

Réponse dynamique des sols : essais aux barres de Hopkinson

J.-F. SEMBLAT

Laboratoire Central des
Ponts et Chaussées

G. GARY, M.-P. LUONG

Laboratoire de Mécanique
des Solides,
École Polytechnique

Résumé

L'analyse de la réponse dynamique d'un matériau aux barres de Hopkinson permet d'appréhender directement son comportement dynamique mais également de contrôler les phénomènes de propagation mis en jeu. La conception d'un **dispositif original à trois barres de Hopkinson** autorise la détermination du trajet de chargement tridimensionnel sur des chemins œdométriques. L'influence considérable du trajet de chargement sur la réponse dynamique est démontrée à l'aide de plusieurs types d'essais (confinement rigide, semi-rigide, souple). Une analyse granulométrique approfondie élucide quelques aspects phénoménologiques de la comminution (diamètre moyen, énergie de rupture).

Dynamic response of soils using Split Hopkinson Pressure Bar method

Abstract

Split Hopkinson Pressure Bar method is particularly efficient to approach materials behaviour at high strain rates. A special device called **Three-Dimensional Split Hopkinson Pressure Bar (3D-SHPB)**, using a radial bar in contact with the specimen through a confining cylinder, allows measurement of radial stress with time. It is then possible to study the different loading paths in terms of mean stress and deviatoric stress. The comparison of the different experiments performed (confining cylinder, confining pressure...) shows a strong influence of the loading path on the dynamic response. At grain size scale, several investigations have been made to evaluate the evolution of grain size distribution after testing. Experimental results show that the *3D-Split Hopkinson Pressure Bar* is a very promising tool for laboratory dynamic testing on soils.

Dynamique des sols

Domaines d'application

De nombreux problèmes pratiques sont concernés par la sollicitation dynamique des sols : le battage de pieux, le compactage dynamique, le compactage vibratoire, l'isolation vibratoire, le génie parasismique... Ces champs d'application pratiques, ainsi que les méthodes d'analyse associées, couvrent des gammes de fréquence, d'amplitude de déformation très variées. La figure 1 propose une classification de différents types de problèmes et d'essais en fonction de la fréquence, de l'amplitude de déformation et du rapport entre longueur d'onde mise en jeu et taille du domaine (ou de l'échantillon). Si ce rapport λ/λ_{ref} est faible, les phénomènes de propagation sont prépondérants (voir Fig. 1), dans le cas contraire ils peuvent être négligés et le comportement « dynamique » du matériau peut être appréhendé directement.

La zone de transition entre ces deux approches correspond au domaine de l'analyse modale pour lequel la longueur d'onde et la taille du domaine (ou de l'échantillon) sont du même ordre. Les essais à la colonne résonnante sont situés dans cette zone frontière entre étude de la propagation d'ondes et analyse du comportement (Fig. 1).

Essais dynamiques

Dans les essais aux barres de Hopkinson, les phénomènes de propagation sont bien contrôlés. J. Meunier en France (1974), C.W. Felice (1985, 1987, 1991) et

G.E. Veyera (1995) aux États-Unis, S. Shibusawa au Japon (1992) et A.M. Bragov en Russie (1994) ont réalisé des essais aux barres de Hopkinson pour déterminer la réponse de sols sous grande vitesse de déformation. Cette méthode est très intéressante car elle donne une mesure fiable des déplacements et des forces aux deux extrémités de l'échantillon. Cependant, la réalisation de tels essais sur les sols pose des difficultés particulières. Comme les caractéristiques mécaniques des sols sont généralement médiocres, il est nécessaire d'adapter le dispositif classique à ce matériau particulier. J. Meunier a, par exemple, utilisé des barres en nylon et C.W. Felice a réalisé des essais œdométriques en confinant l'échantillon dans un cylindre rigide.

Les caractéristiques des essais réalisés par l'ensemble de ces auteurs sont regroupées dans le tableau I. Dans les années 50 et 60, quelques précurseurs ont tenté d'appréhender le comportement dynamique des sols sous grande vitesse de déformation. Toutefois les dispositifs expérimentaux utilisés ne permettaient généralement pas de bien contrôler les phénomènes de propagation mis en jeu.

Comme indiqué dans le tableau I, des travaux beaucoup plus récents se sont intéressés à la réponse de différents types de sols sous grandes vitesses de déformation. C'est Meunier (1974) qui a relancé, dans les années 70, l'intérêt de tels travaux en élaborant un dispositif expérimental mieux adapté au cas des sols. Mais ce n'est qu'à partir du milieu des années 80 que des équipes de diverses origines ont étudié de façon approfondie la réponse dynamique des sols. Les dispositifs expérimentaux sont tous de type Hopkinson (à une seule barre pour Shibusawa (1992)). Les dimensions des barres, des échantillons et les méthodes de confinement utilisées sont variées : cylindre de confinement, pression de confinement (voir tableau I). Les résultats de l'approche proposée dans cet article seront confrontés à ceux obtenus par les auteurs cités dans le tableau I.

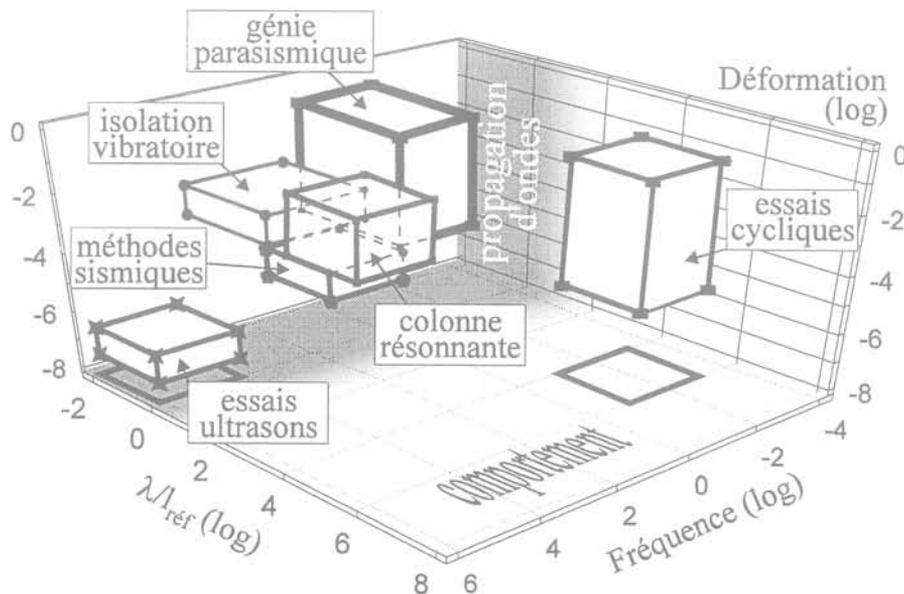


FIG. 1 Classification de différents types d'essais dynamiques sur les sols.
Classification of different types of dynamic tests on soils.

TABEAU 1 Différents essais dynamiques de type Hopkinson sur les sols.
Different Hopkinson type dynamic tests on soils.

Auteurs	Type de sol	Dimensions échantillon	Impacteur & barres	Durée du chargement	Type de confinement
Meunier (1974)	argile	$l = 2 \text{ à } 15 \text{ mm}$ $\Phi = 36 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,15 \text{ m}$ nylon $\Phi = 36 \text{ mm}$	$500 \mu\text{s}$	pression air
Felice (1985, 91)	sable argileux et alluvions	$l = 13/25 \text{ mm}$ $\Phi = 60,9 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,25 \text{ m}$ métallique $\Phi = 60,9 \text{ mm}$	$125 \mu\text{s}$	cylindre épais
Bragov (1994)	plastiline (\leftrightarrow argile)	$l = 15 \text{ mm}$ $\Phi = 20 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,25 \text{ m}$ métallique $\Phi = 20 \text{ mm}$	$200 \mu\text{s}$	cylindre fin ép. = 10 mm mesure de ϵ_r
Veyera (1995)	sable sec ou saturé	$l = 6,3/12,7 \text{ mm}$ $\Phi = 50,8 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,65 \text{ mm}$ métallique $\Phi = 50,8 \text{ mm}$	$257 \mu\text{s}$	cylindre épais : ép. = 25 mm
Shibusawa (1992)	Silt + argile + sable	$l = 50/100 \text{ mm}$ $\Phi = 50 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,25 \text{ m}$ métallique $\Phi = 25 \text{ mm}$	$80 \mu\text{s}$	aucun
Semblat, Luong, Gary (1995)	sable sec	$l = 10, 15, 20, 25$ et 30 mm $\Phi = 40 \text{ mm}$	$l_{imp} = 0,85 \text{ m}$ et $0,5 \text{ m}$ métallique et PMMA $\Phi = 40 \text{ mm}$	$350 \mu\text{s}$	cylindre épais pression air pression huile

2

Le banc dynamique à barres de Hopkinson « classique »

2.1

Dispositif expérimental

Les bancs dynamiques utilisés habituellement sont composés de deux barres axiales (une barre « incidente » et une barre « transmise ») et d'un impacteur projeté sur la barre incidente à l'aide d'un canon à air comprimé. La figure 2 donne un schéma de ce dispositif « classique ». Il était composé à l'origine d'une seule barre et a été modifiée par Kolsky pour réaliser

des mesures indirectes sur les deux faces de l'échantillon.

Comme indiqué sur la figure 2, le choc entre l'impacteur et la barre incidente donne naissance à un créneau constitué d'une onde de chargement et d'une onde de détente. Les ondes générées sont des ondes de compression quasiment pures car la flexion des barres est limitée par des guides répartis sur toute leur longueur. L'extrémité de la barre transmise est munie d'un dispositif d'absorption d'énergie (de type « nid d'abeille »).

Les mesures réalisées sur les barres par des jauges donnent les valeurs des déformations *incidente* (ϵ_{inc}), *réfléchie* (ϵ_{ref}) et *transmise* (ϵ_{tra}) (Fig. 2). D'après ces mesures, il est possible de déterminer les forces et les déplacements en tout point des barres (et en particulier aux interfaces barre-échantillon) et à tout instant.

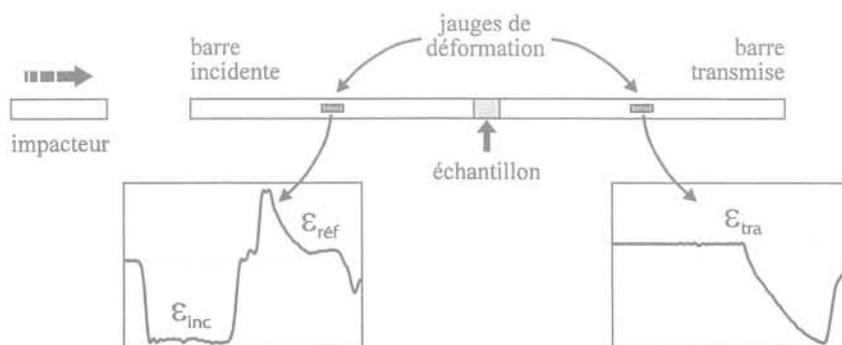


FIG. 2 Banc dynamique à barres de Hopkinson : dispositif « classique ».
« Classical » Hopkinson dynamic testing device.

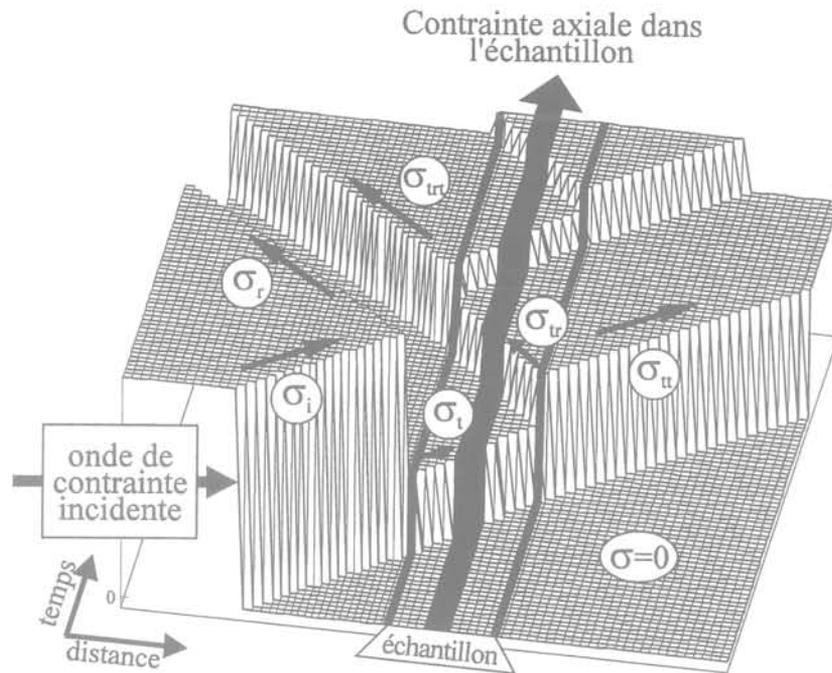


FIG. 3 Propagation de l'onde de contrainte à travers les deux interfaces barre-échantillon.
Propagation of the stress wave through both bar-specimen interfaces.

2.2

Onde de contrainte dans l'échantillon

2.2.1

Contrainte axiale dans l'échantillon

La propagation de l'onde de contrainte dans les barres et aux interfaces barre-échantillon sont un aspect fondamental des essais dynamiques aux barres de Hopkinson. Aux deux interfaces barre-échantillon, de multiples réflexions et transmissions d'onde apparaissent. Elles sont gouvernées par les paramètres mécaniques des barres et de l'échantillon. En supposant l'échantillon parfaitement élastique, il est possible de décrire simplement chaque étape de réflexion-transmission. Comme indiqué à la figure 3, les différentes étapes sont les suivantes :

- l'onde de contrainte incidente σ_i (compression) est partiellement réfléchi à la première interface. Comme le module de l'échantillon est plus faible que celui des barres, apparaissent à la fois une onde de contrainte réfléchi σ_r (traction) et une onde de contrainte transmise σ_t (compression);

- sur la deuxième interface, le même processus de réflexion-transmission intervient et crée deux ondes de compression σ_{tr} (transmise) et σ_{tr} (réfléchi).

Le schéma de la figure 3 donne les variations de la contrainte axiale en fonction du temps et de la position. Il montre clairement que la contrainte axiale dans l'échantillon augmente progressivement. A chaque étape de réflexion-transmission, la contrainte axiale augmente et après plusieurs étapes sa valeur devient très proche de celle de l'onde de contrainte incidente. Cette phase de l'essai est appelée « phase transitoire »; les phénomènes de propagation y sont prépondérants.

Progressivement, la contrainte axiale devient uniforme dans l'échantillon.

2.2.2

Les deux phases expérimentales

Deux phases différentes peuvent généralement être distinguées dans les essais dynamiques aux barres de Hopkinson (voir Fig. 4) :

- une phase transitoire. Les premières réflexions et transmissions de l'onde de chargement conduisent à un état de contrainte inhomogène. Les phénomènes de propagation sont largement prépondérants et cette étape est appelée phase transitoire de l'essai. La force

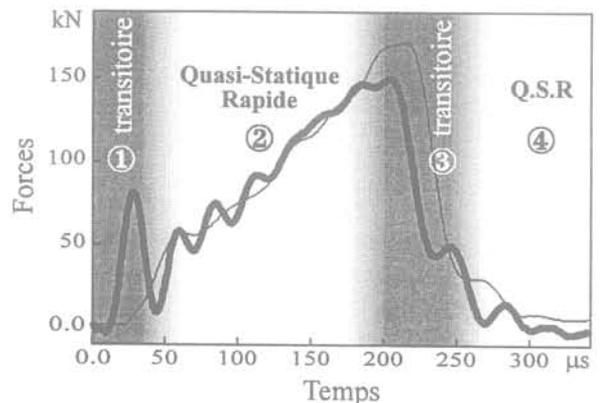


FIG. 4 Forces sur les deux faces de l'échantillon montrant les deux phases de chargement (resp. décharge).
Forces at both faces of the specimen showing both loading phases (resp. unloading).

incidente (trait épais) est bien supérieure à la force transmise (trait fin, voir Fig. 4).

- *une phase quasi statique rapide.* Après plusieurs réflexions et transmissions de l'onde de chargement aux deux interfaces, l'échantillon atteint un état d'équilibre de contrainte. Cette étape est appelée la phase « quasi statique rapide » de l'essai : la contrainte axiale est homogène dans tout l'échantillon (voir Fig. 4), les forces incidente et transmise sont égales.

Comme indiqué à la figure 4, une *phase transitoire* apparaît aussi bien en charge qu'en décharge (phases numéros (1) et (3)). Le domaine d'utilisation des essais aux barres de Hopkinson est la *phase quasi statique rapide* (notée (2) et (4) sur la figure 4). Il existe deux phases d'équilibre de l'échantillon : en charge et en décharge. Des méthodes d'analyse récentes permettent d'exploiter la phase transitoire des essais aux barres de Hopkinson (Rota, 1994).

2.3

Détermination des paramètres mécaniques

Dans les barres, les grandeurs liées au comportement et à la propagation d'onde s'expriment de façon assez simple. Après correction des phénomènes de dispersion (Gary, 1992), l'hypothèse de propagation unidimensionnelle est parfaitement justifiée. Les mesures réalisées sur les barres sont ramenées aux interfaces barre-échantillon afin de déterminer les forces et les déplacements à ces interfaces. Les expressions de la contrainte et de la déformation axiales sont données de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \sigma_{ax} &= \rho \cdot C_0 \cdot v \\ \epsilon_{ax} &= \frac{v}{C_0} \end{aligned} \quad (1)$$

Ces expressions sont valables pour n'importe quel milieu de propagation. Pour des barres parfaitement élastiques, l'expression (1) s'écrit :

$$\sigma_{ax} = \rho \cdot C_0^2 \cdot \epsilon_{ax}$$

Les déformations étant mesurées sur les barres, la contrainte axiale σ_{ax} dans l'échantillon est déterminée d'après les déformations incidente, réfléchie et transmise d'après l'expression suivante :

$$\sigma_{ax} = \frac{S_b \cdot E}{2S_{éch}} \cdot [\epsilon_{inc}(t) + \epsilon_{réf}(t) + \epsilon_{tra}(t)] \quad (2)$$

où S_b est la section des barres et $S_{éch}$ la section de l'échantillon.

L'expression (2) est uniquement valable pour la phase *quasi statique rapide* de l'essai. Elle est calculée d'après les forces aux deux interfaces : c'est une bonne hypothèse si les deux forces sont proches (équilibre).

3

L'« essai à trois barres » de Hopkinson

3.1

Dispositif expérimental

Pour appliquer une sollicitation dynamique aux sols, il est nécessaire de mesurer (ou contrôler) les contraintes axiale et radiale. La réponse dynamique du matériau peut alors être analysée d'après les chemins de contrainte tridimensionnels. Dans cette étude, des essais œdométriques dynamiques utilisant un cylindre de confinement rigide sont réalisés à l'aide d'un dispositif expérimental spécial : le *banc dynamique à trois barres de Hopkinson*. L'utilisation d'un cylindre de confinement rigide empêche les déformations radiales, mais il est alors nécessaire d'estimer la contrainte radiale. Une barre radiale, mise en contact avec l'échantillon à travers le cylindre de confinement, autorise la mesure de la contrainte radiale en fonction du temps (Semblat, 1995-a). La figure 5 donne un schéma du *banc dynamique à trois barres de Hopkinson*.

Le dispositif spécial représenté à la figure 5 comporte trois barres de type Hopkinson :

- 2 barres axiales pour mesurer les forces et les déplacements sur les deux faces de l'échantillon (comme dans le dispositif classique) ;
- 1 barre radiale pour évaluer la contrainte radiale pendant l'essai.

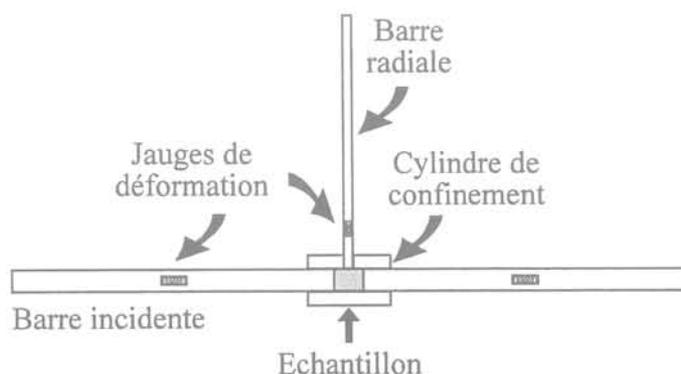


FIG. 5 Dispositif à trois barres de Hopkinson.
Three dimensional Split Hopkinson Pressure Bar.

Essais sous confinement rigide (œdométriques dynamiques)

3.2.1

Contrainte et déformation axiales

Le procédé de préparation des échantillons permet d'avoir une masse volumique constante d'un essai à l'autre (même masse de matériau et même volume d'échantillon pour chaque essai). Pour l'ensemble des essais sous confinement rigide, la masse volumique des échantillons est $\rho = 1667 \text{ kg/m}^3$.

Pour tous les essais réalisés, les échantillons sont composés de sable de *Fontainebleau sec*. Les essais œdométriques dynamiques réalisés sur le dispositif de la figure 5 sont appelés « essais sous confinement rigide » : le cylindre de confinement rigide empêche la déformation radiale. Le cylindre de confinement doit donc être suffisamment rigide ou épais pour obtenir une déformation radiale faible. Ceci a été vérifié d'après les contraintes radiales mesurées (Semblat, 1995-b).

La figure 6 donne les contraintes axiales en fonction des déformations axiales pour trois essais sous confinement rigide (œdométriques). Ces trois essais correspondent à des longueurs d'échantillon identiques ($l = 10 \text{ mm}$) mais à des vitesses de déformation différentes (voir Fig. 6 et Semblat, 1995-a).

Pour les essais sous confinement rigide, les réponses axiales sont quasi linéaires en charge et en décharge mais avec des pentes très différentes dans les deux cas. Le comportement du matériau sous chargement œdométrique dynamique est donc fortement anélastique. En revanche, les pentes en charge d'une part et en décharge d'autre part sont assez proches pour les trois exemples présentés à la figure 6.

La partie élastique de la réponse n'est donc pas réellement visible sur les courbes de la figure 6. La réponse du cas œdométrique est comparée plus loin à des réponses suivant d'autres trajets de chargement.

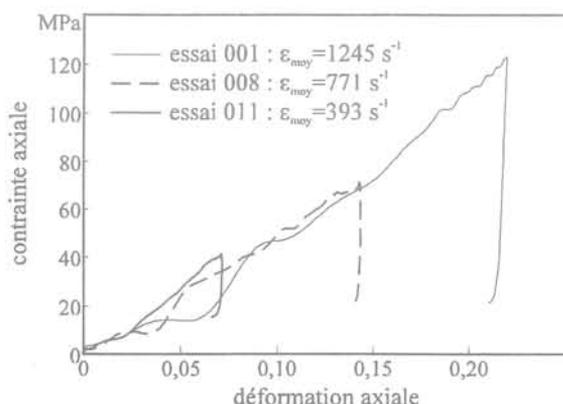


FIG. 6 Exemples de réponses dynamiques sur dispositif à trois barres de Hopkinson.
Dynamic responses on 3D-SHPB.

3.2.2

Répétitivité des expériences

Chaque essai sous confinement rigide (longueur d'échantillon, vitesse d'impact) est réalisé trois fois à l'identique afin d'apprécier la reproductibilité des essais (Semblat, 1995-a). Les résultats obtenus pour trois essais identiques sont très proches en ce qui concerne la contrainte axiale et assez proches pour la contrainte radiale (voir Fig. 7).

Les mesures de contraintes axiale et radiale paraissent donc fiables voire même très fiables dans le cas de la contrainte axiale. Il est alors possible d'étudier les trajets de chargement complets dans le cas des essais sous confinement rigide (essais œdométriques dynamiques).

3.2.3

Mesure de la contrainte radiale

Le dispositif à trois barres de Hopkinson présenté à la figure 5 permet de déterminer à la fois la contrainte axiale et la contrainte radiale. Les deux courbes de la figure 8 donnent les variations des contraintes axiale et radiale en fonction du temps. La contrainte radiale σ_{rad} évolue très nettement en fonction du temps puisque, pour les résultats de cet essai, σ_{rad} atteint un maximum de 30 MPa environ pour un temps $t = 150 \mu\text{s}$. Au-delà de cette valeur de temps, la contrainte radiale décroît alors que la contrainte axiale continue à augmenter (Fig. 8).

La prise en compte de l'évolution du confinement (contrainte radiale) dans des essais œdométriques dynamiques est donc capitale puisque les variations de contrainte radiale au cours du chargement axial sont très importantes. Cet aspect du problème revêt une importance d'autant plus grande dans le cas des sols pour lesquels la connaissance du trajet de chargement tridimensionnel est indispensable.

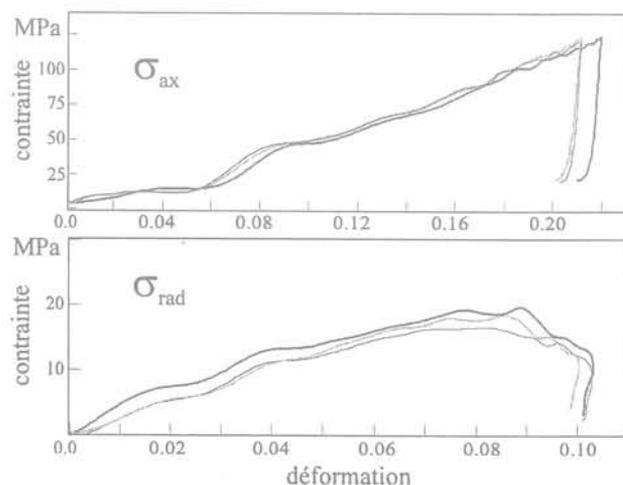


FIG. 7 Contraintes axiale et radiale en fonction de la déformation pour trois essais identiques.

Axial and radial stresses versus strain for three identical tests.

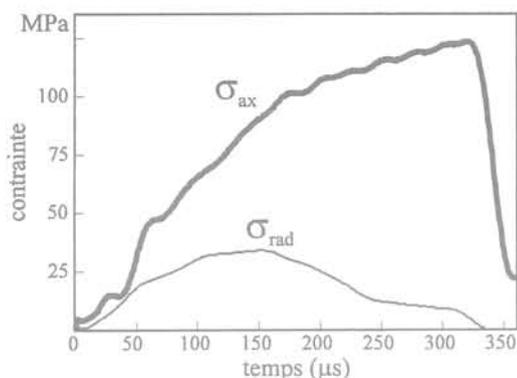


FIG. 8 Contraintes axiale et radiale en fonction du temps.
Axial and radial stresses versus time.

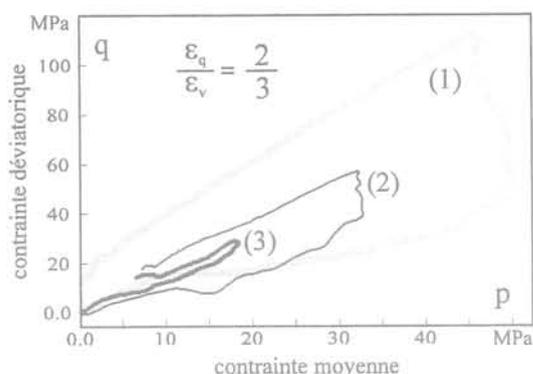


FIG. 9 Diagrammes p-q : contrainte déviatorique en fonction de la contrainte moyenne (essais œdométriques dynamiques).
p-q diagrams : deviatoric stress versus mean stress (oedometric dynamic tests).

3.3

Chargement dynamique : le point de vue tridimensionnel

Le dispositif à trois barres de Hopkinson donne accès aux contraintes axiale et radiale (notées respectivement σ_{ax} et σ_{rad}). En supposant la contrainte radiale homogène autour de l'échantillon, il est possible d'évaluer les trajets de chargement tridimensionnels en termes de contrainte moyenne « p » et contrainte déviatorique « q ». Le calcul de la contrainte moyenne et déviatorique conduit aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} p = \frac{\sigma_{ax} + 2\sigma_{rad}}{3} \\ q = \sigma_{ax} - \sigma_{rad} \end{cases}$$

où σ_{ax} et σ_{rad} sont respectivement les contraintes axiale et radiale.

Les courbes de la figure 9 montrent clairement que pour un trajet linéaire en déformation ($\epsilon_q/\epsilon_v = 2/3$ pour les essais œdométriques), le trajet de contrainte est aussi linéaire. Les courbes p-q de la figure 9 correspondent à des longueurs d'échantillon de 10 mm (1), 15 mm (2) et 20 mm (3). Pour les échantillons courts (1, 2), les pentes en charge et en décharge sur les diagrammes p-q sont très différentes. Pour l'échantillon de 20 mm (3), les pentes en charge et en décharge sont très proches (Fig. 9). Cela montre que la structure de l'échantillon est différente après la phase de chargement (du fait de l'écrasement des grains par exemple, voir § 6, le comportement en décharge du matériau est donc différent du comportement en charge. D'après les courbes de la figure 9, ce phénomène est d'autant plus marqué que les échantillons sont courts, c'est-à-dire que l'écrasement des grains est important (voir § 6).

La détermination des trajets de contrainte tridimensionnels pour des chargements dynamiques est d'un grand intérêt pour les sols. L'influence du trajet de chargement sur la réponse du matériau est bien connue en statique mais n'a jamais été clairement analysée pour des chargements dynamiques. Dans le paragraphe suivant, d'autres essais utilisant des confinements constants et faiblement variables sont présentés.

4

Essais sous confinement fixe

4.1

Autres types d'essais

La comparaison de la réponse dynamique d'un sol suivant différents trajets de chargement est d'un grand intérêt. En plus des essais sous « confinement rigide » (essais œdométriques sur dispositif à trois barres de Hopkinson), trois autres types d'essais sont réalisés (Semblat, 1995-a) :

- *confinement semi-rigide* : pour ce type d'essais, la pression de confinement appliquée à l'échantillon n'est pas constante (fluide incompressible : huile) ;
- *confinement souple* : les essais sous confinement souple sont réalisés à l'aide d'un fluide compressible (air) qui assure une pression de confinement constante pendant les essais ;
- *essais à faible impédance* : les essais précédents sont réalisés sur des barres en duraluminium et la contrainte axiale est élevée. Pour les essais à faible impédance, l'utilisation de barres en plexiglas autorise des chargements sous faible contrainte et faible confinement. L'impédance mécanique de ce type de barres est faible : ces essais sont appelés essais à faible impédance.

Les essais sous confinement « souple » et « semi-rigide » sont réalisés à l'aide d'une cellule de confinement (voir Fig. 10) donnant un confinement modérément variable (semi-rigide) ou constant (souple). Les essais à « faible impédance » sont mis en œuvre sur un dispositif à barres en plexiglas (PMMA) et l'échantillon est confiné sous pression constante. Une procédure spéciale de correction prend en compte l'amortissement et la dispersion dans les barres viscoélastiques utilisées (Zhao, 1992).

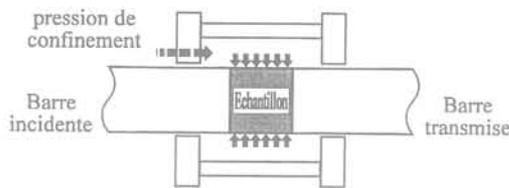


FIG. 10 Cellule de confinement pour les essais à faible impédance et sous confinement souple et semi-rigide.

Confining cell for low impedance, soft confinement and semi-rigid confinement tests.

4.2

Essais sous confinement semi-rigide

Les essais sous confinement semi-rigide sont réalisés sous confinement faiblement variable (fluide incompressible) à l'aide du dispositif présenté à la figure 10. Le dispositif expérimental utilisé ne permet pas de connaître précisément les variations de la pression de confinement comme dans le cas des essais sous confinement rigide.

La figure 11 donne la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale pour différents essais sous confinement semi-rigide (confinement faiblement variable). Pour ce type d'essais, la réponse est quasi-linéaire en charge et en décharge. Les valeurs de contrainte axiale atteintes sont du même ordre que pour les essais sous confinement rigide.

Les courbes présentées à la figure 11 correspondent à des essais sous différentes pressions de confinement (3,0 ; 5,6 et 7,5 MPa) et une même longueur d'échantillon ($l = 10$ mm). La pression de confinement ne paraît pas influencer fortement la forme de la réponse (pour les valeurs de pression utilisées). Il faut toutefois noter que cette pression doit vraisemblablement évoluer au cours du chargement (aucune mesure de cette évolution n'a pu être réalisée).

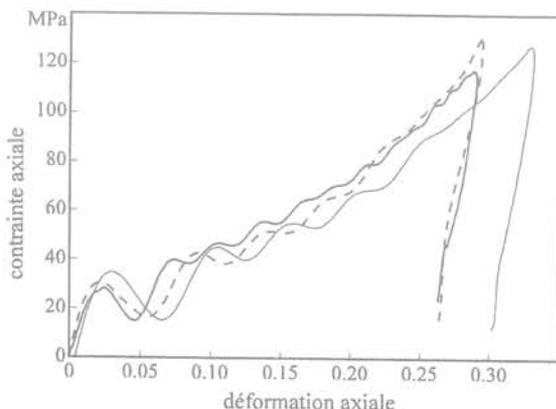


FIG. 11 Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale (essais sous confinement semi-rigide).

Axial stress versus axial strain (for semi-rigid confinement tests).

4.3

Essais sous confinement souple

Les essais sous confinement souple sont réalisés sous confinement constant (pression d'air). Cela permet de comparer les réponses dynamiques obtenues sous confinement faiblement variable et sous confinement constant. La figure 12 donne la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale pour un essai sous une pression de confinement de 2,5 MPa, la longueur de l'échantillon étant $l = 11$ mm.

La valeur maximale de contrainte axiale atteinte est de l'ordre de 40 MPa, ce qui est nettement inférieur aux valeurs obtenues dans les essais sous confinement rigide ou semi-rigide. Dans le cas des essais sous confinement souple, la réponse n'est plus linéaire en charge. L'évolution du confinement au cours du chargement dans les essais sous confinement rigide ou semi-rigide induit donc un raidissement important de la réponse du matériau. Ce n'est pas le cas sous confinement souple puisque la résistance de l'échantillon diminue au cours du chargement (Fig. 12).

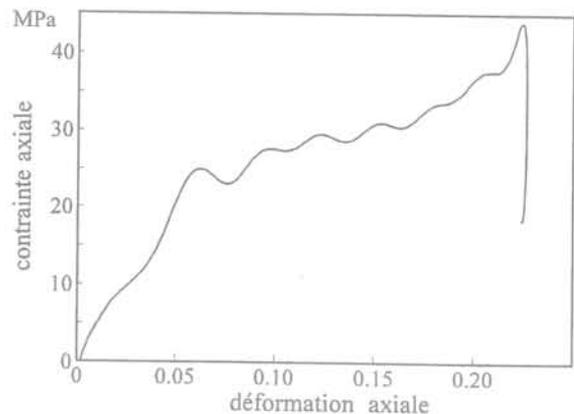


FIG. 12 Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale (essais sous confinement souple).

Axial stress versus axial strain (for soft confinement tests).

4.4

Essais à faible impédance (barres en PMMA)

Les essais à faible impédance sont réalisés sur des barres en PMMA (plexiglas). Ces barres ont une impédance mécanique nettement plus faible que les barres en duraluminium utilisées pour tous les autres essais (Semblat, 1995-a). Le rapport d'impédance entre barres et échantillon est donc plus faible. Cela permet une homogénéisation plus rapide de la contrainte axiale dans l'échantillon. Meunier (1974) a également utilisé des barres à faible impédance (nylon) pour adapter le banc dynamique classique aux cas des sols.

Le dispositif expérimental utilisé est du même type que pour les essais sous confinement souple et semi-rigide (voir Fig. 10). Les corrections des mesures réalisées sur les barres sont un peu plus complexes puisqu'il faut tenir compte à la fois de la dispersion géométrique dans les barres mais également de la dis-

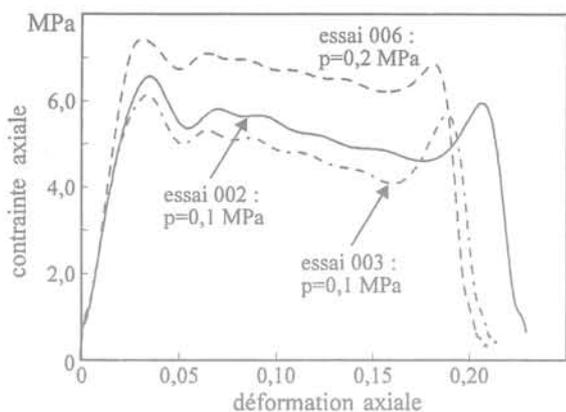


FIG. 13. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale (essais à faible impédance).
Axial stress versus axial strain (for low impedance tests).

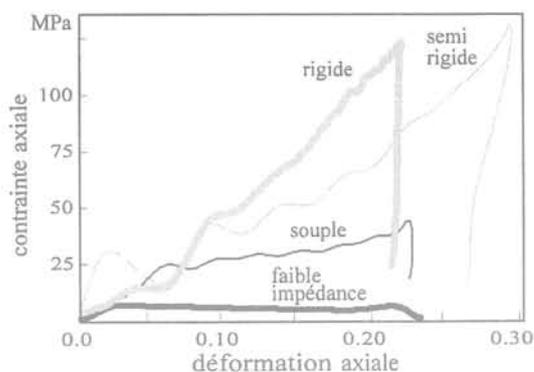


FIG. 14. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale pour différents types de confinement.
Axial stress versus axial strain for different types of confinements.

persion matérielle due à la viscosité du plexiglas. De nombreux éléments sont donnés dans les travaux de G. Gary (1992) et H. Zhao (1992).

La figure 13 donne trois courbes contrainte axiale, déformation axiale issues d'essais à faible impédance. La contrainte axiale maximale est beaucoup plus faible que pour tous les autres types d'essais puisqu'elle est inférieure à 10 MPa. La réponse dynamique du matériau et de type radoucissant alors que les vitesses de déformation sont du même ordre que pour les essais précédents (Semblat, 1995-a). L'influence de la pression de confinement ne semble pas négligeable et paraît modifier sensiblement la réponse dynamique du sable (augmentation de la résistance, voir figure 13).

5

Comparaison des trajets de chargement

5.1

Réponses dynamiques sur différents trajets

En comparant les réponses obtenues pour les différents essais, il est possible d'apprécier l'influence du trajet de contrainte sur la réponse dynamique de l'échantillon. Les courbes de la figure 14 montrent les réponses dynamiques obtenues pour différents trajets de chargement (confinement rigide, semi-rigide, souple et faible impédance).

La principale conclusion issue de ces courbes est que le trajet de chargement dynamique a une grande influence sur la réponse dynamique. En effet, pour une même vitesse de déformation, la réponse dynamique du sable sec est très différente suivant la contrainte axiale appliquée et suivant le trajet de contrainte (type de confinement), voir figures 6, 11, 12, 13 et 14.

Deux types de réponse dynamique sont à distinguer :

- pour les essais « à faible impédance » et sous « confinement souple » : la résistance de l'échantillon décroît au cours du chargement ;

- pour les essais sous « confinement semi-rigide » et les essais « oedométriques » : le comportement est quasiment linéaire en charge. L'évolution du confinement au cours du chargement augmente la résistance dynamique apparente de l'échantillon.

Il apparaît clairement, sur les courbes de la figure 14, que la résistance de l'échantillon est d'autant plus grande que la pression de confinement est grande. Pour l'ensemble des essais réalisés, les valeurs de contrainte axiale s'échelonnent de 6 à 120 MPa et les valeurs de pression de confinement de 0,1 à 30 MPa (Semblat, 1995-a).

5.2

Valeurs des « modules » dynamiques

Les essais sous confinement rigide réalisés sur le dispositif à trois barres de Hopkinson couvrent une large gamme de tailles d'échantillon, de vitesses de déformation... Pour tous ces essais, les modules des courbes contrainte-déformation sont déterminés de manière à caractériser la réponse dynamique du sable. Les valeurs de ces modules sont données en fonction des vitesses de déformation correspondantes à la figure 15. Les caractéristiques des essais sont disponibles dans Semblat, 1995-a. Chaque essai (longueur d'échantillon, vitesse impacteur) est réalisé trois fois à l'identique, l'écart type des valeurs de module pour trois essais identiques ne dépasse pas 10 % de la valeur moyenne.

La réponse dynamique du matériau étant fortement anélastique (voir § 3), le module dont il est question ici s'apparente plutôt à un module d'écroutissage. Les valeurs de modules reportées à la figure 15 varient du simple au double : les valeurs les plus fortes (800 MPa) correspondent aux plus faibles vitesses (200 s⁻¹), les valeurs faibles (350-450 MPa) aux grandes vitesses de déformation (800-1 200 s⁻¹). D'après les résultats de la figure 15, il est donc possible de conclure que le module diminue quand la vitesse de déformation augmente. Il est toutefois difficile d'établir une relation claire entre module et vitesse de déformation du fait de la dispersion des résultats. En outre, il serait nécessaire de réaliser des essais avec différentes longueurs d'impacteur (c'est-à-dire des créneaux de chargement de différentes

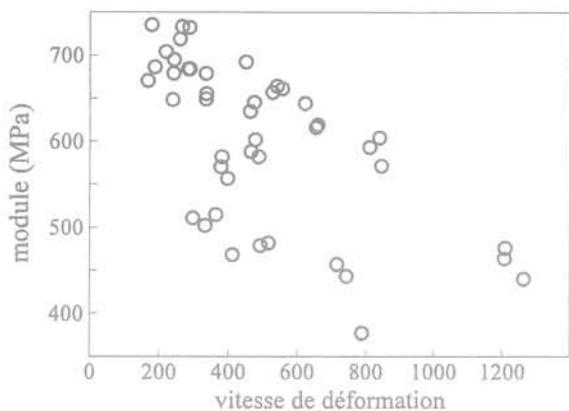


FIG. 15 Pentas de la courbes σ - ϵ en fonction de la vitesse de déformation (essais sous confinement rigide). Slopes of σ - ϵ curves vs strain rate (for rigid confinement tests).

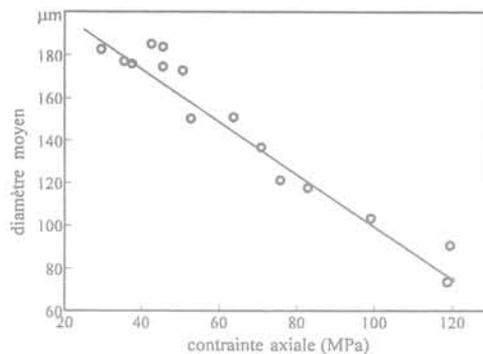


FIG. 17 Diamètre moyen après essai en fonction de la contrainte axiale maximale (pour tous les essais œdométriques). Mean diameter versus maximum axial stress (for all oedometric tests).

durées) pour dissocier clairement les effets de contrainte et les effets de vitesse de déformation.

6

Analyse à l'échelle granulaire

6.1

Évolution de la granulométrie

Après chaque essai œdométrique (« confinement rigide »), les granulométries non cumulées de chaque échantillon sont comparées : la figure 16 donne un diagramme des courbes granulométriques en fonction de la contrainte axiale maximale pour les essais œdométriques. Le pourcentage de gros grains diminue alors que le pourcentage de petits grains augmente. En outre, il est possible de quantifier les variations des tailles de particules.

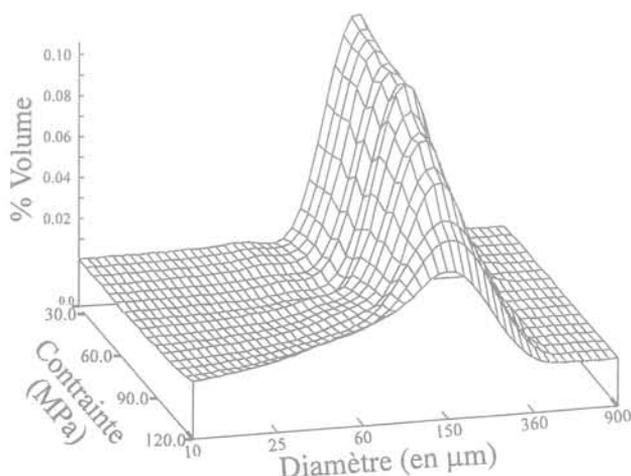


FIG. 16 Distributions granulométriques en fonction de la contrainte axiale maximale (pour tous les essais œdométriques). Grain-size curves versus maximum axial stress (for all oedometric tests).

La figure 17 donne le diamètre moyen des grains après essai pour l'ensemble des essais sous confinement rigide. Le diamètre moyen des grains de l'échantillon vierge est $d_{\text{moy}} = 196 \mu\text{m}$. Après essai, le diamètre moyen des grains peut descendre jusqu'à $65 \mu\text{m}$ (l'ensemble des valeurs est donné dans Semblat, 1995-a). Pour les essais sous confinement rigide, il y a donc bien rupture du matériau. La dépendance entre diamètre moyen des grains après essai et contrainte axiale appliquée est forte. Cela pourrait indiquer qu'il n'y a pas d'effet dynamique dans la rupture des grains. Cet effet peut être sensible dans la phase transitoire du chargement, mais il est difficilement envisageable de déterminer la granulométrie en cours d'essai.

6.2

Influence de la vitesse de chargement

Sadd (1992) et Shukla (1992) ont réalisé des expériences sur des assemblages de grains photoélastiques pour étudier la propagation d'une onde de chargement dans un milieu granulaire. Ils ont étudié l'influence sur la propagation de la présence d'un grain dur ou d'un vide dans des assemblages granulaires 1D ou 2D. De nombreux auteurs ont montré que le chargement statique d'assemblages granulaires fait apparaître des chemins de force de différentes intensités (De Josseling de Jong, 1972).

Dans les essais dynamiques, la rapidité du chargement peut créer des « chaînons de force préférentiels » de forte intensité. Les grains ne peuvent pas suivre le trajet d'intensité de force minimale pour atteindre l'équilibre. Ces « chaînons de force préférentiels » donnent des contraintes de forte intensité. Il serait intéressant de déterminer l'influence de cet effet transitoire (lié à la vitesse de déformation) et de le comparer à l'impact de la contrainte axiale (effet de niveau de contrainte, Fig. 17).

6.3

Énergie de rupture

A partir des distributions granulométriques données à la figure 16, il est possible d'analyser de façon

plus quantitative la rupture des grains au sein de l'échantillon.

Chaque distribution granulométrique peut en effet être reliée à l'énergie de rupture de l'essai correspondant. En supposant les grains sphériques, il est possible d'écrire une relation simple entre l'énergie de rupture E_{rupt} et la nouvelle surface de grain créée. Comme l'a indiqué Fukumoto (1990, 1992), l'expression de E_{rupt} prend l'une des formes suivantes (proposées par Kick et Rittinger :

$$E_{Ritt} = C_R \cdot \sum_i \left[q_i \cdot \left(\frac{1}{x_i} - \frac{1}{x_0} \right) \right]$$

$$E_{Kick} = C_K \cdot \sum_i \left[q_i \cdot \log \left(\frac{x_0}{x_i} \right) \right]$$

où q_i est le pourcentage de grains de diamètre x_i et x_0 le diamètre moyen des grains.

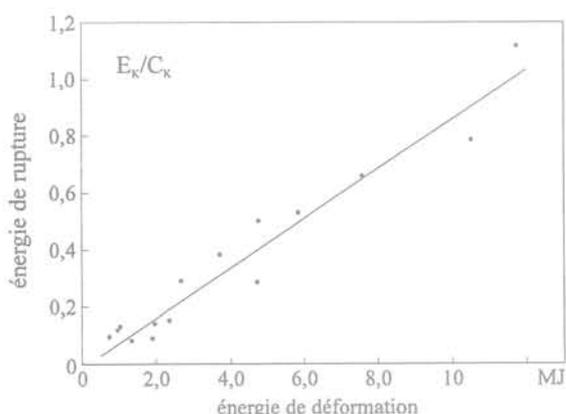


FIG. 18 Énergie de rupture en fonction de l'énergie de déformation (pour tous les essais œdométriques).
Fracture energy versus strain energy (for all oedometric tests).

D'après les courbes contrainte-déformation (axiales), l'énergie de déformation dissipée dans l'échantillon $E_{\sigma-\varepsilon}$ peut être évaluée. Il est intéressant de comparer l'énergie de rupture et l'énergie de déformation. Comme le montre la figure 18, pour tous les essais œdométriques dynamiques, l'énergie de rupture est proportionnelle à l'énergie de déformation $E_{\sigma-\varepsilon}$.

Il y a donc une relation très forte entre l'énergie de déformation dissipée dans l'échantillon (calculée d'après la réponse) et l'énergie de rupture (calculée d'après la granulométrie). Or, après chargement de l'échantillon, une partie des ondes continue à se propager dans les barres. Cette relation entre énergie de rupture et énergie de déformation semble pourtant indiquer que seul le premier créneau de chargement fait évoluer la granulométrie du matériau. Cela est fort probable puisque les vitesses aux interfaces barre-échantillon deviennent négatives après la décharge (Semblat 1995-a). Il y a donc séparation entre les barres et l'échantillon après la phase de décharge.

Principaux résultats

Le résultat le plus important de cette étude est qu'elle donne un moyen de déterminer le trajet de contrainte tridimensionnel sous chargement dynamique. La comparaison des différents essais utilisant plusieurs types de confinement montre la très forte influence du trajet de chargement sur la réponse dynamique. L'analyse à l'échelle granulaire donne également des résultats intéressants sur la relation entre réponse dynamique et variation de la taille des grains.

Le tableau II récapitule les principaux résultats obtenus dans la présente étude et rappelle ceux des auteurs cités au §1.2. Notre étude propose un dispositif expérimental original (dispositif à trois barres de Hopkinson) qui présente le double avantage d'être bien adapté au cas des sols (grâce au confinement de type œdométrique) et de donner accès à la réponse dynamique tridimensionnelle. Elle compare en outre différents types de confinement pour un même matériau et dans une même gamme de vitesses de déformation. Seul Bragov (1994) s'intéresse à la partie radiale de la réponse à travers la déformation radiale de l'échantillon (voir tableau I). Toutefois il n'a pas accès directement à la contrainte radiale et utilise des échantillons

TABLEAU II Principaux résultats des essais dynamiques de type Hopkinson cités dans le tableau I.

Auteurs	Principaux résultats et conclusions
Meunier (1974)	<ul style="list-style-type: none"> • mise au point d'essais sur barres en nylon (faible impédance) sans correction des phénomènes de dispersion • faible influence de la pression de confinement sur la réponse
Felice (1985, 91)	<ul style="list-style-type: none"> • comportement $\sigma-\varepsilon$ bilinéaire : 1^{re} phase pour $\varepsilon <$ porosité initiale, comblement des vides et écrasement des grains 2^e phase échantillon totalement saturé, réponse du fluide
Bragov (1994)	<ul style="list-style-type: none"> • mesure de la déformation circonférentielle d'après essais avec cylindre de confinement souple sur échantillons de plasticine
Veyera (1995)	<ul style="list-style-type: none"> • forte dépendance de la réponse dynamique en fonction du degré de saturation (comportement se raidit quand saturation augmente)
Shibusawa (1992)	<ul style="list-style-type: none"> • augmentation du module avec degré de saturation • essai à une seule barre, résultats obtenus d'après ondes incidente et réfléchi uniquement, contrainte axiale a priori non homogène
Semblat Luong, Gary (1995)	<ul style="list-style-type: none"> • les essais aux barres de Hopkinson sont utilisables pour les sols • détermination du trajet de contrainte tridimensionnel en dynamique, mise au point de l'essai à trois barres de Hopkinson • comparaison des réponses dynamiques suivant plusieurs trajets de chargement (confinements rigide, semi-rigide, souple) • un confinement variable raidit la réponse dynamique du matériau • une analyse granulométrique approfondie donne des éléments intéressants (et quantitatifs) sur le chargement et la ruine du matériau

de plastine et non des échantillons de sol. Plusieurs auteurs s'intéressent à des échantillons de sol saturés mais ils ne considèrent que la réponse axiale du matériau et n'envisagent qu'un type de trajet de chargement (voir tableau I et II).

Il serait intéressant d'étudier avec précision l'influence réelle de la vitesse de déformation sur la réponse dynamique en utilisant différents types d'impacteurs (longueur, masse...). Une approche « problème inverse » donne d'ores et déjà d'intéressants résultats sur la phase transitoire (Rota, 1994) et constitue un outil d'investigation indispensable à une exploitation approfondie des essais aux barres de Hopkinson. Elle permet d'apprécier le comportement du matériau dans la phase transitoire de l'essai pour laquelle la

contrainte n'est pas homogène dans l'échantillon. Les essais réalisés dans cette étude, ainsi que ceux des auteurs cités au § 1.2, montrent que le dispositif à barres de Hopkinson peut donner des résultats intéressants et complets sur la réponse dynamique des sols aux grandes vitesses de déformation.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent au GRECO-Géomatériaux pour le soutien qu'il a bien voulu apporter à cette recherche et en particulier à MM. F. Darve et J.-P. Touret pour leur amical encouragement.

Bibliographie

- Bragov A.M. – Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils, *DYMAT J.*, vol. 1, n° 3, 1994, p. 253-259.
- Felice C.W. – The response of soil to impulse loads using the SHPB technique, Ph. D Thesis, University of Utah, Salt Lake City, 1985.
- Felice C.W., Gaffney E.S., Brown J.A. – Dynamic high stress experiments on soil, *Geotechnical Testing Jnl*, vol. 10, n° 4, 1987, p. 192-202.
- Felice C.W., Gaffney E.S., Brown J.A. – Extended split Hopkinson bar analysis for attenuating materials, *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 117, n° 5, 1991, p. 1119-1135.
- Fukumoto T. – A grading equation for decomposed granite soil, *Soils and Foundations*, vol. 30, n° 1, p. 27-34, 1990.
- Fukumoto T. – Particle breakage characteristics of granular soils, *Soils and Foundations*, vol. 32, n° 1, 1992, p. 26-40.
- Gary G., Klepaczko J.R., Zhao H. – Corrections for wave dispersion and analysis of small strains with Split Hopkinson Bar, Proc. of Int. Symp. of Impact Engineering, Sendai, Japon, 1992.
- De Josseling de Jong G., Drescher A., – Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material, *J. of Mechanics and Physics of Solid*, vol. 20, 1972, p. 337-351.
- Meunier J. – Contribution à l'étude des ondes et des ondes de choc dans les sols. Thèse de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1974.
- Rota L. An inverse approach for identification of dynamic constitutive equations, Proc. of 2nd Int. Symp. on Inverse Problems (ISIP'94), ed. H.D. Bui, M. Tanaka, Paris, 2-4 Nov. 94
- Sadd M.H., Qiu L., Boardman W.G., Shukla A. – Modelling wave propagation in granular media using elastic networks, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, vol. 29, n° 2, 1992, p. 161-170.
- Semblat J.-F., Sols sous sollicitations dynamiques et transitoires : réponse dynamique aux barres de Hopkinson, propagation d'ondes en milieu centrifugé, Thèse École polytechnique, Rapport Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique, n° GT60, LCPC, Paris, mars, 1995-a, 206p.
- Semblat J.-F., Gary G., Luong M.P., – Dynamic response of sand using 3D-Hopkinson Bar, Proc. of IS-Tokyo'95, 1st International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, 14-16 Novembre, Rotterdam, Balkema, 1995-b, p. 157-163.
- Shibusawa S., Oida A. – Dependency of observation parameters on soil dynamic parameters in unconfined impact compression tests, *J. of Terramechanics*, 29, n° 3, 1992, p. 289-306.
- Shukla A., Zhu C.Y. – Dynamic stresses in granular assemblies with microstructural defects, *Journal of Engineering Mechanics* (ASCE), vol. 118, n° 1, 1992, p. 190-220.
- Veyera G.E., Ross C.A. – High strain rate testing of unsaturated sands using a Split-Hopkinson Pressure Bar, Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, p. 31-34, St-Louis, avril 1995.
- Zhao H. – Analyse de l'essai aux barres de Hopkinson ; application à la mesure du comportement dynamique des matériaux. Thèse de Doctorat, ENPC, Paris, 1992.