

## Thermoplasticité dynamique, cisaillement adiabatique et rupture ductile

---

André DRAGON (avec Patrice LONGERE, ISAE-SUPAERO/Institut Clément Ader, Toulouse)

Contacts : [andre.dragon@ensma.fr](mailto:andre.dragon@ensma.fr) ; [patrice.longere@isae.fr](mailto:patrice.longere@isae.fr)

Partenariats : NEXTER (Bourges), DCNS (Lorient et Indret)

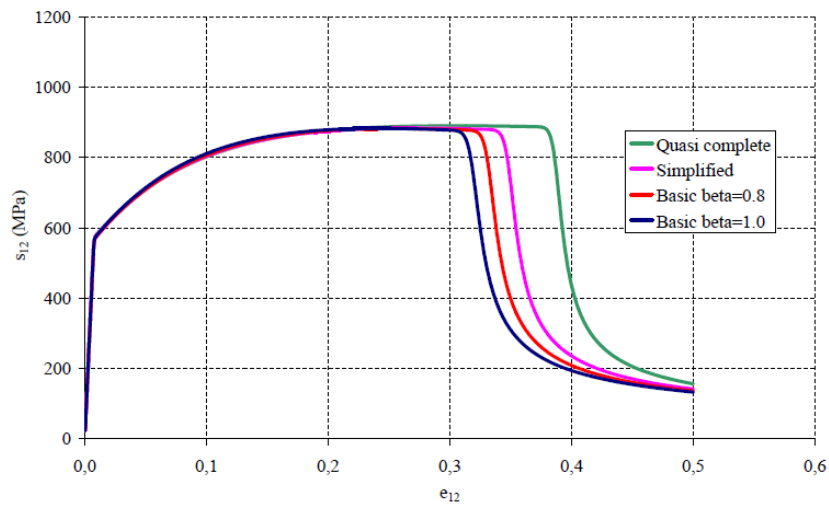
Dans une large classe de matériaux ductiles, notamment dans les alliages à haute résistance concernés ici, une localisation de la déformation dans des bandes de cisaillement de très faible épaisseur précède généralement la rupture ultime. Lorsque la vitesse de chargement est suffisamment élevée (temps caractéristiques de l'ordre de la microseconde), les échanges thermiques au sein du matériau sont limités : les conditions locales s'approchent du processus adiabatique et le mécanisme de localisation se produit sous forme de bandes de cisaillement adiabatique (BCA). S'il est entretenu par le chargement – la concentration de la dissipation plastique dans les bandes conduit à un adoucissement supplémentaire du matériau ce qui favorise la poursuite du processus –, le mécanisme en question génère l'endommagement qui va conduire à la rupture. Par un affaiblissement progressif de la résistance (tout en préservant la cohésion de la matière avant l'endommagement post-localisation), les BCA provoquent une réduction de la tenue à l'impact des matériaux structuraux, p.ex. des métaux/alliages aéronautiques. Dans certaines applications cependant, p.ex. dans le cas de l'usinage à grandes vitesses, la formation des BCA se révèle bénéfique en réduisant l'effort de coupe.

Depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, le cisaillement adiabatique fait l'objet d'intenses études expérimentales. Généralement, on admet que la formation des BCA résulte d'une instabilité de l'écoulement viscoplastique issue d'une compétition entre écrouissage plastique et adoucissement thermique. L'échauffement induit par la dissipation plastique dans les bandes et les gradients thermiques bande/matrice qui en résultent sont tels que le matériau des bandes est le siège de modifications microstructurales, p.ex. recristallisation dynamique voire fusion. Certains auteurs distinguent la localisation de la déformation dans des BCA via une instabilité matérielle thermomécanique provoquée par adoucissement thermique (comme évoqué plus haut) de celle induite directement par adoucissement microstructural, notamment dû à une recristallisation dynamique.

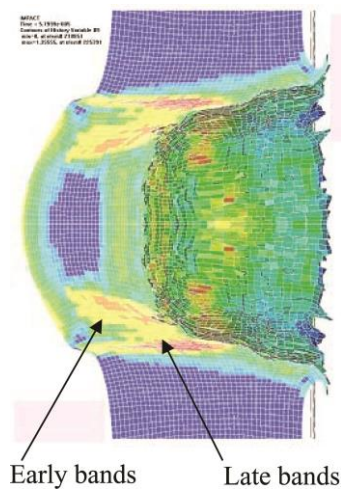
Deux questions fondamentales se posent dans toute modélisation (comportement, localisation, post-localisation, endommagement consécutif, etc) et traitement numérique efficaces pour le calcul de structures. La première question est celle de l'évaluation de l'échauffement induit par la dissipation plastique puisque celle-ci va conditionner l'adoucissement thermique. Une modélisation thermodynamique proposée dans certains travaux cités plus loin permet une quantification 'simplifiée', 'quasi-complète', etc, voir Fig.1, en fonction de la prise en compte d'une partie ou de la quasi-totalité des couplages thermomécaniques en jeu. La deuxième question, hautement épineuse, concerne la description et l'approche numérique de la localisation par les BCA et de ses conséquences, notamment l'anisotropie induite par le caractère fortement orienté des bandes. Le choix fait par les auteurs concernés consiste à incorporer les bandes dans le formalisme des équations constitutives du modèle via un volume élémentaire représentatif (VER) dont la taille caractéristique est largement supérieure à la largeur des bandes. Les conséquences cinématiques et matérielles de la présence des bandes au sein du VER, et par suite de l'élément fini, respectant le postulat d'échelle du VER, sont décrites via, respectivement, une variable cinématique spécifique et une variable interne de détérioration/BCA induisant une forme d'orthotropie. Le modèle ainsi structuré fonctionne dans le cadre des transformations finies en trois dimensions. Il a été appliqué avec succès à des problèmes complexes comme p.ex. celui de la pénétration d'une plaque de protection semi-épaisse par un projectile de type 'fragment' (FSP), voir Fig.2. Le postulat d'échelle du modèle introduisant une borne pour des longueurs caractéristiques, la double viscosité (dans la plasticité et dans la dégradation par BCA) et la procédure d'intégration numérique à pas adaptatif impliquant une détérioration à taux contrôlé, ont un effet régularisant qui réduit considérablement la dépendance des résultats numériques à la taille de maille. Les résultats numériques obtenus à ce jour s'avèrent conformes aux mécanismes de perforation constatés expérimentalement pour des conditions aux limites/initiales et contraintes géométriques comparables.

La transition depuis le cisaillement adiabatique vers l'endommagement post-localisation et la rupture est un problème encore ouvert. Les travaux connus reposent souvent sur des postulats et critères empiriques simplistes. Le cisaillement adiabatique évolue généralement dans des parties de structures soumises à des chargements à faible taux de triaxialité. Ces derniers ont tendance à inhiber la croissance des cavités, mécanisme de base de la rupture ductile. Des études récentes montrent toutefois que l'endommagement ductile par croissance de cavités peut être actif même dans ces conditions (voir certains travaux cités plus loin), voir Fig.3.

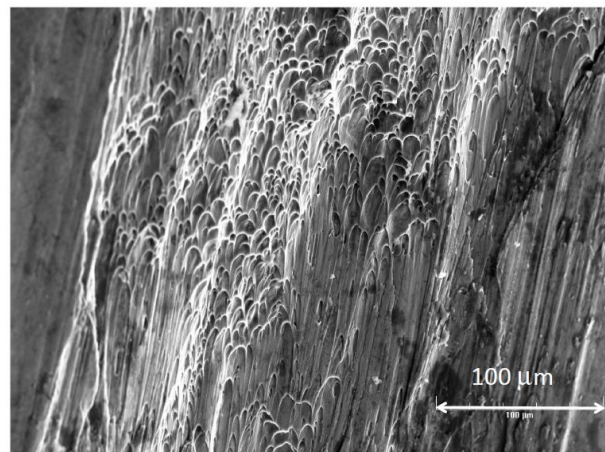
En partant du modèle viscoplastique/détérioration par BCA commenté ci-dessus et des travaux communs sur l'endommagement ductile, un modèle couplé qui décrit la formation des couches de cavités ('micro-void sheets') dans le sillage des BCA a été proposé.



**Fig. 1.** Mise en évidence théorique de l'influence de la méthode d'évaluation de l'échauffement plastique (prise en compte des couplages thermomécaniques) sur l'apparition de la localisation dynamique (début de la chute de résistance), d'après Longère et Dragon, *J. Mech. Mat. Struct.*, 2009.



**Fig. 2.** Simulation numérique (LS-Dyna) de la pénétration d'une plaque de blindage par un projectile de type FSP au moyen du modèle viscoplastique/détérioration par BCA, cas d'un impact à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse limite de protection, d'après Longère et al., *J. Eng. Mat. Tech*, 2009.



**Fig. 3.** Mise en évidence expérimentale par essai de cisaillement par compression de la rupture ductile d'un alliage de titane sous taux de triaxialité négatif, d'après Longère et Dragon, *Mech. Mat.*, 2015.

#### Quelques publications :

- P. Longère, A. Dragon, H. Trumel, T. De Ressaigui, X. Deprince and E. Petitpas. Modelling adiabatic shear banding via damage mechanics approach. Arch. Mech. **55**(1), 3-38. 2003
- P. Longère, A. Dragon, H. Trumel and X. Deprince. Adiabatic shear banding induced degradation in a thermo-elastic/viscoplastic material under dynamic loading. Int. J. Impact Eng. **32**, 285-320. 2005
- P. Longère and A. Dragon. Adiabatic heat evaluation for dynamic plastic localization. J. Theor. Appl. Mech. **45**(2), 203-223. 2007
- P. Longère and A. Dragon. Evaluation of the inelastic heat fraction in the context of microstructure supported dynamic plasticity modelling. Int. J. Impact Eng. **35**(9), 992-999. 2008
- P. Longère and A. Dragon. Plastic work induced heating evaluation under dynamic conditions : critical assessment. Mech. Res. Com. **35**, 135-141. 2008
- P. Longère and A. Dragon. Inelastic heat fraction evaluation for engineering problems involving dynamic plastic localization phenomena. J. Mech. Mat. Struct. **4**(2), 319-349. 2009
- P. Longère, A. Dragon and X. Deprince. Numerical study of impact penetration shearing employing finite strain viscoplasticity model incorporating adiabatic shear banding. J. Eng. Mat. Tech. **131**, 011105.1-14. 2009
- P. Longère and A. Dragon. Adiabatic Shear : Pre- and Post-critical Dynamic Plasticity Modelling and Study of Impact Penetration. Heat Generation in this Context. [in] Dynamic Modelling, Chap. 13, 233-262, Intech, 2010 [ed. A. Brito]
- P. Longère, A.-G. Geffroy, B. Leblé and A. Dragon. Modelling the transition between dense metal and damaged (micro-porous) metal viscoplasticity. Int. J. Dam. Mech. **21**(7), 1020-1063. 2012
- P. Longère and A. Dragon. Description of shear failure in ductile metals via back stress concept linked to damage-microporosity softening. Eng. Fract. Mech. **98**, 92-108. 2013
- P. Longère, A.-G. Geffroy-Grèze, B. Leblé and A. Dragon. Ship structure steel plate failure under near-field air-blast loading: numerical simulations vs experiment. Int. J. Impact Eng. **62**, 88-98. 2013
- P. Longère and A. Dragon. Dynamic vs. quasi-static shear failure of high strength metallic alloys: Experimental issues. Mech. Mat. **80**, 203-218, 2015