

CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES

H. Zhao^{1,2},

¹Laboratoire de Mécanique et Technologie-Cachan, ENS Cachan/CNRSUmr8535, 61 Avenue du président Wilson, 94235 Cachan cedex, ²Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UFR919, 75005, Paris. Téléphone : 01 47 40 20 39, Télécopie : 01 47 40 22 40, Adresse(s) électronique(s) : zhao@lmt.ens-cachan.fr

Mots clés : Comportement des matériaux, essais dynamique, barre de Hopkinson, impact.

1. INTRODUCTION

L'expose commence par une analyse des difficultés spécifiques de l'expérimentation pour la caractérisation du comportement des matériaux sous sollicitations dynamiques. Cette analyse permet de présenter brièvement diverses techniques expérimentales existantes, tout en soulignant leurs possibilités et leurs inconvénients.

La technique expérimentale autour de barres de Hopkinson (principe, divers montage, apport de mesure des champs) seront traité en détailles, cela permet de donner des exemples de l'influences de la vitesse de déformation sur le comportement des matériaux pour des matériaux divers (métaux, polymères, bétons, matériaux cellulaires, etc.) et d'aborder la question de modèles existants de comportement sensible à la vitesse.

2. ESSAIS DYNAMIQUES RAPIDES

La dynamique dite rapide se distingue de la dynamique vibratoire stationnaire et des phénomènes dits quasi-statiques par l'effet transitoire dominant dû à la propagation d'onde. Lors de la conception du système de chargement et d'instrumentation, il est souvent nécessaire d'abandonner l'idée habituelle de l'équilibre dans le système de chargement et parfois même dans l'échantillon lui-même (voir Cantwell & Morton, 1991 ; Field et al., 2004).

2.1 Moyen de chargement

Le puits de chute est l'idée la plus évidente pour produire un impact en faisant tomber une masse guidée par un système de suspension sur l'échantillon. Une variante de ce type de système consiste à lâcher un pendule sur une éprouvette (fissurée) en flexion trois points. L'angle de pendule avant et après le choc permet d'estimer l'énergie absorbée.

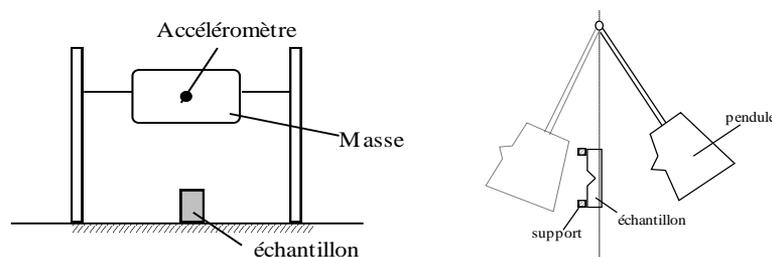


Figure 1. Puits de chute, pendule

Des presses hydrauliques spécialisées à grande vitesse permettent aussi d'atteindre une vitesse de 20m/s. Cependant, ce type de machine n'offre pas la même possibilité de pilotage qu'une presse hydraulique classique fonctionnant à faible vitesse. En effet, à cette vitesse-là, les accumulateurs de pression d'air sont utilisés pour compenser l'insuffisance du débit de groupe. Même si on a la puissance accumulée pour le lancement, on n'a ni la puissance, ni le temps pour piloter. La dernière possibilité est de propulser un projectile en utilisant l'énergie accumulée dans un réservoir sous

pression ou un explosif pour obtenir une vitesse d'une dizaine de mètre par seconde à plusieurs KM par seconde. On utilise notamment des barres d'Hopkinson (Hopkinson 1914 ; Kolsky, 1949) qui consiste à placer un petit échantillon entre deux longues barres identiques et de limite élastique élevée par rapport à celle du matériau testé (Fig2). Avec un projectile, on induit une onde longitudinale de compression dans la barre entrante. Une partie de cette onde se réfléchit à l'interface barre-échantillon, une autre partie se transmet à l'échantillon puis induit une onde dans la barre sortante.

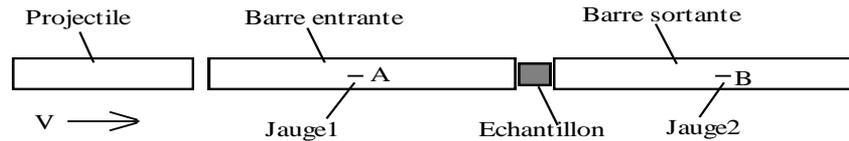


Figure 2. Montage aux barres de Hopkinson

2.2 Instrumentation et mesures

Pour un système de masse tombante, la donnée la plus courante est la décélération de la masse supposée captée par l'accéléromètre placé sur celle-ci. On en déduit une estimation de la force de réaction. En intégrant deux fois l'accélération, on peut estimer l'écrasement de l'échantillon si la structure supportant l'échantillon est infiniment rigide. Il est souvent souhaitable d'ajouter d'autres instrumentations comme un capteur de déplacement laser, un extensomètre optique type Zimmer, imagerie rapide, une cellule de force miniature pour améliorer la précision de mesure. La presse hydraulique rapide est souvent équipée d'une cellule de force et un capteur de déplacement. Il est néanmoins souhaitable d'enrichir ces mesures par des instrumentations plus performantes en bande passante. Il est important aussi de noter que ces mesures ne sont valables que si le principe d'état d'équilibre partout à tout moment règne dans l'échantillon et dans le système de chargement comme en cas quasi-statique.

Par contre, le principe de l'instrumentation des barres de Hopkinson ne repose plus sur l'hypothèse d'équilibre. Des jauges de déformation sont collées sur les deux barres et elles enregistrent l'histoire temporelle des déformations associées aux ondes se propageant dans les barres. Le dépouillement élémentaire des signaux obtenus est fondé sur deux hypothèses simplificatrices : le caractère unidimensionnel des ondes et l'homogénéité des forces et des déformations dans l'échantillon. L'hypothèse de la théorie de la propagation unidimensionnelle permet de relier les déformations mesurées aux contraintes et aux vitesses particulières associées. En supposant que ces grandeurs se transportent sans se modifier, on en déduit les forces et les déplacements aux interfaces barre-échantillon.

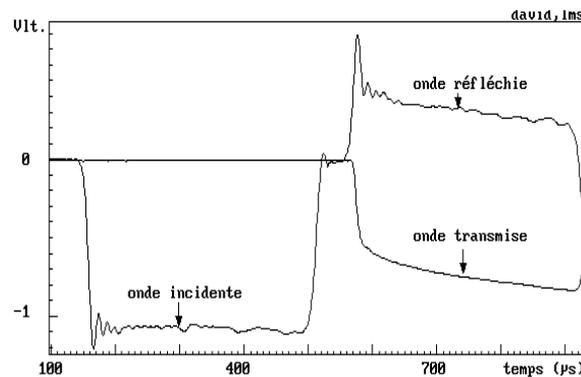


Fig.3 Signaux bruts des barres de Hopkinson

Soient ε_i et ε_r les déformations associées aux ondes incidente et réfléchie mesurées par la jauge au point A, et ε_t celle associée à l'onde transmise mesurée par la jauge au point B (Fig.2). Dans

l'hypothèse d'une propagation unidimensionnelle des ondes, la déformation, la contrainte et la vitesse particulaire sont reliées par des relations linéaires simples : $\sigma = E\varepsilon, v = \pm C\varepsilon$

où σ est la contrainte, E le module d'Young des barres, C la célérité des ondes dans la barre et v la vitesse particulaire. Les vitesses particulières et les forces des deux côtés s'écrivent:

$$\begin{aligned} V_e(t) &= C_0 (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) & F_e(t) &= S_B E (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \\ V_s(t) &= C_0 \varepsilon_i(t) & F_s(t) &= S_B E \varepsilon_i(t) \end{aligned}$$

où S_B est la section des barres.

Les barres de Hopkinson permet donc de mesurer les forces et les vitesses de deux côtés d'échantillon. Au final, la limitation des techniques expérimentales comme puits de chute, pendule ou machine d'essai rapide se trouve dans la validité d'hypothèse d'équilibre (type quasi-statique) partout, notamment dans le système de chargement et mesure. Il est clair que plus la vitesse est grande, moins que cette hypothèse quasi-statique est vrai. Cependant, il est difficile de vérifier cette hypothèse car il n'y a souvent pas de mesure redondante (des forces par exemple). La barre de Hopkinson permet de s'affranchir cette difficulté à condition qu'on puisse transport les ondes élastiques. Cependant, toutes connexions complexes (masses ajoutées) entre échantillon et la barre sont interdites, limitant sa versatilité de la forme et de la dimension d'échantillon.

2.3 Barres de Hopkinson non-conventionnelles

Néanmoins, il est possible de concevoir des essais non-orthodoxes en utilisant des barres qui sont après tout une machine d'essais comme les autres qui offrent un chargement et une mesure de force et vitesse aux deux côté d'échantillon. La motivation est liée à son avantage d'être plus précis au niveau de mesure car il ne fait pas l'hypothèse d'équilibre dans le système de chargement. Un système classique de barres d'Hopkinson emploie des barres de faible diamètre pour profiter de l'hypothèse simplificatrice de la propagation d'onde unidimensionnelle. Cependant, il est possible d'utiliser des barres de grands diamètres si la distorsion des signaux dans ces barres de grands diamètres est correctement prise en compte. En effet, il faut bien sûr prendre en compte, l'effet de dispersion d'onde (Zhao et Gary, 1996) mais aussi l'effet de hypothèse d'onde plane (Merle & Zhao, 2004). Un système de barres en aluminium de 60mm de diamètre (au LMT) donne donc la possibilité de tester des mini structures comme par exemple un tube métallique (jusqu'à des dimensions 40x40mm) (Fig.4a Zhao et al. 2004) ou bien un transformateur d'effort pour réaliser des essais de cisaillement sur les tôles métalliques jusqu'à 100% de déformation (Fig.4b,c ; Merle & Zhao, 2004, Shi et al. 2014).



Figure 4 a)essai de tube laiton ; b) cisaillement

L'utilisation des barres en Nylon permet de tester des éprouvettes de faible résistance. Les problèmes dans la mesure comme la dispersion d'onde dans une barre viscoélastique (Zhao & Gary, 1995) et l'extension de la durée par une méthode de deux points (Zhao & Gary, 1997) ont été résolus. L'utilisation des barres en Nylon de large diamètre (60mm, Fig.5a) permet d'avoir un nombre de cellules suffisantes dans la section afin d'étudier de nouveaux matériaux cellulaires comme par exemple des mousses métalliques, les agglomérats de billes métalliques creuses (Fig.5b; Zhao et al. 2005) ou bien pour avoir une section suffisante pour tester des multi matériaux comme des joints rivetés (Fig.5c, Porcaro et al, 2008).

Pour les matériaux cellulaires, on peut même s'intéresser à la raison de l'augmentation de résistance observée sous impact qui dépasse parfois largement la sensibilité de la vitesse de déformation du matériau de base (Zhao & Abdennadher, 2004) en compression simple et cisaillement-compression combiné (Hou et al. 2011).



Figure 5 a) barre nylon $\phi 60\text{mm}$ et $\phi 40\text{mm}$ 3+3m, b) mousse aluminium, c) rivets

La barre en tant qu'un instrument de mesure permet aussi d'inventer des essais de perforation inversée (Zhao et al., 2007). En effet, si une longue barre instrumentée est utilisée comme un perforateur, la force en cours de pénétration, difficile à mesurer dans un essai de perforation, peut être mesurée avec le même principe que les barres d'Hopkinson. La figure 6a montre une barre de diamètre 16mm (6m en longueur) avec un embout demi sphérique utilisée pour la perforation d'un sandwich à âme en billes creuses. Pour la simplicité technique, la cible à perforer est montée sur le projectile creux (Fig.6b) et la barre pénétrante reste immobile.

Figure 6 a) Barre-perforateur ; b) projectile

3. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MATERIAUX

3.1 Dépouillement des essais dynamiques

Le dépouillement standard des différents bancs comme le puits de chute, la presse rapide, et les barres d'Hopkinson est issu d'un même concept d'homogénéité comme le cas quasi-statique, où l'effort appliqué et le déplacement induit est mesuré sur un état d'équilibre. Cependant, cet état d'équilibre n'est atteint qu'au fur et à mesure des allers-retours d'onde qui permet que l'information se répand. Prenons un exemple d'un bout d'échantillon purement élastique (fig 7a).

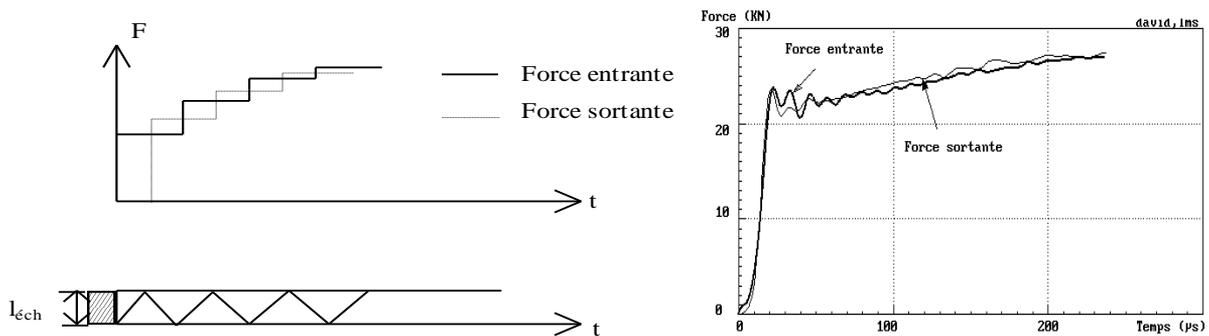


Fig.7 a) Equilibre et effet transitoire, b) équilibre pour un métal

Si on charge sur un côté (noté entrant) avec une force constante F à l'instant initial et le côté sortant bloqué contre un mur caractérisé par un coefficient de réflexion d'onde R_{EM} (d'échantillon au mur), la différence entre les forces entrante et sortante est proportionnelle à la puissance $2n$ (le nombre de réflexion sur le mur) du coefficient R_{EM} .

$$F_e - F_s = F(1 + R_{ME})R_{EM}^{2n}$$

L'homogénéité spatiale dépend du temps car le nombre de réflexion dépend du quotient entre la longueur d'échantillon et la célérité de l'onde. La célérité de l'onde étant une constante du matériau, il est donc indispensable de diminuer la taille d'éprouvette pour disposer d'une zone homogène à grande vitesse. Cependant, on doit garder une taille raisonnable pour préserver la notion de volume élémentaire représentatif et la maniabilité pratique. Fig.7b donne un exemple d'équilibre pour essai sur un échantillon métallique de faible taille (<1cm). On peut ainsi obtenir une contrainte, déformation et vitesse de déformation en moyenne à partir de mesures expérimentales

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{V_{output}(t) - V_{input}(t)}{l_{specimen}} \quad \sigma_m(t) = \frac{F_{input} + F_{output}}{2S_{specimen}}$$

Il est aussi clair qu'à partir d'une certaine vitesse (dépendante du matériau), ce serait difficile d'obtenir un état homogène dans l'échantillon. (Bell, 1966 ; Bertholf & Karnes, 1975). Dans ce cas, diverses méthodes de mesure des champs (généralement optique) et méthode inverse seront indispensables.

Il ne faut pas oublier que la relation contrainte/déformation obtenue est greffée de nombreuse artéfacts (pression induite, échauffement adiabatique) plus ou moins gênantes selon les différentes classes de matériaux. Le confinement latéral induit par l'inertie radiale qui la raison principale de la sensibilité à la vitesse des matériaux fragiles (céramiques, béton, roches) et de matériaux cellulaires non-visqueux (mousses métalliques, lattices). Cependant, cette pression induite par l'inertie n'a guère d'influence sur métaux à une vitesse de déformation modérée (<1000/s). Il est en général admis que l'essai à une vitesse de déformation supérieure à 1/s est adiabatique. La chaleur produite lors de la déformation plastique entraîne un échauffement et donc une tendance adoucissante bien plus important pour des polymères que pour des métaux.

3.2 Quelques modèles de sensibilité à la vitesse

Il est expérimentalement observé que quasiment toutes les classes de matériaux ont une sensibilité positive à la vitesse de déformation. Cela se traduit par une augmentation de niveau de contrainte en fonction de la vitesse de déformation pour une déformation donnée pour les métaux, les matériaux fragiles, les polymères comme pour les matériaux cellulaires.

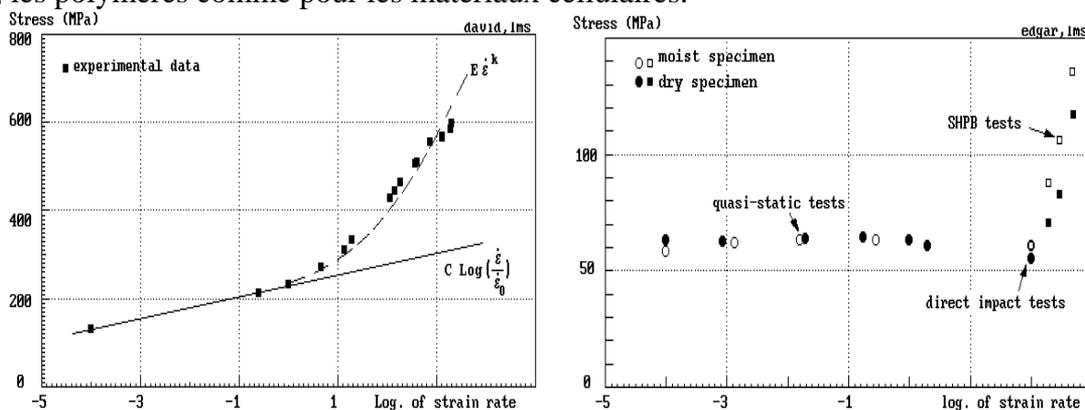


Figure 8 quelques exemple de la sensibilité à la vitesse de déformation a) Acier, b) micro-béton

Les mécanismes derrière cette augmentation apparente sont très différents : thermoactivation pour les métaux, confinement induit pour les bétons, etc (Zhao, 1997,1998a,1998b; Pattofatto et al. 2007, Gao et al. 2010 ; Hou et al. 2012).

Les modèles de la sensibilité à la vitesse ont été développés pour les métaux il n'y a 30ans et adaptés aux autres types de matériaux pour le besoin de calcul numérique. Deux approches ont été proposées pour modéliser cette sensibilité à la vitesse. L'une est la formulation empirique (Johnson-Cook,1983) ou semi-empirique avec quelque mécanisme/explication physique (Zerilli-Armstrong,

1987 ; Steinberg, 1980). Le modèle de Johnson-Cooks est de loin le modèle le plus utilisé, succès sans doute grâce à son simplicité. Ce modèle prévoit juste une dépendance linéaire de niveau de contrainte de la valeur logarithmique de la vitesse de déformation.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})(1 - \frac{T - T_{\text{ambiante}}}{T_{\text{fusion}} - T_{\text{ambiante}}})^m$$

L'autre famille est issue de formalisme viscoplastique, notamment le modèle de over-stress (Malvern, 1951) et le modèle de Cowper-Symonds (1957), plus explicite sous forme de type Norton. Malgré son intérêt théorique, ces modèles sont moins utilisés en dehors du monde académique à cause de sa difficulté d'implémentation (réelle ou supposée) dans le code explicite commerciale.

4. ESSAIS DYNAMIQUES A TRES GRANDE VITESSE

Les phénomènes à très grandes vitesses (au delà quelque centaine de mètre par seconde) génèrent un état de contrainte (déformation) très complexe. Il n'est pas possible d'organiser un état de contrainte unidimensionnelle habituel dû au confinement latéral car l'onde de détente des surfaces latérale libre n'a plus de temps de revenir. Plus la vitesse est grande, plus l'état de contrainte (déformation) s'approche d'un état de déformation unidimensionnelle. (voir : Bridgman, 1952; Meyers, 1994, Field et al, 2004).

4.1 Etat de déformation unidimensionnel et onde de choc

Dans un régime élastique, on peut facilement calculer le module qui relie la contrainte et la déformation longitudinale à partir du module $K = (3\lambda + 2\mu) / 3$ (Bulk modulus) et du module de cisaillement G.

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}$$

$\sigma_1 = K \varepsilon_1$	hydrostatique
$\sigma_1 = (K + 4G / 3) \varepsilon_1$	élastique
$\sigma_1 = K \varepsilon_1 + 2Y / 3$	plastique

Pour un matériau ayant une plasticité parfaite avec un critère de type $\sigma_1 - \sigma_2 = Y$ (où Y est la limite élastique du matériau au sens habituel), la relation contrainte déformation peut être aussi calculée, ce qui donne la limite d'élasticité d'Hugoniot (limite d'élasticité en déformation 1D) à $(K/2G+2/3)Y$ (Fig. 9a)

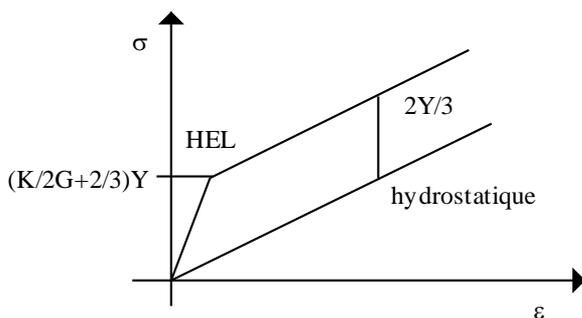
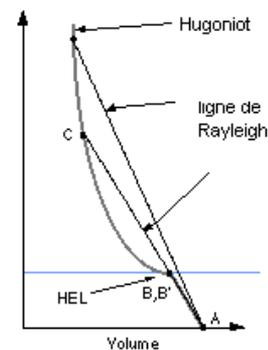


Figure 9 a) Limite élastique d'Hugoniot



b) Onde de choc

Cet état confiné de déformation 1D exhibe une courbe pression volume (contrainte déformation longitudinale) concave. La formation d'un front d'onde de choc est donc inévitable (Fig.9b). Au travers du front de l'onde de choc formée, on peut écrire les équations de Rankine-Hugoniot, issue de la conservation de la masse, de la quantité du mouvement, et de l'énergie :

$$\rho_1(U - u_1) = \rho_0(U - u_0)$$

$$\sigma_1 - \sigma_0 = \rho_0(U - u_0)(u_1 - u_0)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_0) \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right)$$

Ici U est la célérité du front, $\rho_0, \sigma_0, u_0, \rho_1, \sigma_1, u_1$ sont respectivement les densités, les contraintes et les vitesses particulières devant et derrière le front de l'onde de choc.

4.2 Essai d'impact de plaques

L'essai principal à grande vitesse est celui de l'impact entre deux plaques qui consiste à lancer une plaque volante contre une plaque cible (Abou-Sayed et al., 1976 ; Asay & Lipkin, 1978). La géométrie des plaques permet d'assurer un état de déformation unidimensionnelle au centre des plaques durant l'essai. La plaque volante est lancée généralement par un canon à deux étages à une vitesse qui peut atteindre quelques km/s (Fig.10a). La difficulté expérimentale est souvent liée à la précision requise pour la réalisation d'un impact parfaitement plan. La tolérance de planéité requise est de l'ordre de 10^{-4} par rapport au rayon. Ceci implique aussi que les deux surfaces des plaques doivent être planes et rigoureusement parallèles.

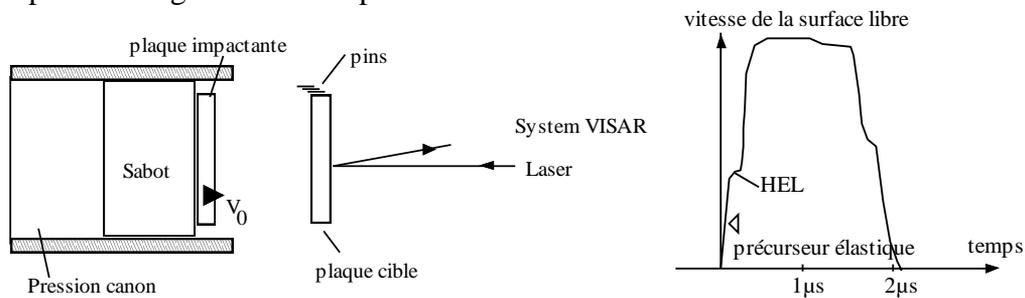


Figure 10a) Essai d'impact entre les plaques. b) Un signal typique obtenu à partir d'un VISAR

Les mesures courantes sont celle de la vitesse initiale d'impact par intervalles de temps donnés d'une série de "pins" (Shortening pins), de la vitesse particulière de la surface libre par système de VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) (Fig.10b). Cette mesure consiste à détecter la variation de longueur d'onde due à la réflexion sur une surface mobile (effet Doppler) par interférométrie Michelson.

4.2.1 Mesure d'Hugoniot, Equation d'état. Avec la mesure de la vitesse de l'onde de choc U et la vitesse particulière derrière le front, on peut remonter à la contrainte et la déformation longitudinale ou à la pression et au volume.

$$p \approx \sigma_1 = \rho_0 U u_1, \quad V/V_0 = 1 - \varepsilon_1 = \rho_0 / \rho = (U - u_1) / U$$

où V_0, ρ_0 sont respectivement le volume et la densité initiale.

Ceci permet d'obtenir un point discret de la relation d'Hugoniot (Pression-volume). Des essais à différentes vitesses (c.a.d différentes pressions) permettent d'obtenir la courbe d'Hugoniot du matériau qui sera utilisée dans la construction de l'équation d'état. Avec la mesure de VISAR, on peut aussi exploiter l'information comme HEL ou bien estimer la vitesse de déformation sur la durée de front de choc (quelques dizaines de nanosecondes). Un système d'enregistrement très rapide est à prévoir.

4.2.2. Contrainte d'écaillage dynamique. Avec le dispositif ordinaire d'essai d'impact entre des plaques, on peut aussi étudier l'écaillage dynamique des matériaux. En effet, il est possible d'arranger l'installation pour que les deux ondes de détente se rencontrent dans la plaque cible. L'écaillage peut avoir lieu à cette section (Current et Banner, 1977).

On conclue cet exposé par une petite introduction sur l'apport de l'imagerie rapide dans expérimentation dynamique. A l'image que l'imagerie est en train de révolutionner la mécanique expérimentale en statique (Grédiac and Hild,2011), Cette technique d'observation et de mesure est aussi l'avenir de l'expérimentation en dynamique.

Si l'imagerie rapide dans le passé est plutôt un moyen qualitatif d'observation de phénomène, elle est devenue de plus en plus un moyen quantitatif de mesure avec la qualité d'image actuelle et les méthodes plus robustes de mesure de champ (Hild and Roux, 2006). On commence à obtenir des champs de déformation exploitables pour des essais dynamiques à une vitesse de déformation de l'ordre de 100/s avec des caméras SA5 et DIC qui permet de quantifier l'état d'homogénéité (Elnasri et al. 2007, Saletti et al. 2013, Liu et al. 2014a,b). On peut espérer d'obtenir des images de qualités et de cadence supérieure dans un futur non-lointain afin de pouvoir directement mesurer la déformation au bout des barres et ainsi obtenir localement les forces sans passer par transport des ondes.

REFERENCES

Quelques documents pour la généralité et les références

- Kolsky H., (1963), *Stress Waves in Solids*, Clarendon Press, Oxford
 Meyers, M.A., (1994), *Dynamic behavior of Materials*, John Wiley & Son Inc.
 Zukas, J.A. (1982) *Impact Dynamics*. John wiley & sons, 2nd Edition 1991
 Zhao, H., (1995), *Etudes expérimentales du comportement dynamique des matériaux*. Polycopiés de cours. DEA Dynamique des structures et couplages.
 Zhao,H.,(2004) *Cellular materials under impact loading*, IPPT-AMAS Eds, Warsaw,(119 pages).

Section 2

- Cantwell W.J. and Morton J., "The impact resistance of composite materials - a review". *Composite*, **22** (1991), 347-362.
 Field J.E., Walley S.M., Proud W.G., Goldrein H.T. et Siviour C.R., "Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies" *Int.J.Impact Engng*, **30** (2004) 725–775
 Hopkinson, B. "A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives by the impact of bullets". *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **A213**(1914), 437-452
 Kolsky, H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc.*, **B62**(1949), 676-700.
 H.Zhao, G.Gary, A three dimensional longitudinal wave propagation in an infinite linear viscoelastic cylindrical bar. Application to experimental techniques, *J. Mech. Phys. Solids*, 43(1995), 1335-1348.
 H.Zhao, G.Gary, The testing and behavior modelling of sheet metals at strain rate from 10⁻⁴ to 10⁴/s, *Mater. Sci. & Engng.* A207 (1996), 46-50.
 H.Zhao, G.Gary, On the use of SHPB technique to determine the dynamic behavior of the materials in the range of small strains, *Int. J. Solid. & Structure*. 33(1996), 3363-3375.
 H.Zhao, G.Gary, J.R. Klépaczko, On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar, *Int. J. Impact Engng.* 19(1997), 319-330.
 H.Zhao, G.Gary, A new method for the separation of waves. Application to the SHPB technique for an unlimited measuring duration. *J.Mech.Phys.Solids*. 45(1997), 1185-1202.
 H.Zhao, Testing of polymeric foams at high and medium strain rates. *Polymer testing*. 16 (1997), 507-516.

- H.Zhao, G.Gary, Crushing behaviours of aluminium honeycomb under impact loading, *Int. J. Impact Engng*, 21 (1998), 827-836.
- H.Zhao, Experimental characterisation of materials behaviour under dynamic loading, *Computer & structures*. 81(2003), 1301-1310.
- H.Zhao, S.Abdennadher, On the strength enhancement of rate insensitive square tubes under impact loading, *Int. J. Solids & Structs*. 41(2004) 6677-6697.
- H.Zhao, S.Abdennadher, R.Othman, Experimental study of square tube crushing under impact loading, using a modified SHPB. *Int.J.Impact Engng*. 32 (2006), 1174-1189.
- S.Pattofatto, A.Poitou, H.Tsitsiris, H.Zhao, A new testing method to investigate the compacting behaviour of fresh concretes under impact loading, *Experimental mechanics*, 46 (2006), 377-386.
- R.Merle, H.Zhao, On the errors associated with the use of large diameter SHPB, Correction for radially non-uniform distribution of stress and particle velocity in SHPB testing, *Int.J.Impact Engng*. 32(2006), 1964-1980.
- H.Zhao, I.Elnasri, Y.Girard, Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading –An experimental study, *Int.J.Impact Engng*. 34(2007),1246-1257.
- R. Porcaro, M. Langseth, A.G. Hanssen, H. Zhao, S.Weyer and H.Hooputra, Crashworthiness of self-piercing riveted connections, *Int.J.Impact Engng*, 35 (2008) 1251-1266.
- H.B. Zeng, S.Pattofatto,H.Zhao, Y.Girard,V.Fascio, Impact behaviour of hollow sphere agglomerates with density gradient, *Int. J. Mechanical Sciences* 52 (2010) 680–688.
- H.B. Zeng, S.Pattofatto,H.Zhao, Y.Girard,V.Fascio, Perforation of sandwich plates with graded hollow sphere cores under impact loading, *Int. J. Impact Engineering* 37 (2010) 1083-1091.
- S.Pattofatto, H.Zhao, H.Tsitsiris,. Influence of the impact velocity on the perforation resistance of a glass-reinforced polypropylene material, *J. of Reinforced plastics and composites*, 30(2011) 1107-1114.
- B.Hou, A.Ono, S. Abdennadher,S.Pattofatto, Y.L.Li, H.Zhao, Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part I: Experiments, *Int. J. Solids and Structures* 48 (2011) 687–697.
- FF Shi, R Merle, B Hou, JG Liu, YL Li, H Zhao (2014), A critical analysis of plane shear tests under quasi-static and impact loading, *Int. J. Impact Engineering*. 74, 107-119

Section 3

- Bell, J.F. (1966). An experimental diffraction grating study of the quasi-static hypothesis of the split Hopkinson bar experiment. *J. Mech. Phys. Solids*, **14**, 309-327.
- Bertholf, L.D. and Karnes, J. (1975). Two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system, *J. Mech. Phys. Solids*, **23**, 1-19.
- Cowper G.R., Symonds P.S. (1957) Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. *Brown University Division of Applied Mathematics Report No. 28*.
- Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rate and high temperature. *Proc. 7th Symp. on ballistics*, 1983, 541-547.
- Malvern, L.E. (1951), Propagation of longitudinale waves of plastic deformation. *J. Appl. Mech.*, 18, p203.
- Steinberg, D.J., Cochran S.G. and Guinan M.W. (1980), A constitutive model for metals applicable at high strain rate. *J. Appl. Phys.* 51, p1498.
- Zerilli F.J., Armstrong R.W. (1987) Dislocation-mechanics-based constitutive relations formaterial dynamics calculations. *J.Appl.Phys.*. 61(5):1816-1825.
- H.Zhao, A constitutive model for metals over a large range of strain rates. Identification for mild-steel and aluminium sheets. *Mater. Sci. & Engng*. A320 (1997) 95-99.
- H.Zhao, A study of specimen thickness effects in the impact tests on polymers by numeric simulations, *Polymer*. 39 (1998), 1103-1106.

- H.Zhao, A study on testing techniques for concrete-like materials under impact loading, *Cement & Concrete Composites*, 20 (1998) 293-299.
- H.Zhao, I.Nasri, S.Abdennadher, An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials, *Int. J. Mech. Sci.*, 47 (2005) 757-774.
- S. Patoffatto, I.Elnasri, H. Zhao, H.Tsitsiris, F.Hild, Y. Girard, Shock enhancement of cellular structures under impact loading: Part II Analysis, *J.Mech.Phys.Solids*, 55 (2007) 2672-2686.
- Z.Y. Gao, T.X. Yu and H. Zhao, Mechanical behavior of metallic hollow sphere (MHS) materials: An experimental study, *ASCE J. Aerospace Eng.* 21(2008), 206-216.
- B.Hou, H.Zhao, S.Patoffatto, J.G. Liu, Y.L. Li, Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading, *Int. J. Solids and Structures* 49 (2012) 2754-2762.

Section 4

- Bridgman P.W., *The Physics of high pressure (3rd edn)*, Publ. Bell and Sons, London, 1952.
- Asay, J.R. and Lipkin J. A self-consistent technique for estimating the dynamic yield strength of shock-loaded material, *J. Appl. Phys.* 49, 4242-4247, 1978.
- Abou-Sayed A.S., Clifton R.J., L. Hermann, The oblique-plate impact experiment, *Exper. Mech.* 16, 127-133, 1976
- Cochran, S. Banner D., Spall studies in Uranium *J.Appl.Phys.* 48, 2729-2737. 1977.
- G.I. Taylor, The use of flat-ended projectiles for determining dynamique yield stress, *Proc. Roy. Soc. Lond.* A194, 289-299. (1948)

Perspective

- M. Grédiac, F. Hild (eds.), (2011), *Mesures de champs et identification en mécanique des solides. Traité MIM* (Hermes, Paris (France)).
- Hild, F., Roux, S., (2006) Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties, a review, *Strain*, 42(2) 69-80.
- I.Elnasri, S. Patoffatto, H. Zhao, H.Tsitsiris, F.Hild, Y. Girard, Shock enhancement of cellular structures under impact loading: Part I Experiments, *J.Mech.Phys.Solids*, 55 (2007) 2652-2671
- D.Saletti, S.Patoffatto, H.Zhao, Measurement of phase transformation properties under moderate impact tensile loading in a NiTi alloy, *Mechanics of Materials*, 65(2013), 1-11.
- J.G.Liu, D.Saletti, S.Patoffatto, H.Zhao, Impact testing of polymeric foam using Hopkinson bars and digital image analysis, *Polymer testing*, 36(2014), 101-109.
- JG.Liu, S.Patoffatto, DN.Fang, FY. Lu, H. Zhao (2014), Impact strength enhancement of aluminum tetrahedral lattice truss core structures, *Int. J. Impact Engineering.*, 10.1016/j.ijimpeng.2014.06.013.