



# 44<sup>èmes</sup> Journées du CEM – Mai 2005

## Fatigue et état de surface

**RESUME : 10 et 11 mai 2005 : 44<sup>èmes</sup> Journées du CEM à Senlis**

Les 44<sup>èmes</sup> Journées du Cercle d'Etudes des Métaux ont coïncidé en 2005 avec les 24<sup>èmes</sup> Journées de Printemps organisées par la Commission Fatigue de la SF2M les 10 et 11 mai, au CETIM de Senlis. Le thème de cette manifestation était le suivant : « Fatigue et Etat de Surface, du rôle des dégradations de surface à l'effet des traitements superficiels ». Ces journées, auxquelles s'étaient également associés le GAMAC et le CETIM, avec le parrainage de l'AFM, ont rassemblé une centaine de personnes dont 50% étaient issus du monde universitaire et 50% du monde industriel avec, dans ce dernier cas, une majorité (60%) en provenance de grands groupes industriels, et le reste en provenance de centres techniques et de PME.

Le programme de ces 44<sup>èmes</sup> journées du Cercle d'Etudes des Métaux est dans la suite logique des manifestations organisées tous les deux ans entre 1993 et 1999 et dont nous rappelons les thèmes :

- novembre 1993 : Evaluation des contraintes résiduelles,
- novembre 1995 : Evaluation de l'endommagement et de son évolution par techniques d'essais non destructifs,
- novembre 1997 : Etude de l'endommagement par fissures au moyen des techniques d'essais non destructifs,
- novembre 1999 : Méthodes d'investigation physico-chimique et mécanique des surfaces.

Les quatre thèmes abordés lors de ces journées ont été les suivants :

- Amélioration de la tenue en fatigue de contact,
- Effet de la microgéométrie de surface,
- Rôle d'un traitement de surface,
- Prédiction de la résistance des couches superficielles.

**1 – Amélioration de la tenue à la fatigue de contact :** Ce thème a regroupé sept communications autour des problèmes posés par les états de surface pour les roulements, la pignonnerie et l'amorçage de fissures en fretting-fatigue, par l'apport d'un revêtement de faible épaisseur du type PVD, ainsi que par l'apport d'un traitement de grenailage, combiné ou non à une cémentation. Parmi les faits marquants de ce premier thème, on peut signaler :

- pour les roulements, l'analyse de la réduction de vie avec prise en compte de la macro et de la microgéométrie, avec comme conséquence, une possibilité d'optimiser le profil de rugosité ;
- pour la pignonnerie, la réalisation d'un outil de caractérisation de la surface par rugosimétrie 3D sans contact, pour hiérarchiser les solutions métallurgiques et comprendre les mécanismes de dégradation ;
- pour la prédiction de l'amorçage des fissures en fretting-fatigue, une dégradation de la durée de vie très dépendante du profil de rugosité ;
- pour l'apport des revêtements PVD, le développement d'un essai de percussion vibratoire d'une bille sur une surface tout à fait judicieux pour optimiser l'épaisseur du dépôt, ainsi que l'évaluation du bon comportement en fretting du revêtement (TiAl)CN, grâce à la libération de particules très fines et au retard à la formation d'oxydes ;
- pour le grenailage, la nécessité de prendre en compte les contraintes résiduelles, la rugosité et les effets d'entaille, l'écroutissage et les endommagements de surface avec, dans le cadre d'un traitement préliminaire de cémentation, le développement d'un modèle de comportement en fatigue sur la base d'essais de simulation.

**2 – Effet de la microgéométrie de surface :** Ce thème a regroupé six communications, ainsi qu'une conférence introductive sur l'analyse des contraintes résiduelles comprenant l'origine des contraintes, leur évaluation, la localisation et la qualité des mesures (justesse, répétabilité, comparaison des méthodes). Les six communications ont surtout traité du problème de la préparation de surface et de son incidence sur la tenue en fatigue. Parmi les faits marquants de ce deuxième thème, on peut signaler :

- dans le cadre de la préparation de surface des aciers 304L, 316L et A42 par plusieurs méthodes (tournage, meulage, sablage, polissage), une influence contrastée de ces méthodes sur la limite de fatigue en liaison avec le profil de rugosité et l'écrouissage de surface (très dépendant du matériau), sachant que les contraintes résiduelles d'origine thermomécanique ont un effet secondaire en raison de leur relaxation rapide ;
- dans le cadre de la préparation de surface des alliages d'aluminium de la série 7000, par plusieurs méthodes donnant des rugosités différentes, l'obtention d'une seule courbe d'endurance grâce à un modèle prenant en compte l'effet d'entaille sur la concentration de contraintes, mais avec des dispersions dépendantes de l'état inclusionnaire et des contraintes résiduelles ;
- l'amélioration de l'état de surface d'aciers de haute dureté usinés par électroérosion grâce à un brossage mécanique qui inverse le sens des contraintes résiduelles ;
- l'amélioration de l'état de surface de superalliages type IN718 fortement échauffés par des opérations de tournage mal adaptées, grâce à des relaxations thermiques (qui reprécipitent les phases durcissantes) et éventuellement en plus grâce à une opération d'alésage qui apporte à la fois un écrouissage et des contraintes résiduelles en compression ;
- l'influence favorable d'une préoxydation sur l'échange thermique de l'acier inoxydable lors du chargement en fatigue thermique, démontrée grâce à l'apport d'une caméra infrarouge pour le relevé de profils de température au cours des essais ;
- la proposition d'un modèle de comportement des fissures courtes en volume, qui met en évidence la dégradation rapide d'une structure renforcée en surface (mécaniquement ou par voie thermochimique) lorsqu'il apparaît les premiers défauts surfaciques.

**3 – Rôle d'un traitement de surface :** Ce thème a regroupé sept communications centrées sur les traitements de galetage, de cémentation, de nitruration et de dépôts minces obtenus par mélange ionique dynamique. Parmi les faits marquants de ce troisième thème, on peut citer :

- le développement d'une approche permettant de prendre en compte, dans le cas du galetage, des champs de contraintes générés et de leur adaptation en fonction du type de cyclage, de l'état de surface, de la vitesse de fissuration et du seuil de non fissuration, avec la mise en évidence d'un effet matériau important pour le gain apporté en fatigue (comparaison d'une structure ferrito-perlitique et d'une structure bainitique) ;
- une évaluation prédictive de la tenue en fatigue des assemblages en alliages d'aluminium bruts de soudage et parachevés par grenailage qui a mis en évidence l'influence des contraintes résiduelles sur l'amélioration de la durée de vie en amorçage ;
- l'influence favorable sur la tenue en fatigue, d'une augmentation de l'austénite résiduelle entre 20 et 40% dans le cas d'un acier 14NiCr11 cémenté, avec un suivi de la modification structurale du constituant austénite au cours de l'essai de fatigue ;
- l'importance de l'état inclusionnaire de l'acier et de l'épaisseur de la couche cémentée lors d'un essai de fatigue gigacyclique par vibration (une augmentation de l'épaisseur de la couche cémentée tend à reporter l'amorçage des défauts vers le substrat) ;
- l'amorçage multiple de fissures dans la couche de combinaison d'un acier 42CrMo4 nitruré, qui peut se traduire par une forte dégradation de la durée de vie en fatigue lors de surcharges ponctuelles ;
- la faible influence de la nitruration par essais de fatigue oligocyclique sur acier X37CrMoV5-1 entre 20 et 700°C, en raison d'une différence sensible dans le mode d'amorçage des fissures liée à un processus d'oxydation préférentielle de la couche nitrurée ;
- l'influence très favorable de couches de faible épaisseur (0,2 à 1 µm) obtenues par mélange ionique dynamique sur la tenue à la fatigue de différents types de matériaux (acier inoxydable, alliage de titane), en raison de la réduction de la densité de fissures et d'une plus grande homogénéité de la déformation cyclique.

**4 – Préviation de la résistance de la couche superficielle : Ce thème a regroupé trois communications prenant en compte les propriétés de surface dans les modèles prédictifs de durée de vie en fatigue. Parmi les faits marquants de ce quatrième thème, on peut citer :**

- la prise en compte des paramètres de surface (contraintes résiduelles, écrouissage, irrégularités de surface) pour évaluer la résistance à l’amorçage des fissures à l’aide des critères classiques de fatigue multiaxiale, avec l’intégration de l’effet d’endommagement, validées par des essais conduits sur différents cas de matériaux écrouis par usinage, grenailage ou renforcés par traitement thermo-chimique ;**
- la simulation numérique de la propagation de fissures dans une géométrie de gorge de vilebrequin galeté, validée expérimentalement par des essais sur géométrie simplifiée approchant celle du vilebrequin.**

**Session Posters : Pour la première fois, cette année, les journées de printemps comprenaient une session posters permettant de compléter les informations données par l’ensemble des conférences. C’est ainsi qu’ont été présentés treize posters regroupant des présentations à caractère plus méthodologique aussi bien sur l’aspect analytique que sur l’aspect modélisation. Certaines présentations de cette session figurent en fin du document.**

# SOMMAIRE

## ***Session 1: Amélioration de la tenue en fatigue de contact***

- 1 C. PAULIN\*, F. VILLE\*, P. SAINSOT\*, S. COULON\*\*  
T. LUBRECHT\* (\*Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides, UMR CNRS/INSA n°5514, INSA, Villeurbanne, \*\*SNR Roulements, Annecy) : ***Effet de la rugosité de surface sur la fatigue de contact en roulement. Approche théorique et expérimentale.***
- 2 F. LEDRAPPIER\*, Y. GACHON\*, C. HEAU\*,  
C. LANGLADE\*\*, A. B. VANNES\*\* (\*HEF R&D, Andrézieux Bouthéon, \*\*LTDS, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Ecully) : ***Etude de la tenue en fatigue superficielle de dépôts PVD pour applications mécaniques.***
- 3 P. DAGUIER (ASCOMETAL CREAS Hagondange) : ***Analyse quantitative des états de surface après fatigue de contact des aciers de pignonnerie.***
- 4 W. EICHLSEDER\*, H. LEITNER\*\*, I. GODOR\*,  
M. WAGGERMAYR\*, C. HINTEREGGER\*\*\* (\*University of Leoben, Institute of Mechanical Engineering, Leoben, Autriche, \*\*Christian-Doppler-Laboratory for Fatigue Analysis, Leoben, Autriche, \*\*\*Magna Drivetrain, Lannach, Autriche) : ***Augmentation de la résistance aux efforts alternes de roues dentées par combinaison de la cmentation et du grenailage.***
- 5 A.B. CHEIKH LARBI\*, B. TLILI\*, T. GENDRE\*\* (\*Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Procédés (LMMP), Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, Montfleury Tunis, Tunisie, \*\*Waterman S.A.S, St-Herblain, France) : ***Comportement en fretting wear du revêtement quaternaire TiAlCN déposé par pulvérisation magnétron.***
- 6 O. HIGOUNEC (Direction Technique et Commerciale, MIC France, Montargis) : ***Grenailage de précontrainte et état de surface en fatigue mécanique et fatigue de contact.***
- 7 H. PROUDHON\*\*\*, S. FOUVRY\*, J.Y. BUFFIERE\*\* (\*LTDS, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, \*\*GEMPPM, INSA de Lyon, Villeurbanne) : ***Influence de l'état de surface sur la prédiction de l'amorçage des fissures en fretting.***

- 8 *Keynote 1* : J.L. LEBRUN (ENSAM, Angers) : *Analyse des contraintes résiduelles et tenue à la fatigue*

***Session 2 : Effet de la microgéométrie de surface***

- 9 M. SURARATCHAI, C. MABRU, C. ESPINOSA, R. CHIERAGATTI (ENSICA, Toulouse) : *Rôle de la rugosité d'une surface usinée sur la fatigue d'un alliage d'aluminium aéronautique.*
- 10 S. HARIRI\*, R. VAUCHER\*\* , H. BLEHAUT\*, P. FLAHAUT\* (\*Ecole des Mines de Douai, Dépt MCM, \*\*BCCN/DRIRE Bourgogne, Dijon) : *Influence des opérations de parachèvement MECANIQUE sur Les contraintes résiduelles.*
- 11 S. PETITJEAN, Y. LEHERICY, J. MENDEZ (Lab. de Mécanique et de Physique des Matériaux, ENSMA, Futuroscope-Chasseneuil.) : *Influence de l'état de surface sur la résistance en fatigue à grand nombre de cycles d'un acier inoxydable austénitique 304L.*
- 12 F. GHANEM\*, N. BEN FREDJ\* , H. SIDHOM\*, C.BRAHAM\*\* (\*Laboratoire de Mécanique, Matériaux et procédés, ESSTT, Tunisie, \*\*Laboratoire de Microstructure et Mécanique des Matériaux de l'ENSAM Paris) : *Amélioration par brossage mécanique de la tenue en fatigue des surfaces finies par électroérosion.*
- 13 G. PERRIN\*, C. COLIN\*, Y. BIENVENU\*, V. ZERROUKI\*\*, C. BRAHAM\*\*\* (\*ENSMP Centre des Matériaux P.M. Fourt, Evry, \*\*Snecma Moteurs, Materials and Processes Dept, Evry, \*\*\*Laboratoire de Microstructure et Mécanique des Matériaux, ENSAM, Paris) : *Characterisations of Drilling Anomalies in LCF and Effect of Reaming on their Fatigue Behaviour.*
- 14 S. CHAISE\*, L. FRANCOU\*\*, P. HERVE\*\*, V. MAILLOT\*\*, L. VINCENT\*, (\*CEA Saclay, Gif sur Yvette, \*\*Pôle scientifique et Technologique de l'Université Paris 10 - Nanterre, Ville d'Avray) : *Influence de l'état de surface sur le niveau de chargement en fatigue thermique.*

### ***Session 3 : Rôle d'un traitement de surface***

- 15 **Keynote 2** : H. MICHAUD (ASCOMETAL CREAS Hagondange) : *Tenue en fatigue des vilebrequins galetés – Rôles respectifs de la nuance, des contraintes résiduelles, et de l'état de surface*
- 16 D. JEDDI\*, H. SIDHOM\*, H.P. LIEURADE\*\*, D. GHIGLIONE\*\* (\*Laboratoire de Mécanique Matériaux et Procédés, ESSTT, Tunis, Tunisie, \*\*CETIM, Senlis) : *Instabilité cyclique du gradient de microstructures et résistance à la fatigue de l'acier 14NiCr11 cémenté.*
- 17 E. BAYRAKTAR\*\*\*, I. MARINES GARCIA\*, C. BATHIAS\* (\*ITMA-CNAM, Paris, \*\*SUPMECA-LISMMA, Saint Ouen, \*\*\*Mechanical Engineering, Washington University in St Louis, MO, USA) : *Effet de traitement de surface sur la tenue en fatigue gigacyclique d'acier SAE 8620.*
- 18 N. SIDHOM\*, C. BRAHAM\*\*, H.P. LIEURADE\*\*\* (\*Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Procédés (SERST – LAB – STI –03) - ESSTT, Montfleury, Tunis – Tunisie, \*\*Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux LIM ENSAM, Paris, \*\*\* Département des matériaux, CETIM, Senlis) : *Amélioration par grenailage de la tenue en fatigue des assemblage soudés en alliage d'aluminium.*
- 19 M.A. TERRES, H. SIDHOM (LMMP, ESSTT, Tunis-Tunisie) : *Evaluation de la tenue en fatigue flexion des composants nitrurés en acier 42CrMo4.*
- 20 Ch. DAFFOS\*\*\*, P. LAMESLE\*\*, F. REZAI-ARIA\*\* (\*Adresse actuelle, DGM, ENSICA, Toulouse, \*\*Axe Etude des Surfaces des Outillages, CROMeP, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, Albi) : *Fatigue Isotherme d'acier nitruré X38CrMoV5 pour outillages travaillant à chaud.*
- 21 P. VILLECHAISE, J. MENDEZ (Laboratoire de Mécanique et de Physique des Matériaux, ENSMA, Futuroscope-Chasseneuil) : *Amélioration de la tenue en fatigue de matériaux métalliques par application de dépôts minces nanocristallins et amorphes.*
- 22 J. STOLARZ (ENSM de Saint Etienne, Centre SMS) : *Effet de l'état de surface et des traitements superficiels sur l'évolution des fissures de fatigue.*

#### ***Session 4 : Prévision de la résistance des couches superficielles***

- 23 **Keynote 3** : A. LAAMOURI\*, M.A. TERRES \*, R. FATHALLAH \*\*, H. SIDHOM \* (\*Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Procédés Tunis, Tunisie, \*\* Laboratoire de Génie Mécanique, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse, Sousse, Tunisie) : ***Prise en compte des propriétés de surface pour une meilleure prédiction de la résistance à l'amorçage des fissures de fatigue.***
- 24 T. PALIN-LUC\*, J.F. FLAVENOT\*\*, S. LASSERRE\*, J.L. CHARLES\*, Y. LEGUERNIC\*\*\* (\*ENSAM – LAMEFIP, Bordeaux, \*\*CETIM, Senlis, \*\*\*MIC France, Amilly) : ***Fatigue strength prediction of a shot peened 42CrMo4 steel using multiaxial fatigue criterion and surface roughness correction.***
- 25 G. THOQUENNE\*, A.A. LUBRECHT\*\*, K. DANG VAN\*\*\*, H.M. MAITOURNAM\*\*\*, H.P. LIEURADE\* (\*CETIM Senlis, pôle fatigue, Senlis, \*\*LMC, INSA de Lyon, Villeurbanne, \*\*\*LMS, Ecole Polytechnique, Palaiseau) : ***Prise en compte des lois de comportement dans la prévision de la tenue en fatigue des roulements trait es superficiellement.***
- 26 C. GARDIN\*, S. COURTIN\*, G. BEZINE\*, D. BERTHEAU\*, H. BEN-HADJ HAMOUDA\*\* (\*LMPM ENSMA, Futuroscope-Chasseneuil \*\*RENAULT, Rueil Malmaison) : ***Propagation par fatigue de fissures dans une géométrie de gorge de vilebrequin galet ***
-