



HAL
open science

Essai de cisaillement plan appliqué à des tôles minces

G. Gary, W. Nowacki

► **To cite this version:**

G. Gary, W. Nowacki. Essai de cisaillement plan appliqué à des tôles minces. Journal de Physique IV Proceedings, 1994, 04 (C8), pp.C8-65-C8-70. 10.1051/jp4:1994809 . jpa-00253339

HAL Id: jpa-00253339

<https://hal.science/jpa-00253339>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Essai de cisaillement plan appliqué à des tôles minces

G. Gary et W.K. Nowacki*

Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

** Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research, Swietokrzyska 21, 00-049 Warsaw, Poland*

résumé : Nous présentons un essai de cisaillement dynamique plan. Il est réalisé avec un montage dont le chargement et les déplacements sont contrôlés au moyen d'une barre de Hopkinson fonctionnant en compression. Ce montage permet d'appliquer un cisaillement plan à des matériaux, comme les tôles minces, disponibles sous forme de feuilles. On observe, à l'issue de l'essai, la grande qualité de l'homogénéité du champ des déformations résiduelles. Ceci confirme que la méthode permet de réaliser des essais de chargement induisant des champs de contraintes et de déformations exceptionnellement homogènes. En outre, de grandes déformations plastiques peuvent être atteintes sans provoquer de localisation de la déformation comme cela se produit dans un essai de torsion sur éprouvette cylindrique mince (voir [1] par exemple).

abstract : In this paper, a new dynamic plane shear test is discussed. It uses a new shear device, the loading and the displacements of which are controlled by a Split Hopkinson Pressure Bar (or Kolsky apparatus) used in the compression configuration. This device allows for the performance of tests under a plane shear state for a specimen having the form of slabs, as metal sheets for instance. An exceptional homogeneity of the permanent strain field over the total length of the specimen is observed after the test. It is concluded that the proposed method is the only known test providing, in the case of a thin sheet, homogeneous stress and strain fields. Furthermore, large deformations can be reached without any localisation of the strain, in contrary with the torsion test made with a thin cylindrical specimen. (see [1] for example)

1. INTRODUCTION

L'utilisation par l'industrie de codes de calculs capables de simuler la réponse des structures au crash rend nécessaire la connaissance du comportement dynamique des tôles minces qui composent pour une part significative les structures concernées. Les caractéristiques mécaniques de ce produit ne dépendent pas uniquement de sa composition métallurgique mais aussi du procédé de fabrication. Il est donc nécessaire de disposer de moyens d'essais adaptés à cette forme particulière.

Pour les essais de compression ou de traction dynamique, l'emploi des barres de Hopkinson est classique bien que non aisé pour des matériaux minces. Dans de tels essais, le déplacement total imposé est limité pour des raisons inhérentes au système des barres de Hopkinson [2], ce qui rend impossible la réalisation d'essais significatifs à des vitesses de déformation moyennes de l'ordre de 50 s^{-1} .

Nous proposons de réaliser un essai de cisaillement plan à l'aide d'un montage adapté à une barre de Hopkinson de compression qui transforme la compression en cisaillement et permet d'atteindre des déformations significatives même à d'assez faibles vitesses de déformation. Utilisé sous chargement statique, ce système permet d'imposer un cisaillement plan à une éprouvette de largeur constante. Ce chargement est de nature comparable au chargement induit par un essai de torsion à déformation axiale fixe. En petites déformations, il se réduit à un chargement en cisaillement pur.

2. DESCRIPTION DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT SIMPLE.

2.1 Définition du montage.

Le principe du montage est représenté sur la figure 1. Ce dernier est constitué de deux parties cylindriques coaxiales. La partie intérieure est pleine et la partie extérieure est creuse. Deux bandes de tôles, situées entre les deux cylindres auxquels elles sont fixées par des mâchoires réalisant un encastrement, sont soumises à un cisaillement dans leur plan lorsque les cylindres se déplacent axialement l'un par rapport à l'autre.

Le diamètre du cylindre intérieur est de 25,4 mm et sa hauteur de 45 mm. La pièce extérieure est tubulaire, de section intérieure cylindrique et de section extérieure hexagonale. Elle est munie de renforts assurant une meilleure fixation de l'éprouvette et augmentant la rigidité du montage. Chaque pièce est constituée de deux parties symétriques entre lesquelles est fixée l'éprouvette avant un serrage réalisé au moyen de vis à haute résistance - Fig. 2. Les pièces sont en acier autotrempeant (0,35% de carbone, 3,8% de nickel, 1,7% de chrome, 0,3% de molybdène) spécialement élaboré pour des éléments d'outillage exposés à des contraintes élevées. Les mors du montage ont une empreinte spécialement étudiée formée de lamelles perpendiculaires à la direction du cisaillement afin d'assurer une adhérence maximale. Le centrage de l'éprouvette par rapport au montage est assuré avec un dispositif auxiliaire. On peut tester des éprouvettes d'épaisseurs différentes. Les résultats présentés ici correspondent à des éprouvettes d'acier "XES" d'épaisseur 0,74 mm. Chaque zone utile, rectangulaire au début de l'essai, se déforme selon une forme très proche de celle d'un parallélogramme dont la longueur et la hauteur restent constantes durant l'essai.

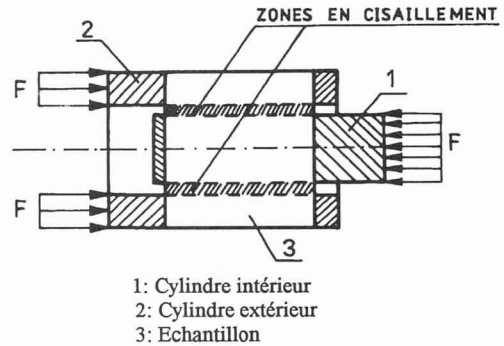


Fig. 1: principe du montage

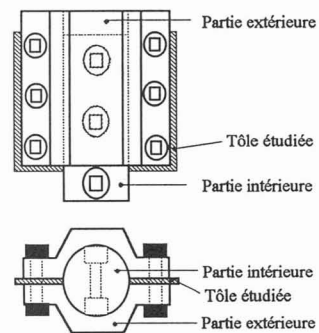


Fig. 2: détail du montage

Le bon comportement du système a d'abord été testé sous chargement quasi-statique. La relation force-déplacement obtenue est donnée sur la figure 3. On vérifie effectivement l'excellente tenue du système de fixation de la tôle et l'homogénéité du champ de déformation dans la zone chargée.

2.2. Utilisation en dynamique.

On procède comme dans le cas statique mais le chargement est cette fois appliqué à l'aide du système des barres de Hopkinson comme indiqué sur la figure 4. Ce système permet, comme on le sait [2], d'accéder aux forces et aux vitesses appliquées aux deux faces de l'échantillon, qui n'est autre ici que le montage. Ce dernier a été conçu pour que chacune de ses deux parties mobiles ait la même impédance mécanique que les

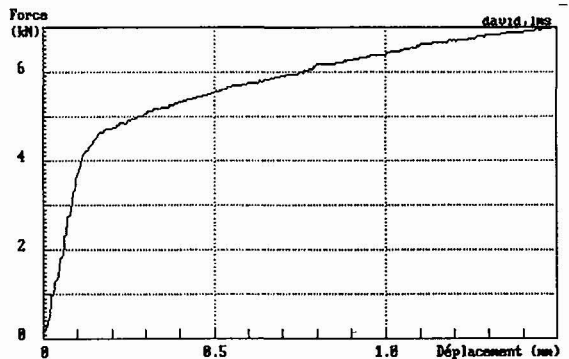


Fig. 3: relation "force-déplacement" sous chargement quasi-statique

barres ; tout se passe donc comme si le système de fixation des tôles était intégré aux barres et, en théorie, aucun signal parasite n'est induit au changement d'interface (points "A" et "B" de la figure 4).

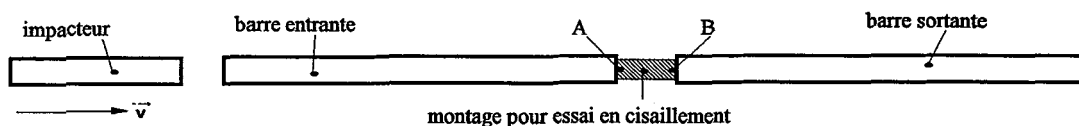


fig 4: description du système d'essai aux barres d'Hopkinson

Analyse simplifiée. Dans l'hypothèse où le chargement est supposé homogène (comme il est raisonnable de la faire si le temps de mise en équilibre est petit devant la durée de l'essai), on peut dépouiller l'essai comme dans le cas quasi statique. Le déplacement est déduit de la connaissance des vitesses appliquées aux faces du système. La force est prise égale à la moyenne des forces entrante et sortante, après avoir vérifié qu'elles sont peu différentes.

Analyse complète. Cependant, une analyse de l'aspect transitoire du chargement révèle le caractère complexe de la mise en équilibre. En effet, la mise en vitesse du côté chargé de l'échantillon n'est pas instantanée (elle nécessite au moins la traversée du montage par le front de l'onde de compression et la vitesse particulière augmente encore brutalement après la réflexion de l'onde à l'extrémité du système). Puis, plus classiquement, l'onde (de cisaillement) induite dans l'échantillon atteint l'autre partie du montage. Un calcul transitoire de la réponse idéale du système a donc été réalisé à l'aide d'un code de calcul par éléments finis afin d'évaluer l'importance de la phase de mise en équilibre.

2.3 Simulation du système.

La mise au point d'un tel essai nécessite en effet de distinguer les problèmes fondamentaux des difficultés technologiques. Le calcul transitoire a donc été réalisé sur le système complet constitué des barres de Hopkinson et du montage. La comparaison des résultats idéaux ainsi obtenus avec les résultats expérimentaux permet d'évaluer les difficultés technologiques de l'essai.

La figure 5 représente la force sortante calculée par le code dans un cas type. On vérifie au passage que cette grandeur est très voisine de celle calculée à partir des ondes fournies par le code en utilisant la technique de dépouillement implantée dans notre laboratoire, telle que décrite dans [2 à 6]. L'écart entre les deux mesures est à attribuer à l'imparfaite représentation de la dispersion géométrique dans le modèle numérique. Ce résultat, est encourageant puisqu'il montre une force sortante sans oscillations, ce qui permettra d'utiliser la technique du dépouillement simplifié pour avoir accès à la relation force-déplacement au niveau du montage.

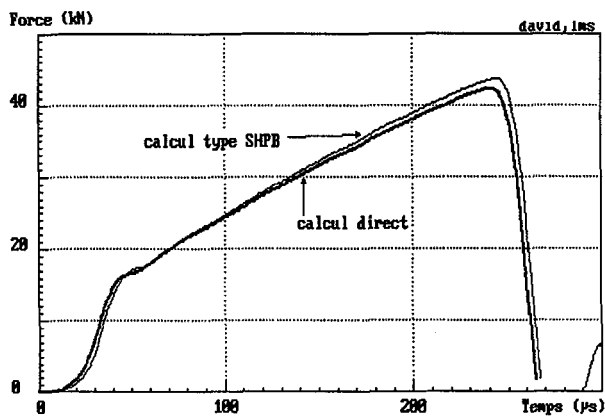


Fig 5: force sortante (calcul direct, calcul type SHPB)

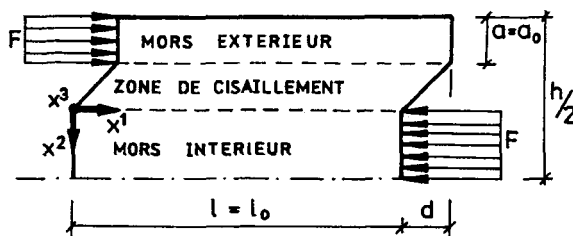


Fig. 6: schéma de fonctionnement

3. CALCUL DES CONTRAINTES D'APRES LES MESURES GLOBALES.

Dans les axes représentés sur la figure 6, le tenseur des contraintes est plan : seules les composantes σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , sont a priori non nulles. La présence des composantes diagonales de la contrainte est liée à la condition $a=a_0=const.$ qui induit une rotation du repère principal dans lequel le chargement n'est donc pas un chargement de cisaillement pur. Néanmoins, dans le cas idéal où l'état de contrainte serait parfaitement homogène, il est possible de relier les composantes des contraintes aux efforts globaux mesurés moyennant un certain nombre d'hypothèses.

3.1. Relation entre les contraintes et les efforts globaux.

En supposant, comme les résultats de la simulation nous y autorisent, que l'analyse locale de l'échantillon peut être réalisée dans l'hypothèse quasistatique (temps de mise en équilibre de l'échantillon petit devant la durée totale de l'essai) on retrouve un problème connu. C'est en effet le problème dit du "glissement simple" étudié par divers auteurs [7, 8] en particulier dans la perspective d'une formulation en grandes transformations. Ce problème n'a pas de solution explicite dans le cas général. Nous nous limiterons donc, à titre indicatif, à examiner le cas rigide plastique tel que décrit dans [14]. C'est évidemment un cas très particulier, mais il rend compte de façon satisfaisante du comportement d'une tôle métallique et permet d'indiquer une voie d'analyse de l'essai. Il n'est bien sûr pas question d'aborder ici ce problème dans un cadre général car ce serait hors des propos de cet article. On trouvera des analyses de problèmes voisins dans les références [9 à 13].

Dans le cas d'un modèle rigide plastique (où on néglige l'élasticité) décrit par un critère de Mises avec une loi normale d'écoulement et un écrouissage isotrope on peut montrer que l'état de contrainte est un état de cisaillement pur. Nous ne détaillerons pas ici les calculs, mais ce résultat est la conséquence de la déformation sans variation de volume propre à la plasticité, de l'état trivial de contrainte plane, et de la cinématique de l'essai au cours duquel la surface de l'échantillon reste constante (parallélogramme de longueur et hauteur constantes). Il en découle un état de contrainte purement déviatorique et donc ici, de cisaillement pur. On peut alors montrer que contrainte et déformation plastique équivalente associées s'expriment en fonction des grandeurs globales par les relations suivantes :

$$\sigma_{eq.} = \frac{F\sqrt{3}}{A} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{eq.} = \frac{d}{a_0\sqrt{3}} \quad \text{où} \quad \sigma_{eq.} = \left(\frac{3}{2} \sigma_{ij}^{dev} \sigma_{ij}^{dev} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{eq.} = \left(\frac{3}{2} d_{ij}^p d_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}$$

Où $A = l_0.e$ est la section de la tôle sollicitée en cisaillement, F la force axiale mesurée et d le déplacement relatif total mesuré.

On vérifie le caractère acceptable de ces hypothèses en comparant la relation force déplacement de la simulation à celle déduite du modèle utilisé dans le code (figure 7)

3.2. Evaluation des imperfections expérimentales.

La comparaison entre les réponses en termes force-déplacement des résultats expérimentaux quasistatique (fig. 3), expérimentaux dynamique (fig. 8) et simulés dynamique (fig. 7) montre que le caractère imparfait de la réponse expérimentale dynamique doit être dû à des difficultés technologiques encore imparfaitement résolues.

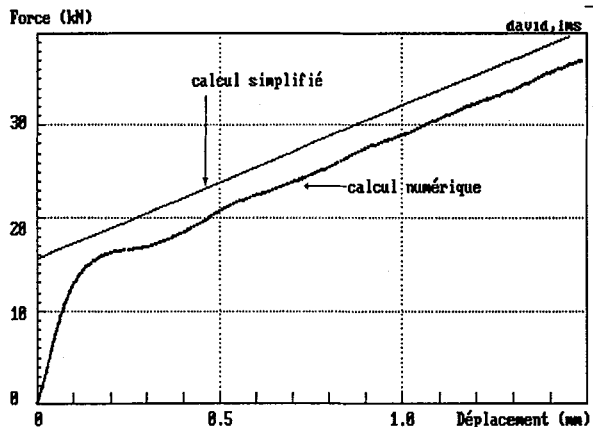


Fig. 7: réponse globale (calcul numérique, théorie simplifiée)

3.2.1 Difficultés indépendantes de la vitesse de chargement.

Dans les axes représentés sur la figure 6, on peut considérer que le montage est parfaitement rigide suivant l'axe x_2 . Cependant, la présence de bords libres au bout de l'éprouvette crée une hétérogénéité du champ des contraintes puisque le vecteur contrainte normal à la surface doit être nul. On doit donc supposer que la zone perturbée est de dimension négligeable par rapport à l'ensemble de l'éprouvette. Cette hypothèse est raisonnable. En effet, des résultats expérimentaux quasi-statiques réalisés au moyen d'un montage de nature comparable ont permis de vérifier empiriquement la bonne qualité des résultats lorsque le rapport a_0/l_0 n'excédait pas 1/10. Voir [11] et [12].

3.2.2. Difficultés propres au caractère dynamique du chargement.

La principale différence qualitative significative observée entre les résultats dynamiques simulés et le résultat réel se caractérise par des oscillations dont la fréquence semble liée au temps de parcours des ondes élastiques dans le montage (voir figure 8). Pour avoir observé des résultats nettement plus perturbés dus au mauvais centrage de l'éprouvette, nous attribuons ces oscillations à un alignement imparfait des deux demi-faces de chaque partie du montage en contact avec la barre entrante et avec la barre sortante. Un écart de position de un dixième de millimètre induit en effet un décalage temporel de l'ordre de la dizaine de microsecondes suffisant pour induire des effets parasites tels que la flexion du montage, effets visibles à l'échelle de temps de l'essai.

Néanmoins la qualité de l'équilibre observé nous autorise à exploiter ces résultats en éliminant les oscillations par filtrage. On dispose ainsi d'une méthode permettant de tester la sensibilité à la vitesse de déformation du matériau étudié soumis à un chargement à forte composante de cisaillement. On constate par exemple, pour l'acier "XES" qui a été testé, une sensibilité à la vitesse conforme aux résultats obtenus par ailleurs [15] en compression (figure 9).

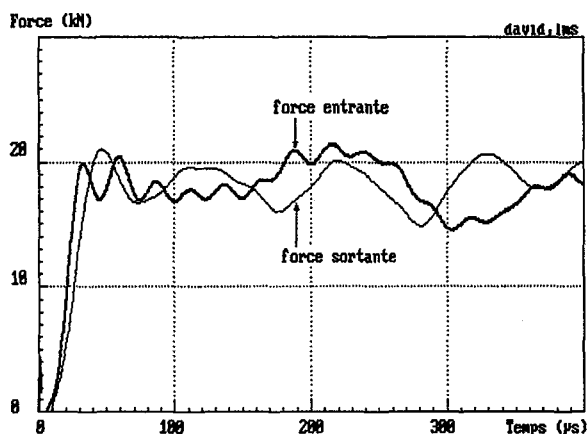


Fig. 8: Forces entrante et sortante mesurées

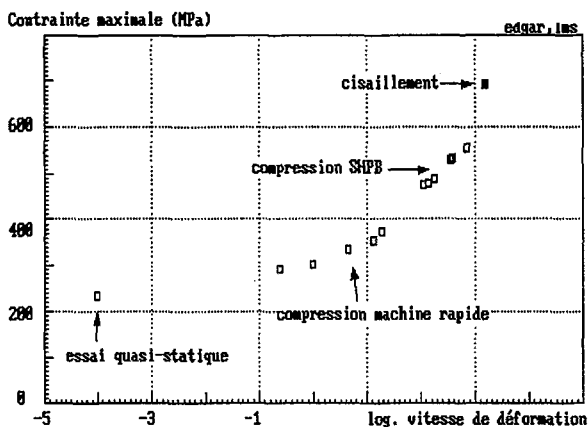


Fig.9: Comparaison avec la compression simple.

4. CONCLUSION.

La confrontation des premiers résultats expérimentaux avec les résultats d'une simulation numérique prenant en compte la totalité des aspects transitoires de l'essai montre que la technique proposée permet de réaliser des essais de cisaillement dynamique plan sur tôles minces en utilisant un montage classique de barres de Kolsky en compression. Cet essai présente plusieurs avantages par rapport aux essais existants : il s'adapte à un système de chargement bien maîtrisé, il s'applique à des structures bi-dimensionnelles planes, il permet d'atteindre de grandes déformations sans apparition de localisation.

REFERENCES

- [1] Hartley K.A., Duffy J., Hawley R.H., "Measurement of the temperature profile during shear band formation in steels deforming at high strain rates", *J. Mech. Phys. Solids*, **3, 35**, 1987
- [2] Gary G. et Zhao H., "Etude expérimentale du comportement dynamique des matériaux composites.", *Annales des composites*, numéro spécial 1993, Editions AMAC, Lyon.
- [3] Gary G., Klepaczko J.R. et Zhao H., "Correction de dispersion pour l'analyse de petites déformations aux barres de Hopkinson", *Journal de Physique IV*, Colloque C3, supp. au journal de Physique III, vol 1, Octobre 91, Les Editions de Physique, Les Ulis, F.
- [4] Gary G. et Klepaczko J.R., "A computer program for the analysis of the SHB test", Paris/Metz (1988)
- [5] Gary G., Klepaczko J.R. et Zhao H., "Corrections for wave dispersion and analysis of small strains with Split Hopkinson Bar", *Proceedings of "International Symposium of Impact Engineering"* SENDAI Japan, October 1992
- [6] Gary G., Klepaczko J.R. et Zhao H., "Application of microcomputers for wave dispersion corrections for Split Hopkinson pressure bar", *ACMIRME'93 International Symposium*, Xian, (1993)
- [7] Mandel J., "Relations de comportement des milieux élastiques-plastiques et élastiques-viscoplastiques. Notion de repère directeur.", *Fondations of plasticity*, A.Sawczuk [ed.], Noordhoff, Leyden, 387-400, 1973.
- [8] Dafalias Y.F., "The plastic spin", *J.Appl. Mech.*, **52**, 865-871, 1985
- [9] PAULUN J.E., PECHERSKI R.B., "On the application of the plastic spin concept for the description of anisotropic hardening in finite deformation plasticity", *Int. J.of Plasticity*, vol.3, 1987, pp.303-314.
- [10] SWIFT H.W., "Length changes in metals under torsional overstrain", *Engineering*, **163**, 1947, p.253.
- [11] Tourabi A., Wack B., Guelin P., Favier D., Pegon P., Nowacki W.K., "Remarks on an experimental plane shear test and on an anisotropic elastic-plastic theory", *SMIRT 93*, Stuttgart, August 15-20, 1993, (Elsevier Sci. Publ., 1993)
- [12] Rauch E.F., G'sell C., "Flow localization induced by a change in strain path in mild steel", *Material Sci. and Eng.*, **A111**, 1989, p.71.
- [13] Szabo L., Balla M., "Comparison of some stress rates", *Int.J.Solids Structures*, vol.25, 1989, pp.279-297.
- [14] Paulun J.E., Pecherski R.B., "On the relation for plastic spin", *Archive of Appl. Mech.*, vol. 62, 1992, pp.376-35.
- [15] Gary.G, Zhao H., Résultat non publié extrait d'un Rapport de Recherche (pour mémoire).

Remerciements. Ce travail a partiellement bénéficié du soutien du Comité de la Recherche Polonaise, KBN-Projet n° 3 1014 91 01 concernant *l'Etude des dommages thermomécaniques et des transformations de phases dans les matériaux*.

Nous remercions également Messieurs **Ben Redjeb K.** et **Zhao H.** pour leur participation active à la réalisation et la mise au point des essais, **Navidi P.** qui a réalisé les simulations numériques transitoires et **Rota L** pour son analyse explicite de la cinématique de l'essai.