



HAL
open science

Etude expérimentale du comportement dynamique des matériaux

Gérard Gary, H. Zhao

► **To cite this version:**

Gérard Gary, H. Zhao. Etude expérimentale du comportement dynamique des matériaux. *Mechanics & Industry*, 2000, 1, pp.15-26. hal-00111297

HAL Id: hal-00111297

<https://hal.science/hal-00111297>

Submitted on 7 Mar 2024

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.

Étude expérimentale du comportement dynamique des matériaux

Gérard Gary^a, Han Zhao^{b*}

^aLaboratoire de mécanique des solides, École polytechnique, Palaiseau, France

^bLaboratoire de Mécanique et Technologie-Cachan, université Pierre et Marie Curie, Paris 6,
61, avenue du Président Wilson, Cachan, France

Résumé — Le présent document rappelle la problématique des essais dynamiques, en particulier lorsqu'ils ont pour objet d'étudier le comportement des matériaux. Une attention particulière est portée au système des barres de Hopkinson en raison de son utilisation fréquente dans une gamme de vitesses de déformation allant de 50/s à 5000/s qui correspond à la gamme de vitesses de la plupart des applications industrielles civiles. On rappelle le principe de la mesure telle qu'elle est effectuée avec ce système, ses limites et ses points forts. Elle est ensuite illustrée par quelques résultats typiques obtenus sur divers matériaux et sur des structures à échelle réduite.

Abstract — Experimental characterisation of materials under dynamic loading. This paper is specially dealing with dynamic testing and in particular the experimental characterisation of materials under dynamic loading. We shall focus on the SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) system because of its frequent use in a range of strain rates from 50/s to 5000/s which corresponds to the strain rates involved in most of civil industrial applications. The limitations of this system and its special advantages will be recalled. Some typical results obtained for various materials and small structures will be shown.

Nomenclature

C	célérité d'onde de la barre	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	F_s	force à l'interface barre sortante-échantillon	N
ρ	densité volumique de la barre	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	S_b	section de la barre de Hopkinson	m^2
$\Delta\sigma$	saut de contrainte d'une onde élastique . .	Pa	S_e	section de l'échantillon	m^2
Δv	saut de vitesse particulaire d'une onde élastique	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	l_e	longueur de l'échantillon	m^2
ε_i	onde incidente		$\sigma_m(t)$	contrainte moyenne dans l'échantillon . .	Pa
ε_r	onde réfléchie		ε_{mt}	déformation moyenne dans l'échantillon	
ε_t	onde transmise		$\varepsilon_m^Y(t)$	vitesse de déformation moyenne dans l'échantillon	1/s
U_e	déplacement à l'interface barre entrante- échantillon	m	ΔT	durée de la mesure	s
U_s	déplacement à l'interface barre sortante-échantillon	m	L	longueur de la barre de Hopkinson	m
V_e	vitesse à l'interface barre entrante-échantillon	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Δd	déplacement relatif des interfaces barre-échantillon	m
V_s	vitesse à l'interface barre sortante-échantillon	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	ε_{\max}	déformation maximale mesurable	
F_e	force à l'interface barre entrante-échantillon	N	$\varepsilon_{\text{monA}}$	onde « montante » en A	
			$\varepsilon_{\text{monB}}$	onde « montante » en B	
			$\varepsilon_{\text{desA}}$	onde « descendante » en A	
			$\varepsilon_{\text{desB}}$	onde « descendante » en B	
			ε_A	déformation mesurée en A	
			ε_B	déformation mesurée en B	
			$T_{\text{transport}}$	noyau de la fonction de transport	

* Correspondance et tirés à part.
zhao@lmt.ens-cachan.fr

1. PROBLÉMATIQUE DES ESSAIS DYNAMIQUES

Les essais de comportement dynamique sont le plus souvent compris comme l'extension des essais quasi-statiques à des situations de chargement rapide. Les hypothèses d'homogénéité des champs mécaniques dans le banc d'essai comme dans l'éprouvette paraissant aller de soi, il est tentant de négliger les effets transitoires dus à la propagation d'ondes élastiques. Cependant, cette vision conduit à des résultats erronés dès que le temps caractéristique (la durée significative) de l'essai n'est plus assez grand devant le temps de propagation des ondes élastiques dans le banc d'essai.

Pour illustrer ce propos, considérons la représentation idéalisée et simplifiée d'un essai assez couramment utilisé, l'essai au puits de chute. On s'intéresse à l'exemple d'un essai de compression de nid d'abeilles d'aluminium pour lequel on peut admettre, en première approximation, que la réponse est à effort F_0 constant (*figure 1a*).

On mesure cet effort de deux façons : avec un ressort qui supporte l'échantillon et dont on mesure le raccourcissement δl . On le déduit de la décélération de la masse tombante à l'aide d'un accéléromètre placé en son milieu. Pour des raisons de simplicité, nous modélisons cet essai comme unidimensionnel (*figure 1a*). On se place donc dans le cadre de propagation d'ondes élastiques unidimensionnelles dans lequel on peut écrire des relations de proportionnalité entre les sauts de contrainte, de vitesse particulière et de déformation à travers le front d'onde [1, 2] :

$$\Delta\sigma = -\rho C \Delta v, \quad \Delta v = -C \Delta\varepsilon \quad (1)$$

La contrainte et la vitesse particulière à tout instant et pour toutes les sections de la masse tombante et du ressort peuvent alors être calculées en régime transitoire (c'est-à-dire sans faire de moyennes temporelles). La *figure 1b* décrit l'évolution des vitesses aux points de mesure. De ces deux vitesses on peut déduire la variation de longueur du ressort (par intégration) et l'accélération vue par l'accéléromètre (par dérivation, et on doit supposer ce dernier de dimension finie pour éviter les accélérations infinies). On obtient les deux mesures de force représentées sur la *figure 1c*.

On constate que les deux méthodes donnent des résultats différents avec, dans les deux cas, une forte sur-estimation (pouvant dépasser 100 % d'erreur) de l'effort maximum.

Toutefois, on peut calculer que les efforts périodiques mesurés on une moyenne égale à la valeur imposée.

Lorsque le temps caractéristique de l'essai est très grand par rapport à la période de chaque système, il peut donc être légitime de négliger la variation périodique et ne considérer que la moyenne. Si ces mesures sont associées à une mesure de déplacement fiable, l'évaluation de l'énergie absorbée par l'échantillon n'est pas trop mauvaise.

Dans une situation réelle, il faut comparer les temps caractéristiques de l'essai avec la bande passante des capteurs et de la chaîne d'acquisition (pour une masse tombante cubique en acier d'un demi-mètre de côté, le temps d'un créneau de la *figure 1b* est d'environ 200 μ s). Si la fréquence d'acquisition n'est pas bien supérieure à la fréquence des signaux transitoires (ici 5 kHz), le résultat observé peut être complètement modifié par le filtre que constitue la chaîne de mesure sans même que les valeurs moyennes soient correctes.

Le problème de la mesure étant supposé réglé, ce qui ne va pas de soi comme nous venons de le voir, les essais dynamiques diffèrent encore des essais quasi-statiques par l'introduction de phénomènes de couplage indissociables de la vitesse. Ainsi, on admet généralement que l'essai dynamique est adiabatique (pas d'échange thermique avec l'extérieur) car la chaleur produite lors de la déformation n'a pas le temps d'être diffusée pendant la très brève durée de l'essai. L'éprouvette est donc soumise à une augmentation de température au cours de l'essai. Dans le cas d'essais de compression, l'expansion radiale de l'échantillon induite par l'effet Poisson est contenue par des effets inertiels, conduisant à un confinement inertiel. L'incidence de cet effet est faible pour les métaux mais important pour les géomatériaux. Lorsque des vitesses très élevées sont mises en jeu (applications militaires, essais d'impact de plaques), des pressions très importantes sont engendrées [3] qui ont une incidence importante sur les phénomènes étudiés. Le *tableau 1* présente une récapitulation des problèmes impliqués en fonction de la vitesse de déformation mise en jeu.

2. ESSAI À LA BARRE DE HOPKINSON

Pour une gamme de vitesses de déformation allant de 50/s à 5000/s qui correspond à la gamme de vitesse de la plupart des applications industrielles civiles, l'effet transitoire ne peut pas être négligé. Pour améliorer la qualité de la mesure, lorsqu'on ne peut utiliser des capteurs directement liés aux grandeurs à mesurer (méthodes optiques rapides par exemple), la solution consiste à tenir compte explicitement des phénomènes de propagation

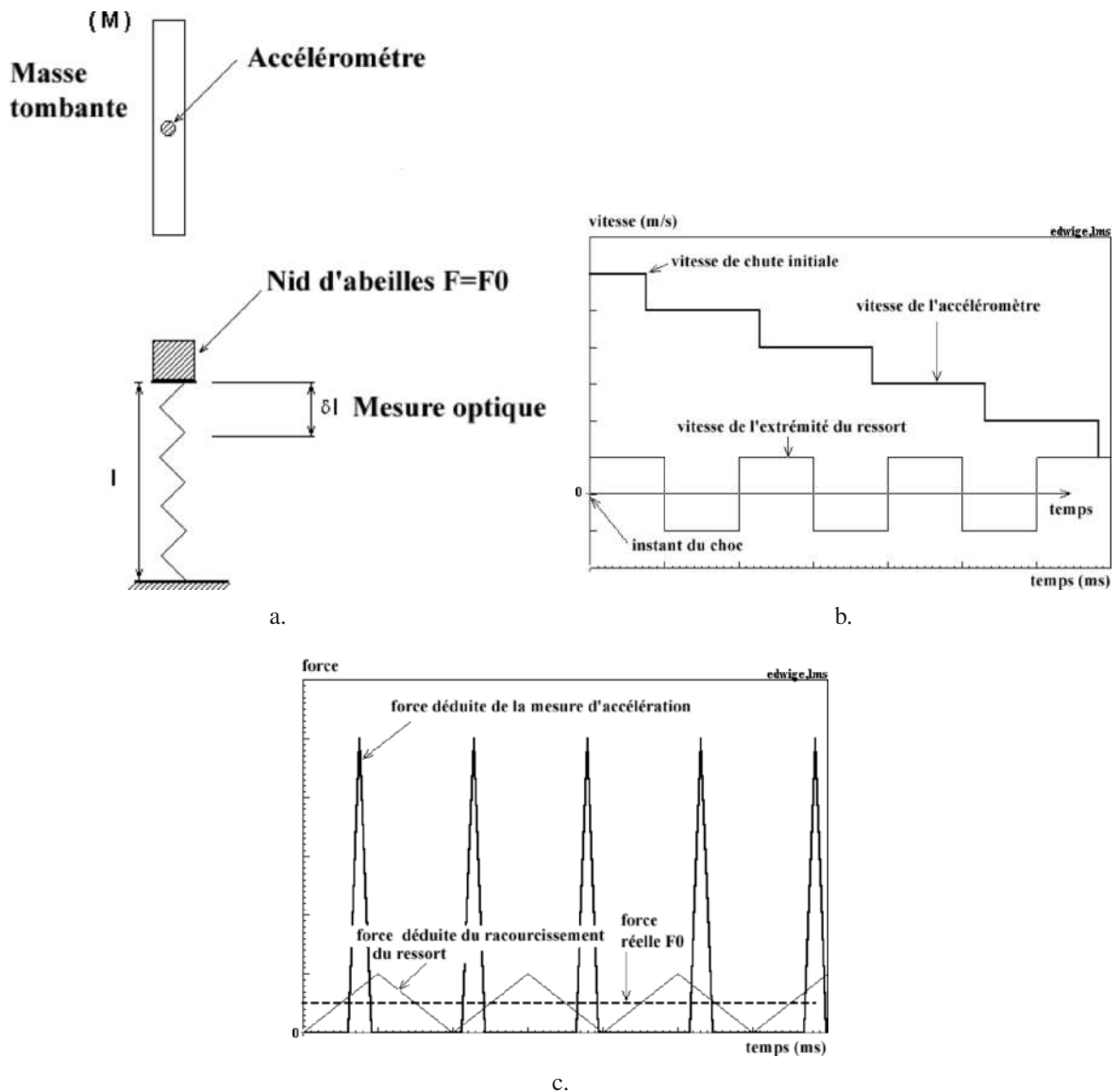


Figure 1. a. Schéma unidimensionnel d'un essai au puits de chute. b. Vitesse aux points de mesure. c. Forces mesurées.

TABLEAU I
Phénomènes à prendre en compte selon la vitesse de déformation.
Involved problems versus strain rate.

Vitesse de déformation	$10^{-4}/s-1/s$	$1/s-50/s$	$50/s-5\ 000/s$	$>5\ 000/s$
Domaines d'application	Phénomène quasi-statique	Sécurité dans les transports Protections anti-sismique	Sécurité dans les transports Protections contre les explosions	Protection des satellites et applications militaires
Thermique	Isotherme	Adiabatique	Adiabatique	Adiabatique
Pression induite (effets inertiels)	Non significative	Non significative	Selon les matériaux	Très élevée
Effet transitoire	Négligeable	Existant	Important	Très important

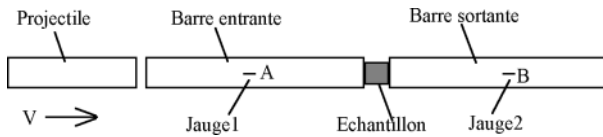


Figure 2. Montage de la barre de Hopkinson.

d'onde, démarche qui conduit assez naturellement à l'utilisation d'un système de barres. En effet, l'analyse transitoire de structures tridimensionnelles est trop complexe pour être efficacement prise en compte alors que l'utilisation de barres « unidimensionnelles » la rend possible, comme nous allons le rappeler.

2.1. Fonctionnement de la barre de Hopkinson. Approche classique

Pour réaliser un essai de compression dynamique avec des barres dites de Hopkinson [4] (appelées système SHPB pour *Split Hopkinson Pressure Bar*, ou barres de Kolsky [5, 6] du nom de celui qui a le premier utilisé le système dans sa configuration actuelle) on place un petit échantillon entre deux longues barres identiques de limite élastique élevée par rapport à celle du matériau testé. Des jauges de déformation sont collées sur les deux barres. 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).

Pour des essais traditionnels visant à caractériser le comportement mécanique du matériau constitutif d'un échantillon, 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 propagation unidimensionnelle permet de relier simplement 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. En postulant ensuite que la contrainte et la déformation sont homogènes dans l'échantillon, on peut évaluer le comportement moyen du matériau.

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. Le transport étant assimilé à une translation temporelle, on suppose que l'on connaît ces déformations au niveau des interfaces.

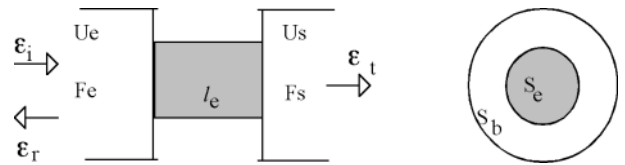


Figure 3. Théorie simplifiée des barres de Hopkinson.

Soient U_e , U_s les déplacements respectifs des interfaces entrante et sortante, ainsi que F_e , F_s les forces et V_e , V_s les vitesses particulières correspondantes (figure 3). Dans l'hypothèse de la propagation unidimensionnelle des ondes, déformation, contrainte et vitesse particulière sont reliées par des relations linéaires simples (1).

Les vitesses particulières des deux côtés s'écrivent :

$$V_e(t) = c(\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) \quad (2a)$$

$$V_s(t) = c\varepsilon_t(t)$$

On peut également calculer les forces aux deux interfaces :

$$F_e(t) = S_b E (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (2b)$$

$$F_s(t) = S_b E \varepsilon_t(t)$$

En supposant que la contrainte et la déformation sont homogènes dans l'échantillon, la déformation moyenne, la vitesse de déformation moyenne et la contrainte dans l'échantillon sont alors :

$$\varepsilon_m(t) = \frac{U_s(t) - U_e(t)}{l_e} \quad (3a)$$

$$\dot{\varepsilon}_m(t) = \frac{V_s(t) - V_e(t)}{l_e} \quad (3b)$$

$$\sigma_m(t) = \frac{F_s}{S_e} \quad (3c)$$

2.2. Limitations du système conventionnel et améliorations

2.2.1. Analyse précise du transport des ondes

L'équation (2) qui permet d'obtenir les forces et les vitesses imposées à l'échantillon est fondée sur l'hypothèse du transport des ondes sans modifications. La réalité est évidemment plus complexe ; ainsi, il est le plus souvent nécessaire de prendre en compte le caractère tridimensionnel des barres et d'introduire (par une technique de

traitement de signal) la correction de dispersion qui traduit la modification du signal dans son transport [7–10]. On utilise également une technique de recalage des ondes par simulation assurant un transport temporel à la micro-seconde près, indispensable à l’obtention de mesures précises pour la zone des petites déformations [11].

2.2.2. Homogénéité des champs mécaniques

L’équation (3) donne une relation contrainte–déformation en moyenne qui n’a de sens que si les champs de contrainte et de déformation dans l’échantillon sont approximativement homogènes [13, 14]. Cette hypothèse d’homogénéité des champs de contrainte et de déformation n’est cependant, en toute rigueur, jamais correcte. Il existe en effet un temps de transfert du chargement au travers de l’échantillon. Selon que ce temps est plus ou moins négligeable devant la durée de l’essai, l’hypothèse est plus ou moins valide. Pour de nombreux matériaux non métalliques comme le béton, les roches (le sel gemme en particulier), les mousses de polyuréthane, etc. constate la non-égalité des forces entrantes et sortantes. On doit alors utiliser une approche inverse [15], qui ne nécessite pas l’hypothèse d’homogénéité, pour obtenir l’information que l’on recherche sur le comportement.

2.2.3. Adaptation de la rigidité des barres

Le système conventionnel des barres de Hopkinson constitué de barres métalliques répond correctement aux besoins des essais sur les matériaux métalliques, les bétons, les roches, etc. Cependant, lorsque le matériau à tester est de très faible résistance, les barres métalliques produisent des signaux de faible intensité qui sont presque noyés dans le bruit de fond. Cela est dû à une très importante différence entre l’impédance acoustique des barres métalliques et l’impédance apparente du matériau testé, conséquence de sa faible résistance. Il est donc nécessaire dans ce cas d’utiliser des barres de faible impédance, un peu comme on choisit une cellule de force adaptée dans un essai quasi-statique. Les barres de faible impédance sont presque inévitablement constituées d’un matériau viscoélastique tel que le Nylon (d’impédance 20 fois plus faible que l’acier). Ce sont de telles barres que nous avons utilisées pour réaliser les essais sur la mousse polymère ou le nid d’abeille d’aluminium.

L’utilisation des barres viscoélastiques ne va pas sans difficultés. Elle nécessite notamment une maîtrise de la propagation des ondes dans ces barres dont la formulation est plus complexe que dans le cas élastique [16]. En

effet, l’onde se modifie significativement dans le transport à cause du couplage entre les effets géométriques (caractère tridimensionnel de la barre) et les effets dus au caractère viscoélastique du matériau [17].

2.2.4. Durée de mesure

La proportionnalité entre les grandeurs mécaniques associées à une onde dans une barre (1) sur laquelle la technique de barres de Hopkinson est fondée ne s’applique qu’à une onde se propageant dans une seule direction, ce qui oblige à mesurer séparément l’onde incidente (se propageant dans un sens) et l’onde réfléchie (se propageant dans l’autre sens). Cela limite la durée de mesure à ΔT ($\Delta T = L/C$, C étant la célérité et L longueur de la barre entrante) fonction de la longueur des barres [18]. La longueur de la barre sortante est choisie pour que l’onde transmise ne soit pas perturbée par sa réflexion à l’extrémité pendant ce temps de mesure. Par conséquent, pour un essai de comportement, la déformation totale ne pourra excéder le produit de la vitesse de déformation moyenne par ΔT . Par exemple, la durée de la mesure ne dépassera pas 400 μs ($C \approx 5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) pour une barre d’acier de 2 m de long et la déformation totale sera alors limitée à 20 % pour un essai à une vitesse de déformation moyenne de 500/s (une barre identique en Nylon fournit un meilleur résultat car la célérité des ondes y est plus faible). Pour réaliser un essai à 50/s jusqu’à 80 % déformation nominale, il faudrait donc une barre 40 fois plus longue (80 m). En raison de cette limitation, le système conventionnel des barres de Hopkinson n’est pas adapté pour des essais sur des matériaux comme des mousses où l’obtention d’une déformation de l’ordre de 80 % est nécessaire pour l’étude de la densification.

Faute de pouvoir aisément utiliser de très longues barres, on cherche à séparer les ondes se propageant dans les deux sens par une méthode capable de tenir compte des réflexions multiples [19, 20]. En effet, les barres étant constituées d’un matériau linéaire, le principe de superposition nous autorise à séparer, par la pensée, les ondes « montantes » (le sens montant étant arbitrairement défini) des ondes « descendantes ». On peut donc écrire les équations (4a) en deux points de mesure A et B. En effet, la contrainte, la vitesse particulière, et la déformation en une section donnée de la barre sont égales à la somme de ces grandeurs associées à toutes les ondes propageant dans la barre. La théorie de la propagation des ondes permet d’écrire les équations de type (4b), liant la valeur des ondes élémentaires en des points distincts. La reconstitution fictive de la totalité des

ondes « montantes » et « descendantes » permettra donc de résoudre notre problème de mesure :

$$\varepsilon_A(t) = \varepsilon_{\text{monA}}(t) + \varepsilon_{\text{desA}}(t) \quad (4a)$$

$$\varepsilon_B(t) = \varepsilon_{\text{monB}}(t) + \varepsilon_{\text{desB}}(t)$$

$$\varepsilon_{\text{monB}}(t) = T_{\text{transport}} \otimes \varepsilon_{\text{monA}}(t) \quad (4b)$$

À partir de ces équations, la séparation des ondes « montantes » et « descendantes » se formule alors de manière systématique (4c) :

$$\begin{aligned} \varepsilon_A(t) &= \varepsilon_{\text{monA}}(t) + T_{\text{transport}} \otimes \varepsilon_{\text{desB}}(t) \\ \varepsilon_B(t) &= T_{\text{transport}} \otimes \varepsilon_{\text{monA}}(t) + \varepsilon_{\text{desB}}(t) \\ \varepsilon_{\text{monA}}(t) &= \frac{\varepsilon_A(t) - T_{\text{transport}} \otimes \varepsilon_B(t)}{1 - T_{\text{transport}} \otimes T_{\text{transport}}} \\ \varepsilon_{\text{desB}}(t) &= \frac{\varepsilon_B(t) - T_{\text{transport}} \otimes \varepsilon_A(t)}{1 - T_{\text{transport}} \otimes T_{\text{transport}}} \end{aligned} \quad (4c)$$

Le noyau de transport doit bien sûr rendre compte de l'effet tridimensionnel et éventuellement de la viscosité du matériau (pour barre en Nylon). La difficulté de la mise en œuvre numérique de l'opération (4c) dépend de la complexité du noyau de transport. On calcule ce noyau à partir de la théorie de la propagation des ondes harmoniques dans une barre infinie [20]. L'utilisation de cette technique, dite de « déconvolution », permet d'augmenter très sensiblement la durée d'observation.

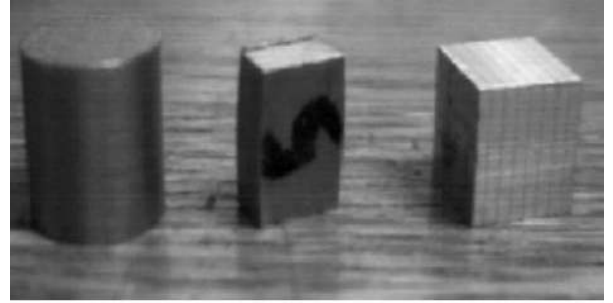
3. APPLICATION AUX MATÉRIAUX DIVERS

Les problèmes de mesure étant résolus, le système des barres de Hopkinson est considéré comme une machine d'essai universelle qui peut être utilisée aussi bien pour tester des structures que des matériaux. On présente quelques résultats typiques pour les métaux, les polymères, les composites, les géomatériaux et les nids d'abeille.

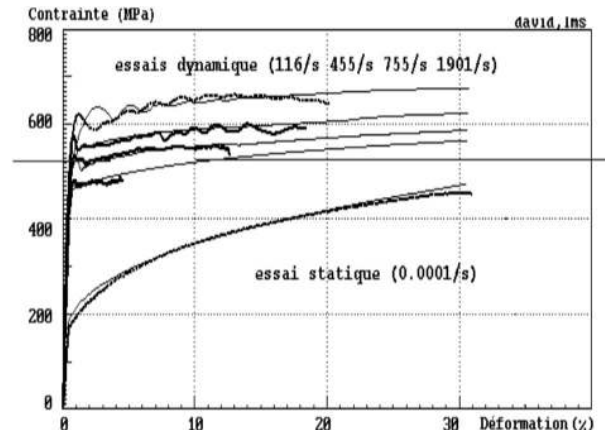
3.1. Métaux, polymères

3.1.1. Métaux

La caractérisation du comportement des matériaux métalliques en dynamique est la première application de la barre de Hopkinson dans la configuration classique



(a)



(b)

Figure 4. a. Photographie d'échantillons métalliques. b. Relations contrainte-déformation de l'acier XES, évolution avec la vitesse de déformation.

présentée ici. L'expérimentation dans ce domaine ne représente plus aujourd'hui de difficulté technique significative. La figure 4a montre des éprouvettes métalliques dont la dimension est l'ordre de quelques millimètres. La figure 4b montre les courbes typiques « contrainte-déformation » obtenue pour un acier doux XES.

3.1.2. Polymères

La réalisation d'essais élémentaires autres que la compression reste encore de réalisation délicate. Un aspect essentiel du dépouillement des mesures aux barres de Hopkinson est en effet l'existence d'un seul point de rupture d'impédance entre chaque barre et l'échantillon. Pour la réalisation d'essais de cisaillement ou de traction, les problèmes d'attache de l'éprouvette rendent difficile le respect de cette hypothèse. Dans cet esprit, des montages spéciaux ont donc été développés qui permettent de surmonter cette difficulté [21, 22] et de réaliser des essais de cisaillement ou de traction. Un mon-

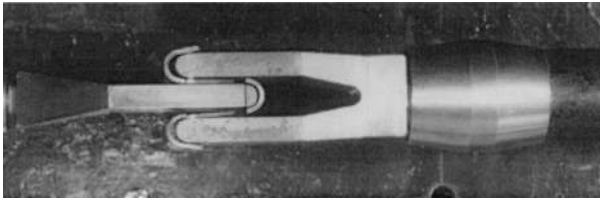


Figure 5. Système inverseur de poussée pour essais sur tôles métalliques.

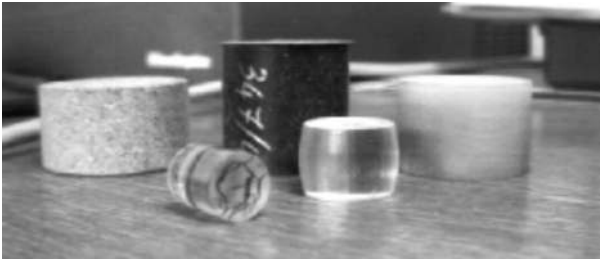
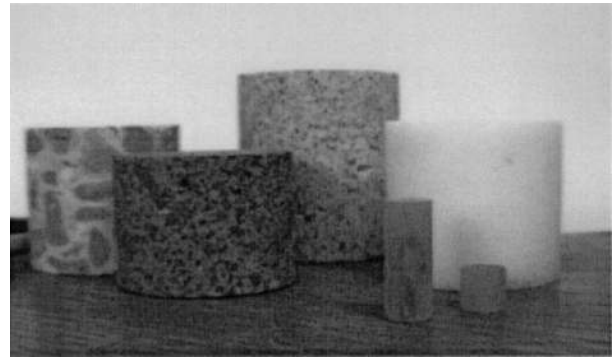


Figure 6. Photographie des échantillons polymères.

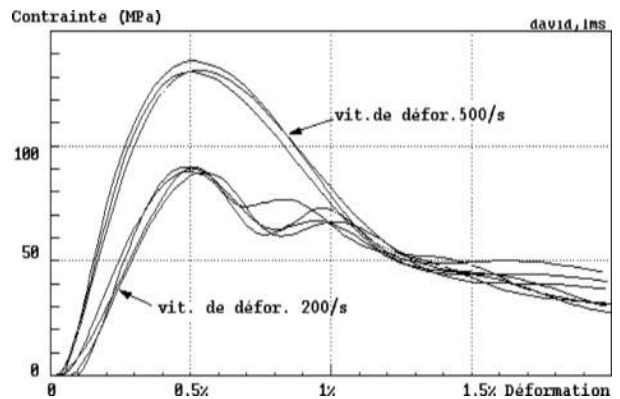
tage de traction est représenté sur la photo précédente (figure 5).

Le comportement des polymères en dynamique intervient dans des études de sécurité de structures industrielles, comme dans les études de la propagation rapide des fissures dans des tuyaux polymères de distribution de gaz (polyéthylène), de l'impact d'objets sur les pare-brise d'avion (PMMA), des chocs sur des plaques protectrices d'avalanches (polycarbonate), etc. Les essais de polymères à une vitesse de déformation élevée sont souvent réalisés avec des barres de Hopkinson. La figure 6 montre quelques échantillons testés (polycarbonate en forme de tonneau, PMMA avec des fissures, caoutchouc en noir, etc.).

L'un des problèmes rencontrés dans les essais sur les polymères est que la sensibilité expérimentale des polymères à la vitesse de déformation semble dépendre de la taille de l'échantillon. En effet, les essais réalisés avec des échantillons courts (< 2 mm) montrent une sensibilité du comportement quasi-linéaire en fonction du logarithme de la vitesse de déformation [23] qui peut être décrite par le modèle d'Eyring [24]. En revanche les essais réalisés avec des échantillons longs (6–8 mm) montrent une sensibilité plus forte à la vitesse de déformation pour les vitesses élevées [25, 26]. Une étude comparative réalisée sur les échantillons de taille différente issus d'un même matériau confirme la réalité de cet effet [27]. Cela suggère qu'une des hypothèses de la méthode de dépouillement de l'essai n'est pas justifiée (équations (2), (3)). Soit l'effet tridimensionnel (frottement ou inerties



(a)



(b)

Figure 7. a. Photographie des échantillons de béton. b. Résultat d'un dépouillement optimal dans les zones des petites déformations sur un béton.

radiales) est très important dans l'échantillon court, soit la déformation n'est pas homogène bien que l'équilibre soit vérifié. Le problème reste ouvert à ce jour [29].

3.2. Géomatériaux

Les essais aux barres de Hopkinson sont aussi utilisés pour l'étude des géomatériaux comme le béton et le sable, les roches, tels que ceux représentés sur la figure 7a [29–31].

Les problèmes expérimentaux en dynamique dans l'étude des géomatériaux sont liés à leur caractère fragile (la déformation maximale ne dépasse pas 2%). Des imprécisions dans le dépouillement des signaux peuvent donc affecter sensiblement les résultats de l'essai. On pourrait donc craindre que l'essai aux barres de Hopkinson ne puisse pas fournir d'information correcte sur le comportement dans cette zone. Cependant, le dépouillement soigné des signaux tenant compte des corrections

de dispersion et du calage des origines permet d'obtenir des informations précises dans la zone des petites déformations [11, 31]. On remarque la bonne reproductibilité des essais ainsi réalisés sur un béton (*figure 7b*).

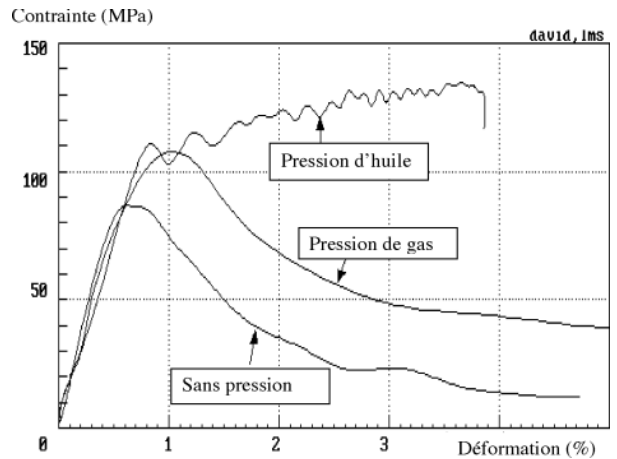
Pour les géomatériaux, et même aux vitesses moyennes (*tableau I*), les effets d'inertie qui freinent l'expansion latérale de l'échantillon induisent un confinement qu'on appelle le confinement inertiel. Il faut donc prendre garde à ne pas confondre le comportement du matériau avec la réponse de l'échantillon. Ce dernier doit être en effet considéré comme une structure.

La maîtrise du confinement étant nécessaire pour l'étude des géomatériaux, diverses techniques ont été développées, fondées sur l'utilisation de cellules permettant la réalisation d'essais sous confinement contrôlé (jusqu'à 10 MPa) [32] ou rigides autorisant alors la compaction du béton [33].

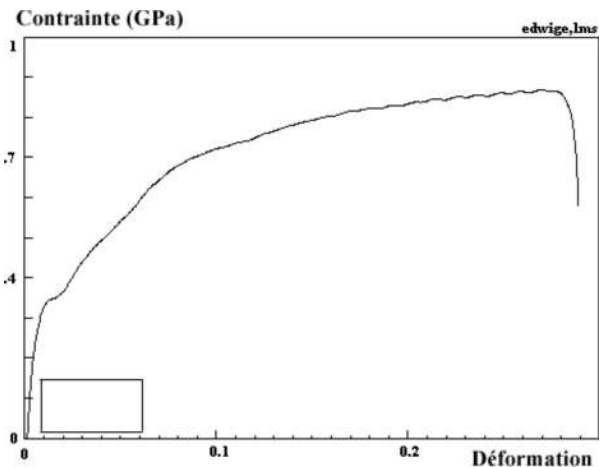
3.3. Plaques composites

Il existe de nombreuses configurations pour réaliser des essais d'impact sur des composites (par exemple le test Charpy ou Izod au pendule, la chute d'une masse, l'utilisation de machines servo-hydraulique rapides, et les barres de Hopkinson). À chaque type d'essais sont associés des problèmes particuliers de mesure et d'interprétation. La situation est bien résumée par la conclusion de Cantwell et Morton [34] dans leur revue comparative des différentes techniques : le résultat issu d'un type d'essai ne permet pas de prévoir celui d'un autre essai. Dans le domaine des composites, il est donc préférable de réaliser des expériences dans des configurations proches du cas réel de l'application industrielle. Prenons pour exemple le problème particulier de l'impact dans son plan d'une plaque composite que l'on rencontre dans le crash automobile (certaines structures en coque mince sont soumises à une compression dans leur plan).

Ce problème a été étudié théoriquement et expérimentalement en statique [35]. La difficulté d'un essai dynamique de compression est liée à la précision de la mesure et à la prévention du flambage global des plaques. En effet, la forme d'une plaque entraîne un rapport très faible de section éprouvette/barre. L'utilisation des barres de faible impédance est indispensable. D'autre part, il est nécessaire d'empêcher un mode de flambement global car on s'intéresse à la contrainte maximale de rupture par une mode de micro-flambage local (*kicking*), en quelque sorte une charge limite. Une solution avec l'utilisation



(a)

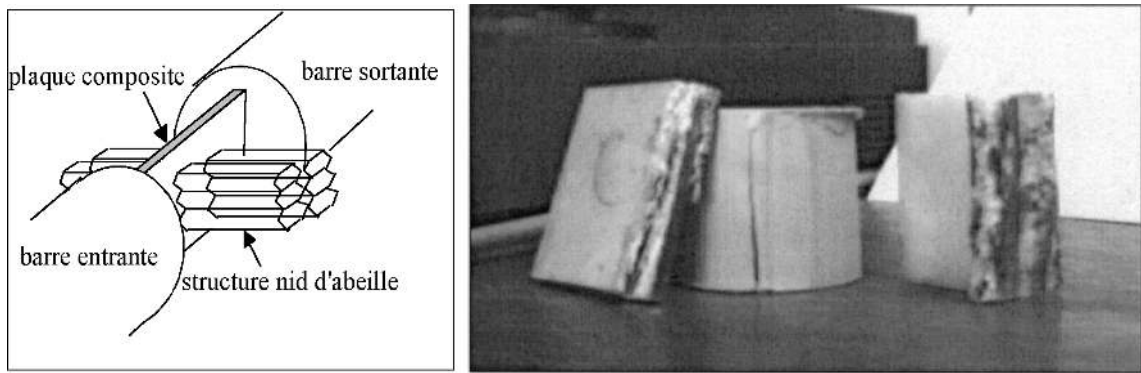


(b)

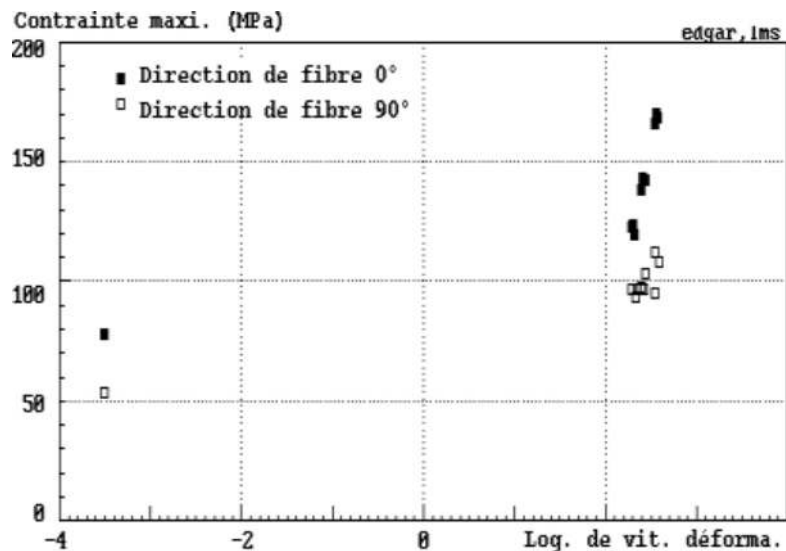
Figure 8. a. Influence du confinement sur la compression dynamique du béton. b. Compaction du béton sous confinement métallique. Le rectangle de la *figure 8b* est à l'échelle de la *figure 8a*.

d'une structure nid d'abeille dont les raideurs transversales sont négligeables devant la raideur axiale a été adoptée [36].

Quelques résultats obtenus sur des plaques fibre verre/résine de 3 mm d'épaisseur de taille carrée 36 mm × 36 mm illustrent l'influence relativement importante de la vitesse de déformation. Une dépendance vis à vis de la direction des fibres est également constatée. Sur la *figure 9b*, les résultats à 0° indiquent une compression parallèle à la direction des fibres, et ceux à 90° représentent une compression perpendiculaire à la direction des fibres. La sensibilité à la vitesse est plus forte pour la compression parallèle à la direction des fibres.



(a)



(B)

Figure 9. a. Montage expérimental d'essai et des plaques composites testées. b. Sensibilité à la vitesse de déformation des composites.

3.4. Mousse polymère ou nid d'abeille

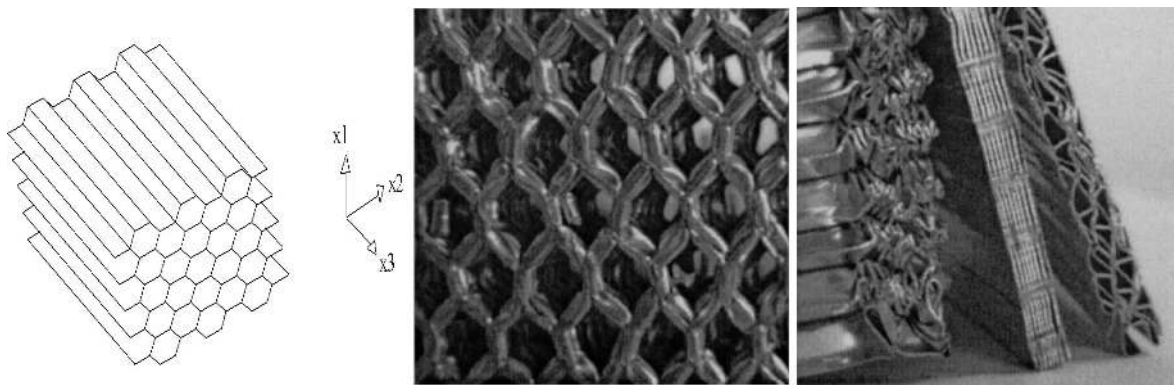
Les matériaux absorbant tels que les mousses polymères ou les structures en nid d'abeille sont largement utilisés dans le secteur de transport pour absorber l'énergie en cas de choc. Bien qu'ils aient des comportements de nature différente, les difficultés expérimentales qu'ils posent sont de même nature. D'une part, l'utilisation des barres viscoélastiques est indispensable à cause de leur faible résistance ; d'autre part, on doit appliquer la technique de déconvolution pour atteindre à une déformation maximale suffisante [37–40]. On présente ici quelques résultats obtenus sur du nid d'abeille d'aluminium (*figure 10a*).

Le nid d'abeille étant supposé orthotrope [41], les données sur trois axes d'orthotropie sur la *figure 10b* résument la dépendance des efforts moyens d'écrasement vis-à-vis de la vitesse de chargement.

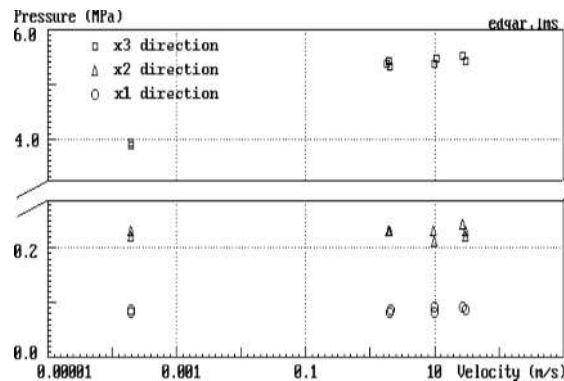
4. APPLICATION AUX ESSAIS DE STRUCTURE

4.1. Structures métalliques

Le système des barres de Hopkinson étant une machine d'essai au même titre qu'une presse classique,



(a)



(b)

Figure 10. a. Structure du nid d'abeille. b. Données expérimentales pour le nid d'abeille.

il peut être naturellement utilisé pour réaliser des essais de structure. Ainsi, on réalise des essais sur des structures tubulaires utilisées comme pièces d'absorption d'énergie dans l'industrie automobile (figure 11a).

L'intérêt de l'extension de la barre de Hopkinson aux essais de structure réside dans la précision des mesures en dynamique que les autres techniques expérimentales ne réussissent pas à égaler aujourd'hui. Par exemple, il est connu que les essais de structure utilisant la technique assez répandue dans l'industrie dite « puits de chute » ont parfois une assez mauvaise précision. Les raisons en sont évoquées en introduction. La figure 11b montre une comparaison des résultats bruts obtenus par les deux dispositifs sur un tube identique. L'avantage de la barre de Hopkinson y apparaît clairement. Cependant, la barre de Hopkinson a, aux vitesses moyennes, une capacité en énergie de chargement limitée, par comparaison au « puits de chute » et elle doit être considérée comme une technique complémentaire à utiliser lorsque des mesures précises sont nécessaires [42].

4.2. Éprouvettes spéciales

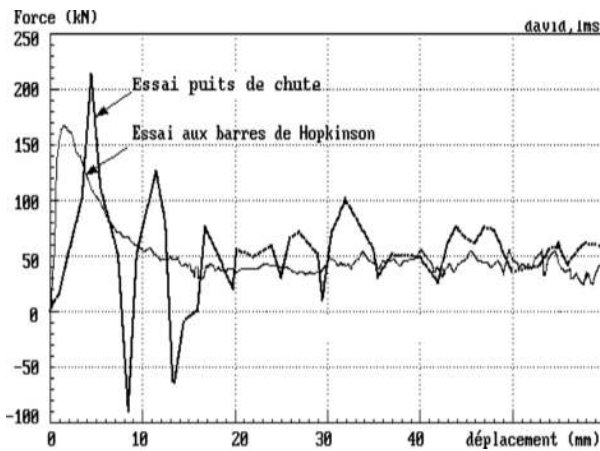
Des éprouvettes particulières peuvent aussi être utilisées en vue d'études spécifiques. C'est en particulier le cas de l'éprouvette « pince à linge » (figure 12) qui permet de réaliser des mesures de ténacité dynamique à partir de données expérimentales en force et en vitesse obtenues à la barre de Hopkinson [43–45].

4.3. Flexion dynamique

Dans le but de tester, en situation proche du fonctionnement réel, les pare-brise d'avions soumis au choc à l'oiseau, on réalise des essais de flexion avec trois barres de Hopkinson permettant une mesure simultanée des forces et des déplacements aux trois points d'appuis [46]. L'utilisation de caméras microseconde permet de visualiser le phénomène (figure 13).



(a)



(b)

Figure 11. a. Écrasement d'un tube avec la barre de Hopkinson. b. Comparaison entre l'essai « puits de chute » et celui aux barres de Hopkinson.

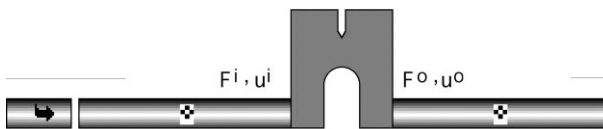


Figure 12. Éprouvette «ECC» de rupture et barres de Hopkinson.

5. CONCLUSION

Les essais dynamiques diffèrent principalement des essais quasi-statiques à cause de la présence non négligeable d'effets transitoires dus à la propagation d'ondes élastiques dans le banc d'essai comme dans l'échantillon. Ils en diffèrent également à cause des effets induits par la vitesse (couplage thermique à cause du caractère adiabatique, non-homogénéité des champs mécaniques dans l'échantillon, confinement inertiel induit).

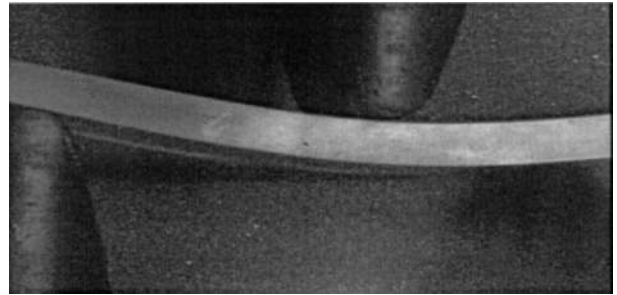


Figure 13. Image microseconde d'une poutre de PMMA en flexion dynamique.

Dans la gamme de vitesses de déformation allant de 50/s à 5 000/s qui correspond à la plupart des applications industrielles civiles, la barre de Hopkinson est le moyen d'essai qui garantit une bonne précision. La limitation de ce système ainsi que ses améliorations ont été discutées. La barre de Hopkinson peut être utilisée pour l'étude d'une grande variété de matériaux. Quelques résultats pour les métaux, les polymères, les composites, les mousses, le nid d'abeille, et le béton ont été donnés, ainsi que des commentaires sur les difficultés spécifiques rencontrées selon le matériau étudié.

La barre de Hopkinson peut aussi être utilisée aussi pour la mesure de la ténacité dynamique des matériaux ou appliquée à la réalisation d'essais de structures et permettre peut être de constituer des données fiables en vue de la qualification de codes de calcul en dynamique.

RÉFÉRENCES

- [1] Achenbach J.D., Wave propagation in elastic solids, North-Holland Publishing Company, 1978.
- [2] Graff K.F., Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State University Press, 1975.
- [3] Zukas J.A., Impact Dynamics, Wiley, 1991.
- [4] Hopkinson B., A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives by the impact of bullets, Phil. Trans. Roy. Soc. A 213 (1914) 437–452.
- [5] Kolsky H., An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, Proc. Phys. Soc. B 62 (1949) 676–700.
- [6] Kolsky H., Stress Waves in Solids, Clarendon Press, Oxford, 1963.
- [7] Pochhammer L., Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner Schwingungen in einem unbergrenzten isotropen Kreiszyylinder, J. für die Reine und Angewandte Mathematik 81 (1876) 324–336.
- [8] Chree C., The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical co-ords, their solutions and applications, Cambridge Phil. Soc. Trans. 14 (1889) 250–369.
- [9] Bancroft D., The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars, Phys. Rev. 59 (1941) 588–593.

- [10] Davies R.M., A critical study of Hopkinson pressure bar, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 240 (1948) 375–457.
- [11] Zhao H., Gary G., On the use of SHPB technique to determine the dynamic behaviour of the materials in the range of small strains, *Int. J. Solid. Structure* 33 (1996) 3363–3375.
- [12] Conn A.F., On the use of thin wafers to study dynamic properties of metals, *J. Mech. Phys. Solids* 13 (1965) 311–327.
- [13] Jahsman W.E., Re-examination of the Kolsky technique for measuring dynamic material behaviour, *J. Appl. Mech.* (1971) 77–82.
- [14] Bell J.F., An experimental diffraction grating study of the quasi-static hypothesis of the split Hopkinson bar experiment, *J. Mech. Phys. Solids* 14 (1966) 309–327.
- [15] Bui H.D., Introduction aux problèmes inverses en mécanique des matériaux, Éditions Eyrolles, Paris, 1993. / English translation: Inverse Problems in the Mechanics of Materials: An Introduction, CRC Press, Boca Raton, 1994.
- [16] Zhao H., Gary G., 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.
- [17] Zhao H., Gary G., Klepaczko J.R., On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar, *Int. J. Impact Engrg.* 19 (1997) 319–330.
- [18] Campbell J.D., Duby J., The yield behaviour of mild steel in dynamic compression, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A* 236 (1956) 24–40.
- [19] Lundberg B., Henchoz A., Analysis of elastic waves from two-point strain measurement, *Experiment. Mech.* 17 (1977) 213–218.
- [20] Zhao H., Gary G., 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.
- [21] Gary G., Nowacki W.K., Essai de cisaillement plan appliqué à des tôles minces, *J. Phys. IV* 4 (1994) C8 65–70.
- [22] Gary G., Mouro P., Zhao H., Dynamic tensile testing of sheet metal, in: *Euromech, Metz, June 2000* (accepted for publication).
- [23] Briscoe B.J., Nosker R.W., The flow stress of high density polyethylene at high strain rate, *Polym. Commun.* 26 (1985) 307–308.
- [24] Eyring H., Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reaction rates, *J. Chem. Phys.* 4 (1936) 283–292.
- [25] Rietsch F., Bouette B., The compression yield behaviour of polycarbonate over a wide range of strain rates and temperatures, *Eur. Polym. J.* 26 (1990) 1071–1075.
- [26] Chou S.C., Robertson K.D., Rainey J.H., The effect of strain rate and heat developed during deformation on the stress-strain curve of plastics, *Experiment. Mech.* 13 (1973) 422–432.
- [27] Dioh N.N., Leever P.S., Willams J.G., Thickness effects in split Hopkinson pressure bar tests, *Polymer* 34 (1993) 4230–4234.
- [28] Zhao H., A study of specimen thickness effects in the impact tests on polymers by numeric simulations, *Polymer* 39 (1998) 1103–1106.
- [29] Hauser F.E., Techniques for measuring stress-strain relations at high strain rates, *Experiment. Mech.* 6(1966) 395–402.
- [30] Reinhardt H.W., Körmeling H.A., Zielinski A.J., The split Hopkinson bar, a versatile tool for the impact testing of concrete, *Matériaux et Constructions* 19 (1986) 55–63.
- [31] Zhao H., A study on testing techniques for concrete-like materials under impact loading, *Cement & Concrete Composites* 20 (1998) 293–299.
- [32] Gary G., Bailly P., Behaviour of a quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modelling, *Eur. J. Mech. A: Solids* 17 (1998) 403–420.
- [33] Gary G., Bailly P., Gatuingt F., Testing concrete at high strains and high rates of strain, in: Shim V.P.W., Tanimura S., Lim C.T. (Eds.), *Impact Response of Materials & Structures, Proc. 3rd Int. Symp. on Impact Engrg.*, The National University of Singapore, Singapore, December 1998, Oxford University Press, 1999, pp. 241–246.
- [34] Cantwell W.J., Morton J., The impact resistance of composite materials—a review, *Composite* 22 (1991) 347–362.
- [35] Budiansky B., Fleck N.A., Compressive failure of fibre composites, *J. Mech. Phys. Solids* 41 (1993) 183–211.
- [36] Zhao H., Gary G., An experimental investigation of compressive failure strength of fibre polymer matrix composite plates under impact loading, *Composite Sci. Technol.* 57 (1997) 287–292.
- [37] Wierzbicki T., Crushing analysis of metal honeycombs, *Int. J. Impact Engrg.* 1 (1983) 157–174.
- [38] Rinde J.A., Hoge K.G., Time and temperature dependence of the mechanical properties of polystyrene bead foam, *J. Appl. Polymer Sci.* 15 (1971) 1377–1395.
- [39] Zhao H., Gary G., Crushing behaviours of aluminium honeycomb under impact loading, *Int. J. Impact Engrg.* 21 (1998) 827–836.
- [40] Zhao H., Testing of polymeric foams at high and medium strain rates, *Polymer Testing* 16 (1997) 507–516.
- [41] Gibson L.J., Ashby M.F., *Cellular Solids*, Pergamon Press, 1988.
- [42] Zhao H., Quelques contributions à l'étude du comportement dynamique des matériaux, *Habilitation à diriger des recherches*, Université Paris VI, 1997.
- [43] Bui H.D., Maigre H., Rittel D., A new approach to the experimental determination of the dynamic stress intensity factor, *Int. J. Solids Struct.* 29 (1992) 2881–2895.
- [44] Maigre H., Rittel D., Mixed-mode quantification for dynamic fracture initiation: application to the compact compression specimen, *Int. J. Solids Struct.* 30 (1993) 3233–3244.
- [45] Maigre H., Rittel D., Dynamic fracture detection using the force-displacement reciprocity: application to the compact compression specimen, *Int. J. Fracture* 73 (1995) 67–79.
- [46] Zhao H., Gary G., Mouro P., Three-point bending test on the PMMA-based sandwich plate using Nylon Hopkinson bars, in: *Dymat International Conference, Krakow, October 2000* (accepted for publication).