

Matériaux en conditions thermiques extrêmes

Jonathan Cormier, Florent Mauget, Florence Hamon, José Mendez, Patrick Villechaise, André Dragon.

Contact : jonathan.cormier@ensma.fr

Partenariats Industriels : SAFRAN (Safran Tech, Snecma, Turbomeca), Cannon Muskegon Corporation US, Aubert et Duval – Groupe Eramet, DCNS

Partenariats Académiques : Université de Californie – Santa Barbara, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal (Canada), Université Texas A&M, Mines ParisTech – Centre des Matériaux, ONERA – DMSM, ENSAM – PIMM, UT Belfort Montbéliard, Insitut Jean Lamour – Mines de Nancy, Mines ParisTech – CEMEF, LMT Cachan.

Principaux Programmes : PRC Structures Chaudes (2009-2014) ; ANR Arcole (2013 -) ; Programme Cascade (2015 -)

Les travaux développés dans cette thématique concernent principalement la **résistance mécanique et la durabilité des superalliages base nickel** élaborés par voie fonderie (monocristalline ou conventionnelle) et de leurs revêtements (**barrières thermiques**, barrières de diffusion) ainsi que la résistance à l'**ablation aérothermique** des composites (CMO, CMC) utilisés comme protection thermique.

Ces activités de recherche s'appuient sur l'emploi de moyens d'essais lourds où les matériaux sont sollicités en conditions proches de celles rencontrées en service. Ainsi, l'ablation des matériaux composites a été étudiée soit en condition thermique (exposition sous torche oxy-acétylène) soit en conditions aérothermiques au **banc Martel**, sous un flux gazeux s'écoulant à $M = 3$ et à une température de 2200°C (Fig. 1).

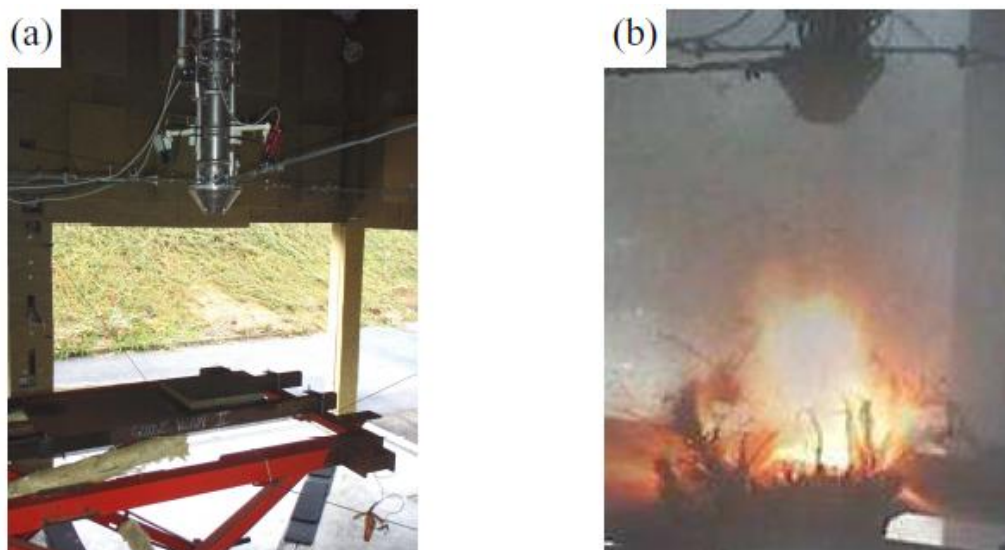


Fig. 1. Configuration ablation sur le banc MARTEL (a) et exemple de délaminage explosif en cours d'ablation aérothermique (b).

En ce qui concerne l'étude de la durabilité des superalliages et des revêtements de type barrières thermiques (BT), l'Institut Pprime s'est doté récemment d'un moyen d'essai unique en Europe, intégralement conçu en interne. Il s'agit du **banc MAATRE** (Fig. 2) où des échantillons immergés dans un écoulement gazeux chaud peuvent être testés en fluage, traction, fatigue, fatigue thermomécanique. Il est de plus possible de refroidir ces échantillons par un écoulement gazeux interne, faisant de chaque échantillon une structure à part entière de part la complexité spatiale et temporelle des champs thermiques et mécaniques. Des mesures de température et de déformation ont été spécifiquement développées pour caractériser au mieux ces essais en conditions extrêmes où les températures des gaz chauds peuvent atteindre 1650°C .

Les principaux verrous associés à ces caractérisations aux températures extrêmes sont associés aux cinétiques extrêmement rapides des processus de déformation, d'évolution microstructurale et d'endommagement, qui sont compris typiquement entre quelques secondes (thermo-oxydation et pyrolyse dans le cas de l'ablation) et

quelques dizaines de minutes (dissolution de phase durcissante dans les superalliages). Ainsi, la réalisation d'**essais mécaniques à chaud sous faisceau synchrotron** (essais de DRX) permet de caractériser les évolutions microstructurales de manière quasi-instantanée en s'affranchissant des possibles évolutions de microstructures intervenant lors des phases de refroidissement.

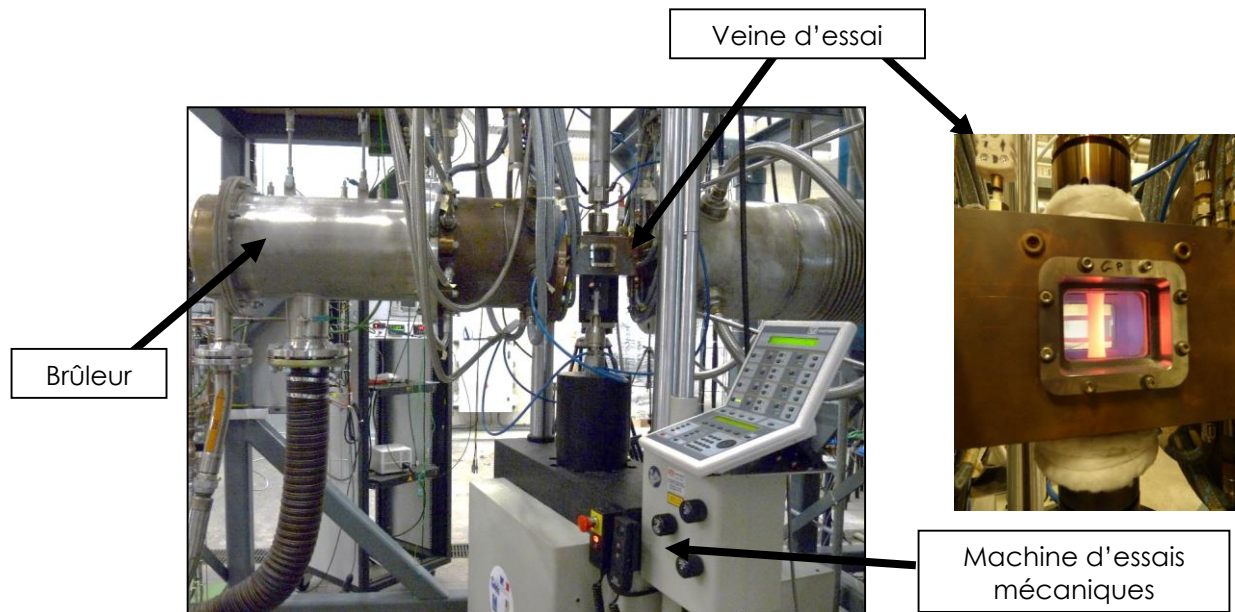


Fig. 2. Vue globale du banc MAATRE et vue sur la veine d'essai lors d'un essai de fatigue thermomécanique sur un échantillon de superalliage monocristallin revêtu d'une barrière thermique.

Les principaux résultats obtenus lors de ces activités ont été les suivants :

1. Mise en évidence d'un couplage aérothermomécanique dans les mécanismes d'ablation des composites CMO et à matrice géopolymère.
2. Caractérisation et modélisation des **cinétiques de dissolution de la phase durcissante γ'** dans les superalliages monocristallins et de l'impact de la déformation plastique sur ces cinétiques.
3. Mise en évidence de l'impact bénéfique du vieillissement microstructural des sous-couches d'accroche sur la résistance à l'écaillage des revêtements BT sous sollicitations de fatigue oligocyclique et de fatigue thermomécanique.
4. Mise en évidence de l'impact néfaste de la mise en radeaux de la phase γ' sur les propriétés en **fluage anisotherme** des superalliages monocristallins.
5. Mise en évidence du **rôle de la reprecipitation γ' tertiaire** sur les propriétés mécaniques en fluage et fatigue-temps de maintien des superalliages base nickel.
6. Développement, identification et validation du code de calcul **Polystar** permettant le dimensionnement des aubes de turbines HP des turbines à gaz lors de cycles de certification.
7. Caractérisation de l'**impact des procédés de fonderie et de forgeage** sur la durabilité en fatigue et en fluage des superalliages monocristallins et forgés.

Thèses soutenues :

1. Thèse Julien Beudet, 2011 : « Caractérisations à très hautes températures de protections thermiques sous impact normal d'un jet chaud supersonique : influence du couplage aérothermique et des propriétés matériaux sur la tenue à l'ablation »
2. Thèse Jean-Briac le Graverend, 2013 : « Etude et modélisation des effets d'incursion à très haute température sur le comportement mécanique d'un superalliage monocristallin pour aube de turbine »
3. Thèse Julien Ghighi, 2013 : « Modélisation du fluage des superalliages monocristallins : effet d'anisotropie et de microstructure »
4. Thèse de Rémi Giraud, 2014 : « Influence de l'histoire thermique sur les propriétés mécaniques à haute et très haute température du superalliage monocristallin CMSX-4® »
5. Thèse de Fanny Riallant, 2014 : « Modes d'endommagement à chaud du système AM1/NiAlPt/BT EBPVD : impact de la plasticité et interactions revêtement – substrat »

Quelques publications : [1-33]

1. Cormier, J., X. Milhet, and J. Mendez, *Effect of very high temperature short exposures on the dissolution of the γ' phase in single crystal MC2 superalloy*. Journal of Materials Science, 2007. **42**(18): p. 7780-7786.
2. Cormier, J., X. Milhet, and J. Mendez, *Non-isothermal creep at very high temperature of the Nickel based single crystal superalloy MC2*. Acta Materialia, 2007. **55**(18): p. 6250-6259.
3. Cormier, J., X. Milhet, J.-L. Champion, and J. Mendez, *Simulation of very high temperature overheating during isothermal creep of single crystal Ni-base superalloy*. Advanced Engineering Materials, 2008. **10**(1-2): p. 56-61.
4. Cormier, J., X. Milhet, and J. Mendez, *Anisothermal Creep at very high temperature of a second generation Ni-based single crystal superalloy*. Materials Science and Engineering A, 2008. **483-484**: p. 594-597.
5. Cormier, J., X. Milhet, F. Vogel, and J. Mendez. *Non-isothermal creep behavior of a second generation Ni-based single crystal superalloy: experimental characterization and modeling*. in SUPERALLOYS 2008. 2008. Seven Springs, Champion, PA, USA.
6. Cormier, J., P. Villechaise, and X. Milhet, *γ' -phase morphology of Ni-based single crystal superalloys as an indicator of the stress concentration in the vicinity of pores*. Materials Science and Engineering, 2009. **A 501**(1-2): p. 61-69.
7. Cormier, J. and G. Cailletaud, *Constitutive modeling of the creep behavior of single crystal superalloys under non-isothermal conditions inducing phase transformations*. Materials Science and Engineering, 2010. **A527**(23): p. 6300-6312.
8. Cormier, J., M. Jouiad, F. Hamon, P. Villechaise, and X. Milhet, *Very high temperature creep behavior of a single crystal Ni-based superalloy under complex thermal cycling conditions*. Philosophical Magazine Letters, 2010. **90**(8): p. 611-620.
9. le Graverend, J.-B., J. Cormier, M. Jouiad, F. Gallerneau, P. Paulmier, and F. Hamon, *Effect of fine γ' precipitation on non-isothermal creep and creep-fatigue behaviour of nickel base superalloy MC2*. Materials Science and Engineering, 2010. **A527**(20): p. 5295-5302.
10. Milhet, X., J. Cormier, and A. Organista, *On the role of the internal stress during non-isothermal creep life of a first generation Nickel based single crystal superalloy*. Materials Science and Engineering, 2010. **A527**(9): p. 2280-2288.
11. Beaudet, J., J. Cormier, A. Dragon, M. Rollin, and G. Benoit, *Ablation properties of C fibers and SiC fibers reinforced glass ceramic matrix composites upon oxyacetylene torch exposure*. Materials Science and Applications, 2011. **2**(10): p. 1399-1406.
12. le Graverend, J.-B., J. Cormier, P. Caron, S. Kruch, F. Gallerneau, and J. Mendez, *Numerical simulation of γ/γ' microstructural evolutions induced by TCP-phase in the MC2 nickel base single crystal superalloy*. Materials Science and Engineering, 2011. **A 528**(6): p. 2620-2634.
13. le Graverend, J.-B., J. Cormier, F. Gallerneau, and P. Paulmier, *Dissolution of fine γ' precipitates of MC2 Ni-based single-crystal superalloy in creep-fatigue regime*. Advanced Materials Research, 2011. **278**: p. 31-36.
14. Ghighi, J., J. Cormier, E. Ostoja-Kuczynski, J. Mendez, G. Cailletaud, and F. Azzouz, *A Microstructure Sensitive Approach for the Prediction of the Creep Behaviour and Life under Complex Loading Paths*. Technische Mechanik, 2012. **32**(2-5): p. 205-220.
15. Giraud, R., J. Cormier, Z. Hervier, D. Bertheau, K. Harris, J. Wahl, X. Milhet, J. Mendez, and A. Organista. *Effect of the prior microstructure degradation on the high temperature/low stress non-isothermal creep behavior of CMSX-4® Ni-based single crystal superalloy*. in Superalloys 2012. 2012. Seven Springs, PA, USA: TMS.
16. le Graverend, J.-B., J. Cormier, S. Kruch, F. Gallerneau, and J. Mendez, *Microstructural parameters controlling high temperature creep life of the nickel base single crystal superalloy MC2*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012. **43A**: p. 3988-3997.
17. le Graverend, J.-B., L. Dirand, A. Jacques, J. Cormier, O. Ferry, T. Schenk, F. Gallerneau, S. Kruch, and J. Mendez, *In situ measurement of the γ/γ' lattice mismatch evolution of a nickel-based single crystal superalloy during non-isothermal very high temperature creep experiments*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012. **43A**: p. 3946-3951.
18. Jouiad, M., J. Ghighi, J. Cormier, E. Ostoja-Kuczynski, G. Lubineau, and J. Mendez, *3D imaging using X-Ray tomography and SEM combined FIB to study non isothermal creep damage of (111) oriented samples of γ/γ' nickel base single crystal superalloy MC2*. Materials Science Forum, 2012. **706-709**: p. 2400-2405.
19. Mauget, F., D. Marchand, M. Morisset, D. Bertheau, J. Cormier, and J. Mendez, *Nouveau moyen de caractérisation des matériaux: Conditions extrêmes et sollicitations thermomécaniques proches des conditions d'usages*. Matériaux & Techniques, 2012. **6/7**: p. 541-545.

20. Milhet, X., M. Arnoux, J. Cormier, J. Mendez, and C. Tromas, *On the influence of the dendritic structure on the creep behavior of a Re-containing superalloy at high temperature/low stress*. Materials Science and Engineering, 2012. **A546**: p. 139-145.
21. Dirand, L., J. Cormier, A. Jacques, J.-P. Chateau-Cornu, T. Schenk, O. Ferry, and P. Bastie, *Measurement of the effective γ/γ' lattice mismatch during high temperature creep of Ni-based single crystal superalloy*. Materials Characterization, 2013. **77**: p. 32-46.
22. Giraud, R., Z. Hervier, J. Cormier, G. Saint-Martin, F. Hamon, X. Milhet, and J. Mendez, *Strain effect on the γ dissolution at very high temperatures of a nickel-based single crystal superalloy*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013. **44A**: p. 131-146.
23. le Graverend, J.-B., J. Cormier, S. Kruch, F. Gallerneau, and J. Mendez, *A strain rate sensitive formulation to account for the effect of γ' rafting on the high temperature mechanical properties of Ni-based single crystal superalloys*, in *Advanced Materials Modelling for Structures* H. Altenbach and S. Kruch, Editors. 2013, Springer. p. 189-199
24. le Graverend, J.-B., J. Cormier, F. Gallerneau, S. Kruch, and J. Mendez, *Highly non-linear creep life induced by a short close γ' -solvus overheating and a prior microstructure degradation on a nickel-based single crystal superalloy*. Materials and Design, 2014. **56**(April): p. 990-997.
25. le Graverend, J.-B., J. Cormier, F. Gallerneau, P. Villechaise, S. Kruch, and J. Mendez, *A microstructure-sensitive constitutive modeling of the inelastic behavior of single crystal nickelbased superalloys at very high temperature*. International Journal of Plasticity, 2014. **59**: p. 55-83.
26. Masoumi, F., M. Jahazi, J. Cormier, and D. Shahriari. *Dissolution kinetics and morphological changes of γ in AD730TM superalloy*. in *Eurosuperalloys 2014*. 2014. Presqu'île de Giens, France: Matec Web of Conferences.
27. Mauget, F., D. Marchand, G. Benoit, M. Morisset, D. Bertheau, J. Cormier, J. Mendez, Z. Hervier, E. Ostoja-Kuczynski, and C. Moriconi. *Development and use of a new burner rig facility to mimic service loading conditions of Ni-based single crystal superalloys*. in *Eurosuperalloys 2014*. 2014. Presqu'île de Giens, France: Matec Web of Conferences.
28. Riallant, F., J. Cormier, A. Longuet, X. Milhet, and J. Mendez, *High temperature creep degradation of the AM1/NiAlPt/EBPVD YSZ system*. Metallurgical and Materials Transactions, 2014. **45A**: p. 351-360.
29. Steuer, S., Z. Hervier, S. Thabart, C. Castaing, T.M. Pollock, and J. Cormier, *Creep behavior under isothermal and non-isothermal conditions of AM3 single crystal superalloy for different solutioning cooling rates*. Material Science and Engineering A, 2014. **A601**: p. 145-152.
30. Chamanfar, A., M. Jahazi, and J. Cormier, *A Review on Inertia and Linear Friction Welding of Ni-Based Superalloys*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015. **46A**: p. 1639-1669.
31. Gaubert, A., M. Jouiad, J. Cormier, Y.L. Bouar, and J. Ghghi, *Three-dimensional imaging and phase-field simulations of the microstructure evolution during creep tests of <011>-oriented Ni-based superalloys*. Acta Materialia, 2015. **84**: p. 237-255.
32. le Graverend, J.-B., A. Jacques, J. Cormier, O. Ferry, T. Schenk, and J. Mendez, *Creep of a nickel-based single crystal superalloy during very high temperature jumps followed by synchrotron X-Ray diffraction*. Acta Materialia, 2015. **84**: p. 65-79.
33. Schenk, T., A. Jacques, J.-B.I. Graverend, and J. Cormier. *Real time in situ X-Ray diffraction study of the high temperature mechanical behavior of a rafted single crystal superalloy*. in *TMS 2015 Annual Meeting*. 2015. Orlando, FL, USA: TMS