

Caractérisation de l'anisotropie induite par le chargement d'un matériau agrégataire

G. PLASSART^a, D. PICART^a,
M. GRATTON^b, A. FRACHON^b, M. CALIEZ^b

a. CEA DAM Le Ripault, gaetane.plassart@cea.fr, didier.picart@cea.fr

b. Laboratoire Gabriel LaMé, INSA Centre-Val-de-Loire, michel.gratton@insa-cvl.fr,
arnaud.frachon@insa-cvl.fr, michael.caliez@insa-cvl.fr

Résumé

Les outils numériques modernes nous offrent la possibilité de simuler les conditions de vie d'une structure pyrotechnique, mais cela nécessite d'établir au préalable une loi de comportement de la composition explosive. La complexité de ce travail va de pair avec la complexité du comportement mécanique du matériau étudié.

Le matériau étudié ici est un explosif composé de grains de TATB agglomérés avec un faible pourcentage de liant. Un procédé de compression isostatique à haute température permet d'éliminer pratiquement toute porosité résiduelle. Il en résulte un matériau agrégataire quasi-fragile avec une structure polycristalline dont la taille caractéristique est de l'ordre de 50 μm . Les cristaux de TATB sont fortement anisotropes mais du fait de leur orientation aléatoire, le matériau est initialement isotrope à l'échelle macroscopique.

Une campagne expérimentale de compressions simples a mis en évidence l'anisotropie induite par le chargement. D'après la littérature, il existe deux causes probables à cette anisotropie. La première est un endommagement se développant dans des directions privilégiées. On peut citer les travaux de thèse de Gotuwka en 1999 [1][2] sur les bétons ou l'étude d'un autre matériau énergétique agrégataire menée par Benelfellah [3][4] en 2013. La seconde cause possible de l'anisotropie induite est une plasticité à écrouissage cinématique, mise en évidence pour du sable d'Hostun par Cambou et Lanier en 1988 [5].

Afin de caractériser l'origine de l'anisotropie induite par le chargement de notre matériau, nous avons réalisé quatre campagnes expérimentales inspirées de ces auteurs : des compressions monotones sous différentes pressions de confinement, des compressions cyclées, des chargements alternés (traction/compression et compression/traction) ainsi que des compressions d'échantillons fortement pré-sollicités. Ces essais nous ont permis d'écarter la théorie d'un endommagement anisotrope au profit d'un écoulement plastique à écrouissage cinématique.

Abstract

Modern numerical tools enable simulating operational life conditions of pyrotechnic structures but an improved and accurate mechanical constitutive law of the explosive composition is required. The

main difficulty comes from the complexity of the behaviour of such a material made of a high solid fraction of grains mixed with a polymeric binder.

The material of interest is a TATB-base PBX (plastic-bonded explosive) made TATB grains mixed with a low percentage of a binder. The isostatic compaction process eliminates most of the initial porosity, resulting in a quasi-brittle material with a polycrystalline microstructure of characteristic size around 50 μm . TATB crystals are strongly anisotropic but their random orientation makes the material initially isotropic on a macroscopic scale.

Some simple compressive tests have highlighted the anisotropy induced by the loading. According to the literature, this induced anisotropy may have two origins. The first one could be due to the damage along some preferred directions. In 1999, Gotuwka [1][2] demonstrated this phenomenon on concrete, and, more recently, Benelfellah [3][4] shown it for a HMX-based PBX. The second assumption is a kinematic hardening plasticity highlighted for a Hostun sand by Cambou and Lanier in 1988 [5].

Inspired by these authors, four experimental tests have been done to characterize the strain-induced anisotropy of our material: monotonic compressive tests under various triaxial pressures, compressive cyclic loadings, alternated tensile/compressive tests and compression of highly pre-loaded specimens. The results obtained drive us to dismiss the anisotropic damage theory for a plasticity theory with kinematic hardening.

Mots clefs : Anisotropie induite, endommagement, écrouissage cinématique, mécanique expérimentale.

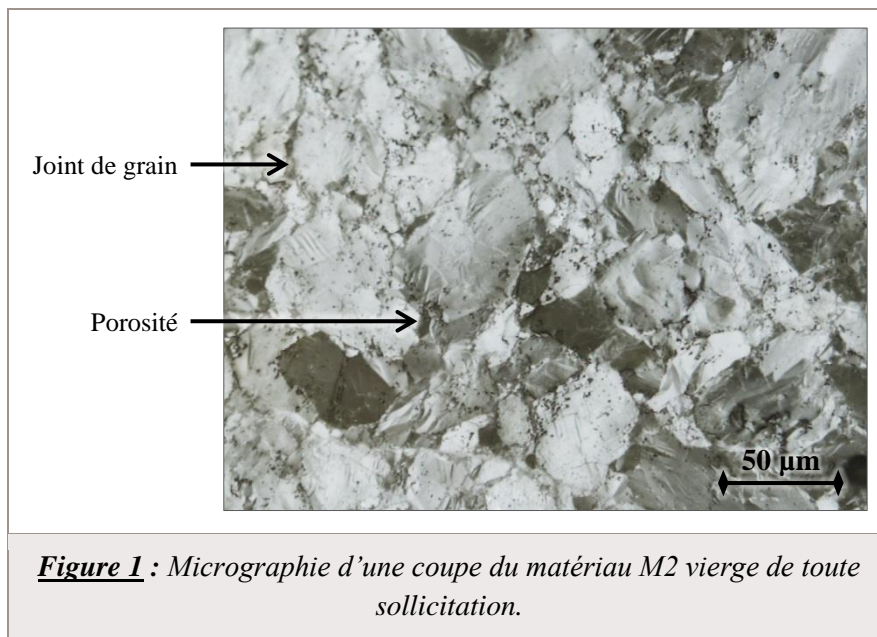
1 Introduction

L'étude présentée dans ce document a été menée dans le but d'établir la loi de comportement d'une des compositions du CEA. Le matériau en question est appelé « M2 » dans ce qui suit.

M2 est un matériau énergétique composé majoritairement de grains de TATB (diamètre moyen $\sim 50 \mu\text{m}$) faiblement dispersés. Lors de la fabrication du matériau, les cristaux d'explosifs sont enrobés d'une fine couche de liant thermoplastique. Un procédé de granulation permet d'obtenir des « métagrains » de taille millimétrique. Afin de donner de la cohésion au matériau, les granulés d'enrobés sont placés dans une poche élastomère hermétique. La poche, mise sous vide, subit plusieurs cycles de compression hydrostatique à une température permettant de ramollir le liant. La pression appliquée est beaucoup plus importante que la pression que peut subir le matériau en service. Après refroidissement, on obtient un matériau cohérent, prêt à être usiné pour sa mise en forme. La porosité résiduelle est de l'ordre de quelques pourcents.

Le cristal de TATB est fortement anisotrope. On notera à ce propos que les variations de teinte observées sur la [figure 1](#) sont dues à cette anisotropie. Toutefois, l'orientation des grains ainsi que la localisation du liant étant aléatoire, le matériau est initialement isotrope à l'échelle macroscopique.

Du point de vue thermomécanique, des essais de caractérisation en compression, traction et compression confinée, ainsi qu'une campagne DMA (spectrométrie dynamique) ont montré que M2 est un matériau viscoélastique sensible à la température, à la pression de confinement et à la vitesse de sollicitation. De plus, M2 subit des déformations irréversibles lors d'un chargement de compression.



Un premier modèle de comportement du matériau M2 a été mis au point il y a quelques années par le CEA et le laboratoire Gabriel LaMé. Cette loi comprend un modèle de viscoélasticité de type Kelvin-Voigt généralisé couplé à un endommagement isotrope et à une viscoplasticité à écrouissage isotrope dont le seuil de plasticité est fonction du confinement. La rupture (considérée par le CEA comme correspondant à la contrainte maximale appliquée) est traitée de manière découplée par deux fonctions : l'une relie la plus grande déformation principale positive à la pression et l'autre est basée sur la plus grande contrainte effective principale positive.

Les paramètres de ce modèle ont été déterminés à partir de mesures DMA et d'essais de compressions simples cyclées à 20°C et 50°C sous pression atmosphérique et sous confinement de 10 MPa à 20°C.

Les comparaisons modèle/expériences montrent que le modèle sous-estime les déformations transversales. Contrairement à ce que décrit le modèle, le rapport des déformations longitudinales et transversales de M2 n'est pas constant au cours de l'essai. On observe donc une anisotropie se développer au cours du chargement.

Le but de cette étude est d'établir une loi de comportement plus fine du matériau M2, avec pour principal objectif de caractériser l'anisotropie induite par le chargement.

2 Caractérisation de l'anisotropie induite de différents matériaux agrégataires

Le matériau M2, par sa microstructure et son comportement quasi-fragile, peut être comparé à des bétons ou à des géomatériaux. La littérature fait état de plusieurs campagnes expérimentales mettant en évidence l'anisotropie induite par le chargement de ces types de matériaux.

Mazars, Berthaud et Ramtani [6] ont effectués au début des années 90 des essais de chargement alterné, traction puis compression, sur un matériau quasi-fragile de type béton. Ils ont observé une reprise de raideur du matériau lors du passage en compression. Ce phénomène, appelé effet unilatéral, est interprété en considérant un réseau de fissures dans le matériau. Lorsque ces fissures s'ouvrent en

traction puis se développent, le matériau subit une perte de raideur, d'où une dégradation des modules élastiques. A l'inverse, lorsque les fissures sont comprimées elles se referment, le matériau gagne donc en rigidité. C'est la reprise de raideur observée par *Mazars* et ses collaborateurs. Ainsi, selon son orientation par rapport à la direction de sollicitation, une fissure n'aura pas la même influence sur le comportement du matériau. Cela implique une anisotropie induite par le chargement, conséquence de l'endommagement du matériau.

Les travaux de thèse de *Gotuwka* [1] ont porté sur la caractérisation du comportement mécanique de trois bétons : un béton ordinaire, un béton à hautes performances et un béton à très hautes performances. Pour cela, il a entre autres réalisé des essais de compression cyclée. Chaque cycle de compression comporte trois étapes : charge, relaxation et décharge partielle sur 40 MPa. Le module sécant entre les fins de relaxation et de décharge est considéré comme module élastique apparent. L'auteur compare l'évolution de ces grandeurs au cours d'un essai et constate que la dégradation du module longitudinal est faible par rapport à la dégradation transversale. Une anisotropie s'exprime donc sur les modules élastiques. *Gotuwka* conclut à un endommagement anisotrope des bétons : la fissuration se développe préférentiellement dans la direction normale à la direction de sollicitation.

Dans les années 1970-1990, beaucoup d'efforts ont été produits pour caractériser finement les géomatériaux, notamment en France à l'Institut de Mécanique de Grenoble. On peut citer en particulier les travaux de *Cambou*, *Lanier* et leurs collaborateurs sur l'anisotropie induite du sable d'Hostun dense [5] et lâche [7]. Pour ces deux types de sables, ils mettent en évidence l'anisotropie induite par le chargement en réalisant deux chargements successifs avec décharge intermédiaire. Chaque éprouvette subit une même compression initiale, seule la direction du second chargement est différente à chaque essai. Le but est d'observer l'influence du premier chargement sur le second. A partir de ces essais, les auteurs constatent que la compression initiale a rendu l'éprouvette plus rigide dans la direction initialement comprimée, avec toutefois un pied-de-courbe identique, tandis que les directions ayant subi une expansion initiale sont plus ductiles (très faible pied-de-courbe en commun). Selon eux, cette anisotropie induite par le chargement du sable peut se modéliser par un modèle élastoplastique à écrouissage cinématique.

Le matériau M1 est un matériau énergétique du CEA, composé majoritairement de grains de HMX et d'un liant thermodurcissable. Le procédé de mise en forme de M1 étant semblable à celui de M2, ces deux matériaux sont morphologiquement proches. *Le* [8][9] a caractérisé M1 dans le domaine quasi-statique. En analysant les essais réalisés sur ce matériau, il constate que le rapport des déformations élastiques n'est pas constant au cours du chargement et que la dégradation du module transversal est plus importante que celle du module longitudinal. Il émet l'hypothèse d'un endommagement fortement anisotrope.

Prenant la suite des travaux de *Le*, *Benelfellah* [3][4] démontre l'anisotropie induite de M1 en comparant la dégradation des modules sécants (supposés élastiques) longitudinal et transversal en compressions cyclées. Il met également en évidence l'effet unilatéral engendré par l'endommagement : lors de chargements alternés traction/compression, le matériau connaît une reprise de raideur en début de compression.

Nous avons pu constater que les résultats expérimentaux pour les bétons, les sables et le matériau énergétique M1 montrent une anisotropie induite par le chargement. En revanche, deux types d'interprétation se distinguent. Pour les bétons et le matériau M1, il s'agirait d'un endommagement anisotrope par microfissuration, tandis que pour les sables, l'anisotropie serait modélisée par un écoulement plastique à écrouissage cinématique. La littérature ne fait pas mention d'un troisième type d'interprétation.

L'objectif de cette étude est de caractériser l'anisotropie induite par le chargement du matériau d'étude et donc de déterminer si ce phénomène peut être interprété comme la conséquence de l'endommagement et/ou de l'écroutissage. Compte tenu du faible niveau de déformation de notre matériau, une analyse optique de la microstructure ne permet pas de valider l'une ou l'autre des hypothèses. Nous avons donc réalisé diverses campagnes expérimentales en nous inspirant de celles décrites ci-dessus.

3 Etude expérimentale de l'anisotropie induite de M2

Afin de mettre en évidence ou non un comportement unilatéral de M2, une campagne expérimentale de chargements alternés, inspirée par les travaux de *Mazars, Berthaud et Ramtani* [6] et de *Benelfellah* [3], a été réalisée. Elle comprend deux types d'essais :

- Compression/traction alternées : compression simple jusqu'à 30 MPa puis traction simple à rupture.
- Traction/compression alternées : traction simple jusqu'à 7 MPa puis compression simple à rupture.

Les éprouvettes utilisées sont des diabolos à base cylindre de diamètre 20 mm et de hauteur 10 mm. Les extrémités de l'éprouvette sont collées aux interfaces d'un montage inverseur. La vitesse de déformation est pilotée par une jauge à 10^{-5} s^{-1} . Quatre jauges assurent la mesure des déformations (deux longitudinales et deux transversales à la direction de sollicitation).

Les courbes obtenues, données figures 2 et 3, ne montrent aucune reprise de raideur au changement de signe de la contrainte. M2 ne semble donc pas subir d'effet unilatéral. Il est toutefois possible qu'il existe une reprise de raideur mais qu'elle soit lissée et donc masquée par la viscosité du matériau. La reprise de raideur serait donc faible à négligeable.

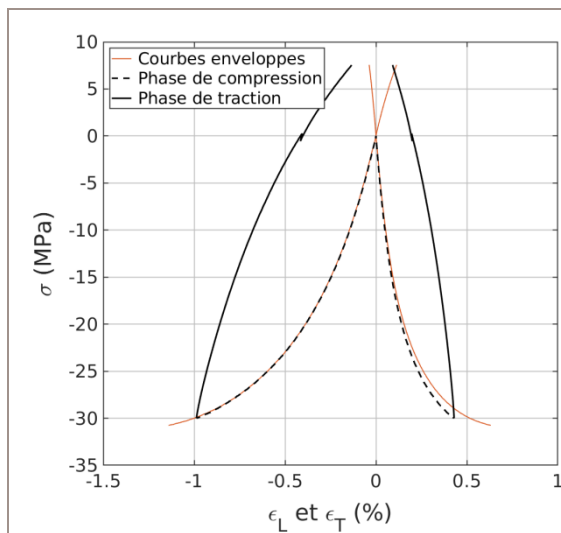


Figure 2 : Essai de compression/traction alternées réalisé sur M2 et comparaison avec les courbes enveloppes.

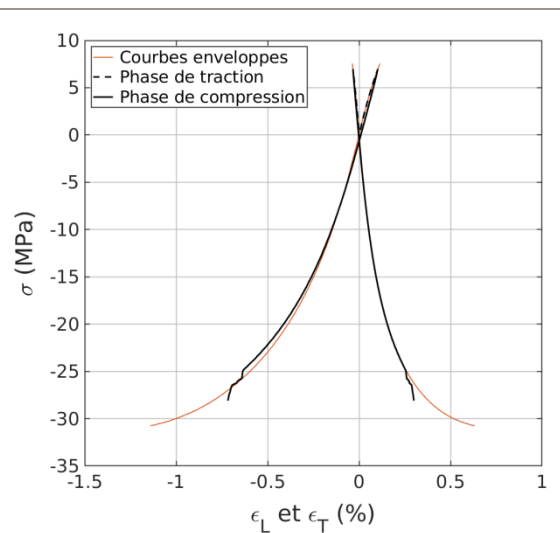


Figure 3 : Essai de traction/compression alternées réalisé sur M2 et comparaison avec les courbes enveloppes.

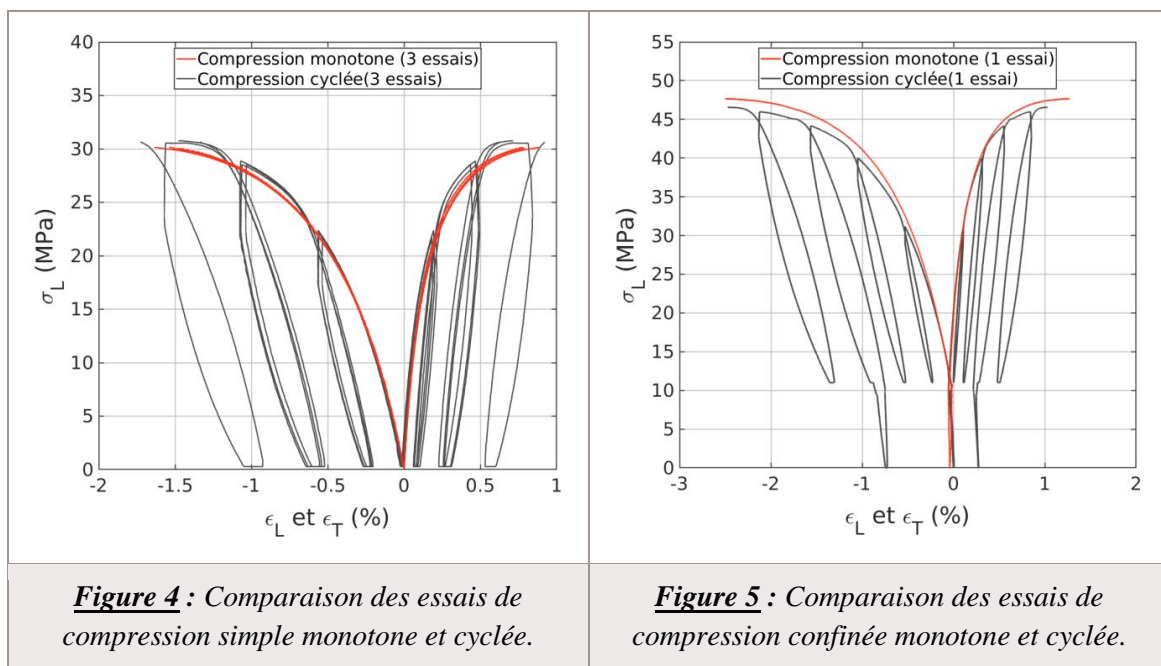
Les essais dits cyclés correspondent à des essais de compression simple (avec ou sans confinement initial) au cours desquels sont réalisés des cycles de chargement. *Benouniche* [10] a réalisé des cycles à trois étapes : charge, décharge, recouvrance. Les cycles réalisés plus tard par *Gotuwka* [1] sont un

peu différents : charge, relaxation et décharge partielle. Le [8] et Benelfellah [3] ont quant à eux réalisés des cycles à quatre étapes : charge, relaxation, décharge, recouvrance. Nous avons choisi de suivre ce dernier mode opératoire, plus complet. Des essais de compression simple cyclée ont ainsi été réalisés à pression atmosphérique et sous 10 MPa de confinement. Les éprouvettes utilisées ici sont des cylindres de 20 mm de diamètre et de 10 mm de haut. Elles sont placées entre deux plateaux de compression sans lubrification. La vitesse de déformation est pilotée par une jauge à 10^{-5} s^{-1} . Deux jauges longitudinales et deux jauges transversales assurent la mesure des déformations.

Les figures 4 et 5 comparent ces essais cyclés aux essais monotones correspondants, réalisés à la même vitesse et sur une même géométrie d'éprouvette. D'après ces graphiques, la courbe de charge globale (appelée courbe enveloppe) des essais cyclés est très proche de la courbe des essais monotones. On considère ainsi que les cycles n'ont pas d'influence sur le comportement en compression de M2.

Effectuer des cycles de chargement permet d'augmenter la quantité d'informations fournies par un essai. L'intérêt des temps de relaxation et de recouvrance est d'annuler les effets visqueux. Ainsi, en fin de recouvrance, on observe le niveau des déformations irréversibles subies par le matériau.

En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de plasticité en décharge, le module sécant calculé entre la fin de la relaxation et la fin de la recouvrance correspond à un module élastique apparent (en vert sur les figures 6 et 7). Les cycles de chargement permettent ainsi a priori d'observer l'évolution des modules élastiques et donc de quantifier l'endommagement du matériau.



Il est également possible d'estimer des modules élastiques apparents tangents. On peut supposer que lors de l'inversion du sens de sollicitation, l'état de contrainte se trouve à l'intérieur de la surface de charge. Ainsi, le comportement d'un matériau en début de charge ou décharge est élastique. On calcule les modules tangents en début de charge apparent (en bleu sur les figures 6 et 7) et de décharge apparent (en rouge sur les figures 6 et 7) par régression linéaire sur une fenêtre de 0,05% de déformation longitudinale.

Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs des modules sécants sur la [figure 6](#) (essai à pression atmosphérique) et sur la [figure 7](#) (essai confiné). Il s'avère que les deux méthodes de calcul donnent des résultats très différents :

- Les modules tangents en début de charge (en bleu) et de décharge (en rouge) sont du même ordre de grandeur, correspondant au module de Young. Ce calcul conduit à penser qu'il n'y a pas d'endommagement.
- Le module sécant (en vert) du premier cycle est du même ordre de grandeur que les modules tangents, mais il décroît progressivement à chaque cycle jusqu'à -50% en fin d'essai. Le calcul des modules sécants conduit donc à penser qu'il y a 50% d'endommagement en fin d'essai.

Ainsi, puisque les deux types de calculs se contredisent, un des deux types de modules n'est pas élastique. Le calcul du module sécant (en vert) fait l'hypothèse des décharges purement viscoélastiques. Le calcul du module tangent (en rouge et en bleu) suppose que lorsque l'on inverse le sens de sollicitation, on rentre dans la surface de charge. Au moins une de ces deux hypothèses est fausse.

Afin de tester l'hypothèse d'élasticité lorsque le sens de la sollicitation s'inverse, il suffit de comparer les modules tangents en début de charge et de décharge. Puisqu'ils sont tous identiques, ils correspondent tous au même mécanisme de déformation. L'hypothèse d'élasticité lorsque le sens de la sollicitation s'inverse est validée.

Cette analyse conduit aux conclusions suivantes :

- Les modules élastiques tangents étant constants, on n'observe pas d'endommagement du matériau M2. En tout cas, s'il y a du dommage, il est très faible et un autre phénomène est prépondérant dans le mécanisme de déformation.
- En conséquence, l'anisotropie induite par le chargement du matériau M2 ne peut pas être causée par l'endommagement.
- Les modules sécants ne sont pas des modules élastiques car ils évoluent. Les décharges ne sont donc pas élastiques, ce qui implique que le type d'écroutissage ne peut pas être purement isotrope.

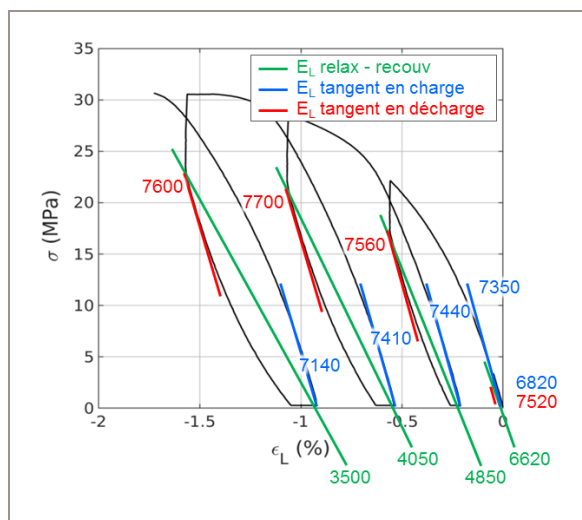


Figure 6 : Modules sécants et tangents longitudinaux en compression cyclée.

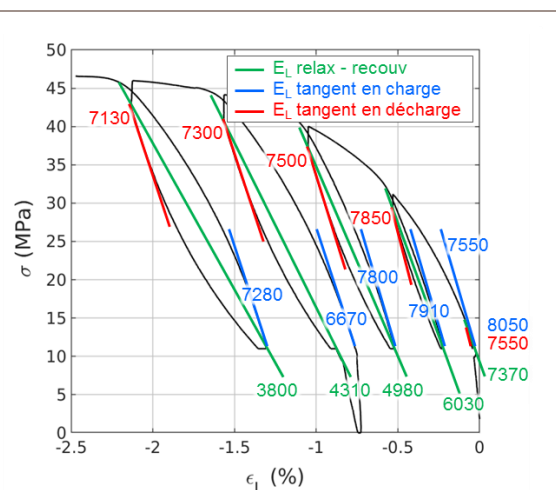


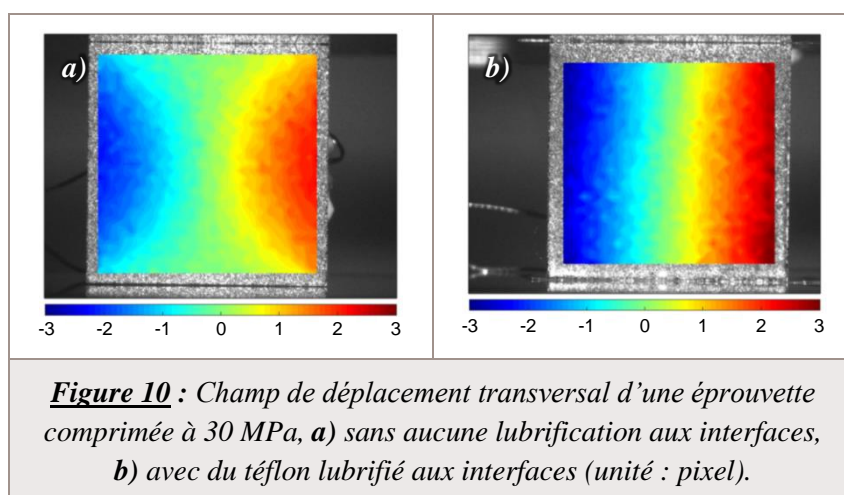
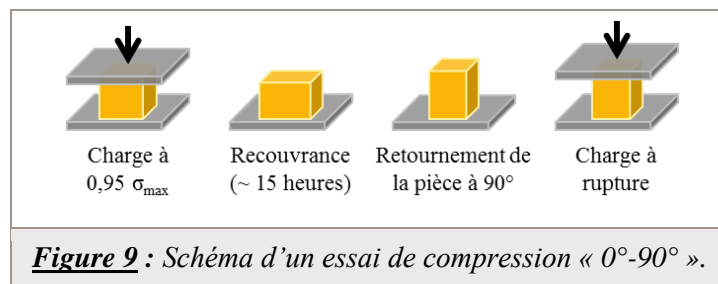
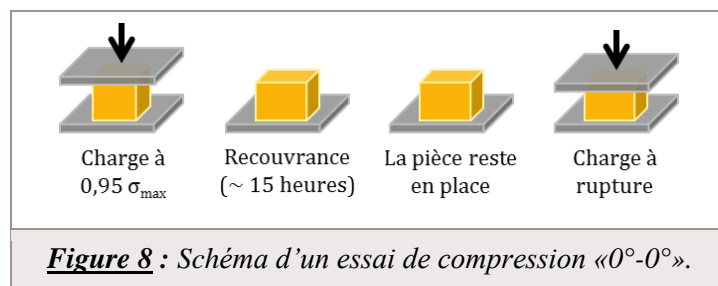
Figure 7 : Modules sécants et tangents longitudinaux en compression cyclée confinée.

Nous venons de démontrer que l'anisotropie induite du matériau M2 n'est pas la conséquence du développement de l'endommagement. Nous avons également conclu que l'écroutissage de M2 n'était

pas purement isotrope puisqu'il y a vraisemblablement de la plasticité en décharge. Ces deux conclusions nous conduisent à penser que l'anisotropie observée est induite par un écrouissage anisotrope.

Nous avons vu que les campagnes expérimentales menées par *Cambou et Lanier* [5] [7] leur ont permis de mettre en évidence l'anisotropie induite par l'écoulement plastique des sables d'Hostun. En s'inspirant de leurs travaux, nous avons réalisé une campagne de doubles compressions d'éprouvettes cubiques. L'objectif est d'observer l'influence de la première compression sur le comportement de l'éprouvette lors de la seconde compression.

Une éprouvette cubique, de 200 mm de côté, est comprimée jusqu'à 30 MPa (plus de 95% de sa contrainte de rupture), puis déchargée. Une seconde compression est ensuite effectuée, soit dans la même direction que la première (« compression 0°-0° », schéma [figure 8](#)), soit dans une direction orthogonale (« compression 0°-90° », schéma [figure 9](#)). Le chargement est piloté par la traverse mobile de la machine d'essai à une vitesse de 10^{-2} mm.s⁻¹, équivalente à 10^{-5} s⁻¹. Les déformations sont mesurées par une jauge longitudinale et une transversale (d'où une certaine dispersion des résultats). Pour éviter « l'effet tonneau » dû au frottement des faces d'appui sur les plateaux de compression, du téflon préalablement lubrifié est placé aux interfaces. On vérifie par corrélation d'images que le déplacement est bien homogène ([figure 10-b](#)).



Les courbes de deux essais représentatifs sont reportées sur la [figure 11](#). La première partie des essais est identique : il s'agit de la charge initiale. Ensuite, on effectue une recharge dans la même direction que la première dans un cas (en bleu) et dans l'autre cas, la pièce est retournée afin d'effectuer une compression à 90° de la première (en vert). On constate que les deux éprouvettes cassent au même point de contrainte-déformation. Il semble donc que le critère de rupture est indépendant de l'histoire du chargement.

Comme *Cambou et Lanier* [5], on souhaite comparer les courbes de charge des éprouvettes, en réinitialisant les déformations en début de recharge. On ajoute également à cette comparaison les courbes de décharges « retournées ». On retrouve ainsi, sur la [figure 12](#), des domaines (correspondant à la dispersion des trois essais réalisés pour chaque mode opératoire) représentant respectivement :

- la charge initiale en rouge, qui correspond à la première charge à 30 MPa de la [figure 11](#),
- la recharge à 0° en bleu, qui correspond à la deuxième partie de la courbe bleue de la [figure 11](#),
- la recharge à 90° en vert, qui correspond à la deuxième partie de la courbe verte de la [figure 11](#),
- et toutes les décharges en gris.

Les courbes de recharge à 0° (en bleu) et à 90° (en vert) sont différentes. On observe nettement l'anisotropie induite par la première compression. Par rapport à la compression initiale (en rouge), le matériau est plus souple à 90° (en vert) et plus rigide à 0° (en bleu). Nos résultats expérimentaux sont donc qualitativement les mêmes que ceux obtenus par *Cambou et Lanier* sur le sable d'Hostun [5]. Le graphique, [figure 12](#), apporte une information supplémentaire : les courbes de décharges (en gris) sont toutes identiques (donc indépendantes de l'histoire du chargement) et elles correspondent au domaine de la recharge à 0°.

Enfin, on notera que les pied-de-courbes sont tous identiques jusqu'à environ 5 MPa. Cela signifie que M2 à un comportement viscoélastique indépendant de l'histoire du chargement, ce qui valide la conclusion d'un endommagement négligeable. On remarque également que la recharge à 0° et la charge initiale ont des domaines superposés jusqu'à environ 15 MPa. On observe le même phénomène sur le graphique de *Cambou et Lanier*.

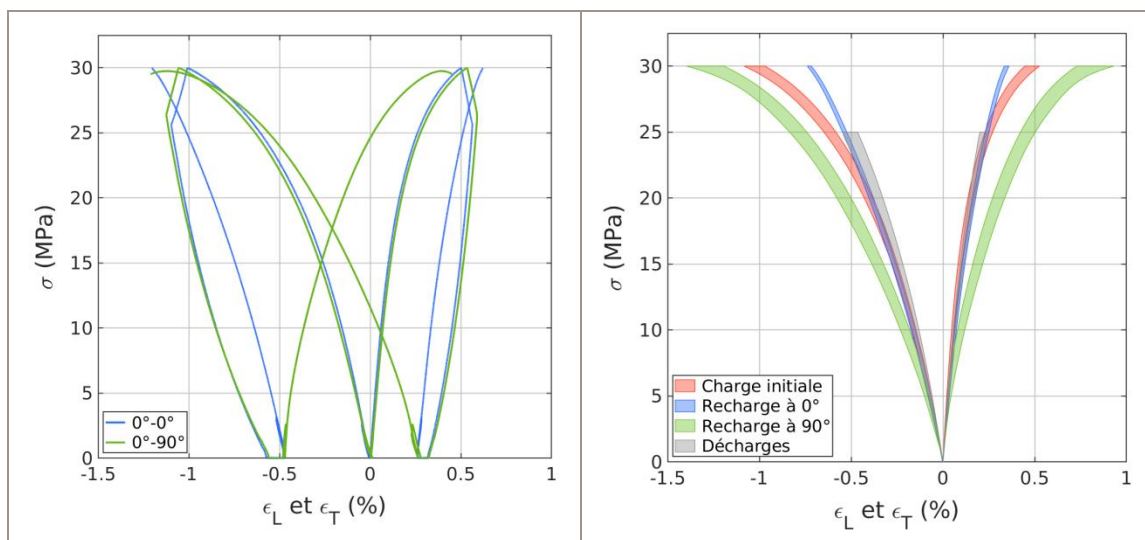


Figure 11 : Exemple de courbes contrainte-déformations d'essais de compression 0°-0° (en bleu) et 0°-90° (en vert).

Figure 12 : Courbes de charge, recharge et décharge des essais 0°-0° et 0°-90° (les zones représentent la dispersion des essais).

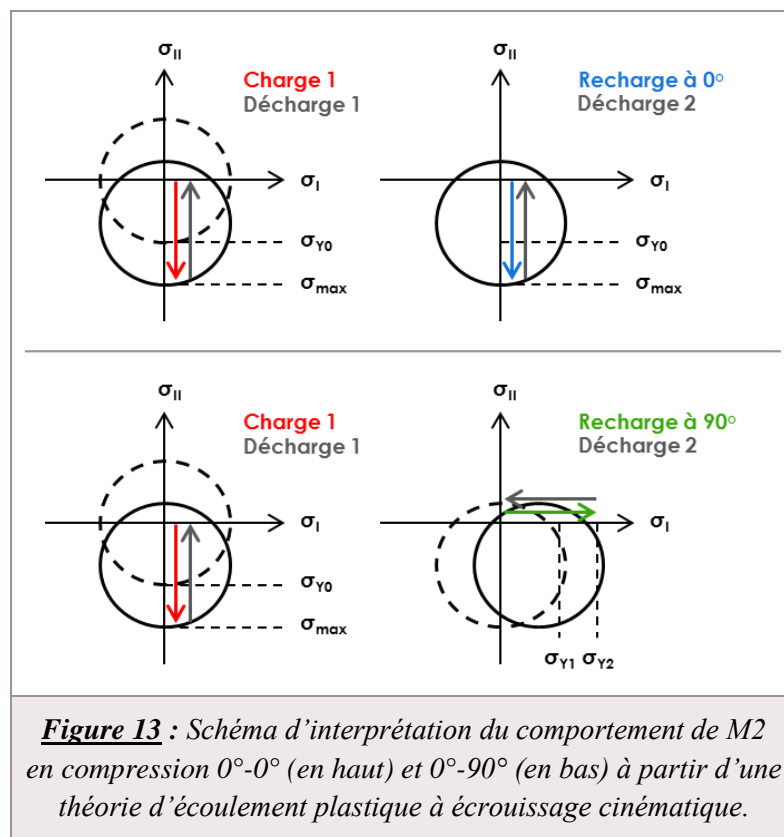
Le comportement du matériau observé avec cette campagne expérimentale peut se modéliser par une théorie d'écoulement plastique à écrouissage cinématique. Observons les schémas de la figure 13 pour expliquer comment intervient l'écrouissage cinématique dans le comportement du matériau.

Lors de la compression $0^\circ-0^\circ$ (schéma figure 13 en haut), la première compression déplace la surface de plasticité. En fin de charge, la surface a été amenée jusqu'à 30 MPa. Les décharges et la recharge à 0° qui suivent se déroulent à l'intérieur de cette surface, elles sont élastiques et donc identiques.

Lors de la compression $0^\circ-90^\circ$ (schéma figure 13 en bas), la première compression déplace la surface de plasticité de telle sorte que la limite d'élasticité à 90° diminue. Il y a ainsi davantage de plasticité lors de la compression à 90° puisque $\sigma_{Y1} < \sigma_{Y0}$. La surface de plasticité est amenée jusqu'à 30 MPa dans la nouvelle direction. La décharge suivante est élastique.

Ainsi, d'après ce modèle, toutes les décharges sont élastiques et identiques. La première compression plastifie moins que la compression à 90° , et la compression à 0° est élastique. Cela correspond à ce qui est observé expérimentalement.

Toutefois, pour que cette théorie s'applique correctement à notre cas, il faut considérer que le zéro de contrainte ne sorte pas de la surface de plasticité, c'est-à-dire que la limite d'élasticité doit être supérieure à $0,5 \cdot \sigma_{\max}$. Dans le cas inverse, la décharge à 90° serait différente des autres décharges (il y aurait de la plasticité). Or, l'hypothèse des décharges élastiques a déjà été contredite plus haut dans ce rapport (voir le paragraphe sur les compressions cyclées). Toutefois, si les décharges observées en compression d'éprouvettes cylindriques $\varnothing 10h20$ contiennent un écoulement plastique, il est possible que lors des compressions de cube, le confinement de la matière causé par le trop faible rapport hauteur/largeur de l'éprouvette entraîne une augmentation artificielle de la limite d'élasticité.



4 Conclusion

Les diverses campagnes expérimentales réalisées sur M2 ont montré que les modules élastiques étaient constants au cours du chargement et que comprimer le matériau dans une même direction le rendait plus rigide dans cette direction. Ces deux observations nous indiquent clairement que l'endommagement du matériau en compression (avec ou sans confinement) est négligeable. Ainsi, l'anisotropie induite par le chargement apparaît être la conséquence d'une plasticité à écrouissage anisotrope. Nous avons pu montrer qu'un simple modèle d'écrouissage cinématique pouvait expliquer les phénomènes observés.

Afin de poursuivre la caractérisation thermomécanique du matériau M2, les recherches doivent être poussées du côté de la plasticité. Une recherche expérimentale de la surface de plasticité initiale et du type d'écrouissage pourra être menée par le biais d'essais multiaxiaux en compression/traction/torsion.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du Laboratoire de Recherche Correspondant CosMa rassemblant le CEA et le laboratoire de mécanique Gabriel LaMé.

Références

- [1] V. Gotuwka, Etude expérimentale du comportement mécanique des Bétons à Très Hautes Performances sous sollicitations multiaxiales simples et complexes, Thèse, Université de Lille I, 1999.
- [2] V. Gotuwka, J.-M. Siwak, D. Kondo, Study of concrete under combined shear compression loading, evaluation of cracking tangential stress, *Materials and Structure* Vol. 32, pp.445-451, 1999.
- [3] A. Benelfellah, Contribution à la modélisation de l'anisotropie induite par endommagement d'un matériau agrégataire énergétique, Thèse, Université de Tours, 2013.
- [4] A. Benelfellah, A. Frachon, M. Gratton, M. Caliez, D. Picart, Anisotropic damage model with unilateral effect and sliding friction for brittle materials, *Design and Modeling of Mechanical Systems, Lectures Note on Mechanical Engineering*, pp. 431-438, 2013.
- [5] B. Cambou, J. Lanier, Induced anisotropy in cohesionless soil: experiments and modelling, *Computers and Geotechnics* Vol. 6, pp. 291-311, 1988.
- [6] J. Mazars, Y. Berthaud, S. Ramtani, The unilateral behaviour of damaged concrete, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 35, n°4/5, pp. 629-635, 1990.
- [7] J. Lanier, C. Di Prisco, R. Nova, Etude expérimentale et analyse théorique de l'anisotropie induite du sable d'Hostun, *Revue Française de Géotechnique* n°57, pp. 59-74, 1991.
- [8] V.-D. Le, Modélisation et identification du comportement plastique viscoélastique endommageable d'un matériau agrégataire, Thèse, Université de Tours, 2007.
- [9] V.-D. Le, M. Gratton, M. Caliez, A. Frachon, D. Picart, Experimental mechanical characterization of plastic-bonded explosives, *Journal of Materials Science* Vol. 45, pp. 5802-5813, 2010.
- [10] S. Benouniche, Modélisation de l'endommagement du béton par microfissuration en compression, Thèse, Université de Paris VI, 1979.