# Le calcul de structures en présence de vieillissement statique ou/et dynamique d'alliages métalliques

Matthieu Mazière, Samuel Forest

▶ **To cite this version:**

Matthieu Mazière, Samuel Forest. Le calcul de structures en présence de vieillissement statique ou/et dynamique d'alliages métalliques. 20ème Congrès Français de Mécanique, CFM 2011, Aug 2011, Besançon, France. 6 p. hal-00684968

**HAL Id: hal-00684968**

**https://minesparis-psl.hal.science/hal-00684968**

Submitted on 3 Apr 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Le calcul de structures en présence de vieillissement statique ou/et dynamique d'alliages métalliques

Matthieu Mazière et Samuel Forest

MINES ParisTech
Centre des matériaux, CNRS UMR 7633
BP 87, 91003 Evry Cedex, France
samuel.forest@mines-paristech.fr

Les phénomènes de Portevin–Le Chatelier (effet PLC) et de Lüders sont très fréquents, dans les aciers et les alliages d'aluminium. Ils se présentent sous la forme d'instabilités sur la courbe de traction (Jaoul, 2008) et sont le résultats de l'interaction d'atomes de solutés avec les dislocations mobiles ou immobilisées au sein du matériau. Ils se manifestent lorsque les constantes de temps de la diffusion des solutés et de la plasticité microscopique sont du même ordre de grandeurs. Ils ont fait l'objet d'une quantité considérable de travaux en métallurgie physique dans les 60 dernières années, conduisant à des modélisations physiques satisfaisantes. Au contraire, les ingénieurs en calculs de structures ne prennent généralement pas ces phénomènes en compte dans l'établissement de la loi de comportement, préférant introduire un lissage des courbes de traction ou des courbes minimales.

Une croyance commune consiste à penser que l'effet PLC ou le pic de Lüders n'existent que pour les essais de traction en raison de l'état apparemment homogène de contrainte ou de déformation imposée. En fait, les instabilités viscoplastiques de type PLC se produisent également dans les zones de concentration de contraintes que sont les perforations, les inclusions et les fissures. Si le développement des bandes de localisation reste confiné dans une telle zone de l'éprouvette, on n'observe pas nécessairement de perturbations sur la courbe de charge globale. Les effets de la localisation de la déformation existent toutefois bel et bien dans certaines zones de la pièce.

Le vieillissement dynamique ne se caractérise pas nécessairement par la présence d'irrégularités sur la courbe de traction. Il peut se traduire également par une sensibilité faible voire négative à la vitesse de déformation dans un certain domaine de température. Il se manifeste également de manière plus insidieuse par des réponses en fluage ou en relaxation inattendues. En fait, la plupart des alliages métalliques et même certains métaux "purs" sont concernés dans un certain domaine de température et de vitesse : alliages de titane et de zirconium, superalliages à base de nickel ou de cobalt, tantale, etc. Il est donc devenu urgent de le prendre en compte en calcul des structures de façon à comprendre ou éviter certaines fragilisations apparemment inexplicables.

## 1 Simulation d'instabilités viscoplastiques

Le modèle issu de la métallurgie physique et utilisé en calcul de structures par (Zhang et al., 2001) est extrêmement simple en apparence. Il s'agit d'un modèle élastoviscoplastique utilisant le critère de von Mises et incorporant une seule variable interne scalaire liée au vieillissement, qui intervient dans le calcul de la limite d'élasticité en fonction et dont l'évolution est régie par une équation de type relaxation. Le même modèle permet, dans une certaine mesure, de rendre compte du vieillissement statique et du vieillissement dynamique (Graff et al., 2004).

Son utilisation en calcul de structures par éléments finis conduit au développement d'instabilités viscoplastiques inédites. Dans le cas PLC, des bandes multiples de localisation de la vitesse de déformation plastique apparaissent et se propagent le long du fût d'éprouvettes de traction ou à partir des zones de concentrations de contraintes (Graff et al., 2005).

L'identification d'un tel modèle sur une large gamme de température est possible mais pose des difficultés importantes dans la mesure où l'on ne peut pas se contenter de simulations au niveau de l'élément de volume pour déterminer les paramètres de la loi. Des calculs par éléments finis sont nécessaires pour simuler les phénomènes de localisation (Belotteau et al., 2009).

## 2 Impact sur le comportement et la prévision de la rupture

Les phénomènes de vieillissement peuvent avoir des effets bénéfiques utilisables dans l'industrie comme dans le cas du Bake–Hardening utilisé pour certains aciers de tôle automobile. On profite du fait que lors de l'étape de cataforèse des tôles mises en forme, l'élévation de température conduit à un ancrage des dislocations et à une élévation de la limite d'élasticité favorable aux chocs éventuels ultérieurs (Ballarin et al., 2009b; Ballarin et al., 2009a).

Les hétérogénéités existant dans la microstructure peuvent constituer des obstacles ou des diffuseurs des bandes PLC. On peut se demander par exemple si la présence de particules rigides comme dans les composites à matrice métallique permet d'empêcher la propagation des bandes et de limiter les oscillations sur la courbe de traction. Cette situation a été étudiée dans (Dierke et al., 2007; Graff et al., 2008).

Le domaine de température pour lequel le vieillissement dynamique se manifeste peut également correspondre à un creux de ductilité comme c'est le cas dans les aciers C-Mn étudiés dans (Wang et al., 2011). Le lien entre vieillissement et rupture fait l'objet de nombreuses études notamment en déchirure ductile mais aussi en fatigue.

## 3 Aspects numériques

Les critères de localisation aujourd'hui disponibles permettent de prévoir la déformation critique pour laquelle les phénomènes de PLC commencent à se produire (Benallal et al., 2006). On observe essentiellement 3 types de fluctuations sur les courbes de traction. Ils sont dits A, B et C. L'analyse des modes de propagation de ces bandes montre que les simulations numériques sont en mesure de rendre compte de ces trois modes de propagation (Mazière et al., 2008; Mazière et al., 2009a). Les phénomènes de sensibilité négative à la vitesse de déformation sont responsables de la localisation de la vitesse de déformation plastique au sein de bandes. Cette localisation est limitée par le fait que le domaine de sensibilité négative est transitoire, propriété qui est responsable de la propagation des bandes.

Les difficultés numériques posées par ces simulations sont considérables en raison des faibles pas de temps nécessaires à la reproduction des oscillations individuelles. Un schéma numérique implicite efficace est toutefois possible (Mazière et al., 2008). Il a été utilisé pour le calcul de l'éclatement d'un disque de turbine en sur-vitesse de rotation dans (Mazière et al., 2009b).

## Références


Ballarin V., Perlade A., Lemoine X., Bouaziz O., and Forest S. (2009a). *Mechanisms and Modeling of Bake-Hardening Steels : Part II. Complex loading paths.* Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 40, pp 1367–1374.

Ballarin V., Soler M., Perlade A., Lemoine X., and Forest S. (2009b). *Mechanisms and Modeling of Bake-Hardening Steels : Part I. Uniaxial Tension.* Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 40, pp 1375–1384.

Belotteau J., Berdin C., Forest S., Parrot A., and Prioul C. (2009). *Mechanical behavior and crack tip plasticity of a strain aging sensitive steel.* Materials Science and Engineering A, vol. 526, pp 156–165.

Benallal A., Berstad T., Borvik T., Clausen A.H., and Hopperstad 0.S. (2006). *Dynamic strain aging and related instabilities : experimental, theoretical and numerical aspects.* European Journal of Mechanics A/solids, vol. 25, pp 397–424.

Dierke H., Krawehl F., Graff S., Forest S., Šachl J., and Neuhäuser H. (2007). *Portevin–Le Chatelier effect in AlMg alloys : Influence of obstacles, experiments and modelling.* Computational Materials Science, vol. 39, pp 106–112.

Graff S., Dierke H., Forest S., Neuhäuser H., and Strudel J.L. (2008). *Finite Element Simulations of the Portevin–Le Chatelier Effect in Metal–Matrix Composites.* Philosophical Magazine, vol. 88, pp 3389–3414.

Graff S., Forest S., Strudel J.-L., Prioul C., Pilvin P., and Béchade J.-L. (2004). *Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens : experiments and finite element simulations.* Materials Science and Engineering A, vol. 387–389, pp 181–185.

Graff S., Forest S., Strudel J.-L., Prioul C., Pilvin P., and Béchade J.-L. (2005). *Finite element simulations of dynamic strain ageing effects at V–notches and crack tips.* Scripta Materialia, vol. 52, pp 1181–1186.

Jaoul B. (2008). *Etude de la plasticité et application aux métaux.* réédité par Les Presses des Mines, Paris.

Mazière M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., and Vogel F. (2008). *Numerical modelling of the Portevin–Le Chatelier effect.* European Journal of Computational Mechanics, vol. 17, pp 761–772.

Mazière M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., and Vogel F. (2009a). *Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks Part I : Analytical and numerical stability analyses.* European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 28, pp 36–44.

Mazière M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., and Vogel F. (2009b). *Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks Part II : Burst of a superalloy turbine disk.* European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 28, pp 428–432.

Wang H., Berdin C., Mazière M., Forest S., Prioul C., Parrot A., and Le-Delliou P. (2011). *Portevin-Le Chatelier (PLC) instabilities and slant fracture in C-Mn steel round tensile specimens.* Scripta Materialia, vol. 64, pp 430–433.

Zhang S., McCormick P.G., and Estrin Y. (2001). *The morphology of Portevin–Le Chatelier bands : finite element simulation for Al–Mg–Si.* Acta Materialia, vol. 49, pp 1087–1094.