



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Mecanique 332 (2004) 887–894



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2B/>

Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable

Nadia Benahmed^a, Jean Canou^{b,*}, Jean-Claude Dupla^b

^a Department of Civil Engineering, University of Bristol, Queen's Building, Bristol BS8 1TR, UK

^b Centre d'enseignement et de recherche en mécanique des sols (CERMES), commun à l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC) et au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), 6 et 8, avenue Blaise Pascal, cité Descartes/Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée cedex 2, France

Reçu le 25 août 2003 ; accepté après révision le 21 juillet 2004

Disponible sur Internet le 1^{er} octobre 2004

Présenté par Jean Salençon

Résumé

A partir de deux modes de reconstitution bien différenciés d'éprouvettes triaxiales de sable, le damage humide et la pluviation à sec, on met en évidence, sur un sable de référence, des différences de comportement mécanique associées significatives vis-à-vis du phénomène de liquéfaction « statique ». Le damage humide favorise l'initiation de l'instabilité de liquéfaction alors que la pluviation favorise un comportement plus stable, moins liquéfiable. L'observation microscopique des matériaux sableux correspondants permet de mettre en évidence deux structures bien différenciées, à savoir, pour le damage humide, une structure irrégulière dans laquelle prédominent des agrégats (grains agrégés) et des macropores, très contractante et instable et, pour la pluviation, une structure plus régulière, sans macropores, plus dilatante et plus stable. Ces observations montrent l'importance qu'il y aurait à caractériser, à l'aide de paramètres appropriés, la structure initiale des matériaux sableux, directement liée à leur mode de formation (naturel ou artificiel). *Pour citer cet article : N. Benahmed et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Initial structure and static liquefaction properties of sand. Based on the use of two different preparation procedures for reconstituting triaxial samples of sand, i.e. wet tamping and dry pluviation, significant differences in associated mechanical behaviour are observed on a reference sand with respect to the phenomenon of 'static' liquefaction. Wet tamping favours the initiation of liquefaction instability, whereas dry pluviation favours a more stable behaviour, less susceptible to liquefaction. Microscopic observation of corresponding sand specimens allows us to identify two well differentiated structures, i.e., for wet tamping, an irregular structure with predominance of aggregates (aggregated grains) and macropores, very contractant and unstable and, for dry pluviation, a more regular structure, without macropores, more dilatant and more stable. These observations show the importance of further characterization, based on the introduction of appropriate parameters, of the initial structure of

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : canou@cermes.enpc.fr (J. Canou).

sandy materials, strongly dependant upon their mode of formation (natural or artificial). **To cite this article:** N. Benahmed et al., *C. R. Mecanique* 332 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Milieux granulaires ; Liquefaction ; Sable ; Essai triaxial ; Pluviation ; Damage ; Instabilité ; Structure ; Dilatance ; Contractance

Keywords: Granular media; Liquefaction; Sand; Triaxial test; Pluviation; Tamping; Instability; Structure; Dilatancy; Contractancy

Abridged English version

It is widely recognized that the mechanical behaviour of soils in general and sands in particular depends to a large extent (over and above constitutive characteristics like material, grain size distribution, shape and angularity of grains, etc.), on the initial state in terms of void ratio and effective stress state. However, and particularly for sands, the importance of initial structure is rarely referred to, even if some authors have already given elements concerning the influence of reconstitution mode of specimens on mechanical behaviour observed [1–6]. In this Note, based on the use of two well differentiated modes of reconstitution of triaxial specimens, significant differences are presented with respect to the liquefaction behaviour of a reference sand. This result allows us to identify, based on microscopic observations, two types of granular structures, responsible for the differences observed [7].

Liquefaction refers to a behaviour in which the sand ‘softens’ and reaches a state in which it can flow like a liquid [8,9]. This phenomenon has already been responsible for sometimes very important flowslides [10,11]. It is characteristic of the undrained response of loose sands, may develop upon monotonic or cyclic shear and must be differentiated from the cyclic mobility phenomenon. Fig. 1 presents a typical result of ‘static’ liquefaction (monotonic shear) obtained on a triaxial specimen [12]. This behaviour is characterized by a sharp peak of shear resistance, followed by a rapid softening until a stationary state is reached, called the steady state [13,14] or critical state [15]. The stress ratio, defined by $\eta = q/p'$ allows us to verify in the stress plane (Fig. 1(b)) that the peak of shear resistance is not a Mohr–Coulomb failure condition, reached for $\eta = \eta_{crit}$, but that it corresponds to a specific instability condition.

The two procedures used to reconstitute the samples of sand are wet tamping [4,8,11], and dry pluviation, based on the use of a specific pluviator [7]. The sand used for the triaxial testing programme is a French reference sand, Hostun sand RF, [16] and Table 1. Fig. 2 shows, for a loose arrangement, the results obtained with the two preparation modes. Significant differences may be observed, showing the strong influence of preparation procedure on corresponding behaviour. Wet tamping favours a very contractant and unstable behaviour (strain softening) with a liquefaction type of response whereas dry pluviation favours a slightly dilatant and more stable response (strain hardening), as described by the characteristic state [17].

Microscopic observations of the sand structures corresponding to the two reconstitution procedures of the samples allow us to clearly identify two different and well characterized types of arrangements (Fig. 3). For wet tamping, an irregular structure is observed, with predominancy of aggregates (aggregated grains) and macropores, whereas for dry pluviation, a more regular and ‘classical’ structure is observed, with grains regularly stacked up and without macropores. With respect to liquefaction phenomenon, the aggregate structure may be qualified as ‘unstable’ or ‘metastable’, whereas the regular structure may be qualified as ‘stable’ structure.

The differences in behaviour observed may be interpreted in terms of differences in volumetric behaviour of the two structures. Due to the presence of macropores, which tend to decrease in volume upon shearing, the aggregate structure is more contractant than the regular structure, which results, upon undrained conditions, in higher excess pore water pressure generated, leading to the initiation of liquefaction. The regular structure is even slightly dilatant, which significantly decreases the risk of liquefaction initiation. Fig. 4 shows a bidimensional conceptual scheme, in the case of monodisperse disks, presenting the two types of structures for same void ratio (or porosity), with presence of macropores in the aggregate type of structure, which do not appear in the regular structure.

This result shows the importance of the initial structure on liquefaction characteristics of the sand and, therefore, the need for introducing appropriate parameters able to somehow ‘quantify’ the influence of this factor on the corresponding mechanical behaviour of the soil.

1. Introduction

Il est largement reconnu que le comportement mécanique des sables dépend de manière significative de leur état initial en termes d’indice des vides (ou d’indice de densité) et d’état de contraintes effectives. On ne fait cependant que rarement référence à la structure initiale du matériau, au sens de l’arrangement géométrique des grains dans l’empilement granulaire, résultant de tel ou tel mode de reconstitution ou de formation du matériau. Certains auteurs ont déjà mis en évidence, de manière indirecte, l’influence de ce facteur sur les comportements mécaniques observés, mais sans s’intéresser spécifiquement aux structures ou arrangements géométriques résultant de ces modes de reconstitution. On peut, en particulier, citer les travaux de Mulilis et al. [1] ainsi que ceux de Tatsuoka et al. [2] qui montrent que le mode de fabrication d’une éprouvette de sable a une influence significative sur sa résistance au cisaillement cyclique. Been and Jefferies [3] mettent en évidence des comportements au cisaillement drainé différents selon que l’on utilise la pluviation ou le damage humide pour la reconstitution d’éprouvettes triaxiales. En ce qui concerne les instabilités de liquéfaction dont il est question ici, Canou [4] présente des résultats préliminaires montrant que des éprouvettes de sable préparées par damage humide semblent plus instables et plus susceptibles de se liquéfier sous cisaillement monotone que des éprouvettes préparées à sec, pour un même indice des vides. Vaid et al. [5] confirment ce résultat en montrant que le damage humide favorise l’initiation de la liquéfaction par rapport à une mise en place par pluviation sous eau. Zlatovic and Ishihara [6] présentent, quant à eux, des résultats obtenus sur un sable du Nevada, tendant à montrer que la pluviation à sec favoriserait l’initiation de la liquéfaction par rapport au damage humide.

À partir d’une étude comparative spécifique basée sur l’utilisation de deux modes de reconstitution d’éprouvettes bien différenciés, on met en évidence l’influence déterminante de ce facteur sur l’initiation et le développement du phénomène de liquéfaction « statique » dans un sable de référence [7], influence venant confirmer les essais préliminaires de Canou [4]. Sur la base de ce résultat, on identifie, à partir d’observations microscopiques, deux types de structures granulaires bien différenciées, permettant d’interpréter les différences de comportement observées.

2. Phénomène de liquéfaction sous cisaillement monotone

La liquéfaction fait référence à un comportement du sable dans lequel celui-ci se « ramollit » et passe de la consistance d’un solide à celle d’un liquide plus ou moins « fluide » [8,9], qui peut alors s’écouler sous l’action des efforts appliqués, entraînant, sur site, des écoulements et glissements parfois de grande envergure [10,11]. Ce comportement est caractéristique d’un cisaillement à volume constant du sol, et correspond, sur site, à une réponse non drainée d’un sable saturé. Le phénomène de liquéfaction est caractéristique de structures lâches, contractantes, et doit être distingué du phénomène de mobilité cyclique qui ne peut se développer, dans les sables dilatants, que sous cisaillement cyclique. La Fig. 1 montre un résultat typique de liquéfaction sous cisaillement monotone, appelée, par abus de langage, liquéfaction « statique », obtenu dans un essai triaxial de compression réalisé à déformation contrôlée sur le sable d’Hostun RF dans un état très lâche [12]. Les résultats sont présentés dans les plans classiques de l’appareil triaxial de révolution (q et Δu , ε_a) et (q , p'). La courbe de cisaillement (q , ε_a) se caractérise par un pic de résistance au cisaillement très marqué et de faible niveau, qui apparaît pour une déformation axiale faible (de l’ordre de 1 % ici), suivi d’une chute très rapide de résistance avec stabilisation progressive autour d’une valeur ultime stationnaire très faible. L’évolution de la surpression interstitielle développée lors du cisaillement rend compte du caractère très contractant du sable, avec un taux d’augmentation très élevé dès le début du cisaillement et stabilisation progressive vers une valeur ultime, à associer à la stabilisation du déviateur des contraintes. Le plan

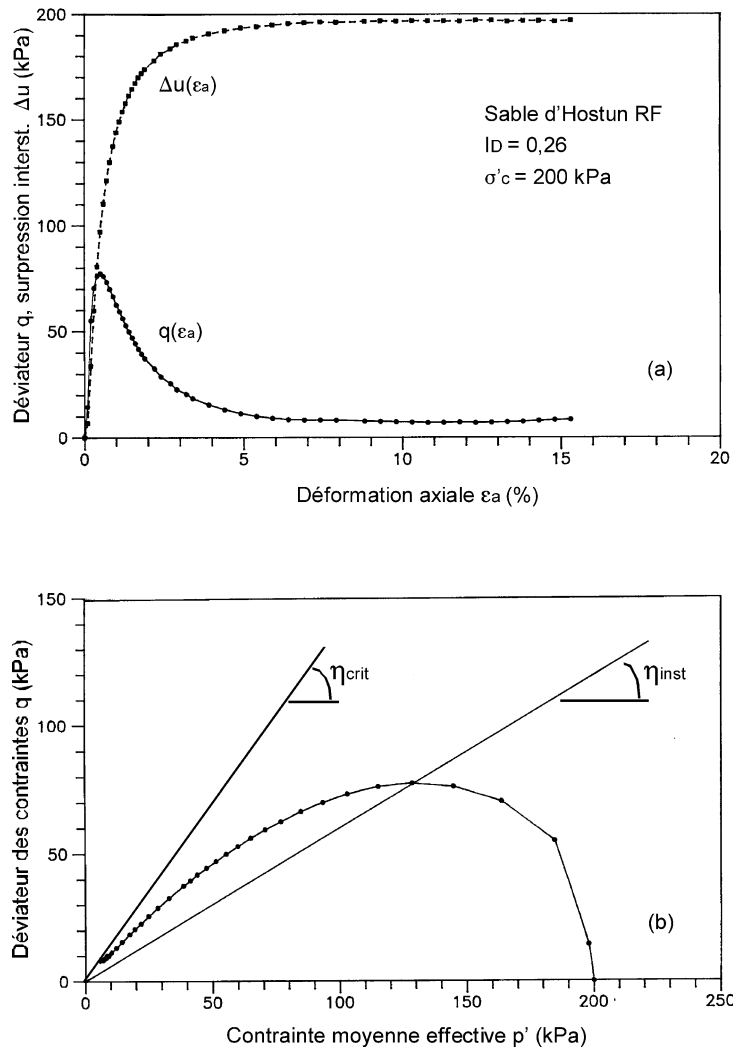


Fig. 1. Résultat d'un essai de liquéfaction statique typique réalisé à l'appareil triaxial (Canou et al., [12]) : (a) courbes de cisaillement et de surpression interstitielle ; (b) chemins des contraintes effectives.

Fig. 1. Result of a typical static liquefaction test carried out in the triaxial apparatus (Canou et al., [12]): (a) shear and excess pore water pressure curves; (b) effective stress path.

(q, p') présente le chemin des contraintes correspondant où l'on reconnaît la forme typique caractérisant le comportement de liquéfaction, avec décroissance continue de la contrainte effective moyenne p' et migration progressive de l'état des contraintes vers l'origine des axes, et stabilisation, à l'état ultime, sur un point d'accumulation. Cet état ultime, appelé état stable par différents chercheurs ([13,14]) peut être assimilé, en première approche, à l'état critique, plus classiquement connu [14]. L'inclinaison des contraintes η_{inst} atteinte au pic de résistance correspond à un angle de frottement mobilisé sensiblement plus faible que l'angle de frottement maximum mobilisé à l'état ultime correspondant à la rupture de Mohr–Coulomb assimilable ici à l'état critique (Fig. 1(b)), montrant que le pic de résistance correspond à une instabilité particulière du matériau qui n'a rien à voir avec une rupture classique de Mohr–Coulomb.

Tableau 1
Caractéristiques principales du sable d’Hostun RF

Table 1
Principal characteristics of Hostun sand RF

D_{50} (mm)	C_U	e_{min}	e_{max}	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
0,35	1,57	0,656	1,000	2,65	1,33	1,60

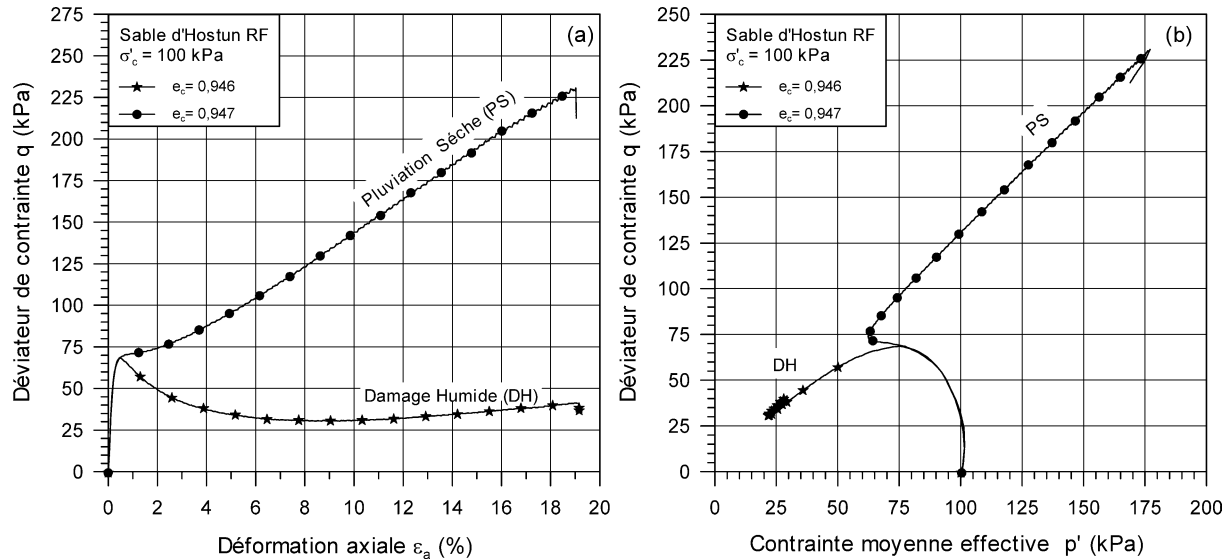


Fig. 2. Influence du mode de reconstitution des éprouvettes sur les comportements observés pour un état lâche du sable : (a) courbes de cisaillement ; (b) chemins des contraintes effectives.

Fig. 2. Influence of the specimen reconstitution procedure on the behaviours observed, for a loose state of the sand: (a) shear curves; (b) effective stress paths.

3. Influence du mode de reconstitution des éprouvettes sur les comportements observés

Deux modes de reconstitution bien différenciés des éprouvettes, le damage humide et la pluviation à sec, ont été utilisés en vue de mettre en évidence de manière implicite, sur un sable de référence, d’éventuels effets de « structure » sur les comportements observés à l’appareil triaxial. Le sable utilisé, le sable d’Hostun RF, a été largement utilisé en France depuis de nombreuses années [16]. C’est un sable essentiellement siliceux, à grains sub-angulaires, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1.

Le damage humide consiste à mélanger de manière la plus homogène possible le sable préalablement séché avec une petite quantité d’eau ($w = 2\%$) de manière à obtenir un milieu foisonné grâce à la cohésion capillaire résultant de la formation des ménisques aux contacts intergranulaires. Le matériau est ensuite compacté par couches dans le moule de fabrication de l’éprouvette triaxiale. La pluviation à sec, quant à elle, consiste à remplir en continu le moule de fabrication par déversement en pluie du sable sec en utilisant une procédure spécifique et un dispositif particulier appelé pluviateur [7]. Les deux méthodes permettent d’obtenir des structures très lâches, ce qui permet d’effectuer des comparaisons entre les deux modes de reconstitution des éprouvettes, à même indice des vides (ou indice de densité).

La Fig. 2 présente une comparaison entre les résultats de deux essais triaxiaux réalisés sur des éprouvettes préparées suivant les deux méthodes. Un état lâche du matériau a été retenu ici, correspondant à un indice des vides

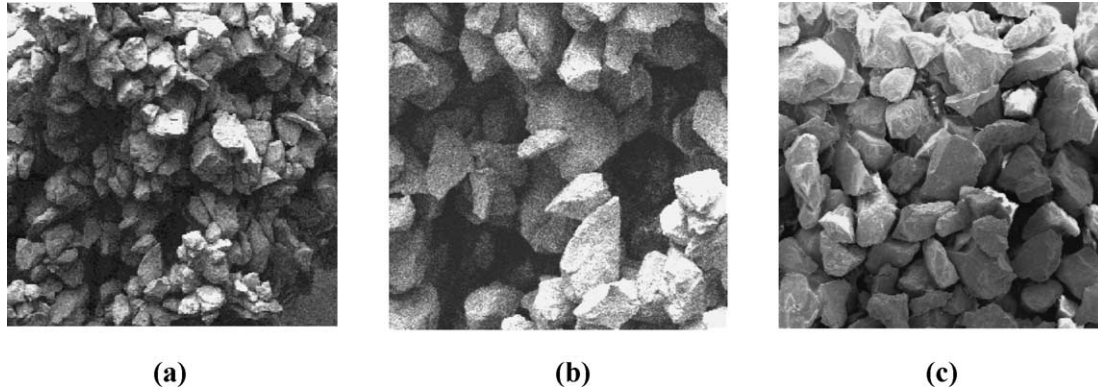


Fig. 3. Microphotographies du sable d'Hostun RF montrant deux structures différenciées : (a) agrégats et macropores (damage humide); (b) agrégats et macropores (zoom); (c) empilement régulier (pluviation à sec).

Fig. 3. Microphotographies of Hostun sand RF showing two differentiated structures: (a) aggregates and macropores (wet tamping); (b) aggregates and macropores (zoom); (c) regular stack (dry pluviation).

après consolidation de 0,946 ($I_D \approx 0,16$). L'examen des courbes de cisaillement (Fig. 2(a)) permet de mettre en évidence des comportements très différenciés, en fonction du mode de préparation, avec un comportement typique de liquéfaction pour le damage humide et, pour la pluviation, après amorce d'un léger radoucissement, une phase de durcissement (écrouissage positif) significatif, caractéristique des sables dilatants en conditions non drainées. Les chemins de contraintes correspondants sont représentés sur la Fig. 2(b), où l'on retrouve la forme typique caractérisant la liquéfaction pour le damage humide et, pour la pluviation à sec, une forme typique de matériau d'abord contractant puis dilatant après franchissement du seuil caractéristique tel que défini par Luong [17].

4. Mise en évidence de deux structures granulaires particulières

Les conditions initiales des éprouvettes étant les mêmes en termes d'indice des vides et d'état des contraintes appliqué, les différences de comportement observées ne peuvent a priori résulter que de différences provenant des modes de reconstitution des éprouvettes, pouvant entraîner des arrangements différents des grains et donc des « structures » différentes du matériau. En vue de mettre en évidence des différences éventuelles de structure, on a réalisé des observations au microscope électronique à balayage (MEB) sur des échantillons prélevés sur des éprouvettes préparées selon les deux procédures. La Fig. 3 présente des vues représentatives obtenues sur le sable étudié. En fonction du mode de fabrication, on met clairement en évidence deux structures bien différenciées, à savoir, pour le damage humide (Fig. 3(a) et (b)), une structure assez irrégulière, avec une organisation en agrégats (grains « agrégés ») et macropores de taille équivalente aux agrégats, alors que, dans le cas de la pluviation à sec (Fig. 3(c)), on observe une structure beaucoup plus régulière au sens d'un empilement régulier de grains, sans macroporosité.

En regard du phénomène de liquéfaction, on peut donc parler d'une structure « instable » ou « métastable », très liquéfiable, caractérisée par une organisation des grains de sable en agrégats et macropores et d'une structure « stable », formée d'un empilement régulier des grains et beaucoup moins susceptible de se liquéfier.

5. Interprétation des différences de comportement observées

Les différences de comportement observées entre les deux structures peuvent s'interpréter en termes de comportement volumique contractant et dilatant. Puisque, pour les deux structures, l'indice des vides global est le

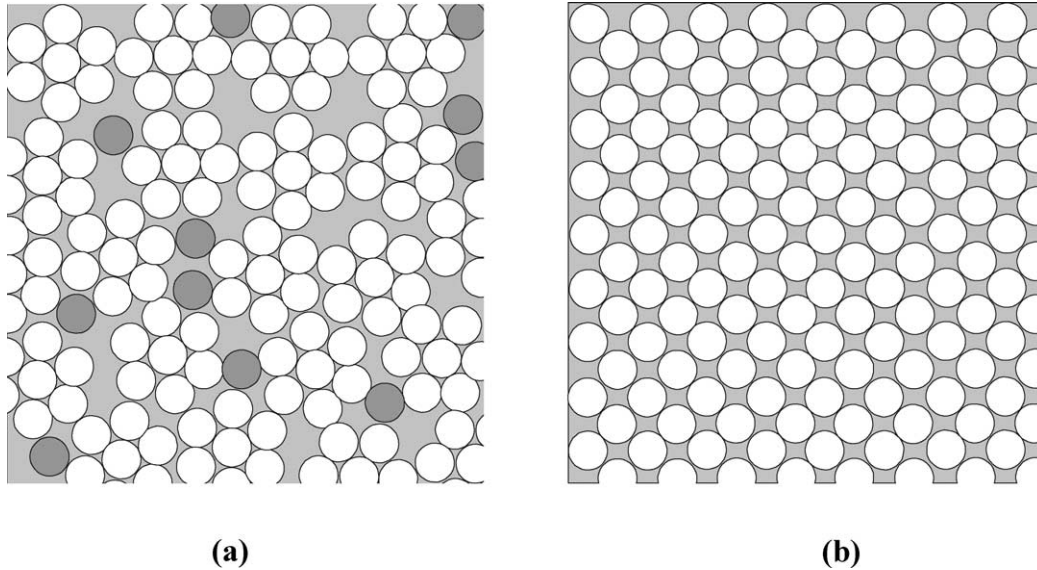


Fig. 4. Représentation conceptuelle bidimensionnelle d'une structure en agrégats et macropores (a), et d'une structure régulière (b) pour des disques monodisperses (même indice des vides dans les deux cas).

Fig. 4. Conceptual bidimensional representation of an aggregate structure (a), and of a regular structure (b) for monodisperse discs (same void ratio in both cases).

même, cela veut dire que, étant donné la présence des macropores dans la structure en agrégats, l'indice des vides propre à un agrégat (indice des vides ou porosité intra-agrégat) est plus faible que l'indice des vides moyen. Si l'on fait alors l'hypothèse que l'agrégat se comporte, tout au moins dans la phase initiale de la déformation, comme un « macro grain » assez peu déformable, on conçoit que la phase initiale de la déformation va correspondre à l'écrasement progressif des macropores, plus fragiles que les pores intra-agrégats. Cet écrasement, avec, malgré tout, déformation progressive des agrégats, correspond à une déformation volumique purement contractante (on ne peut pas avoir de mécanisme dilatant), qui se traduit, en non drainé, par une génération de surpressions interstitielles positives à taux élevé dès le début du cisaillement, responsable de l'initiation de la liquéfaction. Dans le cas du sable préparé par pluviation, la déformation volumique ne peut se faire que par modification de l'espace poreux inter-grain (diminution de cet espace poreux pour avoir de la contractance) qui ne permet, en aucun cas, un écrasement de pores analogue à ce qui se passe pour les macropores, ce qui peut expliquer un comportement volumique globalement beaucoup moins contractant pour ce deuxième type d'arrangement. La Fig. 4 présente de manière schématique, dans une configuration bidimensionnelle et pour des disques monodisperses, les deux types d'arrangements, montrant clairement, dans un cas, la structure en agrégats et macropores (Fig. 4(a)) et dans l'autre, la structure « régulière ». Pour la structure en agrégats, on a utilisé un agrégat « modèle » formé de sept grains et reproduit un certain nombre de fois à l'identique (grains en blanc sur le schéma). Afin de compléter la structure pour arriver au même indice des vides que pour la structure régulière, on a rajouté un certain nombre de grains « indépendants », en grisé sur le schéma.

6. Conclusion

L'utilisation de deux modes de reconstitution bien différenciés a permis de mettre en évidence des différences de comportement mécanique significatives vis-à-vis du phénomène de liquéfaction sous cisaillement monotone (appelée communément liquéfaction « statique »). L'observation au microscope électronique à balayage a per-

mis d'identifier deux structures sableuses bien différenciées, caractéristiques de ces modes de reconstitution, et qui paraissent bien être à l'origine des différences de comportement observées, puisque les autres paramètres des essais sont maintenus constants. On distingue une structure « régulière » formée d'un empilement régulier des grains, obtenue par pluviation dans l'air et une structure « lacunaire », plus irrégulière, obtenue par damage humide, dans laquelle prédomine une organisation de la structure en agrégats et macropores. En regard de l'instabilité de liquéfaction, la première structure peut être qualifiée de stable, dominée par un comportement dilatant, même pour de faibles indices de densité. La deuxième, beaucoup plus contractante, peut être qualifiée d'« instable » ou de « métastable », favorisant l'initiation et le développement de la liquéfaction. Les différences de comportement observées entre les deux types de structures peuvent être interprétées à partir de l'existence des macropores dans la structure en agrégats, peu stables et pouvant s'écraser facilement, favorisant ainsi une réponse volumique contractante. Il est clair que les deux modes de reconstitution d'éprouvettes utilisés ici correspondent à des procédures « artificielles » de laboratoire, non directement représentatives de modes de formation naturels (processus géologiques). Ils n'en posent pas moins le problème général de la caractérisation, en regard de l'occurrence du phénomène de liquéfaction, de la structure initiale des matériaux sableux, qui peut a priori être, pour les sols naturels, sensiblement différente de celles présentées dans ce travail, étant donnée la grande diversité des modes possibles de formation des massifs sableux naturels (sédimentation, dépôts éoliens, liens de cimentation éventuels, présence de fines, etc.). Ces résultats posent aussi le problème de la caractérisation des matériaux sableux humides mis en place par remblaiement hydraulique pour la construction de remblais ou d'îles artificielles en milieu aquatique [10], sans possibilité de compactage efficace in situ et qui peuvent, de ce fait, entraîner la formation de massifs à structure « instable » au sens de la liquéfaction.

Références

- [1] J.P. Mulilis, H.B. Seed, C.K. Chan, J.K. Mitchell, K. Arulanandan, Effects of sample preparation on sand liquefaction, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE* 103 (GT2) (1977) 91–108.
- [2] F. Tatsuoka, K. Ochi, S. Fujii, M. Okamoto, Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations* 26 (3) (1986) 23–41.
- [3] K. Been, M.G. Jefferies, A state parameter for sands, *Géotechnique* 35 (3) (1985) 123–132.
- [4] J. Canou, Contribution à l'étude et à l'évaluation des propriétés de liquéfaction d'un sable, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1989.
- [5] Y.P. Vaid, S. Sivathayalan, D. Stedman, Influence of specimen reconstituting method on the undrained response of sand, *Geotech. Testing J.* 22 (3) (1999) 187–195.
- [6] S. Zlatovic, K. Ishihara, Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric, *Soils and Foundations* 37 (4) (1997) 47–56.
- [7] N. Benahmed, Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.
- [8] G. Castro, Liquefaction of sands, PhD dissertation, University of Harvard, Cambridge, USA, 1969.
- [9] P. Habib, Liquéfaction des sables, *Annales de l'ITBTP* 355 (1977) 155–157.
- [10] J.A. Sladen, R.D. d'Hollander, J. Krahn, The liquefaction of sands, a collapse surface approach, *Can. Geotech. J.* 22 (1985) 564–578.
- [11] F. Schlosser, Liquéfaction de veines de sable lâche dans des talus sous-marins, in : C. R. 11ème Conf. Intern. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, San Francisco, 1985.
- [12] J. Canou, L. Thorel, E. de Laure, Influence d'un déviateur de contrainte initial sur les caractéristiques de liquéfaction statique d'un sable, in : C. R. 10ème Conf. Europ. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Florence, vol. 1, 1991, pp. 49–52.
- [13] G. Castro, S.J. Poulos, Factors affecting liquefaction and cyclic mobility, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE* 103 (6) (1977) 501–515.
- [14] S.J. Poulos, The steady state of deformation, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE* 107 (5) (1981) 553–562.
- [15] A.N. Schofield, C.P. Wroth, *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London, 1968.
- [16] E. Flavigny, J. Desrues, B. Palayer, Note technique sur le sable d'Hostun RF, *Rev. Fr. Géotechnique* 53, 67–70.
- [17] M.P. Luong, Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents, *Rev. Fr. Géotechnique* 10 (1980) 39–53.