment. La solution proposée n'est que conceptuelle pour l'instant. Elle est constituée d'une grande enceinte cylindrique étanche permettant de faire les essais sous atmosphère contrôlée. À l'intérieur de cette enceinte, un four semi-elliptique à lampes infrarouge permet la montée en température des échantillons. Un actionneur mécanique (pas pris en compte lors du design) situé hors de l'enceinte étanche permet l'application d'un effort sur la ligne de traction au moyen d'un passage étanche pour réaliser les essais de traction. La solution de chauffe choisie fonctionne sur tous les types de matériaux (conducteurs, isolants, etc.) et dans toutes les atmosphères (gaz, vide, air), et permet aussi une réactivité thermique conséquente, nécessaire pour réaliser du cyclage thermique. La micromachine préliminaire conçue dans le cadre de cette recherche intègre les développements scientifiques et technologiques de travaux précédents [1, 5, 6].

## Instrumentation : un tour d'horizon



Figure 1 Pied à coulisse

En ce qui concerne le choix de l'instrumentation pour la mesure de la déformation locale, notons que depuis une vingtaine d'années, les techniques de mesure de champ cinématique se sont développées suivant les besoins naissants de mesure d'hétérogénéités de déformation dans les structures. Les techniques anciennes d'extensiométrie, essentiellement les jauges de déformation, fournissent uniquement une mesure en un point et ne permettent pas la détermination d'un champ à l'échelle de la structure sans la disposition d'une multitude de capteurs de mesure. Les nouvelles techniques ont permis la répartition des déformations en fonction de la géométrie des pièces et de guider la conception de leur forme, l'optimisant du point de vue de l'épaisseur [10]. Les champs locaux expérimentaux déterminés par ces méthodes ont servi de base pour valider les simulations numériques de prévisions, telles que les calculs par éléments finis. Le fait que ces techniques reposent sur le principe « sans contact avec l'échantillon » a également motivé leurs développements. En effet, l'absence de contact avec l'échantillon observé permet d'éviter les interactions mécaniques et thermiques de l'appareil de mesure avec la pièce, pouvant modifier la mesure, en particulier pour les matériaux ultraminces.

Plus tardivement, ces techniques ont été créées d'une part, à une échelle plus fine que celle de la structure (quelques dizaines de centimètres) pour l'étude du comportement mécanique de matériaux hétérogènes comme les bétons et les composites à fibres, d'autre part, pour l'étude de la répartition de la déformation lors de la mise en forme par emboutissage. Plus récemment, avec l'amélioration des performances des simulations numériques et le raffinement des lois de comportement, de nouvelles techniques sont apparues, destinées à l'étude microscopique du comportement des matériaux métalliques [11, 12]. On peut citer en particulier les études sur les

mécanismes de fissuration. C'est pourquoi dans l'état de l'art actuel, on rencontre beaucoup de techniques différentes qui ont été développées pour des applications très précises. Elles utilisent des moyens d'investigation différents (laser, lumière blanche, caméra, microscopie optique...) et leur mesure s'appuie sur des principes physiques variés (interférométrie, imagerie optique...). On dispose de techniques présentant des performances diverses, particulièrement sur le plan de la précision de la mesure locale et la taille de la zone analysée.

## Technique d'instrumentation retenue pour la micromachine



Figure 2 Exemple de mesure de température sans contact

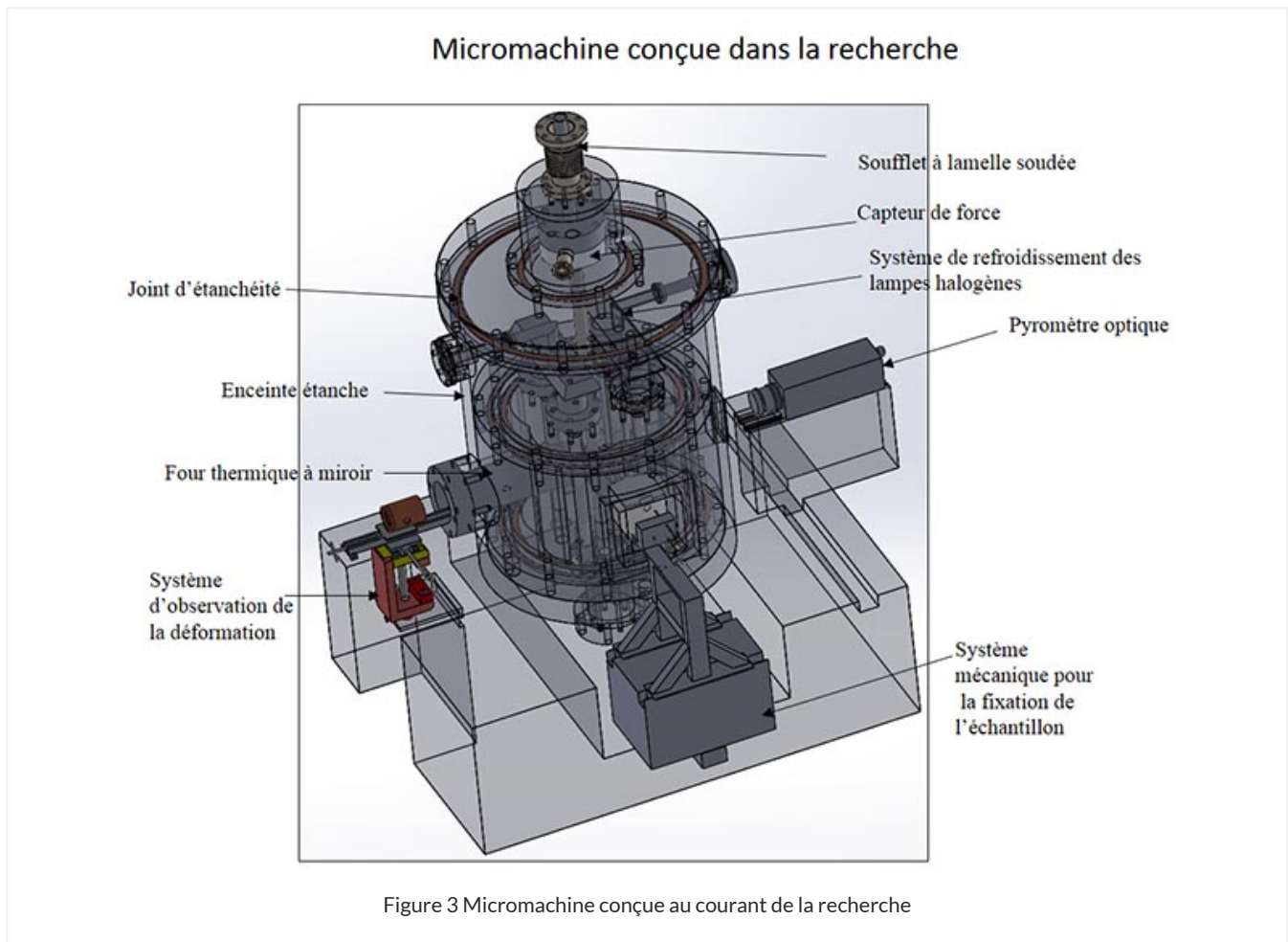
On classe l'ensemble de ces techniques en quatre grandes classes (les méthodes utilisant la photoélasticité les techniques de moiré, les méthodes d'interférométrie holographique, les méthodes d'analyse d'images). Parmi ces techniques, la photoélasticité et les méthodes d'interférométrie holographique ne sont pas applicables dans notre



contexte. Leur échelle d'investigation, de l'ordre du millimètre, est trop grossière. De plus, la photoélasticité nécessite de déposer à la surface des échantillons un film photoélastique et les méthodes d'interférométrie holographique utilisent, quant à elles, du matériel optique et un laser. De tels dispositifs sont peu compatibles avec une observation de la microstructure au cours de l'essai mécanique.

Les deux autres techniques peuvent être utilisées avec différents moyens d'observation : microscopie optique et laser, microscope électronique à balayage électronique, etc. Les méthodes de moiré nécessitent l'utilisation de systèmes particuliers dont les coûts sont hors de portée pour une petite micromachine comme la nôtre afin d'atteindre une très bonne précision. Pour cela, nous rejetons donc cette technique. Les techniques d'analyse d'images sont les techniques les plus appropriées à la mesure des déformations locales couplée aux techniques complémentaires d'observation optique et électronique par suivi de marqueurs. Dès lors, notre choix se tourne vers la technique de corrélation d'images, plus adaptée à nos besoins actuels. Elle permet un dépouillement automatique dont la rapidité est compatible avec les moyens informatiques actuels. Elle assure également une précision subpixelique (en dessous du pixel) qui permet des mesures de déplacement en deçà de la résolution même des images numériques.

Le fait que cette technique soit capable d'étendre son application à la mesure de la composante hors plan du déplacement par stéréocorrélation d'images, pour une meilleure évaluation des composantes planes du tenseur des déformations, constitue un argument supplémentaire justifiant ce choix. Il est à noter que pour cette recherche, nous avons conçu un mécanisme de déplacement en translation suivant les trois axes ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) pour déplacer la lentille du microscope afin de faciliter la focalisation et le suivi de la zone observée sur l'échantillon. En ce qui concerne la cartographie thermique, il existe plusieurs techniques de mesure de température, par contact et sans contact. Pour notre recherche, nous sommes allés vers des techniques sans contact pour les raisons évoquées plus haut, et nous avons utilisé un pyromètre optique en complément de thermocouples (type K) pour la régulation de la température [1, 4].



Des simulations numériques des différentes sections de la micromachine ont été réalisées dans le but de permettre un dimensionnement adapté du banc d'essai mécanique.

## Conclusion

Notre objectif était de proposer une enceinte polyvalente et adaptable sur tout type de bancs d'essai mécanique commercial. Pour rendre la micromachine qui fait l'objet de cette recherche fonctionnelle, il faut également choisir et ajouter au besoin tous les composants nécessaires pour la faire fonctionner (pompe à eau glycolée, thermocouples K, jauges de vide, détecteurs de pression de gaz, pompe à argon, souffleurs à air, feuilles d'aluminium pour les essais avec gaz corrosifs ou oxydants, appareillage pour la régulation thermique de la température de l'échantillon, appareil de mesure de la déformation et de la température, passages étanches : jauges de vide, thermocouples, détecteurs de pression de gaz, entrée et sortie de gaz. Les étapes suivantes seraient de passer à la phase de dessin de définition des pièces, de les faire usiner et de passer finalement à l'assemblage proprement dit de la micromachine afin de tester ses performances.

Cette micromachine permettrait de répondre à des problématiques industrielles de caractérisation de matériaux présents dans de nombreux secteurs industriels (problématique de réactivité de surface à haute température, matériaux revêtus, irradiés, etc.). Qui plus est, ce banc d'essai répondrait également aux besoins des recherches fondamentales portant sur les interactions environnement/propriétés mécaniques, essais de surface libre/interface, etc.



**James William Chuitcheu**

[Profil de l'auteur\(e\)](#)

James William Chuitcheu est étudiant à la maîtrise au Département de génie mécanique et assistant d'enseignement à l'ÉTS.

**Programme :** [Génie mécanique](#)

**Laboratoires de recherche :** [LOPFA – Laboratoire d'optimisation des procédés de fabrication en aéronautique](#)  
[DYNAMO – Équipe de recherche en dynamique des machines, des structures et des procédés](#)



**Damien Texier**

[Profil de l'auteur\(e\)](#)

Damien Texier est chargé de recherche CNRS à l'Institut Clément Ader. Il a été postdoctorant et associé de recherche à l'ÉTS. Il travaille sur les matériaux hétérogènes, les matériaux à gradients et les produits minces.

**Programme :** [Génie mécanique](#)

**Laboratoires de recherche :** [LOPFA – Laboratoire d'optimisation des procédés de fabrication en aéronautique](#)



Philippe Bocher est professeur au Département de génie mécanique de l'ÉTS. Ses recherches portent sur les procédés de fabrication, l'aérospatiale, la caractérisation des produits manufacturés et l'amélioration des propriétés mécaniques.

**Programme :** Génie mécanique Génie aérospatial

**Laboratoires de recherche :** DYNAMO – Équipe de recherche en dynamique des machines, des structures et des procédés LOPFA – Laboratoire d'optimisation des procédés de fabrication en aéronautique

---

**Laboratoires de recherche :** LOPFA – Laboratoire d'optimisation des procédés de fabrication en aéronautique

**Domaines d'expertise :** Caractérisation des matériaux Aérospatiale

#### Références

- [1] Alam, Z., Eastman, D., Jo, M., & Hemker, K. (2016). Development of a High-Temperature Tensile Tester for Micromechanical Characterization of Materials Supporting Meso-Scale ICME Models. JOM, 68(11), 2754-2760.
- [2] Aeronews, 2015, Quelle est la température d'un réacteur d'avion de chasse ? «<http://www.aeronewstv.com/fr/lifestyle/a-votre-avis/2800-quelle-est-la-temperature-d-un-reacteur-d-avion-de-chasse.html> » (Consulté le 12/12/2017).
- [3] Wilkinson, C., & Gostelow, C. (1994). High Temperature Cyclic Behaviour of Aerospace Materials: Room Temperature Validation Tests of Ti-6Al-4V. Retrieved from
- [4] Zupan, M., Hayden, M. J., Boehlert, C., & Hemker, K. (2001). Development of high-temperature microsample testing. Experimental mechanics, 41(3), 242-247.
- [5] Hemker, K., & Sharpe Jr, W. (2007). Microscale characterization of mechanical properties. Annu. Rev. Mater. Res., 37, 93-126.
- [6] Texier, D., Monceau, D., Salabura, J., Mainguy, R., & Andrieu, E. (2016). Micromechanical testing of ultrathin layered material specimens at elevated temperature. Materials at High Temperatures, 33(4-5), 325-337.
- [7] Texier, D. (2013). Mesure et Evolution des gradients de propriétés mécaniques dans le système superalliage à base de nickel MC2 revêtus MCrAlY. École Doctorale Sciences de la Matière (Toulouse); 154236152,
- [8] Texier, D., Monceau, D., Crabos, F., & Andrieu, E. (2017). Tensile properties of a non-line-of-sight processed  $\beta$ - $\gamma$ - $\gamma'$  MCrAlY coating at high temperature. Surface and Coatings Technology, 326, 28-36.

[9] Texier, D., Monceau, D., Hervier, Z., & Andrieu, E. (2016). Effect of interdiffusion on mechanical and thermal expansion properties at high temperature of a MCrAlY coated Ni-based superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 307, 81-90.

[10] Doumalin, P. (2000). Microextensométrie locale par corrélation d'images numériques. Ecole Polytechnique X,

[11] Stinville, J., Echlin, M., Texier, D., Bridier, F., Bocher, P., & Pollock, T. (2016). Sub-grain scale digital image correlation by electron microscopy for polycrystalline materials during elastic and plastic deformation. *Experimental mechanics*, 56(2), 197-216.

[12] Stinville, J.-C., Lenthe, W. C., Echlin, M. P., Callahan, P. G., Texier, D., & Pollock, T. M. (2017). Microstructural statistics for fatigue crack initiation in polycrystalline nickel-base superalloys. *International Journal of Fracture*, 208(1-2), 221-240.

### Références images

Les figures 1 et 2 ont été achetées sur Istock.com. Des droits d'auteur s'appliquent.

La figure 3 provient des auteurs. La Licence CC de Substance s'applique.