Analyse du frottement dans les essais de compression sur barres d'Hopkinson

A. Lichtenberger, E. Lach, A. Bohmann

► To cite this version:

A. Lichtenberger, E. Lach, A. Bohmann. Analyse du frottement dans les essais de compression sur barres d'Hopkinson. Journal de Physique IV Proceedings, 1994, 04 (C8), pp.C8-29-C8-34. 10.1051/jp4:1994803 . jpa-00253333

HAL Id: jpa-00253333

<https://hal.science/jpa-00253333>

Submitted on 1 Jan 1994

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.

Analyse du frottement dans les essais de compression sur barres d'Hopkinson

A. Lichtenberger, E. Lach et A. Bohmann

Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis, ISL, 5 rue du Général Cassagnou, BP. 34, 68301 Saint-Louis cedex, France

Résumé: Une étude a été menée sur l'influence du frottement sur les résultats d'essais de compressions statique et dynamique. Un relevé du profil après déformation plastique d'éprouvettes cylindriques a été effectué afin d'évaluer l'importance du frottement dans les essais. Une simulation numérique de cet essai permet avec un coefficient de frottement adapté de retrouver la forme de l'échantillon déformé.

Par ailleurs, le coefficient de frottement a été déterminé à partir d'essais de compressions d'anneaux. Dans ces essais la position de la ligne neutre d'écoulement plastique dépend du coefficient de frottement qui a une influence directe sur la géométrie de l'échantillon déformé. Cette méthode utilisée jusqu'à présent par Burgdorf, dans le domaine statique, a été transposée dans le domaine dynamique pour les essais sur barres d'Hopkinson.

Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de frottement est relativement faible et diminue en présence de lubrifiant et lorsque la vitesse de déformation croît.

Abstract: An investigation has been carried out about the influence of friction on the results of static and dynamic compression tests. The barreling of cylindrical specimens profile after plastic deformation shows the effect of friction in experiments. A numerical simulation of this experiment with an adapted coefficient of friction allows to find the form of the deformed specimen.

To define coefficients of friction, compression ring tests have been executed. The geometry of deformed specimens is only influenced by the position of neutral line which depends only on the coefficient of friction. This method was developed by Burgdorf and used for static application up to now. It has been transposed for dynamic investigation for the Split-Hopkinson-Pressure-Bar.

Experimental results show that coefficients of friction are relatively small and are decreasing with lubrication and with increasing strain rate.

1. INTRODUCTION.

Les phénomènes de frottement entre l'échantillon et les faces d'appui d'une installation de barres d'Hopkinson en compression ont en général une influence sur l'écoulement du matériau, la répartition des déformations et les résultats de l'essai. Le frottement est la cause de la déformation en forme de tonneau des éprouvettes au cours de l'essai, ce qui conduit ainsi à des erreurs dans la détermination du comportement du matériau. Par ailleurs, les études actuelles s'orientent vers des matériaux de plus en plus résistants et dans les domaines de vitesses et de déformations élevées; la part due au frottement sur le résultat est plus importante et le problème d'une diminution du frottement et de la connaissance de ce paramètre devient donc de plus en plus nécessaire.

2. INFLUENCE DU FROTTEMENT SUR LA FORME DES EPROUVETTES CYLINDRIQUES.

Lors des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques, on constate, sur le contour extérieur, un bourrelet plus ou moins important selon le taux de déformation plastique. Cet effet est dû aux conditions d'essais et en particulier au frottement aux interfaces [1].

Ce frottement peut varier avec la vitesse de déformation et peut aussi avoir une influence sur les courbes de contrainte-déformation obtenues au cours de l'essai, la géométrie cylindrique de l'éprouvette n'étant plus respectée. De plus, dans les essais dynamiques, le frottement joue un rôle non négligeable sur l'apparition des bandes de cisaillement adiabatique et le début de l'endommagement

2.1 Conditions d'essais:

Des essais de compression ont été effectués en statique ($\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ /s) et en dynamique sur une installation de barres d'Hopkinson de diamètre 20mm ($\dot{\epsilon} = 2,4 \cdot 10^3$ /s).

Le matériau utilisé pour ces tests est un acier à 0.45% de carbone (type XC45).

Afin de modifier les conditions de frottement entre l'éprouvette et les supports, différentes conditions de lubrification ont été sélectionnées: (a) à sec; (b) dépôt de bisulfure de molybdène;

(c) mélange spécial de particules graphitées et d'huile légère; (d) insertion d'une feuille mince en téflon de 25µm d'épaisseur.

Fig.1: Compression statique pour différentes lubrifications.

2.2 Résultats expérimentaux:

Les figures 1 et 2 montrent les courbes de contrainte-déformation vraies obtenues dans le cas des essais statiques et dynamiques. On constate que le frottement a une influence directe sur la réponse du matériau en compression. Un frottement important aux interfaces conduit ainsi à une augmentation apparente de la résistance du matériau testé. La couche intermédiaire en téflon permet de réduire le frottement, mais introduit des erreurs aux faibles déformations, dues à l'écrasement de cette couche trop épaisse qui masque l'apparition de la limite élastique. La réponse est plus satisfaisante dans les deux autres cas avec lubrifiant. La lubrification (d) conduit aux contraintes d'écoulement les plus faibles.

Une évaluation quantitative du frottement peut être faite à partir du profil de l'éprouvette après un certain taux de déformation plastique (25%).

On a ainsi défini un facteur de forme F à partir des dimensions caractéristiques du contour extérieur de l'éprouvette. Ce facteur est peu sensible aux variations éventuelles de la déformation globale; il est d'autant plus élevé que le frottement entre les interfaces est important. Rmax et Rmin étant les diamètres moyens extérieurs de l'échantillon, on a:

(1) $F = h_0 / R_0 \cdot \Delta R / \Delta h = h_0 \cdot (R_{\max} - R_{\min}) / R_0 \cdot (h - h_0)$

Le tableau I montre les valeurs obtenues pour ce facteur de forme dans les différentes conditions d'essais. On constate que l'augmentation de la vitesse de déformation entraîne une diminution importante de F.

Fig.2: Compression dynamique pour différentes lubrifications.

Tableau I: Facteurs de forme pour différents cas de lubrification.

Lubrifiant	a	b	c	d
Essais statiques	0,274	0,136	0,112	0,087
Essais dynamiques	0,166	0,61	0,037	0,069

Dans le domaine dynamique, les plus faibles valeurs sont atteintes pour la lubrification spéciale (cas c), la lubrification à sec correspondant au frottement maximal.

Une simulation numérique de l'essai de compression a été faite avec le code Dyna 2D. En introduisant la loi de comportement du matériau et une certaine valeur du coefficient de frottement μ , il est possible de reconstituer une carte des déformations plastiques avec le contour exact de l'échantillon déformé. Le facteur de forme F pourrait ainsi être relié au coefficient de frottement; la figure 3 montre un exemple avec $\mu = 0,08$ correspondant à $F = 0,112$.

Fig.3: Calcul des déformations plastiques

3. CARACTERISTIQUES DE FROTTEMENT AU MOYEN D'ESSAIS D'ANNEAUX.

3.1 Description mathématique du frottement:

Le frottement est caractérisé par la résistance au glissement entre deux surfaces se déplaçant tangentiellement l'une sur l'autre. Il est représenté par la contrainte de cisaillement τ qui existe entre les deux surfaces. Elle est en général désignée par la contrainte de cisaillement au frottement (appelée aussi cission de frottement) τ_R . Dans la théorie de la plasticité, deux modèles physiques ont été adoptés pour la description de τ_R .

La loi de coulomb pour le frottement établit une relation entre la contrainte normale σ_n qui agit à la compression et la contrainte de cisaillement au frottement qui apparaît entre les surfaces. Soit:

$$(2) \quad \tau_R = \mu \cdot \sigma_n$$

Le facteur de proportionnalité, appelé coefficient de frottement de Coulomb, est très souvent considéré comme constant durant l'essai et sur toute la surface de frottement. De nouvelles études montrent cependant que ce coefficient dépend non seulement des matériaux en contact, mais aussi de la géométrie des surfaces de contact, de la pression, de la vitesse de glissement et de la température. Pour une contrainte de cission τ croissante, le coefficient de frottement peut augmenter, diminuer ou rester constant, selon les variations relatives des contraintes normale et de cisaillement au niveau des interfaces [2].

Une autre loi classique est celle de Tresca, basée sur une relation entre la cission de frottement τ_R et contrainte d'écoulement maximum au cisaillement, ou cission critique du corps le plus mou $\tau_{\max}$.

$$(3) \quad \tau_R = m \cdot \tau_{\max}$$

Le coefficient de proportionnalité m est appelé coefficient de frottement de Tresca.

3.2 Principes de base de l'essai de compression d'anneau:

Un grand nombre de méthodes d'essais reposent sur le fait que l'évolution des déformations au cours de la compression dépend des conditions de frottement au niveau des surfaces de contact. Parmi ces méthodes l'essai de compression d'anneau joue un rôle particulier. Cet essai a été proposé par Kudo [3]; Male et Cockcroft ont montré que la variation des dimensions d'un anneau à la compression (en particulier le diamètre intérieur) est une grandeur sensible au comportement en frottement [4]. Pour un faible coefficient de frottement, le diamètre intérieur de l'anneau augmente régulièrement durant la compression, alors qu'il diminue pour un coefficient de frottement élevé. Dans le cas d'une absence de frottement l'échantillon reste cylindrique et chaque diamètre augmente en proportion de sa distance au centre.

Pour déterminer les valeurs de coefficient de frottement m et μ avec cet essai, Burgdorf a établi une relation basée sur la théorie de la plasticité en mécanique des milieux continu; elle relie la résistance au frottement et la variation de forme de l'anneau [5], [6].

A partir d'une considération à l'état d'équilibre on obtient l'équation différentielle ci contre:

$$(4) \quad \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{2\tau}{h}$$

Pour tenir compte des champs de vitesses et déterminer les contraintes normales l'anneau est divisé en 2 parties (figure 4). La limite entre ces deux domaines forme la ligne de limite d'écoulement (ou ligne neutre) avec un rayon r_n . L'écoulement plastique du matériau se produit vers l'extérieur pour le domaine 1 et vers l'intérieur pour le domaine 2. On suppose les vitesses radiales indépendantes de z . La forme en tonneau de l'éprouvette n'est pas prise en considération dans l'analyse qui suit. Les vitesses dans les deux domaines peuvent être décrites par un champ de vitesse commun [2]:

$$(5) \quad v_r = v_{r1} = v_{r2} = v_n \cdot (r^2 - r_n^2) / 2h \cdot r$$

$$(6) \quad v_z = v_{z1} = v_{z2} = v_n \cdot z / h$$

En supposant le coefficient de frottement μ constant, on obtient les équations. (2) et (4), les champs de vitesses (5) et (6) et selon le critère d'écoulement de Von Mises une équation permettant la détermination du rayon de la ligne neutre r_n :

$$(7) \quad e^{\frac{2\mu r}{h}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{r_n}^r \frac{r_n^2}{r \sqrt{3r^4 + r_n^4}} e^{\frac{2\mu r}{h}} dr - e^{\frac{2\mu(2r_n - r)}{h}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{r_n}^{r_n} \frac{r_n^2}{r \sqrt{3r^4 + r_n^4}} \cdot e^{\frac{2\mu(2r_n - r)}{h}} dr = 0$$

Hawkyard et Johnson [7] supposent une cisssion constante: $\tau = \tau_R$ et appliquent les équations (3) (4) et (5) ainsi que le critère d'écoulement de von Mises pour aboutir à deux équations de détermination de la ligne neutre: en posant: $X_i = r_i / r_n$ et $X_a = r_a / r_n$

$$(8) \quad r_n \leq r_i \quad \frac{2mr_i}{h} = \frac{r_i}{r_e - r_i} \ln \left[\frac{(\sqrt{3X_e^4 + 1 - 1})X_i^2}{\sqrt{3X_i^4 + 1 - 1})X_e^2} \right]$$

$$(9) \quad r_i \leq r_n \leq r_e \quad \frac{2mr_i}{h} = \frac{X_i}{X_e + X_i - 2} \ln \left[\frac{(\sqrt{3X_e^4 + 1 - 1})X_i^2}{(\sqrt{3X_i^4 + 1 - 1})X_e^2} \right]$$

Avec les équations (8) et (9) et connaissant les coefficients de frottement

on peut attribuer à chaque géométrie d'éprouvette un rayon de la ligne neutre r_n . Néanmoins, cette valeur de r_n ne peut pas être déterminée directement et la résolution des équations passe par une méthode itérative.

Fig. 4: Schéma de l'anneau.

3.3 Calcul des abaques:

Les difficultés de l'exploitation sont dues à la détermination du rayon de la ligne neutre. Il ne peut être mesuré expérimentalement et doit être calculé à partir de l'équation (7); mais la résolution de cette équation nécessite la connaissance du coefficient de frottement cherché. Le calcul d'abaques permet de contourner cette difficulté [6].

Pour un coefficient de frottement constant, à l'aide de l'équation (7), on calcule tout d'abord le rayon de la ligne neutre r_{n0} correspondant à la géométrie initiale (r_{e0} , r_{i0} , h_0). La hauteur h_0 est ensuite réduite d'une quantité $\Delta h = h_1 - h_0$, en supposant, en première approximation, négligeable la modification de la position de la ligne neutre. Les nouveaux rayons (r_{e1} , r_{i1}) peuvent être calculés en considérant le volume constant de chaque coté de la ligne neutre r_{n0} . A cette nouvelle géométrie d'éprouvette (r_{e1} , r_{i1} , h_1) on fait correspondre une nouvelle valeur de la ligne neutre r_{n1} , en conservant le même coefficient de frottement. La hauteur est alors réduite à h_2 , ce qui conduit à de nouvelles dimensions (r_{e2} , r_{i2} , h_2), avec un rayon r_{n2} . On calcule ainsi les

variations de géométrie de l'éprouvette par pas successifs Δh

La même procédure de calcul est appliquée pour d'autres valeurs du coefficient de frottement. On obtient ainsi sur la figure 5 la relation entre le rayon intérieur et la hauteur de l'échantillon pour différentes valeurs du coefficient de frottement de Coulomb. Des relations similaires ont été calculées pour le rayon extérieur. Ces abaques, qui ne sont toutefois valables que pour la géométrie fixée, permettent une détermination très facile aussi bien pour le coefficient de frottement de Coulomb: μ , que pour celui de Tresca: m .

Fig.5: Coefficients de friction pour l'acier XC45

3.4 Etude du frottement dans les essais dynamiques:

Pour étudier l'influence du frottement sur les résultats de l'essai de compression sur barres d'Hopkinson, Klepaczko a entrepris une analyse numérique [8]. Il a incorporé l'effet du frottement avec des

considérations énergétique, en tenant compte également des forces d'inertie. Pour cela, des éprouvettes avec différents rapports h/d ont été utilisées. Il détermine le coefficient de frottement de coulomb sans tenir compte des variations en cours d'essai. Les calculs ont été fait avec une valeur de $\mu = 0.1$, qui lui permet d'obtenir un bon accord entre calcul et expérience.

Une détermination expérimentale quantitative du frottement a été effectuée par Gorham et al.[9]. Il se base sur l'analyse de l'essai d'anneau. d'Avitzur qu'il applique au cas de l'impact direct [10]. Dans le cas d'une éprouvette cylindrique, l'équation d'Avitzur se ramène à :

$$(10) \quad \bar{P} = \left[1 + \frac{2mr_e}{3\sqrt{3}h} \right] \sigma_y$$

Elle permet une correction des résultats expérimentaux à partir du coefficient de frottement déterminé par essais d'anneaux. Gorham a effectué des essais d'anneaux avec une géométrie particulière qui respecte un certain rapport entre les diamètres intérieur, extérieur et la hauteur. Il obtient des valeurs assez faibles d'environ $m = 0,05 \pm 0,03$.

Fig.6: Coefficients de friction pour le cuivre.

3.5 Résultats expérimentaux et interprétation:

Le dépouillement de l'essai nécessite de connaître la hauteur et le rayon intérieur. Dans la littérature il est spécifié que la mesure du rayon extérieur est entachée d'une erreur plus importante que le rayon intérieur. Nous avons effectué un calcul d'erreur qui montre que l'incertitude sur le coefficient de frottement est 5 fois plus élevée avec la mesure du diamètre extérieur qu'avec le diamètre intérieur. Ce dernier a été déterminé par une méthode plus précise de mesure du volume de la cavité intérieure qui ainsi intègre aussi certaines inhomogénéités axiales de la déformation. Contrairement au procédé décrit précédemment pour la détermination des abaques (avec des pas de 0,2mm) la déformation finale a été obtenue en une seule étape. Les résultats expérimentaux pour le cuivre et l'acier XC45 sont représentés sur les figures 5 et 6.

Les valeurs pour les coefficients de frottement de Coulomb et de Tresca, obtenues soit à l'aide des abaques, soit par calcul direct, sont indiquées dans le tableau II. Les écarts sont dus aux différentes méthodes d'évaluation déjà décrites. Le calcul direct de μ n'est valable que si la ligne neutre reste inchangée, l'hypothèse d'un volume constant de part et d'autre de cette ligne étant alors respectée. Les résultats obtenus montrent que cette condition n'est pas toujours satisfaite en particulier pour les déformations supérieures à 30%. En toute rigueur, il serait nécessaire de renouveler systématiquement la lubrification entre chaque étape de déformation, afin de maintenir le frottement constant et d'éviter un écart trop important aux grandes déformations. Les essais correspondants effectués dans le cas de l'acier XC45 ont conduit à des coefficients de frottement beaucoup plus constants avec la déformation; ces coefficients varient de 0,023 (à sec), à 0,24 (avec lubrification).

Tableau II: Caractéristiques de frottement pour diverses conditions d'essais.

			ε (%)	μ	μ_C	mc	ε (%)	μ	μ_C	mc
Acier XC 45	statique	sec	30,2	0,150	0,124	0,340	49,5	0,090	0,069	0,320
		lubrifié	29,8	0,060	0,049	0,220	48,9	0,085	0,060	0,310
	dynamique	sec	31,5	0,150	0,131	0,350	48,4	0,085	0,060	0,310
		lubrifié	33,9	0,025	0,019	0,136	51,1	0,030	0,045	0,190
Cuivre	statique	sec	29,1	0,160	0,149	0,360	49,8	0,140	0,108	0,370
		lubrifié	30,3	0,060	0,048	0,220	49,8	0,060	0,033	0,250
	dynamique	sec	29,8	0,200	0,181	0,390	48,5	0,150	0,125	0,380
		lubrifié	30,2	0,050	0,036	0,190	49,7	0,035	0,035	0,214

Dans le cas du cuivre on constate pour des échantillons non lubrifiés un coefficient de frottement plus élevé en dynamique qu'en statique. Par contre en présence de lubrification, le frottement est plus faible dans les

essais dynamiques. La lubrification joue un rôle plus important dans le cas de l'acier, avec un coefficient assez faible en dynamique (environ 0,02), alors qu'il existe peu de différences entre les essais statiques et dynamiques dans le cas non lubrifié. Les écarts observés sur le coefficient de frottement correspondant à une déformation de 50% sont dus aux différentes méthodes d'évaluation décrites précédemment. Ils sont particulièrement importants dans le cas des essais statiques et dynamiques à sec sur l'acier. Ce phénomène résulte d'un effet bien connu de collage dans le cas des éprouvettes en acier et de modification d'un régime hydrodynamique de lubrification vers un régime de frottement mixte ou par film discontinu. On constate par ailleurs que le coefficient de frottement reste relativement constant durant les essais dynamiques. Le coefficient de Coulomb semble être un paramètre mieux adapté que celui de Tresca pour la description et l'évaluation du frottement dans les essais de compression.

4. CONCLUSION.

L'importance du frottement dans les essais de compression statique et dynamique a été analysée.

On a mis en évidence l'influence du frottement sur les résultats d'essais. Aussi bien dans les essais statiques que dynamiques, le frottement entre l'échantillon et les supports entraîne un accroissement apparent de la contrainte d'écoulement du matériau testé.

La déformation extérieure des éprouvettes en forme de tonneau est moins marquée dans les essais dynamiques que dans les essais statiques. Un facteur de forme F a été défini pour quantifier cette déformation; celui-ci peut être relié au coefficient de frottement à l'aide d'une simulation numérique de l'essai de compression. Une bonne lubrification permet de conserver la forme cylindrique de l'éprouvette pour des déformations importantes et de limiter les erreurs sur les courbes de contrainte-déformation.

La détermination des coefficients de frottement de Coulomb et de Tresca a été effectuée au moyen des essais d'anneaux. Cette méthode utilisée dans le domaine statique a été adaptée aux conditions d'essais de compression sur barres d'Hopkinson de 20mm de diamètre.

Les abaques correspondant à la nouvelle géométrie d'éprouvettes ont été calculées. Elles permettent ainsi de déterminer de manière très simple, sans aucune mesure de contrainte ou de déformation pendant l'essai, un coefficient de frottement pour des conditions données de lubrification.

On a montré qu'en l'absence de lubrifiant, le coefficient de frottement dans les essais dynamiques est sensiblement identique, parfois même légèrement supérieur, à celui obtenu dans les essais statiques. Comme prévu, la présence de lubrifiant entraîne une diminution importante du frottement. Mais cette lubrification est particulièrement importante dans le cas des essais dynamiques pour lesquels le coefficient de frottement est nettement plus faible qu'en statique, en particulier dans le cas d'éprouvettes en acier.

Les caractéristiques de frottement calculés directement à partir de la géométrie finale sont en accord avec celles obtenues à partir des abaques pour des déformations inférieures à 30%. Pour des déformations de 50%, la position de la ligne neutre peut varier de manière importante avec une modification des conditions de frottement au cours de l'essai. Dans ce cas la déformation doit être obtenue en plusieurs étapes, avec renouvellement du lubrifiant. La détermination du coefficient de frottement pour un taux de déformation de l'ordre de 15% à 20% est préconisée.

REFERENCES:

- [1] Kulkarni K.M. and Kalpakjian S.J., Eng.Ind., (1969), 743-754.
- [2] van Rooyen G.T. and Backofen W.A., J.Mech.Phys.Solids, 7, (1958/59), 163-68.
- [3] Kudo H., Int.J.Mech.Sci.I, 2, (1960), 102-127.
- [4] Male A.T. and Cockcroft M.G., J.Inst.Metals, Vol.93, (1964-65), 38-46.
- [5] Burgdorf M.: Berichte aus dem Institut für Umformtechnik; TH Stuttgart, Nr 5, 1966, Verlag Girardet
- [6] Burgdorf M., Industrie-Anzeiger (1967), 15-20.
- [7] Hawkyard J.B. und Johnson W., Int.J.Mech.Sci.9, (1967), 163/82.
- [8] Malinowski J.Z. and Klepaczkowski J.R., I.J.Mech.Sci.28, (1986), 381-391.
- [9] Gorham D.A., Pope P.H. and Cox O., Inst.Phys.Conf.Ser.70, (1984).
- [10] Avitzur B., Israel J. Technology, 2 (1964), 295-304.