

Influence du Procédé de Découpage Adiabatique sur la Limite en Fatigue

A. Buffard^a, J.M. Bergheau^a, M. Dursapt^a, B. Weber^b

^aÉcole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, LTDS, UMR CNRS 5513

58, rue Jean Parot 42000 Saint-Etienne

^bARCELOR Research Center, voie romaine, BP 30320, 57283 Maizières Les Metz

Résumé Aujourd'hui, différents procédés de découpe sont utilisés pour découper des pièces en tôle. Ces procédés conditionnent fortement l'aspect et les propriétés des bords découpés. Aussi, les travaux que nous nous proposons de réaliser portent sur l'étude de l'influence de ces différents procédés sur la tenue en service des pièces découpées, et tout particulièrement sur l'influence du procédé de découpage adiabatique. Pour cela nous avons retenu trois procédés de découpe (découpe classique, découpe fine et découpe adiabatique) et un procédé de référence qui est le fraisage. Nous avons défini la forme de l'éprouvette plate qui sera utilisée pour les essais de fatigue. Par la suite, nous tâcherons de modéliser numériquement les procédés de découpe avec un modèle unique afin d'évaluer les contraintes résiduelles sur le bord découpé, les moyens actuels de mesure ne nous permettant pas d'en effectuer un relevé. Également, nous tâcherons de modéliser la géométrie et la microgéométrie de la surface afin d'évaluer l'influence de la rugosité et de la géométrie du bord découpé sur la tenue en service. Il en sera de même quant à la métallurgie de la pièce. Enfin, nous réaliserons des essais de fatigue en traction ondulée ($R=0,1$) sur les éprouvettes découpées et sur les éprouvettes fraisées (procédé de référence qui n'induit pas de contraintes résiduelles au niveau du bord de l'éprouvette) afin de statuer sur l'influence du procédé de découpage adiabatique quant à la limite en endurance ainsi que sa position par rapport aux autres procédés.

1 INTRODUCTION

L'objectif de l'étude que nous avons débutée est de comparer la tenue en fatigue de pièces obtenues suivant différents procédés de découpe. En particulier, nous avons retenue des procédés mécaniques à basse et haute énergie. Pour ceux basse énergie, nous avons retenu le découpage classique et le découpage fin ; quant à ceux haute-énergie, nous n'avons retenu qu'un procédé émergent : le découpage adiabatique. Les découpes par laser, plasma et autres ne seront donc pas étudiés ici. Chaque procédé (voir section suivante), produit une géométrie du bord découpé différente. Par ailleurs, pour ce qui concerne le procédé de découpage adiabatique, on peut modifier localement et de manière importante l'état métallurgique du matériau ainsi que ses propriétés mécaniques locales. En conséquence, il semble naturel que les propriétés en fatigues des pièces découpées soient largement influencées par leur procédé d'obtention. Il nous faudra donc caractériser d'une part la géométrie du bord découpé et d'autre part l'état métallurgique et mécanique au niveau de ce bord découpé. Une fois cette caractérisation obtenue, nous réaliserons des essais de fatigue à grand nombre de cycles en traction ondulée ($R=0,1$) afin de comparer et classer les différents procédés. En parallèle de ces essais, nous tenterons de réaliser une modélisation numérique globale pour le procédé de découpe (qui permette de représenter la découpe classique et le découpage adiabatique) afin de déterminer un ordre de grandeur des contraintes résiduelles. Il en sera de même en découpage fin.

2 LES PROCÉDÉS DE DÉCOUPE

En production industrielle, on utilise couramment les procédés de découpe classique et découpage fin. Lorsque le procédé de découpe adiabatique sera totalement maîtrisé, alors ce dernier prendra naturellement sa place dans l'industrie de la découpe, compte-tenu des précisions attendues et de la cadence de frappe espérée. A présent, nous allons tâcher de vous présenter chaque procédé ainsi que l'influence de ce dernier sur la géométrie du bord découpé.

2.1 Le Découpage Classique

En découpe classique le bord de la pièce présente quatre zones bien distinctes (voir figure ci-dessous). Le bombé plastique est liée à la phase de pénétration du poinçon dans le flanc avant que le cisaillement ne débute. La pièce se déforme jusqu'à ce que la contrainte de cisaillement soit atteinte. Ensuite, le cisaillement se produit. En notant que les efforts de découpe se localisent entre l'extrémité du poinçon et de la matrice, des fractures s'initient et se propagent ensuite entre ces deux extrémités. Les faces internes de ces fractures sont donc arrachées et lorsqu'elles se rejoignent, la pièce tombe et présente généralement une bavure dont la dimension dépend du jeu de découpe et du matériau découpé.

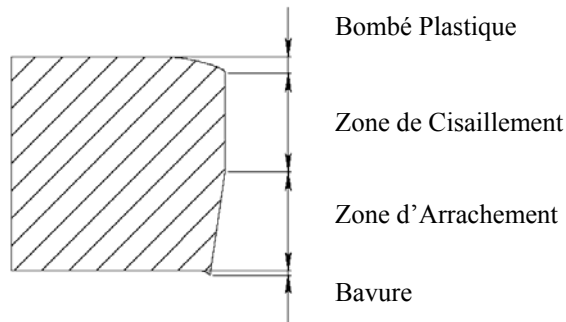


Figure 1. Aspect du bord obtenu en découpage classique.

2.2 Le Découpage Fin

Similaire au découpage classique, le découpage fin se caractérise par un jeu poinçon/matrice réduit et une section découpée généralement plus faible. Il en résulte une précision dimensionnelle importante et un bord découpé perpendiculaire à la face d'appui du flanc et ne présentant pas de bavure. A priori, la pièce découpée ne présente pas de transformation métallurgique ni de zones propices à l'amorçage de la fissuration (zone de bavure dans le cas de la découpe classique). Dans le cadre de nos travaux, nous tenterons d'évaluer un ordre de grandeur du champ de contrainte résiduelle au niveau du bord découpé, et nous caractériserons la macro et la micro-géométrie du bord découpé ainsi que son état métallurgique.

2.3 Le Découpage Adiabatique

Dans un premier temps, nous présenteront le phénomène de cisaillement adiabatique, puis nous parlerons plus avant du procédé de découpage adiabatique.

2.3.1 Le cisaillement adiabatique

Lorsque qu'un matériau est soumis à une charge dynamique élevée de courte durée (choc, impact, perforation dynamique), des bandes de cisaillement dues à des déformations plastiques intenses peuvent être observées. Ces dernières sont très fines (de l'ordre de quelques microns à quelques dizaines de microns). Des matériaux aussi divers que le cuivre, le laiton, le plastique, le titane et ses alliages, les alliages d'aluminium et bien évidemment les aciers sont sujets à l'apparition de ce type de bande.

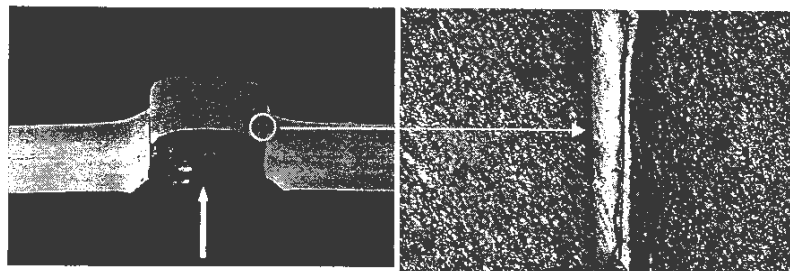


Figure 2. Impact dans une tôle d'acier et bande de cisaillement adiabatique contenant une fissure.

C'est à TRESKA (1878) que l'on associe la découverte des bandes de cisaillement adiabatiques. Au cours de travaux relatifs à l'étude du procédé de forgeage, ce dernier observe que lors de la frappe du marteau sur la pièce, un échauffement local et important peut être observé dans des directions privilégiées qu'il appelle alors « lignes de chaleur », ces dernières formant un « X » dans la zone de l'impact.

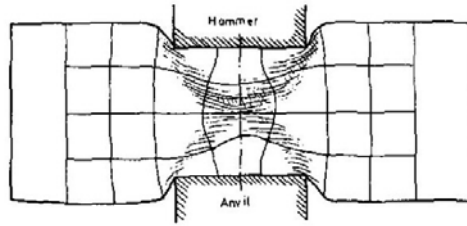


Figure 3. Zones de déformation plastique d'après TRESKA H. (1878)

TRESKA cherche alors à déterminer le rendement du procédé en calculant la part d'énergie cinétique qui s'est transformé en travail plastique. En fonction des matériaux forgés, il estime qu'entre 73% et 94% de l'énergie cinétique est transformée en travail plastique, localisé au niveau des « lignes de chaleurs ». Ce n'est que bien plus tard en 1934 que TAYLOR et QUINNEY [1] calculeront la quantité de chaleur produite par le travail plastique. Ce sont Zener et Hollomon [2] qui ont expliqué dès 1944, le principe de formation de ces bandes, et c'est également à eux que l'on doit l'appellation « Bande de Cisaillement Adiabatique »

D'après leurs travaux, lorsqu'une déformation plastique est localisée au niveau d'une imperfection du matériau (zone de concentration de contraintes, inclusions...) et que le processus de déformation plastique est suffisamment rapide, alors une élévation importante de la température apparaît au voisinage de cette dernière. Dès lors, l'augmentation locale de la température conduit à la chute de la contrainte d'écoulement, c'est ce qu'on appelle l'adoucissement thermique. Si l'écrouissage plastique compense les effets de l'adoucissement thermique, le processus reste stable. Dans le cas contraire, la diminution de la contrainte d'écoulement favorise la déformation, et le phénomène est alors auto entretenu. La durée de la charge dynamique étant particulièrement faible (de quelques μs à quelques ms), on peut négliger les effets liés à la conduction thermique, et on est alors proche de conditions adiabatiques.

En 1988, MARCHAND et DUFFY [3] ont montré l'existence d'une vitesse limite en dessous de laquelle il ne se forme pas de bande de cisaillement adiabatique. Au cours de l'expérience qu'ils utilisèrent, en mesurant l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du cisaillement nominal, ils ont alors distingué trois phases lors de la déformation de l'éprouvette (voir figure 4).

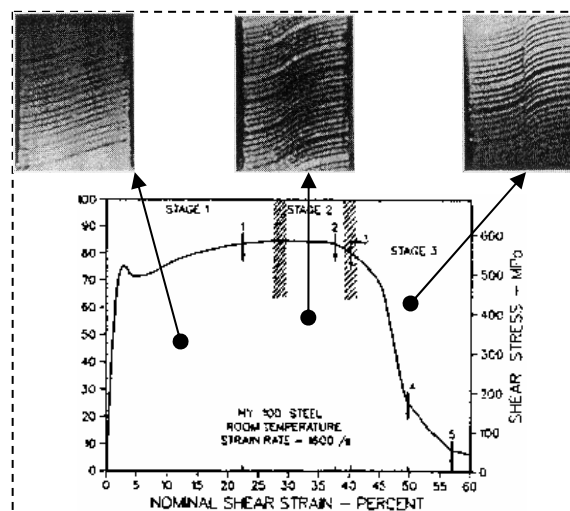


Figure 4. Génération d'une bande de cisaillement adiabatique (d'après MARCHAND et DUFFY)

Ces trois phases sont les suivantes :

- Phase 1 : La contrainte de cisaillement croît jusqu'à un maximum.
La déformation plastique est homogène.
L'écrouissage est suffisant pour compenser l'adoucissement thermique.
- Phase 2 : La contrainte de cisaillement décroît légèrement.
L'instabilité commence à se développer.
La déformation plastique se concentre au sein d'une bande de largeur importante.
L'adoucissement thermique l'emporte progressivement sur l'écrouissage.
- Phase 3 : La contrainte de cisaillement chute brutalement.
La déformation plastique se localise au sein d'une bande très fine qui se développe, et cette dernière est généralement suivie d'une rupture de l'éprouvette.

De nombreux travaux, principalement expérimentaux, ont permis la mise en évidence de la dépendance de l'apparition des bandes de cisaillement adiabatique avec des paramètres tels que la température, la structure du matériau, les imperfections de ce dernier ou la vitesse de la sollicitation. On peut également citer les travaux de ZUREK [4], LEAR [5] ou LI et Al. [6], où il est montré que la rupture qui peut suivre l'apparition des bandes de cisaillement adiabatique, et en particulier que le mode de rupture, dépend de la vitesse de la sollicitation.

Bien évidemment, la métallurgie de la bande de cisaillement adiabatique et de son environnement ont fait l'objet de nombreuses études ([7] [8] [9] [10]). Il est montré que le matériau, et en particulier sa diffusion thermique, a une grande importance sur la métallurgie de la bande. On notera aussi l'existence de deux bandes appelées « bande de déformation » et « bande de transformation ». La première est caractérisée par une déformation plastique importante aux frontières de la bande de cisaillement adiabatique, et la seconde est caractérisée par des transformations métallurgiques importantes qui donnent à la BCA des propriétés distinctes (structures, microdureté) de celle de la matrice ou elle apparaît. Ces transformations métallurgiques sont liées à l'accroissement local de la température qui peut alors dépasser les 1000° C.

2.3.2 Le procédé de découpage

Le phénomène de cisaillement adiabatique a très tôt été utilisé dans l'industrie de l'armement car la majeure partie des aciers de blindage sont sujet au cisaillement adiabatique lorsqu'ils sont impactés par des projectiles émis à grande vitesse et disposant d'une énergie cinétique importante. Cependant, l'intérêt industriel pour la découpe de pièces s'est principalement développé au cours des années 80 au Japon, puis plus récemment sous nos latitudes. Aujourd'hui, on découpe des barres d'acier à l'aide de ce procédé, et on développe également des techniques de découpage de tôle. La figure suivante illustre le procédé de cisailage d'une barre.

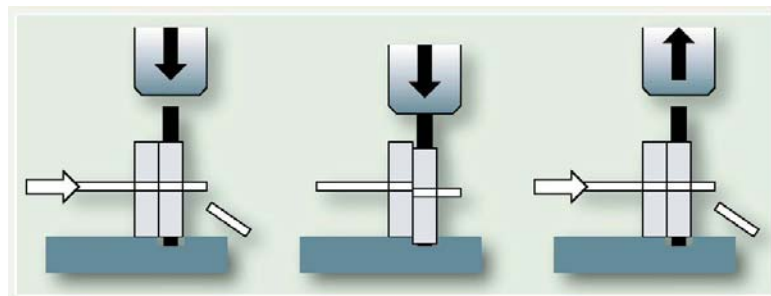


Figure 5. Cisailage adiabatique d'une barre [12]

Contrairement aux autres procédés de découpe, le déplacement du coulisseau est très faible, l'effort appliqué est plus faible mais par contre, l'énergie cinétique est beaucoup plus importante

Contrairement aux autres procédés de découpe, le poinçon ne pénètre que très peu dans la pièce à découper. L'intérêt du procédé semble par ailleurs acquis : bavure réduite voir inexistante, états de surface améliorés, hauteur de bombé réduite, épaisseur de la zone écrouie réduite de 30 %. On peut par ailleurs découper des pièces en matériaux durs sans avoir à effectuer un traitement préalable afin de diminuer la résistance mécanique de ces derniers.

3 TENUE EN FATIGUE

Comme nous l'avons énoncé précédemment, chaque procédé de découpe conditionne fortement l'état géométrique, mécanique ou métallurgique de la pièce au niveau du bord découpé. Pour tenter de comprendre l'influence du procédé de découpe sur la limite en endurance de la pièce obtenue, les travaux que nous conduisons consistent à soumettre le bord découpé d'une éprouvette (voir figure 6) à une sollicitation cyclique.

Nous comparerons donc, au sens des courbes de Wohler issues d'essais de fatigue en traction ondulée à $R=0.1$, des éprouvettes plates obtenues suivant différents procédés. Les procédés étudiés sont au nombre de trois : le découpage classique, le découpage fin et le découpage adiabatique. En complément, nous avons défini un procédé de référence pour lequel l'éprouvette est obtenue par usinage en fraisage et dont le bord est poli.

Afin de pouvoir comparer les différents procédés et déterminer leur influence sur le bord découpé, nous effectueront une mesure de la géométrie de ce dernier (micro et macro), nous réaliserons une étude métallurgique de la pièce au niveau du bord découpé, et à l'aide d'une modélisation numérique des procédés de découpe, nous tenterons d'évaluer un ordre de grandeur des contraintes résiduelles occasionnées par le procédé d'obtention, en particulier celles dans le sens longitudinal de l'éprouvette, puisque ces dernières ont un impact important sur la limite en endurance compte-tenu du cyclage retenu.

3.1 Étude Préliminaire, forme de l'éprouvette

3.1.1 Géométrie de l'éprouvette

Compte-tenu des moyens de production disponibles en découpage adiabatique de tôle, nous avons défini une forme d'éprouvette qui soit conforme à la norme AFNOR A03-401, et de taille réduite.

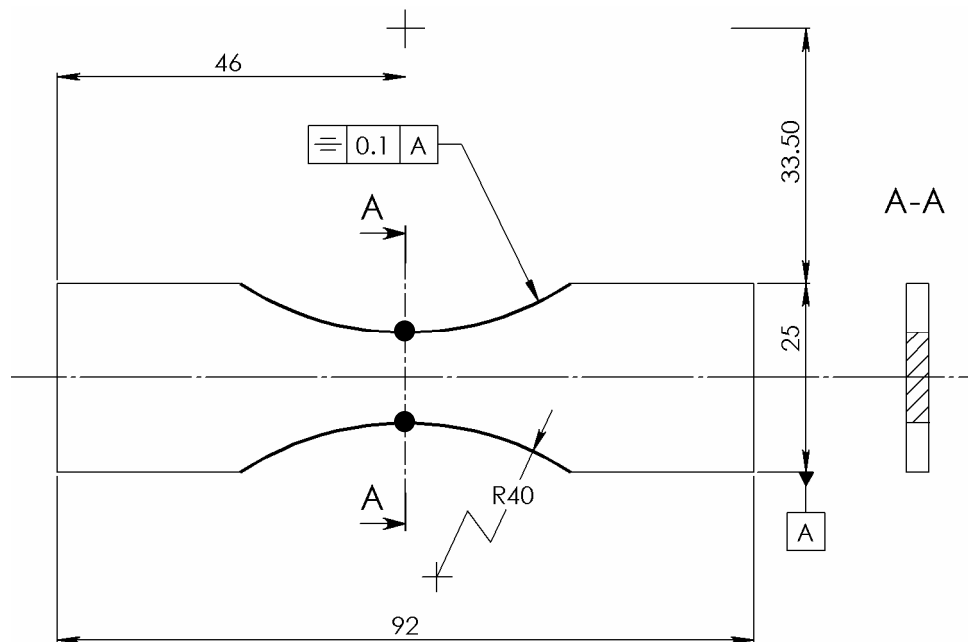


Figure 6. Seconde géométrie d'éprouvette plate de fatigue

En gras sur la figure précédente, on voit apparaître la zone découpée et les deux points qui figurent les zones où la sollicitation en traction est la plus importante.

3.1.2 Essai de validation en fatigue

Lors des essais réalisés [13], nous avons comparé deux éprouvettes de références afin de valider la forme de l'éprouvette réduite.

En comparant les résultats obtenus avec l'éprouvette réduite et celle de taille plus importante conforme à la norme AFNOR A03-401 (notée FE1), on observe que la limite en endurance obtenue pour notre éprouvette est sensiblement équivalente pour $R=-1$ et est meilleure pour $R=0.1$ (voir figures 7 et 8 ci-dessous). Or si on considère l'évolution de la limite en endurance σ_D en fonction du coefficient de concentration de contrainte K_t , nous devrions avoir le résultat inverse ($K_t=1.05$ pour l'éprouvette FE1, $K_t= 1.28$ pour l'éprouvette réduite). Par ailleurs, on observe également que le point de rupture sur l'éprouvette réduite, contrairement à l'éprouvette FE1, ne se situe pas au milieu de l'éprouvette, mais dans une zone plus large. Une des hypothèses retenue pour éclairer ces essais est que l'écroutissage local dans la zone la plus sollicitée est plus important pour l'éprouvette réduite que pour l'éprouvette FE1. Aussi, d'autres essais ont été planifiés avec un matériau moins sujet à l'écroutissage.

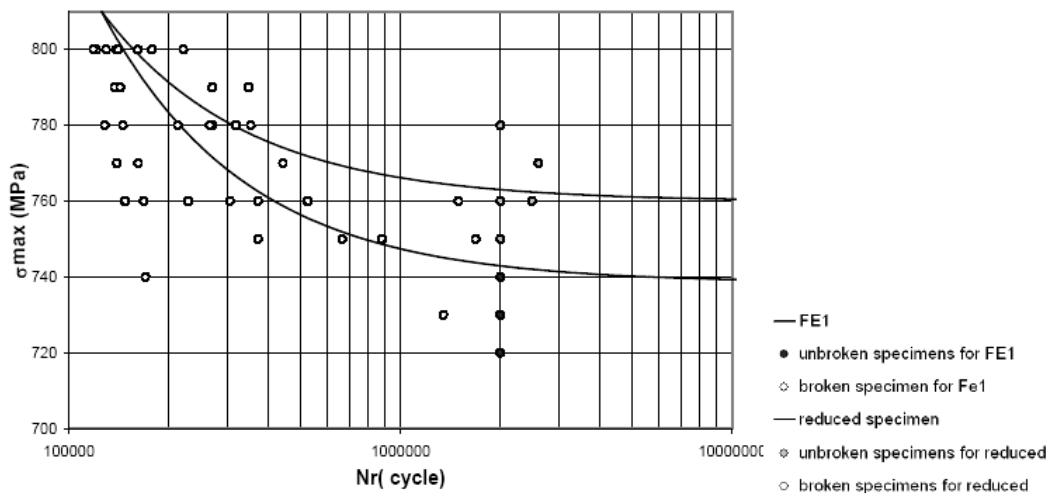


Figure 7. Courbes de Wohler obtenues avec $R=0.1$

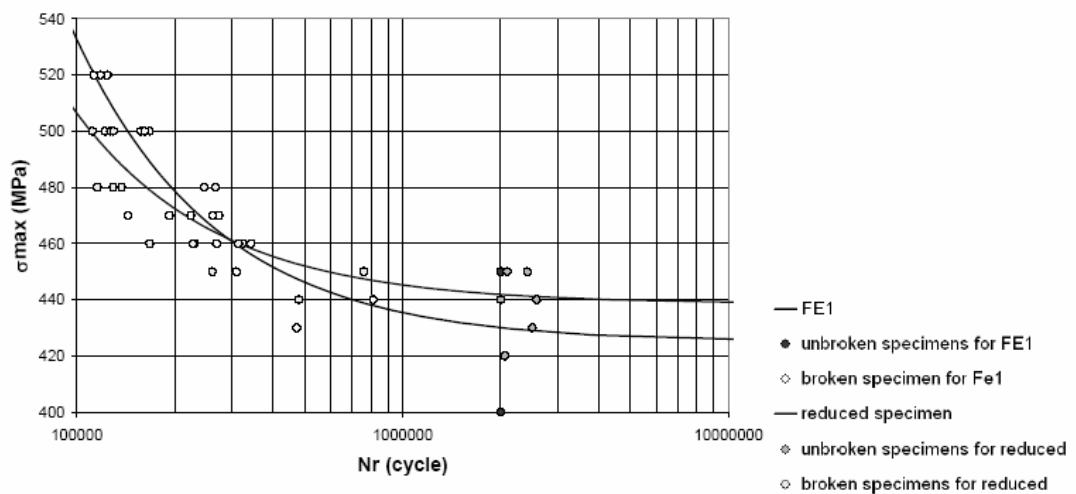


Figure 8. Courbes de Wohler obtenues avec $R=1$

4 PERSPECTIVES

Dès lors que la forme de l'éprouvette sera définitive, nous réaliserons les découpes de pièces et nous effectuerons l'ensemble des mesures et évaluations nécessaires au bon dépouillement des essais de fatigue qui seront prochainement conduits.

5 REFERENCES:

1. G. I. TAYLOR et M. A. QUINNEY, The latent energy remaining in a metal after cold working, *Proc. of the Royal Society of London*, A413, 1934, 307-326.
2. C. ZENER et J. H. HOLLOMON, Effect of strain rate upon plastic flow of steel, *Journal Appl. Phys.*, 15, 1944, 22-32.
3. A. MARCHAND et J. DUFFY, An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel, *Journal Mech. Phys. Solids*, 36, 3, 1988, 251-283.
4. A. K. ZUREK, The study of adiabatic shear band instability in a pearlitic 4340 steel using a dynamic punch test, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol 25A, 1994, 2483-2489.
5. M. H. LEAR, Numerical simulation of adiabatic shear bands and crack propagation in thermoviscoplastic materials, PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003
6. S. LI, W. K. LIU, A. J. ROSAKIS, T. BELYTCHKO et W. HAO, Mesh-free Galerkin simulations of dynamic shear band propagation and failure mode transition, *International Journal of Solids and Structures*, 39, 2002, 1213-1240.
7. J. KREJCI, J. BREZINA, J. BUCHAR et S. ROLC, Adiabatic shearing in cast austenitic steel under ballistic attack, *Journal de la Physique IV*, C3, 1991, 667-673.
8. S. P. TIMOTHY, The structure of adiabatic shear bands in metals: a critical review, *Acta Metallurgica*, 35, 1987, 301-306.
9. M. E. BACKMAN et S. A. FINNEGAN, The propagation of adiabatic shear, *Metallurgical Efforts at Hight Strain Rates*, 1973, 531-543.
10. J. L. DEREK, Microstructure transformation induced by adiabatic shearing in armour steel, *Acta Metallurgica*, 35, n°6, 1987, 1245-1249.
11. E. MARONNE, Prise en compte de l'effet de la découpe sur le comportement en fatigue des tôles d'acier, PhD Thesis, Université Blaise Pascal – Clermont II, 2003.
12. Passez à la vitesse supérieure, CETIM Information, n°177, 2002, 51-54.
13. Report of tests on reduced fatigue specimens, ARCELOR Research Center, 2007 6197 AUP.