

Expérimentation et modélisation de blocs compressibles de matières plastiques pour des remblais allégés Élaboration d'un modèle viscoélastique non linéaire, orthotrope de révolution

H. EL GHOCHE
C. COULET

Laboratoire Génie
Civil Habitat
Environnement
IUT A, Université
Lyon 1

B. CAMBOU

Laboratoire
Tribologie et
dynamique des
systèmes
URA - CNRS 855
École Centrale
de Lyon.

Résumé

L'utilisation de blocs de déchets de matières plastiques compressés et ligaturés permet d'une part, grâce à la légèreté de ce nouveau matériau de résoudre les problèmes de tassements des remblais construits en sites compressibles et d'autre part de valoriser des déchets coûteux à éliminer.

Le pressage unidirectionnel de ce matériau formé d'un empilement de couches de déchets lui confère une orthotropie de révolution. Des essais de compressibilité et de fluage sur blocs réels et sur échantillons ainsi que des essais de chargements cycliques et biaxiaux ont permis de modéliser, avec une précision satisfaisante, le comportement viscoélastique non-linéaire de ce matériau.

Experimentation and Modelling of Compressible Waste Plastic material for Light-Weight Embankments Elaboration of a Non-Linear viscoelastic and Orthotropic Model

Abstract

The utilization of blocks, made of compressed waste plastic material, permits us to solve many problems. As their density is very light (0.3 to 0.6), these blocks could be used to build light-weight embankments on compressible ground. On the other hand, this process makes use of plastic waste which is very expensive to eliminate.

Because the compression, when the blocks are being made, is unidirectional this material is made up of a stack of layers of waste. In this case, the material has an axial orthotropy. A large number of tests were carried out : compressibility, creep, cyclical and biaxial loading. These tests permitted us to model the nonlinear viscoelastic behaviour of this material with adequate precision.

Introduction

Le sol, matériau classique de remblaiement, dont des millions de mètres cubes sont mis en œuvre chaque année, provoque des problèmes sérieux dans les sites compressibles et exerce de fortes pressions sur les soutènements.

De nombreux procédés de remblais allégés, utilisant des matériaux neufs ou des déchets, apportent un bon remède à ces problèmes. Mais tous ces procédés présentent un certain nombre de contraintes (économiques, techniques...) qui limitent leurs applications à des cas particuliers (El Ghoche, 1992).

D'un autre côté, les déchets, une menace réelle contre l'environnement, posent un autre type de problèmes, tout particulièrement, les déchets de matières plastiques. Les pays de la CEE en secrètent près de 10 millions de tonnes par an, le seul gisement français s'élève environ à 2 millions de tonnes. 75 % de ces déchets s'accumulent dans des décharges ou sous forme de déchets sauvages.

PLASTBLOC, empilement de déchets de matières plastiques constitués en grande proportion de sacs et de films en polyéthylène, compressés et ligaturés sous forme de blocs de densité variable (0,3 à 0,6) et de volume de 1 m³, est un nouveau procédé de remblais allégés. Il consomme une grande partie des rebuts plastiques et présente une solution aux problèmes décrits ci-dessus.

L'objet de cet article est d'analyser et de modéliser le comportement de ces blocs en vue de dimensionner les ouvrages réalisés avec ces éléments.

Pour déterminer le comportement de ce nouveau matériau, plusieurs campagnes d'essais ont été entreprises. Après des tests de compression simple sur blocs réels, le travail a été complété par des essais de même type sur échantillons et achevé par des essais biaxiaux. En parallèle, un remblai expérimental a été construit (Daudon, El Ghoche, Coulet, 1991).

Les exploitations des résultats expérimentaux ont abouti à élaborer un modèle viscoélastique non linéaire qui prend en considération l'orthotropie du matériau.

Essais

Réalité physique

Selon le mode de fabrication, pressage unidirectionnel, le matériau se présente sous forme d'empilement de couches quasi identiques. Un certain volume d'air reste emprisonné entre les feuilles de plastique, ce qui est indispensable pour que la légèreté soit assurée. La forme parallélépipédique du bloc est maintenue grâce à des attaches métalliques. Leur nombre et leur rigidité influent sur la planéité des faces. La pérennité de ces attaches n'est pas nécessaire car, après sa mise en service avec un chargement perpendiculaire aux couches, ce matériau se comprime et les attaches se distendent. Un léger gonflement, qui se produit juste après relâchement de la presse en phase finale de fabrication, a été signalé.

Compte tenu de toutes ces observations, le matériau peut être considéré comme orthotrope de révolution.

Blocs réels

L'analyse du comportement et la définition des caractéristiques de ce nouveau matériau a commencé par une série d'essais sur blocs de taille réelle (Fig. 1). Quatre blocs de densités différentes ont été testés suivant le principe de l'essai de compression simple. Les surcharges, appliquées perpendiculairement aux couches et par paliers, ont été maintenues suffisamment longtemps pour mettre en évidence le phénomène de fluage. Plusieurs cycles de chargement et de déchargement ont été réalisés.

Les premiers résultats ont conduit aux conclusions suivantes :

– le matériau est viscoélastique non linéaire. La déformation due au fluage varie linéairement en fonction du logarithme du temps. La pente et l'ordonnée à l'origine sont fonctions de la contrainte appliquée et de la densité initiale de fabrication (Fig. 2) ;

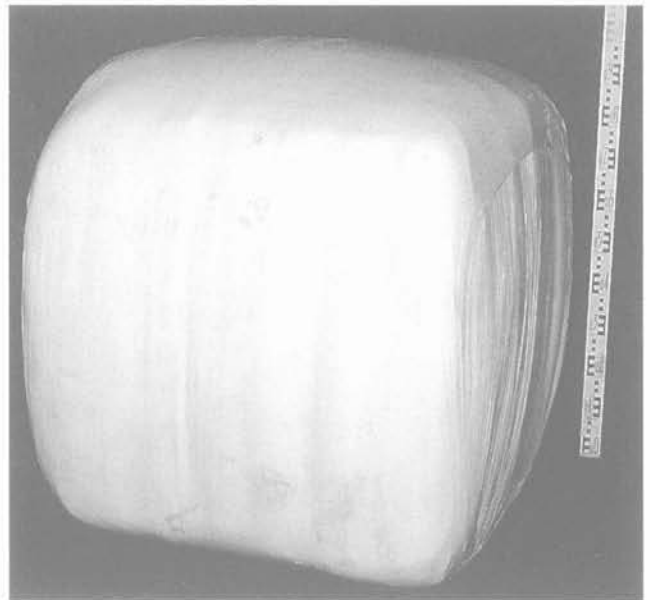


FIG. 1 Bloc testé expérimentalement. The first tested block.

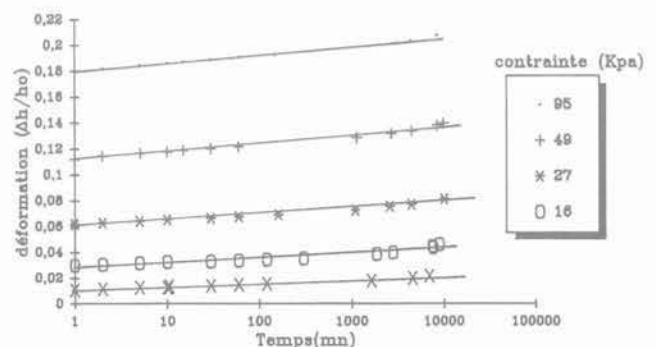


FIG. 2 Courbes de fluage. Chargement par palier. Bloc réel (densité initiale : 0,435). Creep curves of a block. Loading by steps (initial density : 0.435).

- à cette échelle, la déformation latérale ne s'est pas manifestée, d'où un coefficient de Poisson quasi nul ;
- l'influence de la densité initiale est primordiale (Fig. 3) ;
- des phénomènes rhéologiques complexes (durcissement, écrouissage, vieillissement) ont été constatés ;
- un prégonflement a été signalé qui est lié au mode de fabrication. Ce phénomène a pour effet de diminuer les caractéristiques mécaniques.

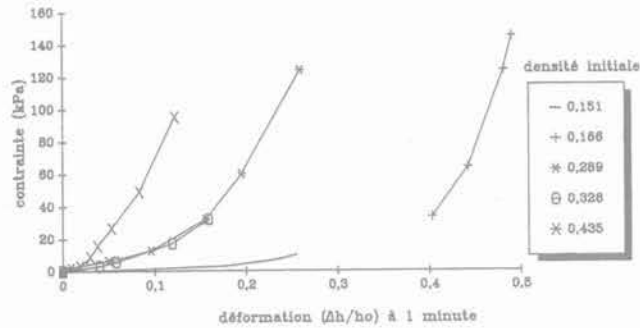


FIG. 3 **Contrainte-déformation à 1 minute. Blocs réels (densité initiale constante (sans tenir compte du fluage)).**
Stress-strain at 1 minute.
Real block (constant initial density).

2.3

Essais sur échantillons

Les essais sur échantillons de taille réduite se sont avérés indispensables pour en multiplier le nombre et ainsi mieux tester les différents paramètres. Pour permettre la fabrication de ces échantillons, deux bâtis ont été construits :

- cylindrique : diamètre de 20 cm, hauteur de 20 à 40 cm ;
- parallélépipédique : 20 x 20 x 25 cm.

La taille des feuilles de plastique a été réduite afin de respecter l'échelle. Deux types de liens ont été utilisés :

- fils métalliques ;
- rubans en plastique.

Le prégonflement a été empêché dans la mesure du possible.

2.3.1

Compressibilité - Fluage (perpendiculairement aux couches)

Suivant le principe de l'essai de compression simple, avec une plaque rigide guidée verticalement (Fig. 4), 14 échantillons de densités allant de 0,3 à 0,5 ont été testés. Les surcharges, appliquées par palier (Fig. 5), ont été maintenues le temps nécessaire pour mettre en évidence le phénomène de fluage. L'essai le plus long a duré 40 jours. Au total, 134 essais de chargement et de déchargement ont été réalisés.

La variation linéaire de la déformation en fonction du logarithme du temps a été confirmée (Fig. 6). La pente de la droite et son ordonnée à l'origine varient non linéairement en fonction de la contrainte et de la densité initiale (Fig. 7). La déformation latérale a été mesurée à

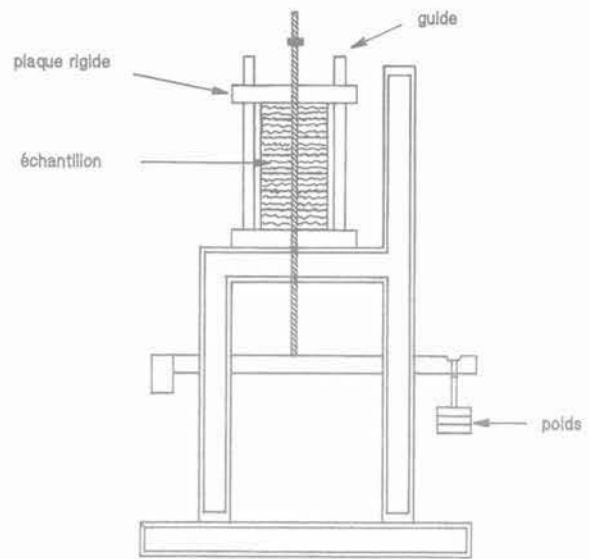


FIG. 4 **Bâti expérimental - Schéma de principe.**
The experimental testing equipment.

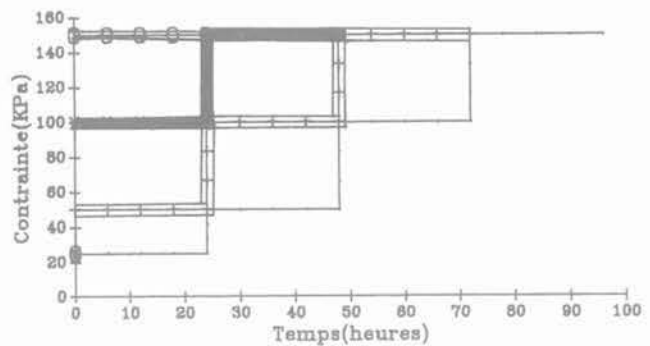


FIG. 5 **Chemin de contraintes : quatre échantillons différents pour chaque densité initiale.**
Loading path : four different samples for each density.

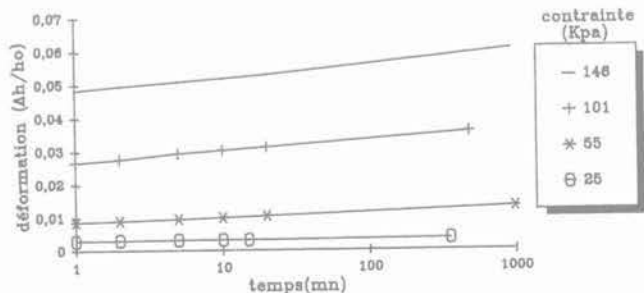


FIG. 6 **Courbes de fluage sur échantillon. Chargement par palier (densité initiale : 0,457).**
Creep curves of a sample. Loading by steps (initial density : 0.457).

partir de la variation du périmètre de l'échantillon. Le rapport $([\Delta R/R_0]/\Delta h/h_0)$ (h : hauteur ; R : rayon) est, en moyenne, égal à 0,068. Ce même rapport chute à 0,02 lors du deuxième chargement. La déformation perpendiculaire aux couches est plus importante (sous la même contrainte) (Fig. 8). Le comportement, fortement lié à la densité initiale, s'améliore quand celle-ci devient plus grande. On observe, en particulier, que la rigidité augmente au cours d'un essai de compression simple monotone.

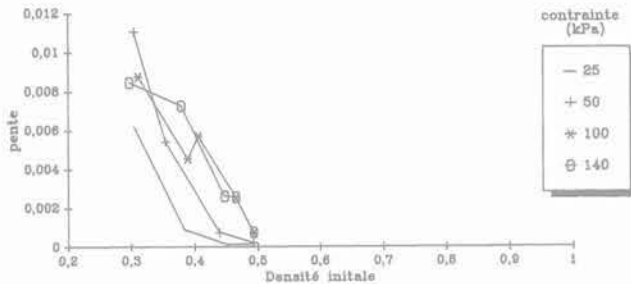


FIG. 7a Variation de la pente de la droite de fluage (échelle logarithmique) en fonction de la densité initiale à contrainte constante.
Slope of the creep straight line (logarithmic scale), function of the initial density at constant stress.

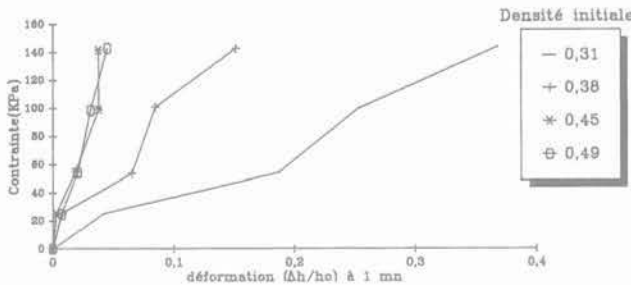


FIG. 7b Courbes « contrainte-déformation » à 1 minute (densité initiale constante).
Stress-strain at 1 minute (constant initial density).

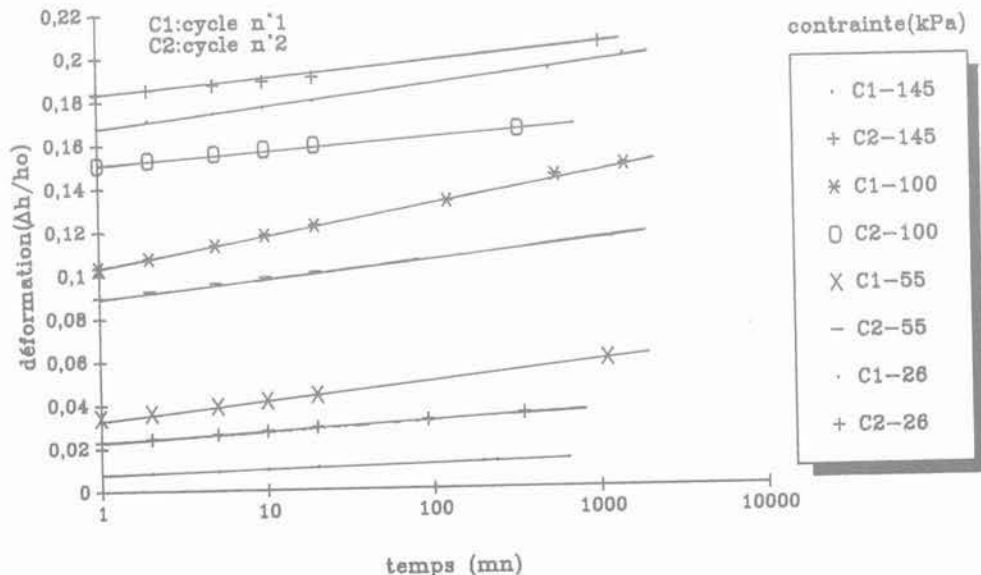


FIG. 8 Chargement-rechargement suivant le même chemin de contraintes (densité initiale 0,384).
Loading-reloading (initial density 0,384).

2.3.2

Essais cycliques à vitesse de déformation constante (perpendiculairement aux couches)

Cinq échantillons de densités allant de 0,3 à 0,5 ont été testés, sous deux vitesses de déformation de $0,006 \text{ mn}^{-1}$ et $0,018 \text{ mn}^{-1}$. Un nombre de cinq cycles a été atteint (Fig. 9).

L'écroutissage du matériau a été mis en évidence. L'évolution de la déformation permanente a tendance à diminuer au cours des cycles. En d'autres termes, l'accommodation sera atteinte après un certain nombre de cycles que nous ne pouvons pas, pour l'instant, préciser.

2.3.3

Essais biaxiaux

Les essais ont été effectués à l'aide d'un appareil biaxial, conçu et construit spécialement pour ce type de matériau. Dans un sens, la surcharge appliquée à l'aide de poids est transmise par une plaque rigide guidée. Dans l'autre sens, la contrainte est mesurée par un anneau dynamométrique fixé à une autre plaque de même nature (Fig. 10). Le déplacement de celle-ci est de l'ordre de la déformation de l'anneau. Les autres déformations sont mesurées par des méthodes classiques. Puisque leur rôle n'est pas prévu à long terme, les attaches sont coupées dès que l'échantillon est mis dans l'appareil. Une contrainte σ_3 apparaît alors dans la direction perpendiculaire aux couches qui est mesurée (Fig. 12).

Dix-huit échantillons de quatre densités différentes ont été testés suivant un chemin de contraintes par palier (Fig. 5). La contrainte résiduelle, mesurée à une heure de la fabrication, varie exponentiellement avec la densité initiale (Fig. 11). La variation de la contrainte σ_3 (perpendiculairement aux couches) en fonction de σ_2 (parallèlement aux couches) et du temps n'est pas notable. Elle est du même ordre de grandeur que l'incertitude de la mesure (Fig. 12). La déformation, parallèle aux couches, varie linéairement en fonction du logarithme du temps (Fig. 13).

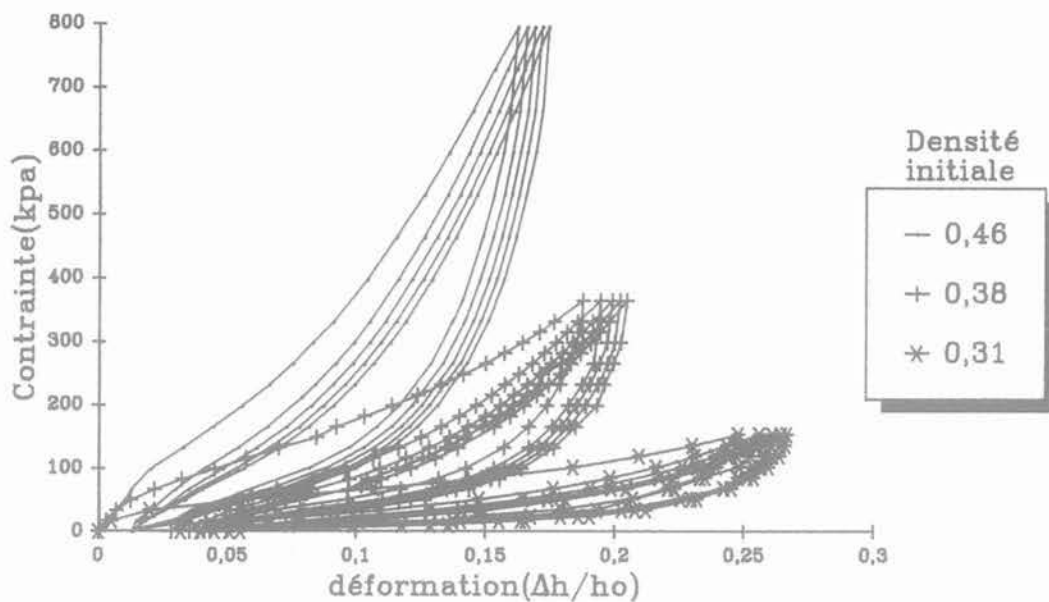


FIG. 9 Contrainte-déformation à vitesse de déformation constante ($0,018 \text{ min}^{-1}$).
Cyclical loading with constant deformation velocity ($0,018 \text{ min}^{-1}$).

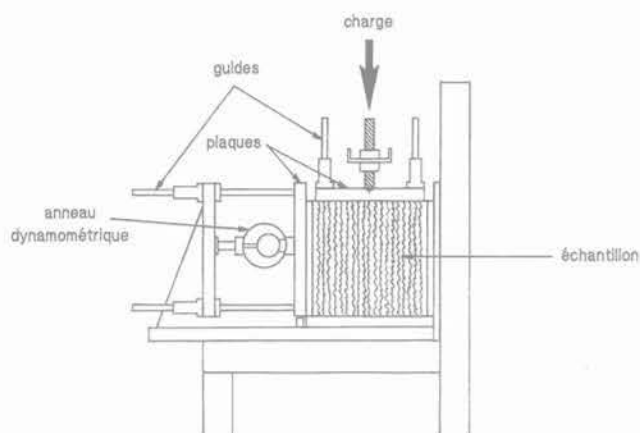


FIG. 10 Appareil biaxial. Schéma de principe.
Biaxial equipment.

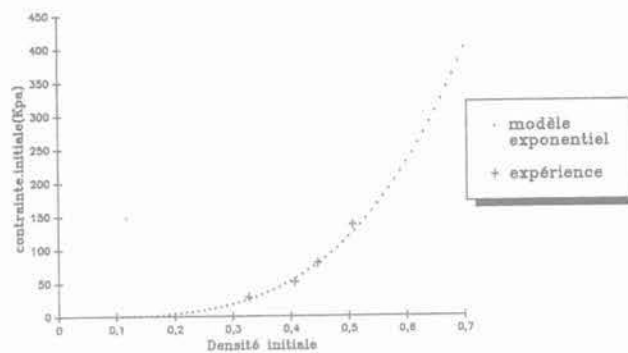


FIG. 11 Variation de la contrainte (perpendiculaire aux couches) à 1 heure de la fabrication en fonction de la densité initiale.
Residual stress (perpendicular to the layers), function of the initial density at 1 hour.

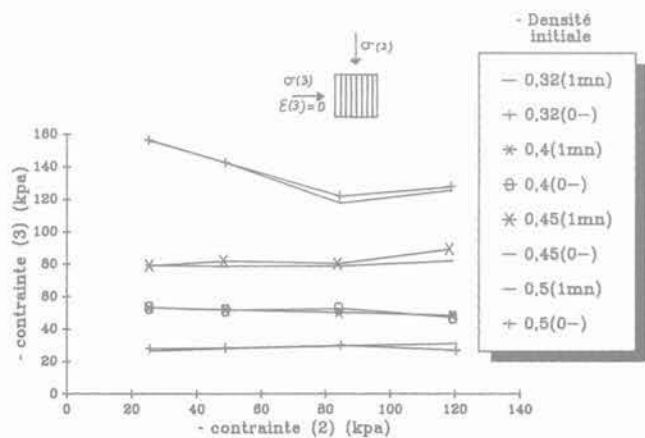


FIG. 12 Variation de la contrainte σ_3 en fonction de σ_2 pour un essai à $\epsilon_3 = 0$, juste avant le chargement 0- et à 1 minute du chargement (1 mn).
Stress (σ_3) variation at $\epsilon_3 = 0$.

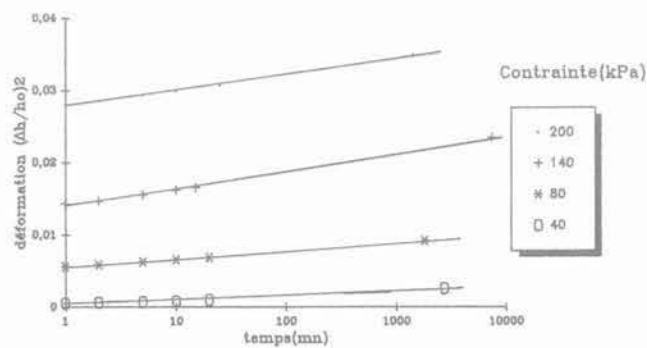


FIG. 13 Courbe de fluage (parallèle aux couches).
Chargement par palier (densité initiale : 0,444).
Creep curves (parallèle to the layers). Loading by steps (initial density : 0,444).

Formulations analytiques des résultats expérimentaux

3.1

Problématique

Avant d'attaquer la modélisation théorique, il est nécessaire de s'arrêter un peu devant la réalité physique du matériau. Sans aucun doute, il est hétérogène. Globalement, on est en présence d'un mélange biphasique dont les composantes sont l'air et les feuilles de plastique. Leur proportion varie en fonction de la densité initiale. De plus, la phase solide (plastique) est fortement anisotrope (feuilles).

Comme première approximation, on considère que la phase solide est constituée, en grande proportion, de feuilles de polyéthylène de basse densité (0,94). Le milieu est assimilable à un milieu alvéolaire de cellules ouvertes ou fermées. On s'approche de plus en plus d'un état de cellules fermées avec la croissance de la densité.

Dans le domaine envisageable de contrainte (0 – 200 kPa), la déformation propre des feuilles de plastique est négligeable devant celle du matériau biphasique : plastique + air. Ces résultats sont confirmés par un essai sur un bloc de polyéthylène de densité 0,94. Le comportement est donc essentiellement géré par la variation du volume de la phase gazeuse (air), soit par compressibilité, soit par expulsion.

3.2

Homogénéisation

L'assimilation d'un milieu hétérogène à un milieu homogène équivalent est le seul moyen qui permette d'appliquer les principes de la mécanique des milieux continus. Cette démarche est limitée par un certain nombre de conditions (Huet, 1980). En partant de l'hypothèse de l'adhérence parfaite (i.e. pas de glissement ou de décollement entre les différents constituants) (Mandel, 1978), on exige que l'élément de volume représentatif soit assez grand pour que soit gommée l'influence des détails microscopiques. L'approche stochastique est adoptée. La moyenne spatiale de chaque variable est calculée en fonction de quantités qui sont imposées ou qui peuvent être mesurées au contour. En opérant sur un ensemble d'éprouvettes, la moyenne stochastique $\langle \bar{\phi} \rangle$ des moyennes spatiales $\langle \phi \rangle$ est déterminée (Huet, 1980). La solution obtenue est à considérer comme une première approximation. Ensuite, les principes de la mécanique des milieux continus sont appliqués sur le milieu équivalent qui est un milieu orthotrope de révolution (Fig. 14).

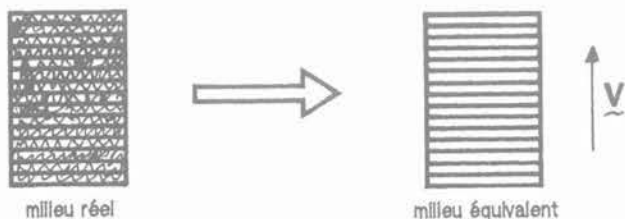


FIG. 14 Milieu réel – Milieu équivalent.
Real material. Equivalent material.

En élasticité linéaire, un tel milieu est caractérisé par cinq paramètres (Lemaître et Chaboche, 1988). Par extension de cette notion sur un milieu viscoélastique non linéaire, on aura cinq fonctions à identifier.

3.3

Essais de fluage (perpendiculairement aux couches)

La courbe de fluage est de la forme :

$$\Delta h/h_0 = (\Delta h/h_0)_i + A p \cdot \ln(t/t_0) \quad \text{avec } t_0 = 1 \text{ minute.}$$

Nous identifions chacun des deux termes de ce développement.

3.3.1

Identification de $(\Delta h/h_0)_i$ (déformation à 1 minute)

Pour des raisons pratiques, $(\Delta h/h_0)_i$ « instantané » a été mesuré à 1 minute. Une formulation analytique permettant une description approchée des résultats d'essais sur blocs a déjà été proposée (El Ghoche, Coulet, Daudon, 1992). Dans le présent travail, on s'intéresse seulement aux essais réalisés sur échantillons pour lesquels le prégonflement a été éliminé. En supposant que la déformation latérale est négligeable, on peut relier $(\Delta h/h_0)_i$ à la densité initiale par l'expression :

$$(\Delta h/h_0)_{1\text{min}} = (1 - d_0/d_1)$$

d_0 : densité initiale

d_1 : densité à 1 minute.

La courbe traduisant l'évolution de la densité à 1 minute en fonction de la contrainte appliquée est définie par les trois paramètres α , d_0 , d_p définis sur la figure 15.

On propose la formulation analytique suivante :

$$d_1 = (-A)/[\sigma/Pa] + B + d_p$$

A, B : deux paramètres qui dépendent de d_0

$$B = (d_p - d_0)/\text{tg}\alpha$$

$$A = B^2 \text{tg}\alpha$$

d_0 : densité initiale

d_p : densité propre du plastique supposé incompressible

σ : contrainte

Pa : pression atmosphérique.

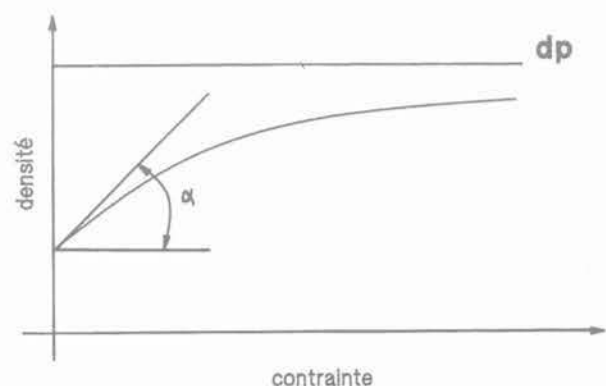


FIG. 15 Variation de la densité à 1 minute en fonction de la contrainte.
Density at 1 minute variation.

L'ensemble des courbes à 1 minute, établies pour différentes densités, permet de proposer l'approximation analytique suivante :

$$\alpha(\text{rd}) = (d_p - d_o) / [(d_o)^n + (2d_p/\pi)]$$

n est déterminé après avoir lissé les valeurs expérimentales :

$$n = -19,28 d_o + 4,73$$

3.3.2

Identification de A_p

Cette pente est une fonction de la contrainte et de la densité initiale. On suppose que :

$$A_p = f(d_o) * g(\sigma)$$

En analysant les courbes expérimentales, on considère les deux formes analytiques suivantes :

$$f(d_o) = (d_p - d_o) / d_o$$

$$g(\sigma) = [(\sigma/Pa) + 1]^m - 1$$

m, paramètre dépendant de d_o , est identifié expérimentalement :

$$d_o \leq 0,5 ; m = -0,048 d_o + 0,025$$

$$d_o > 0,5 ; m = -0,0011 d_o + 0,0011 \text{ (par extrapolation).}$$

En calculant la déformation à 1s et en supposant que la courbe de fluage est assimilable à une parabole au voisinage du zéro, la déformation instantanée est la suivante :

$$(\Delta h/h_o)_i = (\Delta h/h_o)_{1\text{min}} - A_p * \ln(c)$$

c : paramètre dépendant de l'origine du temps.

Le rapport $\alpha_3 = -(\epsilon_{22}/\epsilon_{33}) = -(\epsilon_{11}/\epsilon_{33})$ a été calculé sur l'ensemble des essais effectués. Il ne change pas ni en fonction de la densité initiale, ni avec la contrainte appliquée. Sa valeur moyenne est de l'ordre de 0,068 avec un écart type de 0,028.

3.4

Essais biaxiaux

La contrainte initiale $\sigma_{0,3}$ (perpendiculaire aux couches), mesurée à une heure environ de la fabrication, varie exponentiellement en fonction de la densité initiale (Fig. 11). Le lissage des résultats expérimentaux conduit à :

$$\sigma_{0,3} = 14,5xPa (d_o)^{3,6}$$

σ : contrainte

Pa : pression atmosphérique.

La variation de la contrainte σ_3 (perpendiculaire aux couches) en fonction de σ_2 (parallèle aux couches) et du temps est du même ordre que l'incertitude de la mesure. Donc σ_3 est supposé constant. La déformation dans la même direction est négligeable (déformation de l'anneau).

A σ_2 constant, la déformation $(\Delta h_2/h_{0,2})$, parallèlement aux couches, varie linéairement en fonction du logarithme du temps (Fig. 13).

$$(\Delta h_2/h_{0,2}) = (\Delta h_2/h_{0,2})_{1\text{min}} + Pn * \ln(t/t_o), \quad t_o = 1 \text{ minute.}$$

$$(\Delta h_2/h_{0,2})_{1\text{min}} = ((d_p - d_o) / [(d_o)^k]) \sigma_{22}$$

$$k = -19,61 d_o + 4,66$$

$$Pn = ((d_p - d_o) / [(d_o)^l]) \sigma_{22}$$

$$l = -29,11 d_o + 6,11$$

La déformation instantanée est calculée en supposant qu'au voisinage du zéro, la forme analytique est une parabole. Alors :

$$(\Delta h_2/h_{0,2})_i = ((d_p - d_o) / [(1/d_o^k) - (1/d_o^l)]) \ln(c) \sigma_{22}$$

c : paramètre dépendant de l'origine du temps ;

et par conséquent :

$$(\Delta h_2/h_{0,2}) = (\Delta h_2/h_{0,2})_i + Pn * \ln(t/t_o)$$

$t_o = 1$ minute.

Le rapport $\alpha_2 = -(\epsilon_{11}/\epsilon_{22})$ a été calculé sur l'ensemble des essais. Sa valeur moyenne est de l'ordre de 0,039 avec un écart type de 0,017. Aucune variation claire et significative de ce paramètre n'a pu être dégagée.

4

Modèle rhéologique

Les essais de compréhension réalisés et l'analyse de l'état physique nous ont conduits à identifier le comportement de ce matériau qui est :

- anisotrope (orthotrope de révolution) ;
- alvéolaire à cellules fermées ou ouvertes ;
- viscoélastoplastique ;
- non linéaire par rapport à la contrainte perpendiculaire aux couches (σ_3) ;
- influencé fortement par la densité initiale.

La réalité physique est très complexe. Le matériau en plus de son hétérogénéité, fait l'objet de phénomènes rhéologiques très difficiles à modéliser (vieillessement, écrouissage...).

Bien que le comportement d'un matériau alvéolaire soit la surposition de deux comportements élémentaires (gaz + structure polymère ouverte) nous adoptons cependant une approche globale pour modéliser celui de notre matériau.

L'élaboration d'un modèle complet qui tient compte de tous les phénomènes observés est très difficile. La modélisation a pu être initiée en admettant quelques hypothèses simplificatrices. Le modèle proposé est viscoélastoplastique non linéaire et non vieillissant en petites déformations. Il schématise le comportement pour un premier chargement et est paramétré par la densité initiale.

Les variables à intégrer sont :

- temps ;
- tenseur des contraintes ;
- tenseur vitesse de contraintes ;
- tenseur des déformations ;
- tenseur vitesse de déformations ;
- seuil élastique.

La représentation mathématique est la suivante :

$$f(\underline{\sigma}, \underline{\dot{\sigma}}, \underline{\epsilon}, \underline{\dot{\epsilon}}, \underline{D}) = 0$$

$\underline{\sigma}$: tenseur des contraintes

$\underline{\dot{\sigma}}$: tenseur vitesse de contraintes

$\underline{\epsilon}$: tenseur des déformations

$\underline{\dot{\epsilon}}$: tenseur vitesse de déformations

\underline{D} : tenseur du 4^e ordre qui contient les variables d'état.

A partir de cette formulation générale et en respectant les hypothèses déjà fixées, la modélisation porte sur deux cas simplifiés par rapport à la réalité.

Modèle unidirectionnel général (solicitation perpendiculaire aux couches)

Le comportement unidirectionnel suivant cette direction est décrit par le modèle suivant :

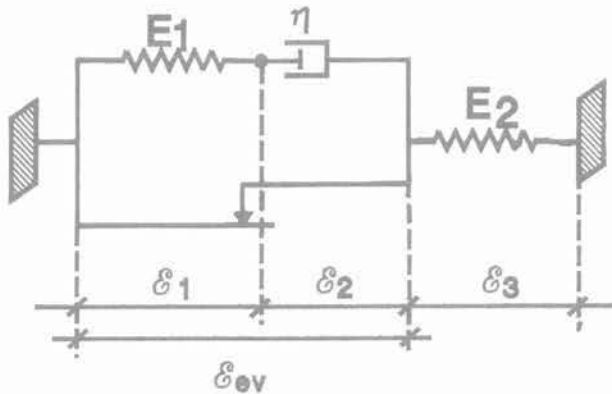


FIG. 16 Modèle rhéologique.

E_2 représente le comportement élastique linéaire dû à la compression de la phase gazeuse et à la déformation des parois de cellules (Hillyard, 1982). Le seuil élastique (σ_e) correspond à une déformation de 0,02 quelle que soit la densité initiale. Dans le domaine envisageable de la densité initiale (0,3 - 0,6), σ_e peut être décrit par la relation linéaire suivante :

$$(\sigma_e / \text{Pa}) = 4,49 d_o - 1,06$$

P_a : pression atmosphérique.

Le module d'Young, E_{2e} , est égal à ($\sigma_e / 0,02$)

Au-delà de ce seuil, la phase viscoélastique est activée. Le comportement sera représenté par le modèle de Maxwell de caractéristiques E_1 et η . La non-linéarité est prise en compte par les formes non linéaires de E_1 et η .

Dans un état constant de contraintes :

$$\epsilon_1 = 1 - [d_o(\sigma^* + B)] / [d_p(\sigma^* + B) - A] - [(d_p - d_o) / d_o] \frac{[(\sigma^* + 1)^m - 1] \ln(c)}{c}$$

$$\epsilon_2 = \sigma^* / \eta$$

$$\epsilon_{ve} = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

$$\sigma^* = \sigma P_a$$

P_a : pression atmosphérique.

Pour rejoindre la forme logarithmique de la fonction de fluage, la viscosité a été considérée comme dépendante de la déformation ϵ_2 , elle peut être représentée par :

$$\eta = [(d_p - d_o) / d_o] \{ (\sigma^* + 1)^m - 1 \} \text{EXP} \left\{ \epsilon_2 \frac{[d_o / (d_p - d_o)] \{ (\sigma^* + 1)^m - 1 \}}{[(\sigma^* + 1)^m - 1] \ln(t/t_o)} \right\} / \sigma_{33}^*$$

Toute analyse faite, le comportement viscoélastique sera décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\epsilon_{ve} = [d_o A / [d_p(\sigma^* + B) - A]^2 - m [(d_p - d_o) / d_o] (\sigma^* + 1)^m - 1] \ln(240) \dot{\sigma}^* + [(d_p - d_o) / d_o] \{ (\sigma^* + 1)^m - 1 \} \text{EXP}(-P/Q)$$

$$P = \epsilon_{ve} - 1 + [d_o(\sigma^* + B)] / [d_p(\sigma^* + B) - A] + [(d_p - d_o) / d_o] \frac{[(\sigma^* + 1)^m - 1] \ln(c)}{c}$$

$$Q = [(d_p - d_o) / d_o] \{ (\sigma^* + 1)^m - 1 \}$$

La validation a été faite par deux types d'essais. Essais de fluage à contraintes imposées par palier et essais à vitesses de déformation constantes. La résolution numérique de l'équation différentielle par la méthode de Runge-Kuta d'ordre 4 a permis de comparer les résultats théoriques et expérimentaux (Fig. 17a,b,c) (Fig. 18a,b).

Les résultats sont satisfaisants. L'écart entre la théorie et la réalité est dû principalement à l'incertitude sur la densité initiale et l'hétérogénéité du matériau. Il faut noter que le modèle ne prend pas en compte l'écroutissement dû à l'évolution de la densité au cours de la sollicitation, ni l'effet des grandes déformations.

4.2

Modèle tridimensionnel pour une sollicitation constante en contrainte

Les hypothèses de l'orthotropie de révolution et de petites déformations sont maintenues. La relation contrainte-déformation, pour un état constant de contraintes, est représentée par :

$$\begin{array}{l} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \end{array} = \begin{array}{cccccc} f_1 & f_{12} & f_{13} & 0 & 0 & 0 \\ f_{12} & f_1 & f_{13} & 0 & 0 & 0 \\ f_{13} & f_{13} & f_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_1 - f_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 \end{array} \begin{array}{l} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{array}$$

$f_1, f_{12}, f_{13}, f_3, f_4$ sont cinq fonctions à identifier.

Le rôle de σ_{33} (perpendiculaire aux couches) qui pilote la non-linéarité est primordial. Une linéarisation en fonction des autres contraintes (σ_{11}, σ_{22}) (parallèles aux couches) est adoptée avec une précision assez acceptable.

4.3

Identification

4.3.1

$$f_1, f_{12}, f_{13}, f_3$$

L'essai de compression simple à contrainte constante ($0, 0, \sigma_{33}$) conduit à :

$$\epsilon_{11} = f_{13} \sigma_{33}$$

$$\epsilon_{22} = f_{13} \sigma_{33}$$

$$\epsilon_{33} = f_3 \sigma_{33}$$

En utilisant la formulation analytique définie dans le paragraphe 3 on aboutit à :

$$f_3 = \frac{(1 - [d_o(\sigma_{33}^* + B)] / [d_p(\sigma_{33}^* + B) - A] + [(d_p - d_o) / d_o] \{ (\sigma_{33}^* + 1)^m - 1 \} \ln(t/t_o)}{[(\sigma_{33}^* + 1)^m - 1] \ln(t/t_o)} / \sigma_{33}^*$$

$$f_{13} = \epsilon_{22} / \sigma_{33} = (\epsilon_{22} / \epsilon_{33}) (\epsilon_{33} / \sigma_{33}) = \alpha_3 f_3$$

Une analyse directe de l'essai biaxial :

$$(0, \sigma_{22}, \sigma_{33}) \Rightarrow (\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, 0)$$

conduit à :

$$f_1 = (d_p - d_o) \{ 1 / [(d_o)^k] + [1 / (d_o)^l] \ln(t/t_o) \} + (\alpha_3)^2 f_3$$

$$f_{12} = \alpha_1 f_1$$

$(\alpha_3)^2 f_3$ est négligeable devant les autres termes.

$$\sigma_{33}^* = \sigma_{33}/Pa$$

Pa : pression atmosphérique ;

$t_0 = 240$ secondes.

4.3.2

Identification de f_4

Dans le cas de l'élasticité linéaire, f_4 est l'inverse du module du cisaillement ($f_4 = (2 * G_{13})^{-1}$) que l'on peut mesurer par un essai de distorsion. En l'absence de cet essai, nous avons tenté de l'approcher, en supposant que le matériau est isotrope. Selon les caractéristiques dans la direction perpendiculaire aux couches, on trouve que :

$$f_4 = f_3 (1 - \alpha_3)$$

En adoptant les caractéristiques dans la direction parallèle aux couches :

$$f_4' = (d_p - d_o) ([1/(d_o)^k] + [1/(d_o)^j] \ln(t/t_0)) (1 - \alpha_1)$$

Le rapport f_4'/f_4 est de l'ordre de 1,9.

La valeur de f_4 adoptée est la moyenne de ces deux cas extrêmes :

$$f_4 = [f_3(1 - \alpha_3) + R(1 - \alpha_1)]/2$$

$$R = (d_p - d_o) ([1/(d_o)^k] + [1/(d_o)^j] \ln(t/t_0))$$

Compte tenu de la valeur approchée de f_4 , on peut négliger α_1 et α_3 . Donc f_4 sera :

$$f_4 = (f_3 + R)/2$$

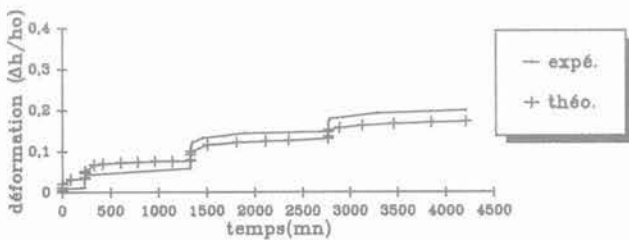


FIG. 17a Densité initiale : 0,38.
Initial density : 0.38.

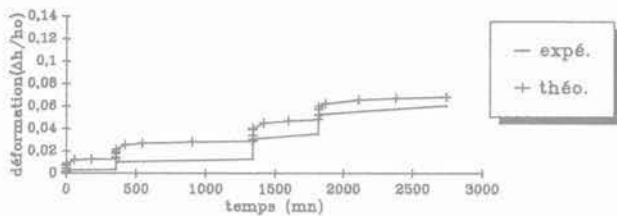


FIG. 17b Densité initiale : 0,46.
Initial density : 0.46.

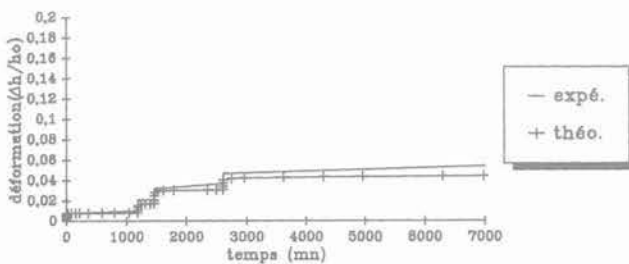


FIG. 17c Densité initiale : 0,49.
Initial density : 0.49.

FIG. 17a-b-c Fluage par palier. Courbes expérimentales et théoriques.
Creep loading by steps. Experimental and theoretical curves.

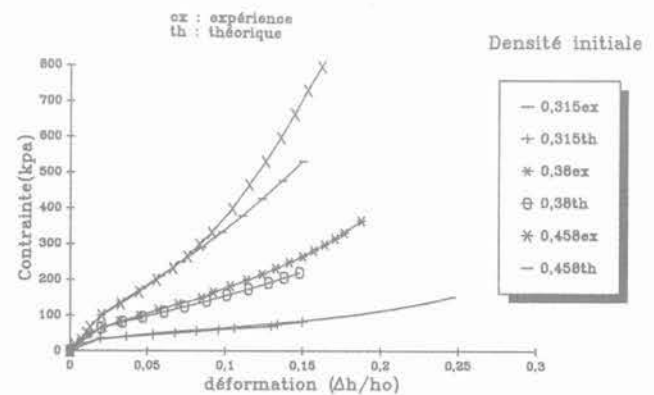


FIG. 18a Vitesse de déformation : 0,018 min⁻¹.
Deformation velocity : 0.018 min⁻¹.

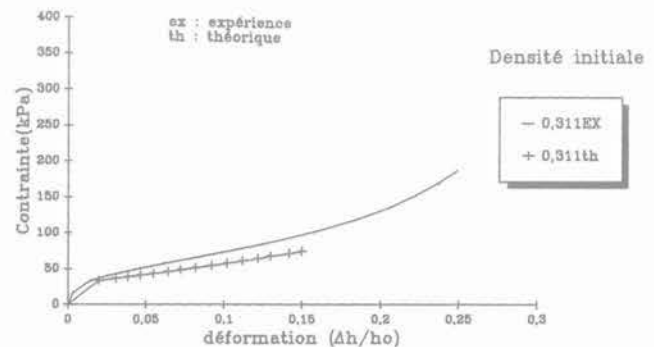


FIG. 18b Vitesse de déformation : 0,006 min⁻¹.
Deformation velocity : 0.006 min⁻¹.

FIG. 18a-b Contraintes-déformation à vitesse de déformation constante. Courbes expérimentales et théoriques.
Stress strain with constant deformation velocity. Experimental and theoretical curves.

Conclusion

L'étude expérimentale a permis de montrer la validité du procédé proposé. Elle a permis, en outre, de mettre en évidence le comportement des blocs qui est :

- fortement dépendant de la densité initiale ;
- orthotrope de révolution ;
- non linéaire en fonction de la contrainte σ_3 perpendiculairement aux couches ;
- fortement visqueux.

L'essentiel du comportement ainsi mis en évidence a pu être modélisé de façon correcte par la théorie proposée.

Ce modèle, élaboré dans le cadre des petites déformations, ne tient pas compte de l'évolution de la densité

en cours de sollicitation. Une amélioration de ce modèle pour lever ces deux limitations est en cours d'étude.

La densité initiale, un bon critère d'évaluation, sera fixée en fonction de l'environnement mécanique. Empêcher le gonflement initial lors de la fabrication est indispensable afin de garder de bonnes caractéristiques mécaniques.

Une étude statistique plus approfondie tant sur la composition du gisement de déchets plastiques que sur les caractéristiques dimensionnelles des blocs sera nécessaire pour bien cerner et définir la fourchette de précision sur les paramètres caractéristiques et pour bien compléter la démarche stochastique adoptée.

Enfin, un chantier a été envisagé, il ouvrira une nouvelle perspective qui permettra de suivre le comportement réel d'un massif de blocs et de valider le modèle tridimensionnel.

Bibliographie

- Daudon D., El Ghoche H., Coulet C. - Plastic Waste Low-Weight Embankments for Pavements Construction on Soft Soil, GEO-COAST' 91, International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Theory and Practice, Yokohama, Japon, sept. 1991.
- El Ghoche H. - Expérimentation et modélisation de blocs compressibles de matières plastiques pour des remblais allégés. Détermination d'une loi de comportement orthotrope de révolution viscoélastique non linéaire, Thèse de Doctorat, Université Claude-Bernard, Lyon 1, décembre 1992.
- El Ghoche H., Coulet C., Daudon D. - Plastic Waste for Low-Weight Embankments, Conference of the ASCE, Grouting Soil Improvement and Geosynthetics, New Orleans, USA, Feb. 1992.
- Hilyard N.C. - Mechanics of Cellular Plastics, Macmillan ed., 1982.
- Huet C. - Remarque sur la procédure d'assimilation d'un matériau hétérogène à un matériau continu équivalent, CR 15^e Coll. GFR. Comportements rhéologiques et Structure des matériaux, Paris, 1980.
- Lemaître J., Chaboche J.-L. - « Élasticité, Thermoélasticité, Viscoélasticité linéaire », Mécanique des matériaux solides (chap. 4), Paris, Dunod, 2^e éd. 1988, pp. 123-162.
- Mandel J., « Chargements à plusieurs paramètres - Comportement Linéaire », Propriétés mécaniques des matériaux - Rhéologie - Plasticité (chap. IV), Eyrolles, Paris, 1978, pp. 45-58.