

sable d'Axios sous contraintes multiaxiales

Axios river sand under multiaxial stresses

C.A. DEMIRIS
I.A. BAKASSIS
C.A. SCHINAS

Laboratoire de Géologie du Génie Civil
de l'Université Aristote de Thessalonique*

Résumé

Des éprouvettes de sable d'Axios ont été soumises à quatre trajets de chargements triaxiaux et multiaxiaux.

L'analyse des résultats fournit plusieurs conclusions en ce qui concerne les relations entre la contrainte principale σ_1 , la déformation axiale ε_1 , la déformation volumique ε_v et les déformations latérales $\varepsilon_2, \varepsilon_3$. En outre, les variations du rapport $\frac{q}{p}$ en fonction de la déformation déviatorique ε_d , ont été étudiées, de même que les relations entre ε_v et ε_d et entre $\frac{q}{p}$ et ε_v .

Abstract

Samples of Axios river sand have been subjected to four stress paths under triaxial and multiaxial loading conditions. Analysis of the results yields several conclusions regarding the interrelations between axial stress (σ_1), axial strain (ε_1), volumetric strain (ε_v) and lateral strains $\varepsilon_2, \varepsilon_3$. Also, the variations of the $\frac{q}{p}$ ratio as a function of the deviatoric strain (ε_d) and the ε_v vs ε_d and $\frac{q}{p}$ vs ε_v relations have been investigated.

* Département de Génie Civil, Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur, Thessalonique, Grèce.

1. INTRODUCTION

Bien que de nombreuses études expérimentales [3], [4], [5], [6], aient été effectuées sur le comportement mécanique des matériaux pulvérulents, comme les sables, les graves et les enrochements, soumis à des efforts en compression triaxiale conventionnelle ($\sigma_2 = \sigma_3$), bien peu se réfèrent, dans la bibliographie, au comportement de ces matériaux soumis à des efforts en compression multiaxiale ($\sigma_2 \neq \sigma_3$). Ainsi, il est légitime de se demander dans quelle mesure les conclusions tirées de ces études sont également valables pour le comportement de matériaux soumis à des efforts en compression multiaxiale.

La présente étude expérimentale a pour but de présenter et de commenter les résultats tirés d'essais multiaxiaux, qui ont été réalisés, au laboratoire de Géologie de Génie Civil de la Faculté de Technologie de l'Université Aristote de Thessalonique, sur des éprouvettes de sable de la rivière Axios.

2. APPROCHE PROPOSÉE

Nous avons étudié un sol sableux dans le but d'évaluer le comportement des sols pulvérulents, c'est-à-dire des sols qui sont formés de grains solides et irréguliers sans liaison effective entre eux. Plus précisément, nous avons étudié le sable de la rivière Axios qui est constitué de grains se répartissant comme suit : 50 % de quartz, 36 % de feldspath, 10 % de minéraux argileux, 4 % de calcite. Le sable d'Axios a une granulométrie étalée $0,08 < d < 2$ mm (fig. 1). Les caractéristiques de compacité sont $\gamma_s = 27$ kN/m³, $\gamma_{dmax} \approx 16,7$ kN/m³, $\gamma_{dmin} \approx 14,1$ kN/m³.

L'appareil utilisé et sa cellule, avec certains détails techniques, ont été décrits dans une publication antérieure [7].

A cause de la forme particulière des essais, sur un matériau comme le sable, il a été nécessaire d'effectuer certaines modifications concernant le fonctionnement de l'appareil utilisé : et en particulier, l'application de la contrainte principale σ_1 de telle façon qu'elle conduise à une déformation axiale ε_1 (compressibilité) uniforme.

C'est pour cette raison que le chargement axial est fait à l'aide de deux vérins hydrauliques actionnés par la même pompe (mêmes valeurs de la pression dans les deux vérins pendant toute la durée des essais). Les deux plateaux de la presse qui apparaissent sur la figure 2, jouent le rôle de deux appuis stables du système vérins-cellule.

Le matériau a été mis en place dans un sac parallélépipédique en cellophane, très déformable, très mince et placé dans la cellule. Le matériau a été déposé en sept couches et chaque couche a été compactée dynamiquement et mécaniquement à l'aide d'une perceuse à percussion électronique de telle façon que la densité relative, à la mise en place avant l'essai, atteigne $D_r \approx 95$ %. Les éprouvettes ainsi préparées avaient pour dimensions $5 \times 5 \times 10$ cm.

Pour éliminer les effets de frottement, on a utilisé comme réducteur de frottement, sur toutes les surfaces des éprouvettes, trois feuilles de téflon de 0,1 ; 0,02 et 0,05 mm d'épaisseur, lubrifiées à la graisse de silicone. Après des essais réalisés [1] préalablement au laboratoire, ce réducteur a donné le plus petit coefficient apparent de frottement ($\mu \approx 0,004$).

Les notations utilisées sont les suivantes :

$$- \text{contrainte moyenne } p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$$

- contrainte déviatorique :

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

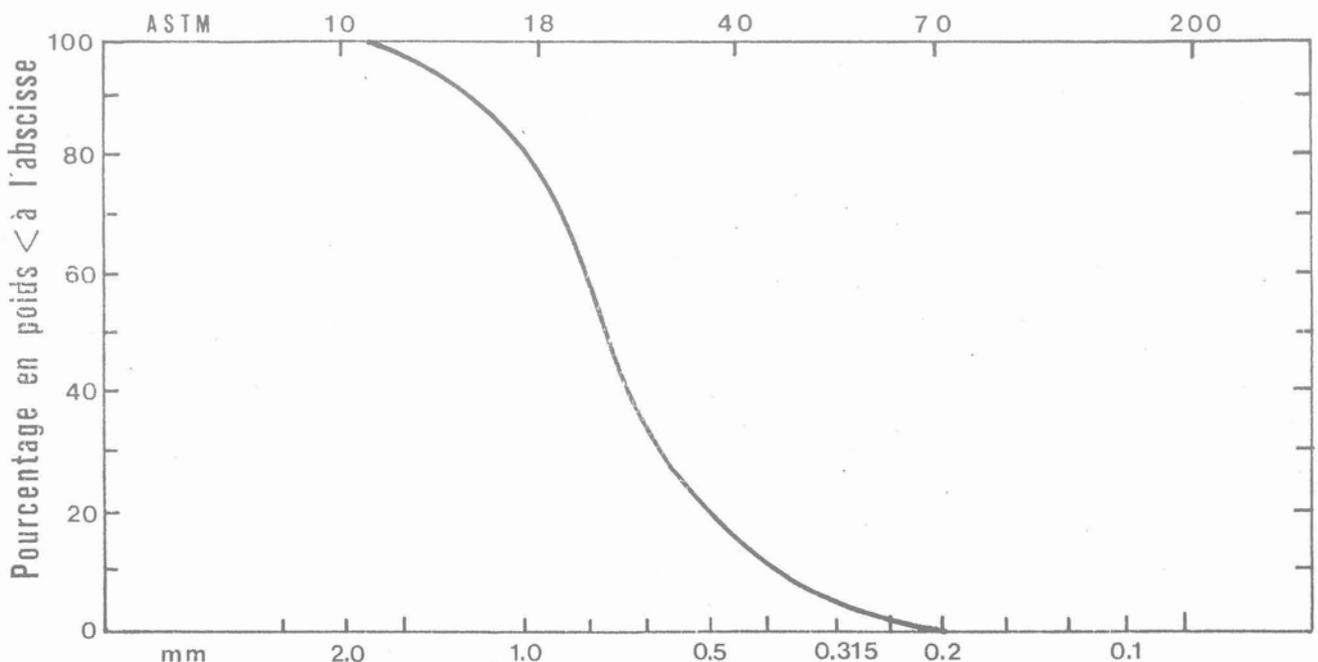


Fig. 1. — Granulométrie du sable étudié.

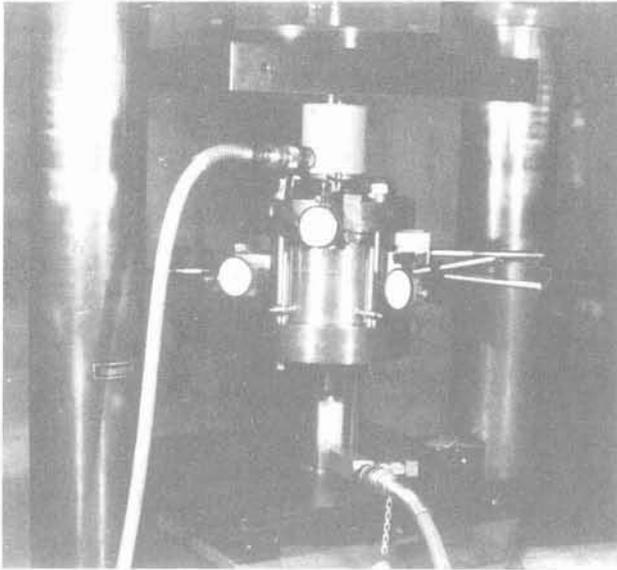


Fig. 2. — La cellule utilisée avec deux vérins hydrauliques pour l'application de la contrainte σ_1 .

— niveau déviatorique $\eta = \frac{q}{p}$

— déformation volumique $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

— déformation volumique maximale $\varepsilon_v \text{ max}$

— déformation de distorsion :

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

Soulignons que $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sont les trois contraintes principales appliquées et $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ respectivement, les trois déformations axiales mesurées.

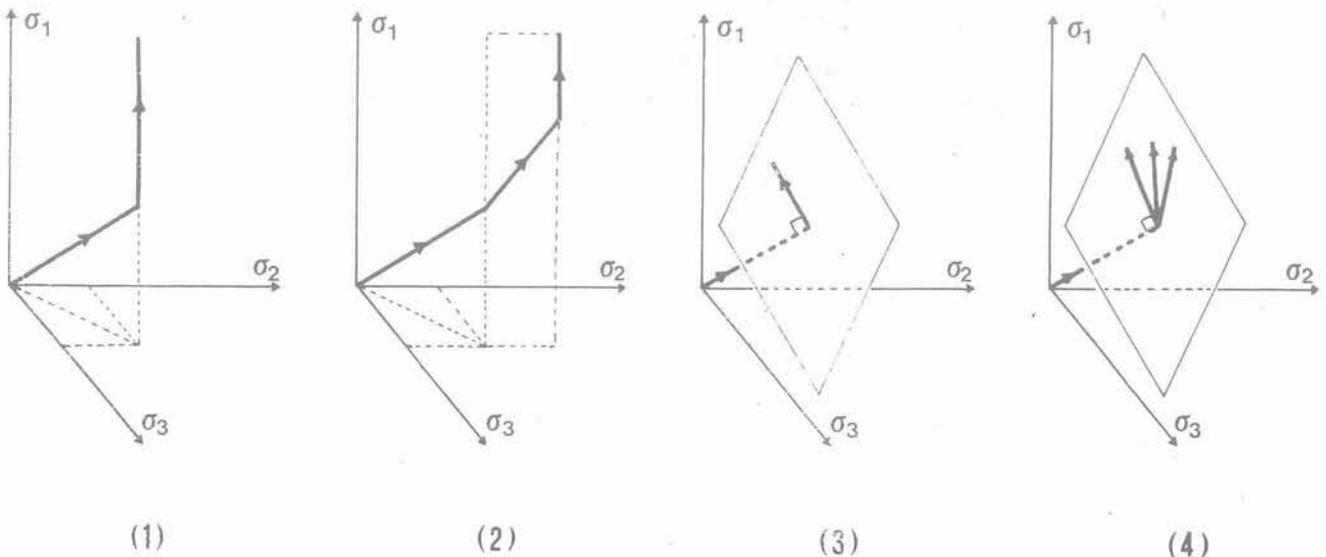


Fig. 3. — Les quatre trajets de chargement.

3. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les essais multiaxiaux ont été effectués en suivant quatre trajets de chargement différents :

1. trajet triaxial à confinement constant, sous contraintes latérales ($\sigma_2 = \sigma_3$) constantes ;
2. trajet multiaxial à confinement constant, sous contraintes latérales ($\sigma_2 \neq \sigma_3$) constantes ;
3. trajet à contrainte moyenne p constante sous contraintes latérales $\sigma_2 = \sigma_3$;
4. trajet à contrainte moyenne p constante sous conditions $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ constant ($\sigma_2 \neq \sigma_3$).

Pour les quatre trajets, les essais ont été réalisés dans les conditions suivantes :

— dans le cas du premier trajet, les valeurs de $\sigma_2 = \sigma_3$ couvrent l'amplitude des contraintes latérales entre 5 et 15 MPa ;

— dans le cas du deuxième trajet, ou $\sigma_2 \neq \sigma_3$, la contrainte principale minimale σ_3 a été de 10 MPa et le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ a été 1,0 ; 1,5 et 2,0 ;

— dans le cas du troisième trajet, les essais triaxiaux répondaient aux valeurs de la contrainte moyenne p égales à 5, 10 et 15 MPa. Les essais ont été réalisés par une augmentation continue de la contrainte σ_1 et par une diminution respective des autres contraintes principales σ_2 et σ_3 sous la condition $\sigma_2 = \sigma_3$.

— Enfin dans le cas du quatrième trajet, tous les essais ont été effectués sous une contrainte moyenne p égale à 10 MPa et avec des relations fixées entre les contraintes σ_1 et σ_2 . Les relations entre les contraintes σ_1 et σ_2 se réfèrent à leurs variations après le chargement isotrope.

La figure 3 se réfère au mode de sollicitation des éprouvettes dans l'espace représentatif ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), qui a été adopté pour chacun des quatre trajets de chargement déjà décrits (1), (2), (3), (4) respectivement.

Pour tous les essais des quatre trajets, ont été étudiées :

— La variation de la contrainte principale σ_1 et de la déformation volumique ε_v en fonction de la déformation axiale ε_1 de l'éprouvette ;

— La variation des déformations axiales transversales ε_2 et ε_3 en fonction de la déformation axiale ε_1 de l'éprouvette.

— D'une part, la variation du niveau déviatorique η en fonction de la déformation volumique ε_v et de la déformation de distorsion ε_q et, d'autre part, la variation de ces deux dernières entre elles.

4. COMPRESSION TRIAXIALE A CONFINEMENT CONSTANT $\sigma_2 = \sigma_3$.

Les figures 4, 5 et 6 qui se réfèrent au comportement du sable soumis à une compression triaxiale à confinement constant ($\sigma_2 = \sigma_3$, fig. 3 (1)), permettent de confirmer ce que LUONG et TOUATI avaient précédemment déterminé [6] et, plus précisément d'affirmer que :

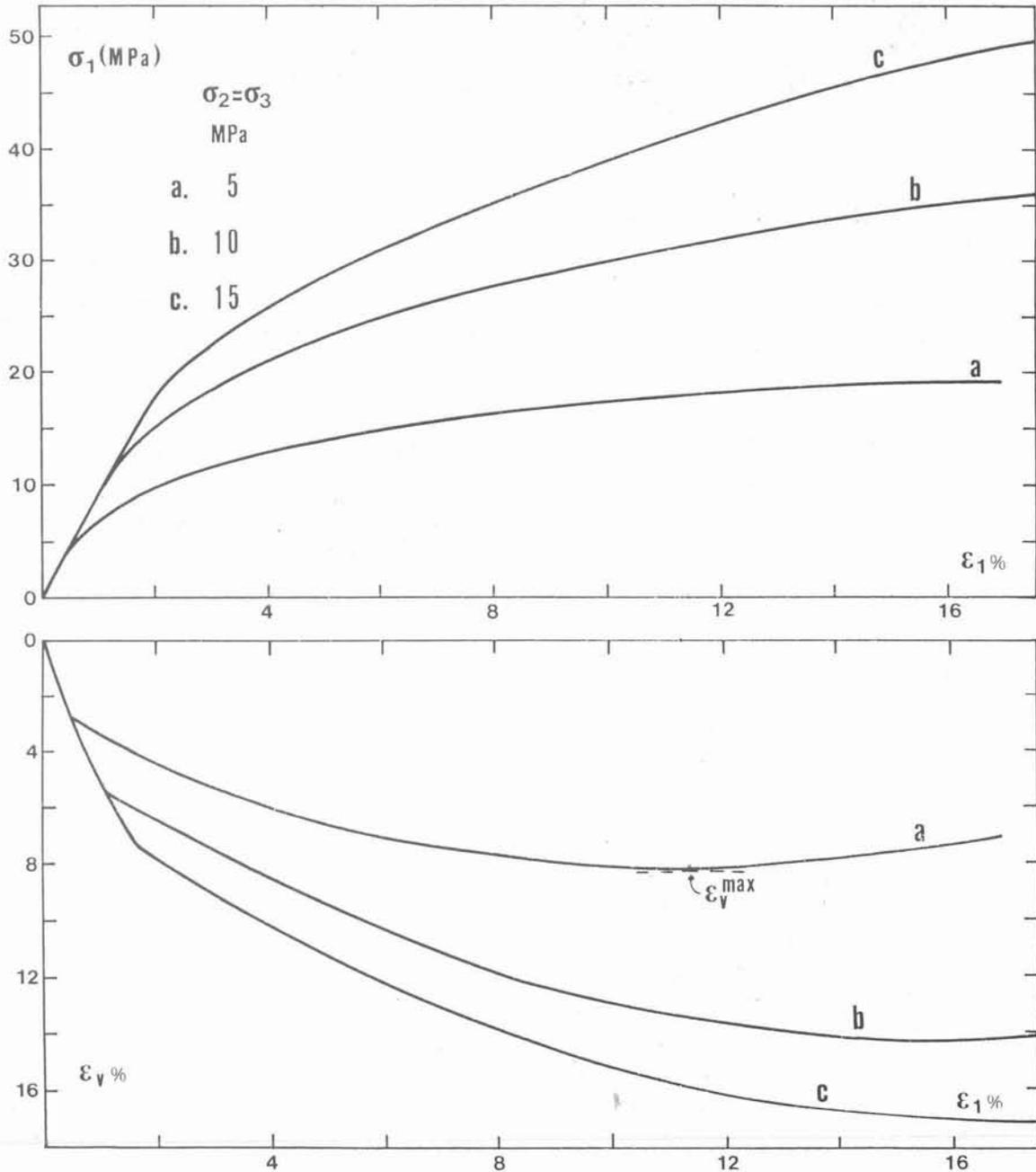


Fig. 4. — Évolution de la contrainte principale σ_1 et de la variation du volume ε_v du sable d'Axios en fonction de la déformation axiale ε_1 , sous des conditions de contraintes latérales σ_2 et σ_3 constantes et $\sigma_2 = \sigma_3$.

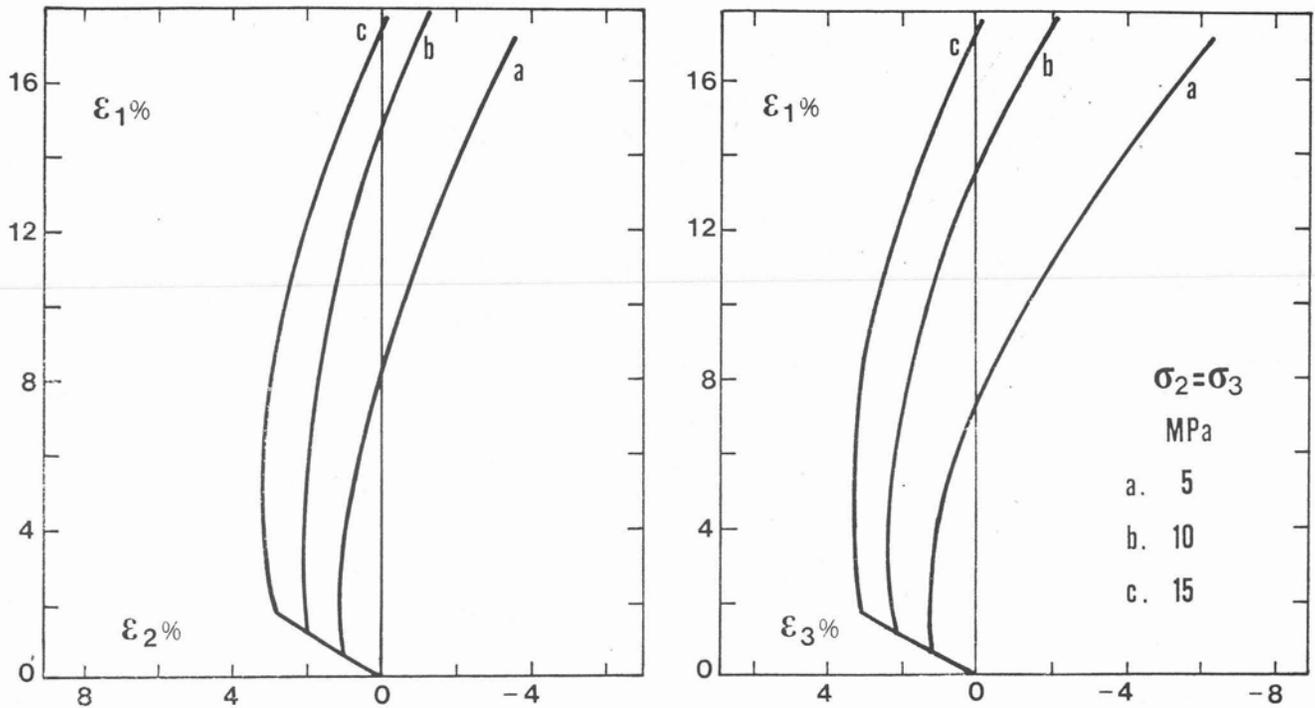


Fig. 5. — Relations entre les déformations axiales ε_1 , ε_2 , ε_3 du sable, sous des conditions de sollicitations σ_2 et σ_3 constantes et $\sigma_2 = \sigma_3$.

— Pour la même déformation axiale ε_1 d'éprouvette, l'augmentation des contraintes latérales σ_2 et σ_3 provoque l'augmentation de la contrainte principale σ_1 .

— Au cours d'un chargement isotrope, la variation du volume (contraction) ε_v est intense. Ensuite et quand les contraintes σ_2 et σ_3 se stabilisent à la valeur prédéterminée, le taux de la variation du volume $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ diminue sensiblement avec une tendance à la plus grande diminution.

— Pour les petites valeurs de contraintes égales σ_2 et σ_3 , le taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ diminue de manière continue, s'annule à une certaine valeur de la déformation ε_1 (point de dilatance nulle) pour commencer ensuite à augmenter progressivement.

— Plus les valeurs des contraintes σ_2 et σ_3 augmentent, plus le point de changement de signe correspond à de grandes valeurs de la déformation ε_1 . Ce qui a été dit plus haut est aussi confirmé par les relations entre la déformation volumique ε_v et la déformation de distorsion ε_q de la figure 6.

— En effet, les variations des déformations ε_2 et ε_3 en fonction de la déformation ε_1 permettent de constater que, pendant le chargement isotrope, le taux de variation (contraction) $\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}$ et $\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1}$ est assez grand et qu'après

la stabilisation des contraintes principales σ_2 et σ_3 , il diminue brusquement. Ainsi, si l'on augmente la déformation ε_1 , les valeurs des taux $\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}$ et $\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1}$ s'annulent et augmentent progressivement avec leur signe inversé.

— La variation du niveau déviatorique η ($= \frac{q}{p}$) en fonction de la déformation volumique ε_v permet de vérifier [6] que les points de dilatance nulle correspondent à peu près à une même valeur du niveau déviatorique η .

5. COMPRESSION MULTIAXIALE A CONFINEMENT CONSTANT $\sigma_2 \neq \sigma_3$.

Les figures 7, 8 et 9 se réfèrent aux résultats d'une série d'essais avec des rapports de contraintes latérales $\frac{\sigma_2}{\sigma_3} = 1,0$; 1,5 et 2,0 et avec la contrainte σ_3 égale à 10 MPa. Au cours de ces essais le trajet de chargement a été fait comme l'indique la figure 3 (2).

L'élaboration des résultats de ces essais et la comparaison avec les résultats d'autres essais réalisés sous des conditions $\sigma_2 = \sigma_3$ à confinement constant, permettent de formuler ce qui suit :

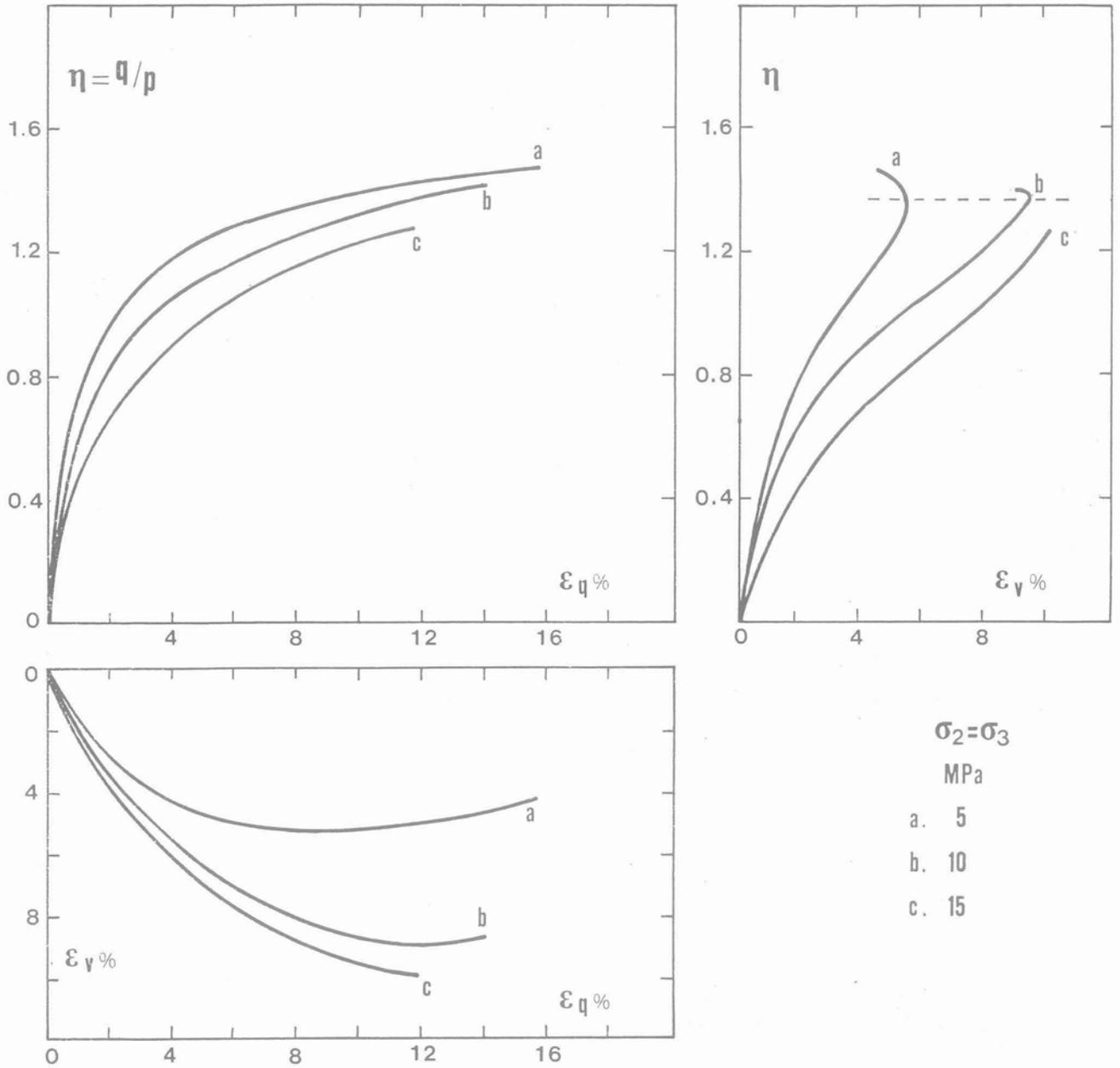


Fig. 6. — Relations entre le niveau déviatorique η , la déformation volumique ϵ_v et la déformation de distorsion ϵ_q du sable, sous des conditions de sollicitations σ_2 et σ_3 constantes et $\sigma_2 = \sigma_3$.

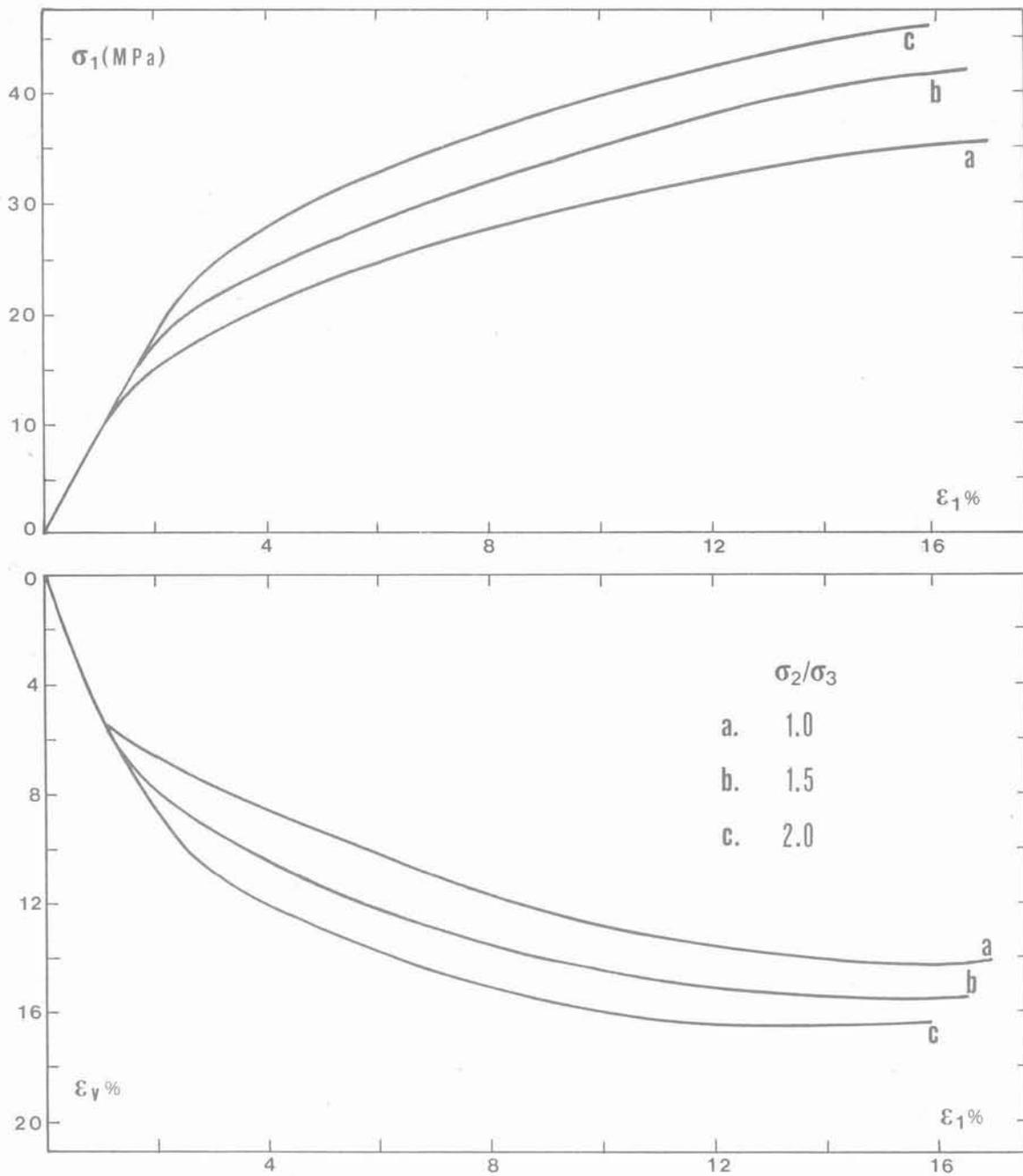


Fig. 7. — Évolution de la contrainte principale σ_1 et de la variation du volume ϵ_v du sable d'Axios en fonction de la déformation axiale ϵ_1 , sous des conditions de contraintes latérales σ_2 et σ_3 constantes $\sigma_2 \neq \sigma_3$ et $\sigma_3 = 10$ MPa.

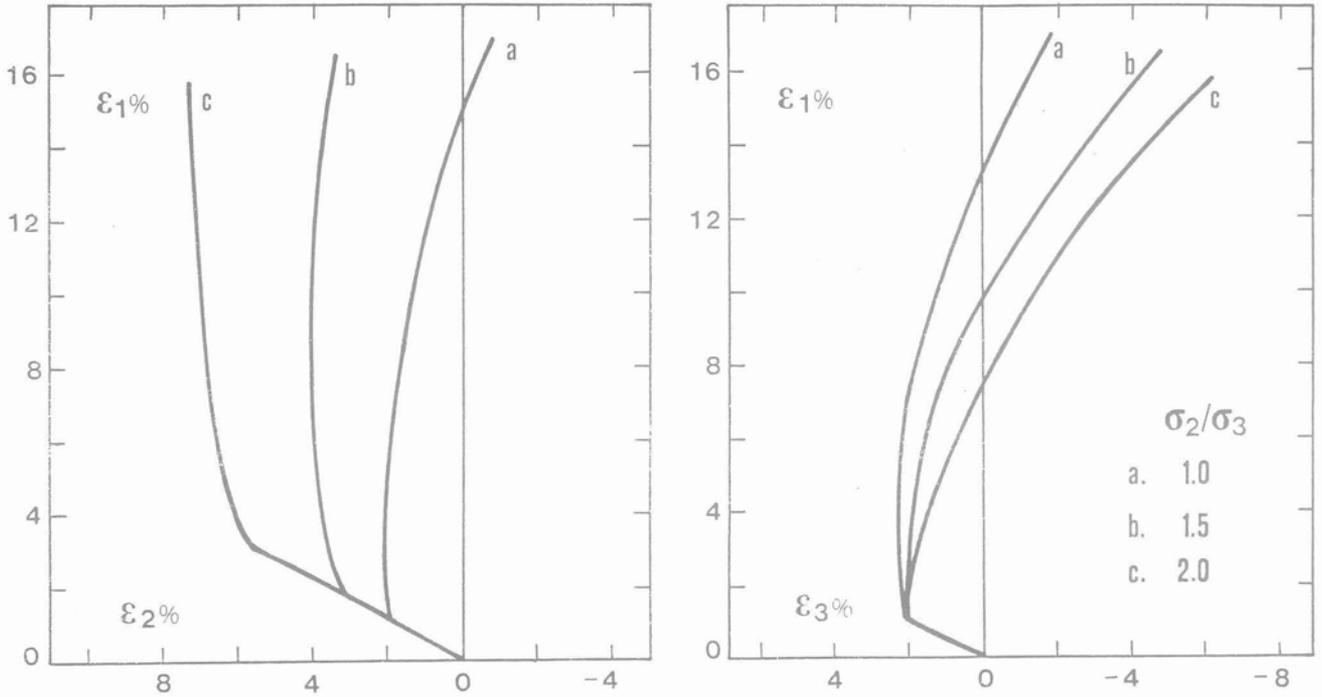


Fig. 8. — Relations entre les déformations axiales $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ du sable, sous des conditions de sollicitations σ_2 et σ_3 constantes, $\sigma_2 \neq \sigma_3$ et $\sigma_3 = 10$ MPa.

— Dans le cas où $\sigma_2 \neq \sigma_3$ comme dans le cas où $\sigma_2 = \sigma_3$ pour la même déformation ϵ_1 , l'augmentation des contraintes σ_2 et σ_3 provoque l'augmentation de la contrainte principale σ_1 . Il apparaît que l'augmentation de la contrainte σ_1 ne dépend pas du rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ mais qu'elle dépend de la somme des contraintes latérales $\sigma_2 + \sigma_3$.

— L'augmentation du rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ provoque l'augmentation de la variation du volume ϵ_v des éprouvettes. En outre, plus le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ augmente, plus la valeur de déformation axiale ϵ_1 à laquelle correspond le point de dilatance nulle est petite (fig. 7).

— En ce qui concerne les déformations ϵ_2 et ϵ_3 par rapport à la déformation ϵ_1 (fig. 8) et particulièrement pour la déformation ϵ_3 , dans ce cas-là, on observe après le chargement hydrostatique, une brusque diminution de variation de ϵ_3 dont le signe s'inverse. Le changement de signe se fait d'autant plus tôt que le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ est grand. Après ce changement, le taux de variation de ϵ_3 en fonction de la déformation ϵ_1 augmente de manière continue et s'accroît d'autant plus que le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ est grand. La déformation axiale ϵ_2 , après le chargement hydrostatique et pendant que la

contrainte principale σ_2 varie encore (la contrainte σ_3 est stable), continue d'augmenter (raccourcissement) avec un taux $\frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1}$ qui est un petit peu plus grand. Après la stabilisation de la contrainte σ_2 à la valeur prédéterminée, les valeurs de déformation ϵ_2 diminuent brusquement et tendent progressivement à changer le signe du taux $\frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1}$. Contrairement à ce qui se passe pour la déformation ϵ_3 , le changement de signe de la déformation ϵ_2 se fait à une plus grande valeur respective de ϵ_1 , quand le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ est plus grand. La même chose se passe avec la variation du taux $\frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1}$, après le changement de signe, laquelle variation diminue (en valeurs absolues) quand le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ devient plus petit, tandis que la variation du taux $\frac{d\epsilon_3}{d\epsilon_1}$ augmente.

— Pour la variation du niveau déviatorique η en fonction de la déformation ϵ_v et de la déformation ϵ_q , sur la figure 9, on constate, que — contrairement au cas des essais triaxiaux conventionnels, où indépendamment de la valeur des contraintes égales latérales, les points de dilatance nulle correspondent à un même niveau déviatorique η — ici plus le rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$ est grand, plus la valeur de η (au point de dilatance nulle) est petite.

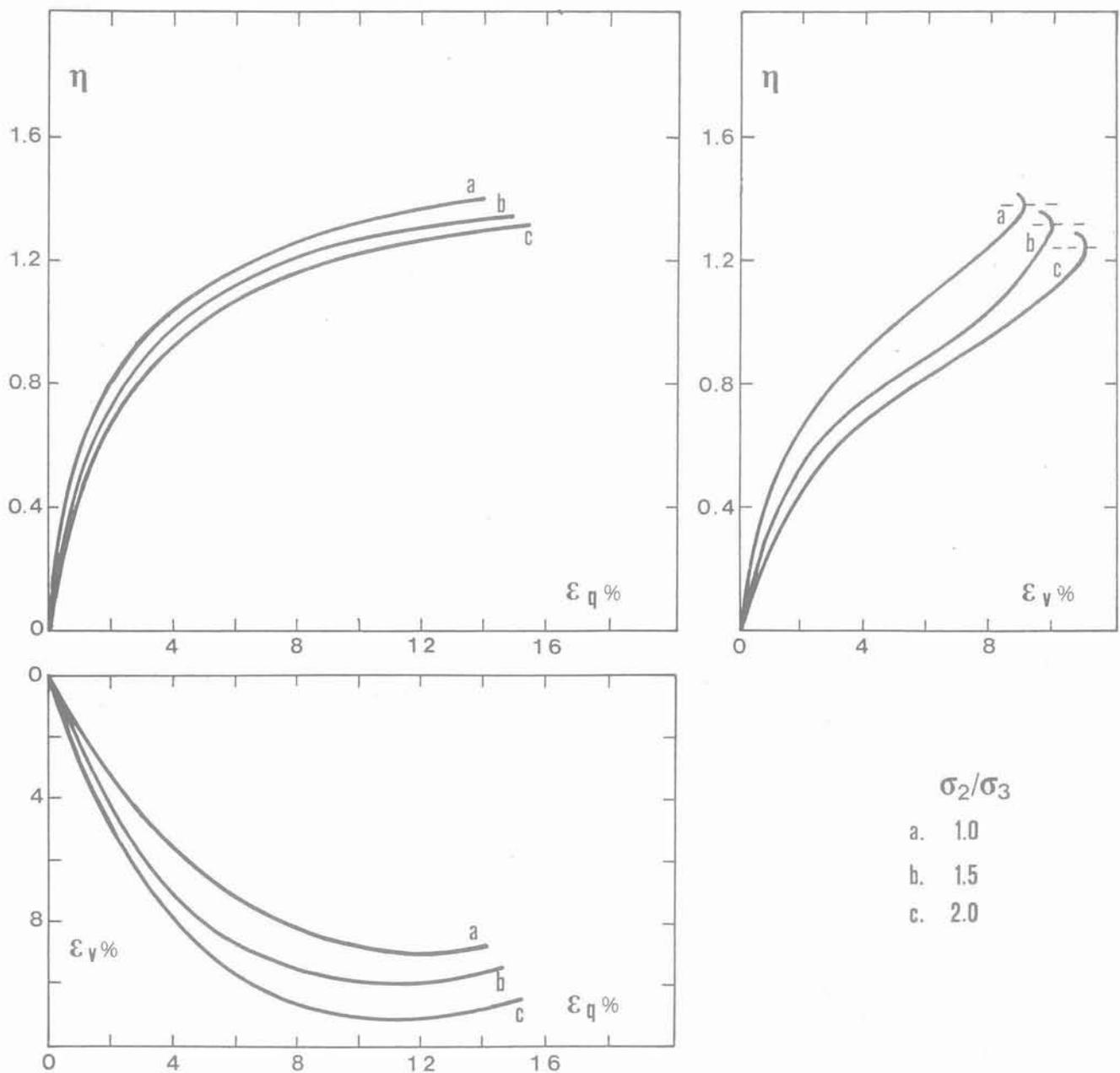


Fig. 9. — Relations entre le niveau déviatorique η , la déformation volumique ϵ_v et la déformation de distorsion ϵ_q du sable, sous des conditions de sollicitations σ_2 et σ_3 constantes $\sigma_2 \neq \sigma_3$ et $\sigma_3 = 10$ MPa.

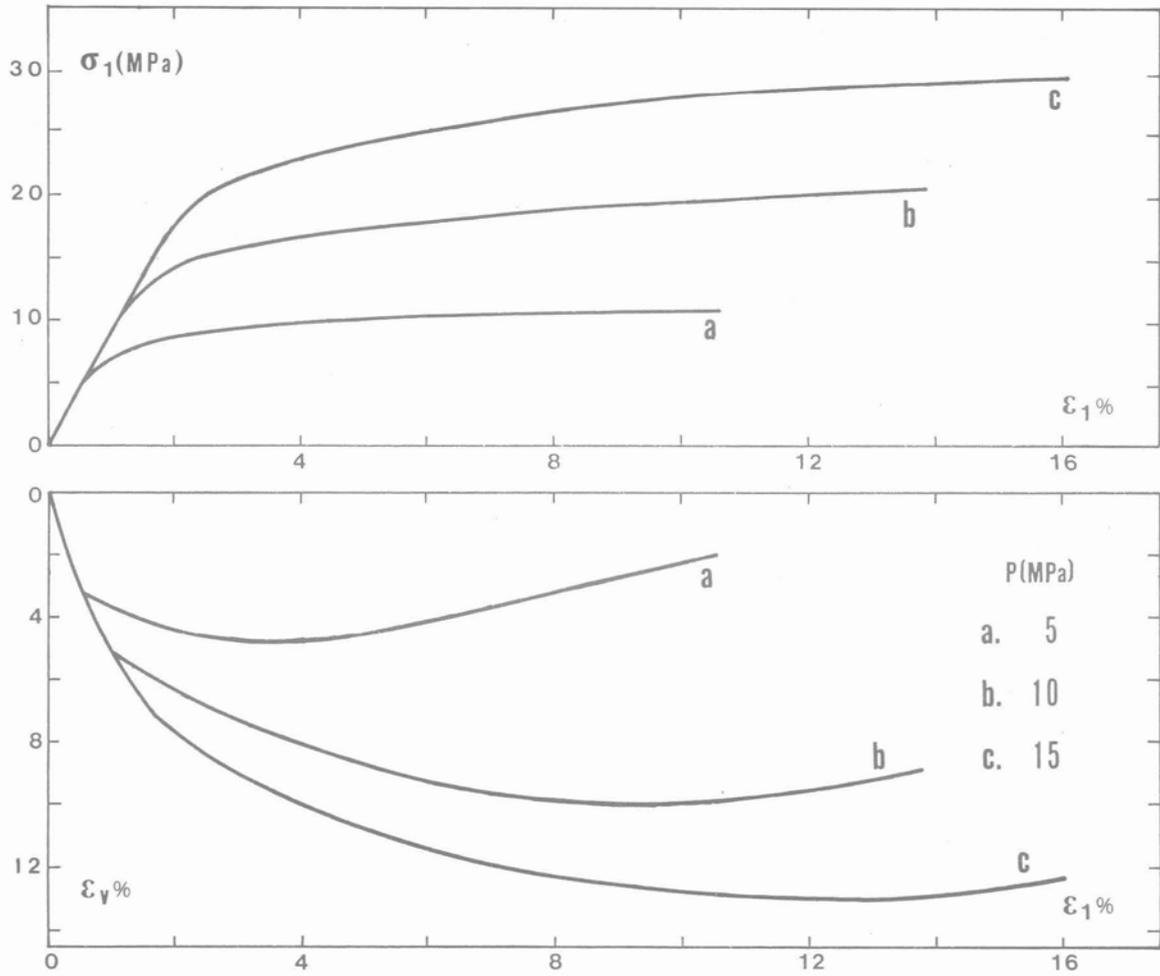


Fig. 10. — Évolution de la contrainte principale σ_1 , de la variation du volume ϵ_v du sable d'Axios en fonction de la déformation axiale ϵ_1 , sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante et où $\sigma_2 = \sigma_3$.

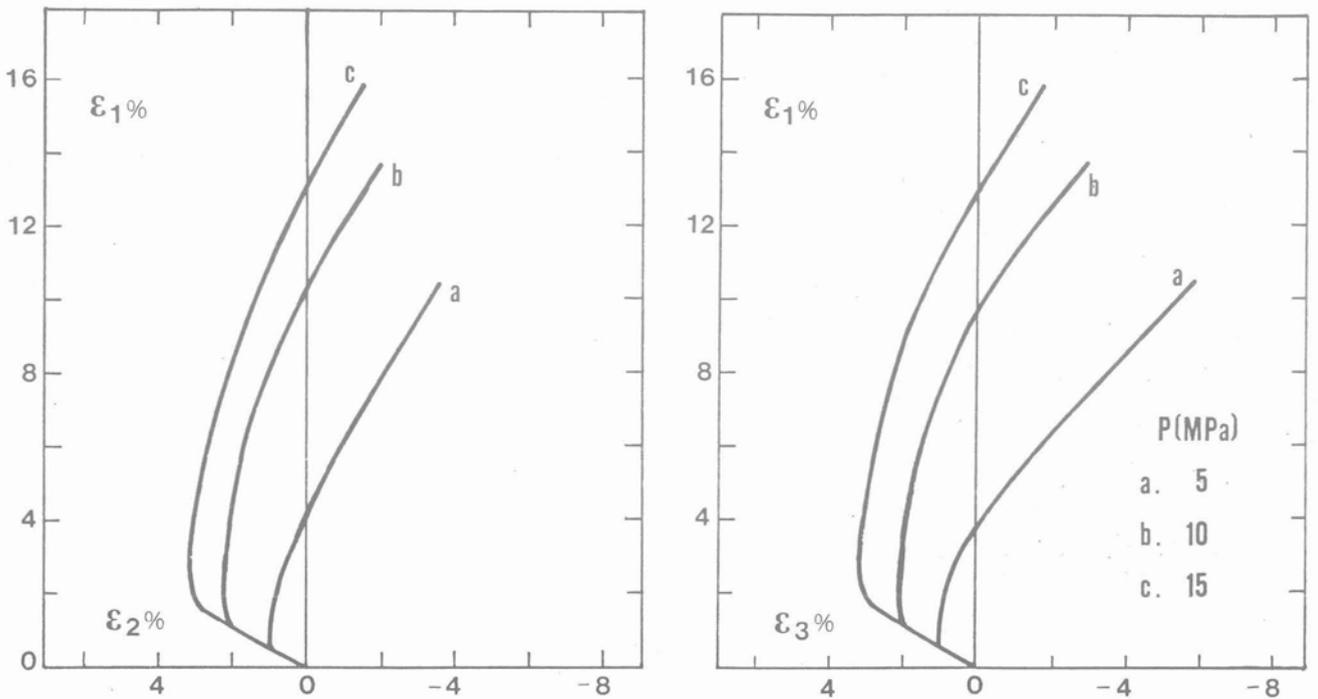


Fig. 11. — Relations entre les déformations axiales $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ du sable, sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante et où $\sigma_2 = \sigma_3$.

6. COMPRESSION TRIAXIALE A CONTRAINTE MOYENNE CONSTANTE

Les figures 10, 11 et 12 se réfèrent à une série d'essais sous conditions de contraintes moyennes constantes $p = 5$; 10 et 15 MPa. Le trajet de chargement de ces essais est indiqué sur la figure 3 (3). De ces essais, on constate que :

— La contrainte principale σ_1 augmente au cours des essais et elle est proportionnelle à la contrainte moyenne p . Après le chargement isotrope, le taux de la variation de volume $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ diminue sensiblement de manière continue, s'annule (point de dilatance nulle) pour commencer ensuite une augmentation (en valeurs absolues) progressive.

— Cette augmentation (dilatation) de la variation $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ tend vers une valeur constante. Cette constatation est confirmée, tant par la variation de ε_v en fonction de ε_q , que par les variations des déformations transversales en fonction de la déformation ε_1 de la figure 11.

— En effet, les courbes de cette figure qui évoluent vers des droites, permettent d'expliquer la linéarité de la relation entre ε_v et ε_1 . La valeur constante du taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ dépend de la contrainte moyenne p et plus elle est grande plus la contrainte moyenne p est petite. Soulignons que si $\left| \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} \right| + \left| \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} \right| > 1$ il existe un point de dilatance nulle.

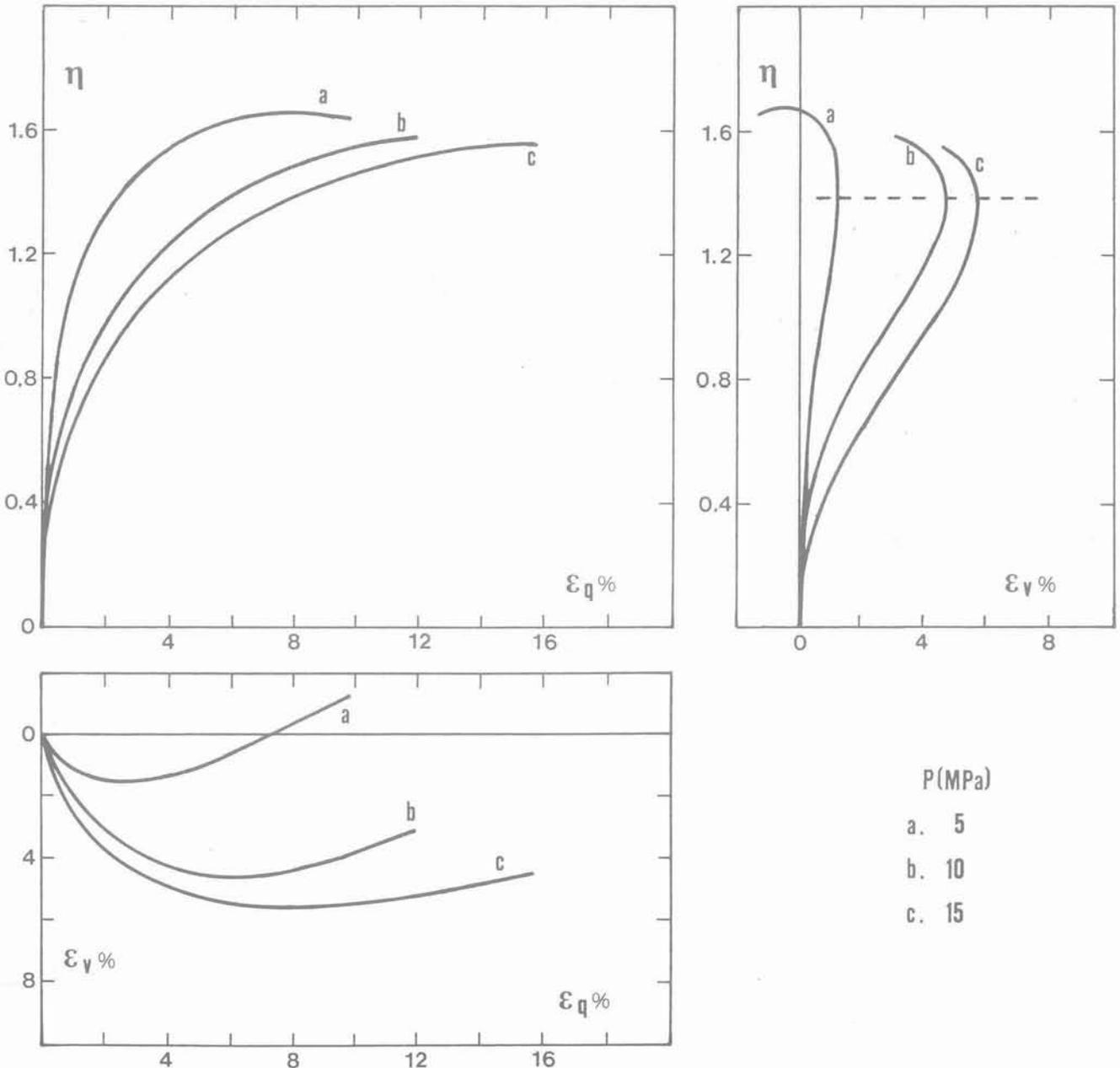


Fig. 12. — Relations entre le niveau déviatorique η , la déformation volumique ε_v et la déformation de distorsion ε_q du sable, sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante et où $\sigma_2 = \sigma_3$.

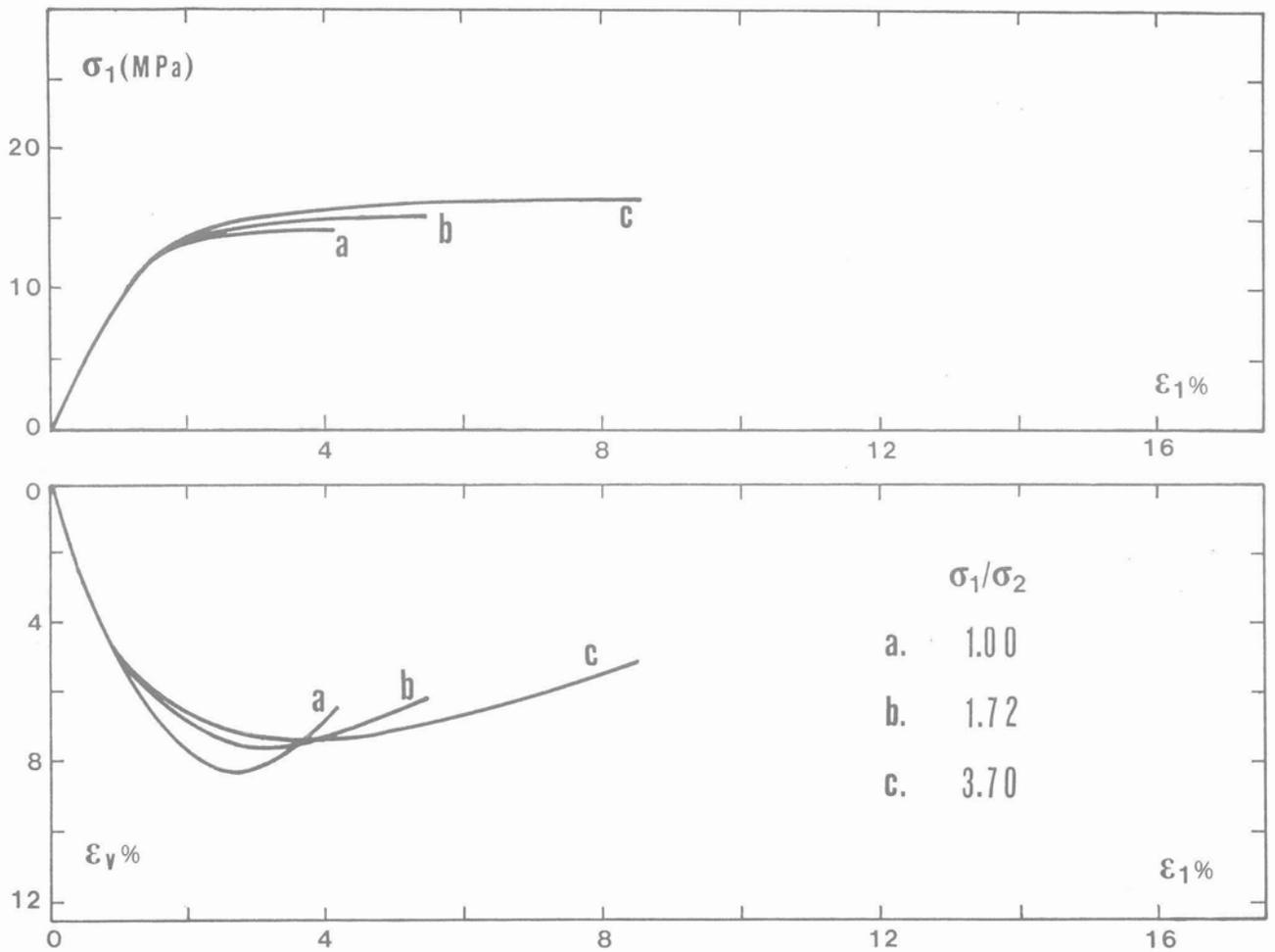


Fig. 13. — Évolution de la contrainte principale σ_1 et de la variation du volume ϵ_v du sable d'Axios en fonction de la déformation axiale ϵ_1 , sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante ($p = 10$ MPa) et où $\sigma_2 \neq \sigma_3$.

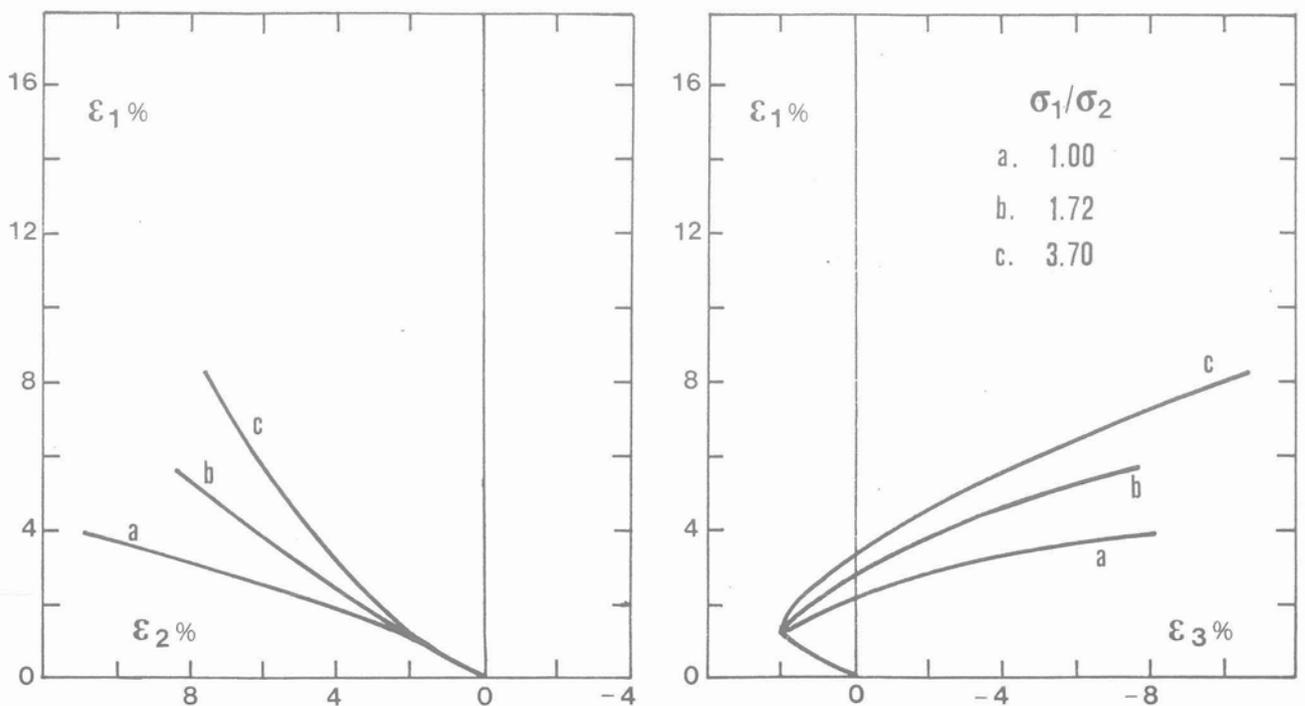


Fig. 14. — Relations entre les déformations axiales ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 du sable, sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante ($p = 10$ MPa) et où $\sigma_2 \neq \sigma_3$.

— En ce qui concerne les variations des niveaux déviatoriques η en fonction de ε_v et de ε_q de la figure 12, elles permettent de constater que tous les points de dilatance nulle du sable correspondent ici au même niveau déviatorique.

**7. COMPRESSION MULTIAXIALE
A CONTRAINTE MOYENNE CONSTANTE**

Les résultats de ces essais sont représentés sur les figures 13, 14, 15 et 16. Il s'agit d'une série d'essais qui a été effectuée sous la contrainte moyenne $p = 10$ MPa

et sous différents rapports entre les contraintes σ_1 et σ_2 . Les rapports utilisés pour ces deux contraintes après le chargement isotrope sont $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1,0 ; 1,72$ et $3,7$ (fig. 16).

Au cours de ces essais, on a suivi le trajet de chargement, indiqué sur la figure 3 (4), en augmentant σ_1, σ_2 avec la proportion choisie après le chargement isotrope et en diminuant σ_3 .

Les résultats de ces essais amènent à formuler ce qui suit :

— Pour la même déformation ε_1 , la contrainte principale σ_1 a la plus petite valeur quand le rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1,0$

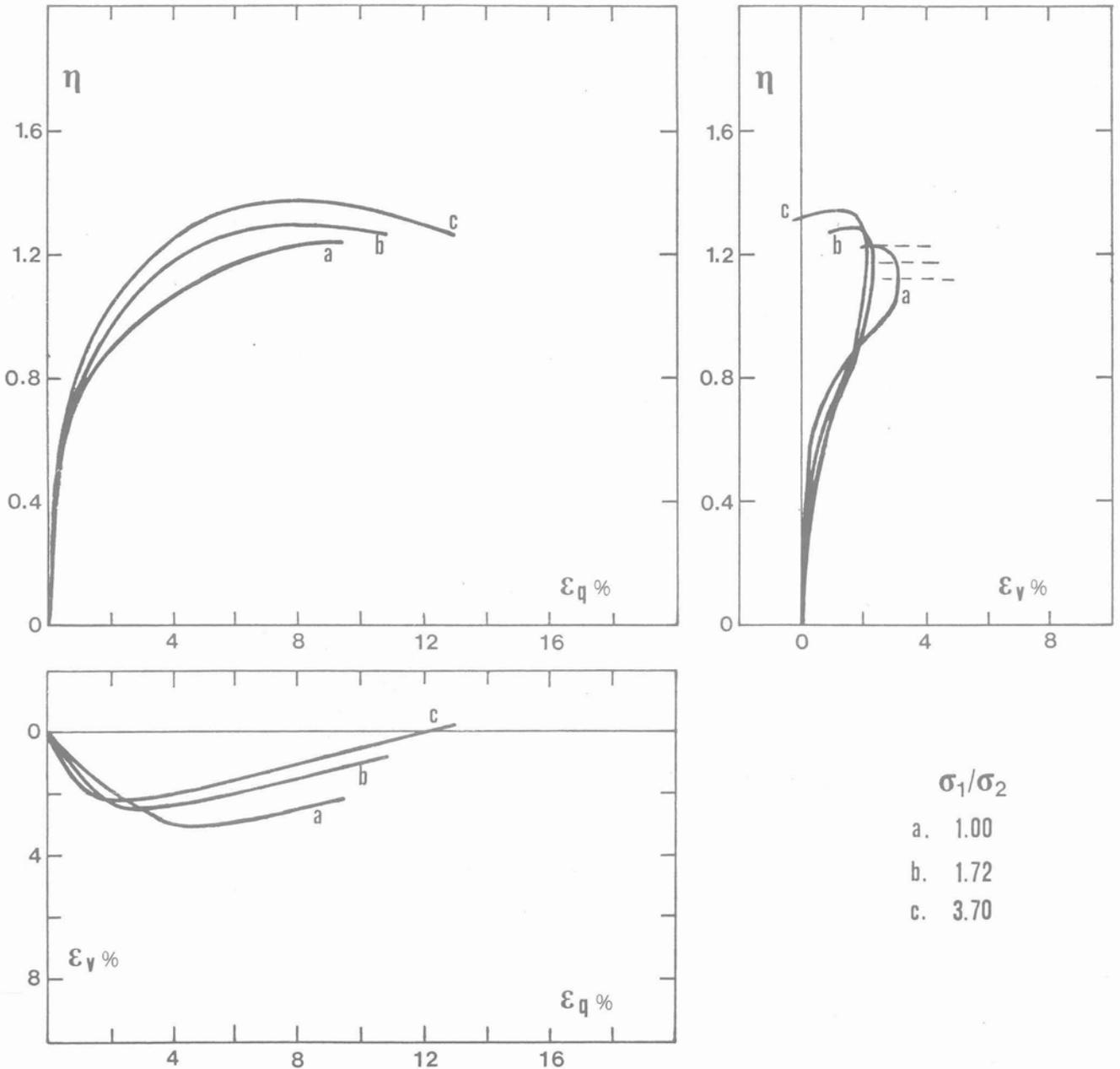


Fig. 15. — Relations entre le niveau déviatorique η , la déformation volumique ε_v et la déformation de distorsion ε_q du sable, sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante ($p = 10$ MPa) et où $\sigma_2 \neq \sigma_3$.

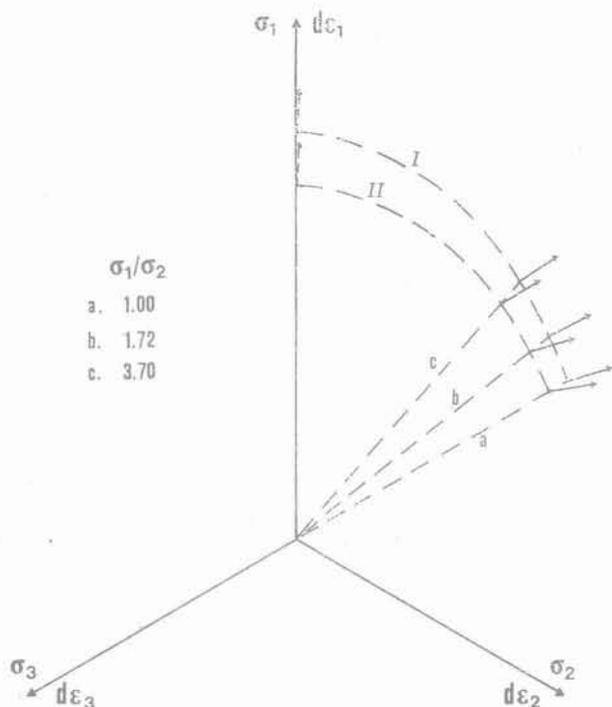


Fig. 16. — Position des vecteurs de déformation incrémentale par rapport à la surface de rupture (I) et à la surface de dilatance nulle (II) sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante ($p = 10$ MPa).

et plus elle augmente, plus le rapport augmente lui aussi.

— Au cours de ces essais, et comme pour les autres essais, déjà décrits, la variation de volume, après le chargement isotrope, diminue de manière continue, jusqu'à ce que le taux de variation $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ s'annule. Après le point de dilatance nulle, le taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ augmente avec son signe inversé jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur limite.

— Cette valeur limite est aussi confirmée par la courbe $(\varepsilon_v, \varepsilon_1)$ de la figure 15 et par les courbes de la figure 14. En effet, les variations des déformations $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ en fonction de la déformation ε_1 permettent de constater qu'après le chargement isotrope, alors que la déformation ε_2 continue d'augmenter (raccourcissement axial), la déformation ε_3 varie avec le signe du taux $\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1}$ inversé. Les courbes (a), (b) et (c) de la figure 14 tendent vers des lignes droites avec des pentes qui sont inversement proportionnelles au rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

En ce qui concerne le point de dilatance nulle où la déformation volumique de l'éprouvette a la plus grande valeur de contraction, il apparaît que cette valeur ε_v^{\max} comme d'ailleurs la valeur de la déformation

axiale correspondante, dépend du rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$. Et plus précisément, plus le rapport est grand, plus la valeur ε_v^{\max} est petite et plus la valeur de la déformation ε_1 est grande.

— La variation du niveau déviatorique en fonction de la déformation ε_v , sur la figure 15 permet de constater que — contrairement au cas des essais triaxiaux ($\sigma_2 = \sigma_3$) à contrainte moyenne p constante, où tous les points de dilatance nulle correspondent à un même niveau déviatorique — ici plus le rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ est grand, plus la valeur du niveau déviatorique η devient grande.

— La figure 16 se réfère aux positions de vecteurs de déformation incrémentale par rapport à la surface de dilatance nulle, dans le plan déviatorique. Les directions des vecteurs ont été déterminées à partir de la relation $\tan \theta = \frac{\sqrt{3} (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)}{(2 d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)}$. Sur cette figure et pour la contrainte moyenne p égale à 10 MPa, il apparaît que les vecteurs de déformation incrémentale sont presque perpendiculaires à la surface de rupture. Par contre, les vecteurs de déformation incrémentale présentent une légère déviation par rapport à la normale à la surface de dilatance nulle. Cette déviation est d'autant plus petite que les valeurs absolues du rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ augmentent.

8. CONCLUSIONS

Les résultats des essais effectués, qui ont été commentés dans les paragraphes précédents, pour la détermination du comportement du sable d'Axios soumis à des efforts en compression multiaxiale aussi bien sous des conditions de contraintes σ_2 et σ_3 constantes et avec des valeurs allant jusqu'à 15 MPa, que sous des conditions de contrainte moyenne p constante, autorisent à formuler les conclusions suivantes :

1. Sous des conditions de contraintes σ_2 et σ_3 constantes, pour la même déformation axiale ε_1 du sable, la variation de la contrainte principale σ_1 est proportionnelle à la somme $\sigma_2 + \sigma_3$ et indépendante du rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ et lui est proportionnelle.
2. Sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante dans le cas où $\sigma_2 = \sigma_3$, pour la même déformation ε_1 du sable, la variation de la contrainte principale σ_1 est proportionnelle à p , tandis que dans le cas où $\sigma_2 \neq \sigma_3$ et où le rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ est constant, la variation correspondante de σ_1 dépend du rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ et lui est proportionnelle.
3. La variation du volume ε_v du sable en fonction de la déformation ε_1 présente une valeur maximale contractante ε_v^{\max} (point de dilatance nulle) au-delà de laquelle le taux de variation change de signe et augmente, en valeurs absolues, de manière continue. La grandeur de ε_v et la valeur correspondante de ε_1 dépendent des

valeurs des contraintes principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ et du mode de sollicitation du sable. Et plus précisément, dans le cas où la sollicitation se fait sous contraintes latérales σ_2 et σ_3 constantes, la variation de la valeur de ε_v^{\max} est proportionnelle aux valeurs de contraintes σ_2 et σ_3 et au rapport de ces contraintes tandis que la variation de la valeur de déformation correspondante ε_1 est d'une part proportionnelle aux valeurs des contraintes σ_2 et σ_3 et de l'autre, inversement proportionnelle au rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$.

Dans le cas où la sollicitation du sable se fait sous contrainte moyenne p constante, les variations des déformations ε_v^{\max} et des déformations correspondantes sont proportionnelles à la valeur de la contrainte p tandis que dans le cas où $\sigma_2 \neq \sigma_3$ et où le rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ est constant, la valeur de ε_1 est proportionnelle à la déformation ε_v^{\max} et inversement proportionnelle au rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

4. Sous des conditions de sollicitations à contrainte moyenne p constante, la valeur du taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ du sable, après le changement de signe, augmente de manière continue (en valeurs absolues) jusqu'à une valeur au-delà de laquelle elle demeure stable. La grandeur de la valeur du taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ dépend de la contrainte moyenne p (et p lui est inversement proportionnelle) et du rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

5. Sous des conditions de sollicitations triaxiales conventionnelles ($\sigma_2 = \sigma_3$) et constantes, les points d'inversion du signe du taux $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$ correspondent au même niveau déviatorique $\eta = \frac{q}{p}$ indépendamment des valeurs des contraintes principales σ_2 et σ_3 . La même chose se passe sous des conditions de sollicitation du sable à contrainte moyenne p constante et dans le cas où $\sigma_2 = \sigma_3$.

6. Sous des conditions de sollicitations multiaxiales à confinement constant ($\sigma_2 \neq \sigma_3$), les points de contraction maximale correspondent à des niveaux déviatoriques différents entre eux, qui sont inversement proportionnels au rapport $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$. La même chose est valable sous des conditions de sollicitations multiaxiales à contrainte moyenne p constante, à cette différence près que les valeurs du niveau déviatorique η sont proportionnelles au rapport $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

BIBLIOGRAPHIE

1. DEMIRIS C. (1985), *Surfaces de rupture et de limite de dilatance du marbre de Thassos soumis à des efforts de compression multiaxiaux*. C.R. Acad. Sc. Paris t. 301, série II, n° 17, 1985.
2. HABIB P. et LUONG M.P. (1974), *Comportement mécanique des sols à forts recouvrements*. 3^e Congrès International de Mécanique des Roches, Denver Colorado, U.S.A.
3. HABIB P. et LUONG M.P. (1986), *Comportement du milieu pulvérulent*, in « Génie Parasismique ». Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
4. LUONG M.P. (1978), *État caractéristique du sol*. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 287, nov. 1978, série B, pp. 305-307.
5. LUONG M.P. (1980), *Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents*. Revue Française de Géotechnique, 10, pp. 39-53.
6. LUONG M.P. et TOUATI A. (1984), *Sols grenus sous fortes contraintes*. Revue Française de Géotechnique, 23, pp. 51-63.
7. MICHELIS P., DEMIRIS C., *Conception et construction d'une vraie cellule triaxiale*. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 299, série II, n° 8, 1984, pp. 375-378.