CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE MATERIAUX HYDRAULIQUES A BASSE RESISTANCE

MECHANICAL BEHAVIOUR OF CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIALS

Caroline MORIN[1,2,4], Thierry SEDRAN[2], Christophe DANO[3], François de LARRARD[2], Hélène DUMONTET[4], Sylvain MURGIER[1], Michel HARDY[1].
1 Direction de la Recherche de Gaz De France, Saint-Denis, France
2 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France
3 Ecole Centrale, Nantes, France
4 Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

RÉSUMÉ – Le travail présenté est issu d'une thèse qui vise à caractériser l'excavabilité des matériaux traités aux liants hydrauliques à basse résistance, inférieure à 8 MPa, pour tranchées. Nous nous intéressons ici à la formulation puis à la caractérisation mécanique d'un mortier à fort pourcentage en air entraîné et d'un béton très maigre, en termes de résistance et de déformabilité.

ABSTRACT – This research is part of a thesis which consists in defining the excavatability of Controlled Low-Strength Materials for trenches (not exceeding 8 MPa). This communication deals with a mortar containing a high volume of air entrained and a very low cementitious concrete which are both self-compacting. We present their composition and the characterization of their mechanical behaviour in order to calibrate a constitutive law for finite element analyses.

1. Introduction

Les matériaux traités aux liants hydrauliques, à faible résistance en compression, sont utilisés en tranchées pour protéger les réseaux. Ils présentent une résistance minimale pour assurer la traficabilité, et une résistance maximale pour être facilement excavables à l'aide d'outils de terrassement, en cas d'incidents sur les réseaux (Hitch et al., 2004).

Ces matériaux sont constitués essentiellement de ciment, d'additions minérales, d'eau, de granulats et d'autres adjuvants. Ils sont formulés de manière à être autocompactants pour être déversés et mis en œuvre facilement sans vibration (Certu, 1998). A l'étranger, et notamment aux Etats-Unis, ces mélanges dosés de 20 kg/m^3 à 60 kg/m^3 de ciment sont dénommés « Controlled Low-Strength Materials ». De nombreuses études expérimentales ont porté sur la formulation et les propriétés à l'état frais de ces matériaux, en particulier leur fluidité, leur masse volumique, leur perméabilité et leur consolidation (Howard et al., 1994). Certains auteurs ont cherché à prédire la résistance en compression des mortiers à fort pourcentage en air entraîné au cours du temps (Du et al., 2002) et montré l'influence du rapport eau/ciment. Le comportement au cisaillement des mortiers a fait également l'objet d'études (Dolen and Benavidez, 1998), (Hoopes, 1998) et (McGrath and Hoopes, 1998).

L'excavabilité des matériaux, qui peut être caractérisée comme la facilité ou non à être détruit (d'après le guide du NRMCA), est souvent corrélée à la résistance en

compression (Crouch et al., 2004). Par exemple, un critère actuellement retenu est une résistance en compression inférieure à 2 MPa (Certu, 1998). Cependant, cette excavabilité est également influencée par la composition, le type et la qualité du ciment, la nature du sol en contact et la méthode d'excavation et ce critère s'avère souvent non adapté. Finalement, seuls des essais en vraie grandeur permettent de s'assurer de l'excavabilité ultérieure du matériau. Des échelles d'appréciation sont ainsi proposées par des opérateurs (Crouch et al., 2004) et (Pons et al., 1998). Il apparaît donc nécessaire de définir, via la mise en place d'un ou plusieurs essais de laboratoire, un ensemble de prescriptions pour spécifier des matériaux excavables.

Dans ce contexte et après une étude de formulation, nous avons sélectionné et caractérisé deux matériaux autocompactants typiques à l'aide d'essais triaxiaux conventionnels. Ceci a permis d'identifier les paramètres d'une loi de comportement appropriée. Ces données devraient permettre ultérieurement la mise au point un essai d'excavabilité notamment à l'aide de calculs aux éléments finis.

2. Etude de formulation

Deux formules typiques de matériaux autocompactants de tranchées ont été mises au point : un mortier à fort pourcentage en air entraîné, et un béton très maigre. Les matériaux sont composés de ciment, de filler, de sable (0/4 mm), de gravillons (en deux coupures : 6/10 et 10/14), d'eau et d'un entraîneur d'air pour le mortier. L'utilisation de cendres volantes a été proscrite de façon à mieux maîtriser les résistances à long terme (Howard and Hitch, 1998). Les quantités de ciment ont varié entre 35 et 150 kg/m^3 pour le mortier et entre 20 et 80 kg/m^3 pour le béton très maigre. Ces variations étaient compensées volume pour volume par du filler.

Pour le mortier et pour chaque dosage en ciment, l'eau était ajustée pour obtenir une teneur en air, mesurée à l'aéromètre à mortier, de 20% et un étalement de 200 mm.

L'optimisation du squelette du béton très maigre a été faite pour minimiser l'indice de serrage caractérisant le processus de construction de l'empilement granulaire (de Larrard, 2000). Le mélange, malaxé dans une bétonnière est ensuite déversé dans l'appareil de Glanville (Herr et al., 2001) qui permet de rendre la confection de l'éprouvette indépendante de l'opérateur. On mesure ensuite, pour la quantité d'eau introduite dans le mélange, la masse volumique réelle de l'éprouvette rapportée à sa masse volumique théorique sans vide. Pour chaque dosage en ciment, l'eau de la formule est ajustée pour obtenir un ratio supérieur à 0,90. Cette valeur est jugée acceptable pour assurer l'autocompactabilité du matériau.

Les masses volumiques expérimentales s'élèvent en moyenne à 1965 kg/m^3 pour les mortiers et à 2176 kg/m^3 pour les bétons très maigres.

3. Essais mécaniques de résistance : compression et traction par fendage

Les mortiers et les bétons très maigres ont été caractérisés dans un premier temps à l'aide des essais de compression uniaxiale non confinée (norme NF P 98 231-1) et de traction par fendage (norme NF P 18-408) à 28 jours. Les essais de cisaillement pur étant difficiles à mettre en œuvre expérimentalement (Maso, 1982) n'ont pas été réalisés.

Les essais de compression et de traction sont réalisés respectivement selon une rampe de 0,1 MPa/s et de 0,01 MPa/s. Les essais de compression sur mortier ont nécessité un surfaçage à la boîte à sable (Boulay et al., 1992). Un disque en carton

a assuré l'interface entre l'éprouvette de béton très maigre et la presse. Pour chaque essai, trois éprouvettes cylindriques sont testées.

Les résistances expérimentales ont été corrélées au rapport V_c / (V_c+V_e +0,5V_{air}) (de Larrard, 2000) sous la forme d'une loi puissance (voir figure 1):

$$R_c = A * \left(\frac{V_{ciment}}{V_{ciment} + V_{eau} + 0{,}5 * V_{air}} \right)^n \qquad (1)$$

Dans cette équation, V_{ciment}, V_{eau} et V_{air} sont les volumes respectifs de ciment, d'eau efficace et d'air total déduit de la masse volumique des mélanges. Le facteur 0,5 lié à l'air rend compte de son influence moindre sur les résistances (Mathias, 2005), contrairement à la formule de Féret pour laquelle les coefficients multiplicateurs pour le volume d'eau et le volume d'air sont identiques. Le terme A décrit la performance du ciment et du squelette granulaire.

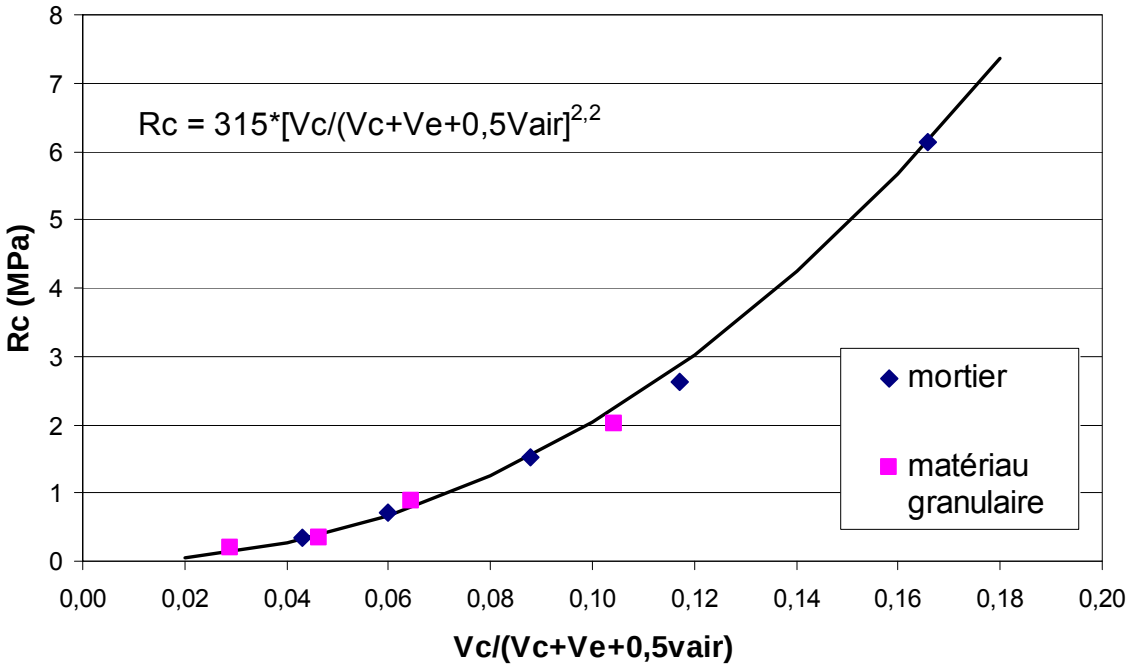

Figure 1. Evolution de la résistance en compression en fonction du rapport V_c / (V_c+V_e +0,5V_{air})

Pour étudier l'influence du squelette granulaire des deux matériaux, nous avons ajusté n à 2,2 et obtenu ainsi pour A une valeur de 315 pour les deux types de matériaux.

On constate que les mortiers et les bétons très maigres suivent à peu près la même loi pour ce qui concerne la résistance en compression, alors qu'ils diffèrent en termes de résistance en traction par fendage. La variation de la résistance en traction par fendage en fonction de la résistance en compression est linéaire dans la plage de résistance testée :

$$R_{tb_mat.granulaire} = 0{,}150 * R_c \quad (2)$$

$$R_{tb_mortier} = 0{,}112 * R_c \quad (3)$$

Pour une même résistance en compression, le mortier présente une résistance en traction plus faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que le matériau granulaire contient du sable silico-calcaire mais également un gravillon de gneiss contrairement au mortier.

A l'issue de cette première série d'essais, qui nous a permis de balayer un intervalle de résistances typiques des matériaux de tranchées, nous avons sélectionné un matériau de chaque famille avec une résistance en compression visée de 0,9 MPa pour une caractérisation plus complète. Malgré cette sélection, les deux matériaux ont affiché des résistances différentes : en compression et en fendage pour le mortier et respectivement pour le béton très maigre.

4. Essais de déformabilité à l'appareil triaxial

Des essais de compression triaxiale conventionnels (selon la norme NF P 94-074), en condition drainée ont été réalisés pour les deux matériaux sur des éprouvettes coulées dans des cylindres en plexiglas et conservées pendant 28 jours à 20°C. Ces essais consistent d'abord à appliquer une contrainte de confinement constante et ensuite une contrainte déviatorique, causant ainsi un cisaillement de l'éprouvette (Desai et Siriwardane, 1984). Une cellule triaxiale Wykeham Farrance International a été utilisée. Elle est adaptée aux éprouvettes de 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur, ce qui permet de garantir la représentativité de nos échantillons de matériaux. Trois pressions de confinement ont été appliquées : 100, 200 et 400 kPa. La vitesse de cisaillement a été choisie à 0,1 mm/min. Un capteur de force interne et un comparateur de déplacement externe ont été utilisés. Ce dernier point est acceptable car nous nous intéressons au comportement en grandes déformations.

Des essais au GrindoSonic préliminaires ont permis de mesurer le module d'Young E et le coefficient de Poisson *v* dans le domaine des petites déformations. Nous avons obtenu E=3,95 GPa et v = 0,22 pour le mortier et E=5,79 et v = 0,10 pour le béton très maigre. Il faut signaler que cette valeur est étonnamment basse.

Le module sécant, E_{sec}, évoluant en fonction du confinement, est calculé à des déformations de l'ordre de 10^{-3} et le coefficient de Poisson, v, a été déterminé sur la première portion de la courbe de volume. Le coefficient de Poisson est relativement indépendant du confinement et du matériau (égal à 0,2). Du point de vue rigidité, les deux matériaux sont peu différents (164 MPa en moyenne pour le mortier et 178 MPa pour le béton très maigre).

La mesure du déviateur et du volume des échantillons pour chaque pression de confinement a permis la construction de la figure 2 sur laquelle les résultats expérimentaux sont présentés sous la forme de deux droites dites de résistance maximale (rupture) et d'état caractéristique (transition contractance/dilatance) dans un plan (p-q), avec q le déviateur des contraintes et p la contrainte moyenne. On

constate que les deux matériaux ont un comportement d'abord contractant puis dilatant, caractéristique des matériaux denses.

Une autre représentation dans le plan (τ-σ), avec τ la contrainte de cisaillement et σ la contrainte normale, montre que les points de l'enveloppe de résistance maximale s'alignent selon une droite, décalée vers le haut du fait de l'existence d'une cohésion, ce qui peut justifier l'utilisation du critère de Mohr-Coulomb défini par deux paramètres plastiques C (cohésion) et φ (angle de frottement interne).

L'analyse montre que le mortier a une cohésion de 141 kPa et un angle de frottement interne de 35° alors que l'on obtient respectivement 175 kPa et 47° pour le béton très maigre. Ces différences s'expliquent probablement par les différences de résistance mécaniques et de diamètre maximal de granulat des deux matériaux. Une comparaison entre les résistances en compression simple calculées à partir de C et de φ et les résultats expérimentaux en compression simple obtenus sur la presse triaxiale montre un écart de 3% pour le mortier et un écart de 19% pour le béton très maigre.

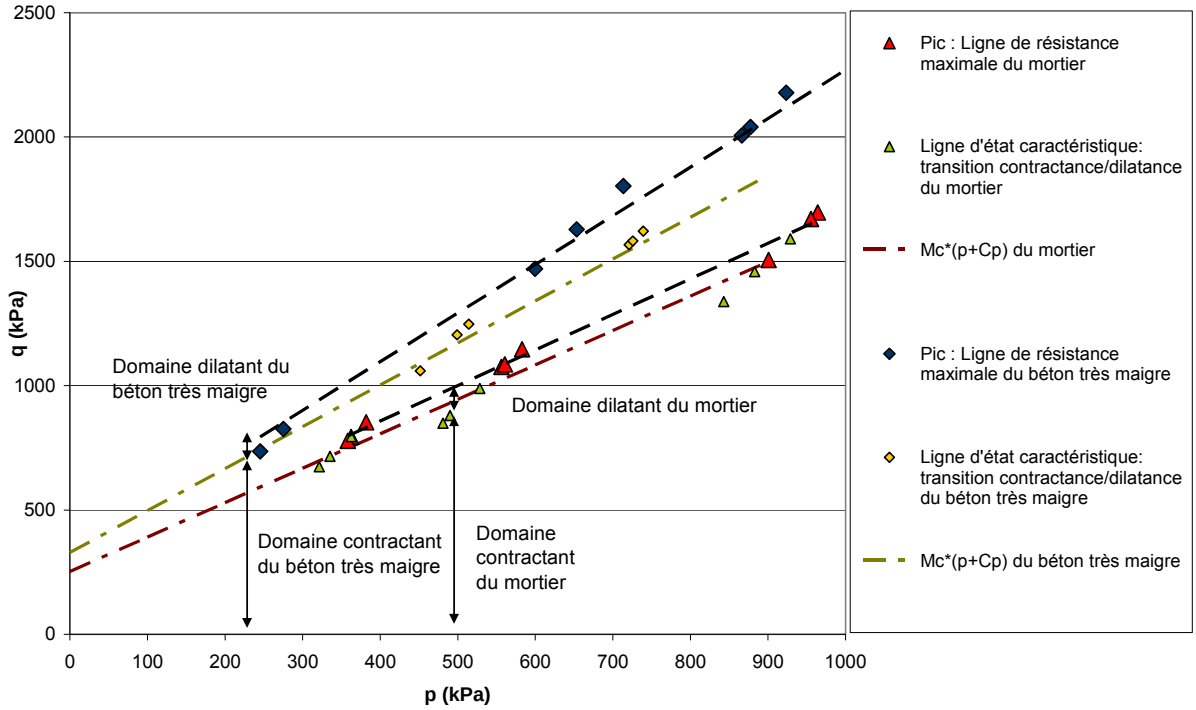

Figure 2. Plan (q-p) du mortier et du matériau granulaire

L'angle de dilatance, calculé sur la deuxième portion de la courbe de déformation volumique, évolue en fonction du confinement. Le mortier a des angles de dilatance plus faibles (9 à 15°) que le béton très maigre (15 à 24°) qui présente une asymptote à la courbe de dilatance plus pentue. La dilatance correspond à une augmentation de volume. La compacité plus élevée ainsi que le pourcentage de vide plus faible du matériau granulaire est probablement à l'origine de cette différence.

Par construction, les 5 paramètres de la loi de Mohr-Coulomb non associée ainsi calculés ne permettent pas de décrire correctement la transition élastique/plastique. C'est pourquoi nous avons eu recours à une autre loi non linéaire de type hyperbolique (Hardening Soil) (Duncan and Chen, 1970). L'ajustement des paramètres de cette loi, a été réalisé en simulant un essai de compression triaxiale

sous le logiciel géotechnique Plaxis. Une étude de sensibilité a d'abord permis de distinguer le rôle de chacun des 7 paramètres de la loi non linéaire ($E_{50}^{réf}$, ν, m, R_f, C, φ et ψ) et d'optimiser le calage de cette loi aux résultats expérimentaux afin de prendre en compte la non-linéarité (via R_f) et la dépendance au confinement (via m) (Mestat et Riou, 2001).

Pour illustration, la figure 3 rend compte de ces ajustements pour la courbe de cisaillement (déviateur-déformation axiale) obtenue sur le mortier.

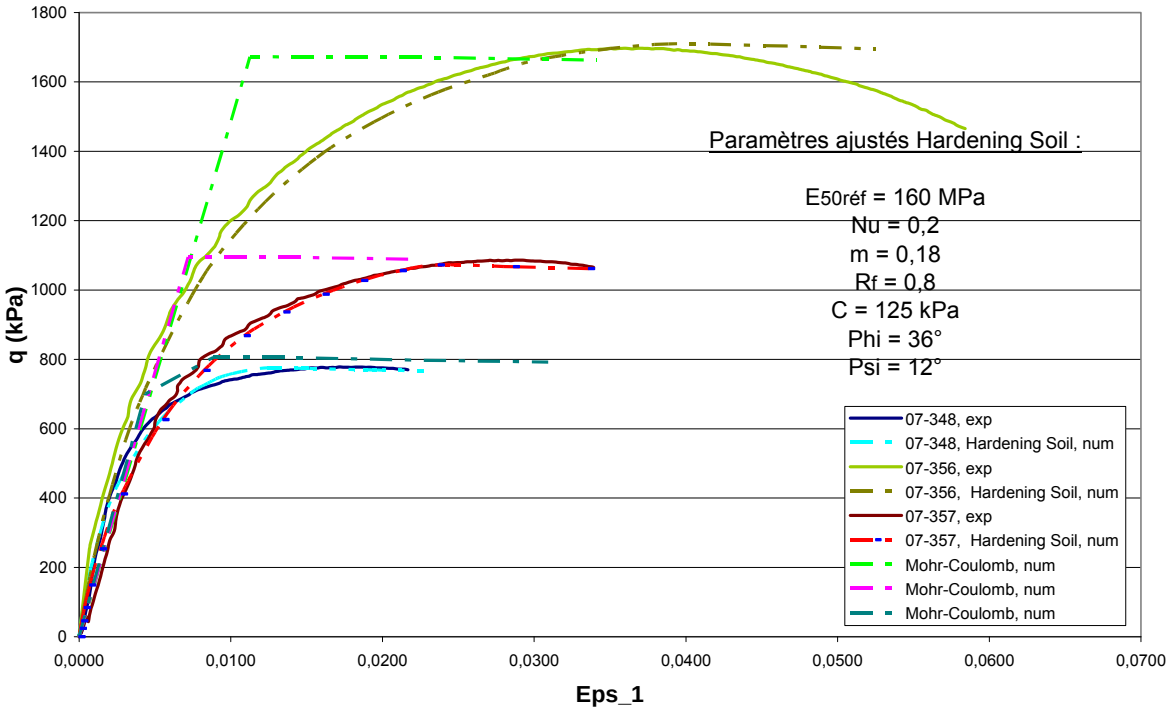

Figure 3. Confrontation des courbes expérimentale et théorique du mortier à la loi de type Hardening Soil
(en traits pleins la courbe expérimentale, en pointillés les courbes théoriques de Mohr-Coulomb et en traits discontinus celles de la loi Hardening Soil)

4. Conclusions

Deux types de matériaux autocompactants pour tranchées ont été fabriqués : des mortiers à forte teneur en air et un béton très maigre. Nous avons montré que leurs résistances en compression simple et en traction par fendage pouvaient être approchées par des lois « puissance » en prenant en compte le volume de ciment, d'eau et d'air. Dans le cas étudié, les bétons très maigres présentent, pour une même résistance en compression, une résistance en traction plus grande. Les essais triaxiaux ont montré une dépendance du module et du mode de rupture des éprouvettes au confinement et une dépendance du comportement contractant/dilatant en fonction de la composition. Ils nous ont permis d'identifier les paramètres de la loi de Mohr-Coulomb propres à nos matériaux. Enfin, nous avons approché le comportement de ces matériaux par une loi non linéaire de type Hardening Soil, qui semble bien adaptée. Une perspective pour la poursuite de ce

travail est d'étudier la dépendance des paramètres de comportement à la composition des mélanges, notamment au rapport eau/ciment et à la fraction des gravillons. On envisage également de simuler l'excavation à l'aide des lois de comportement identifiées, incorporées dans un code aux éléments finis.

6. Références bibliographiques

Boulay C., Belloc A., de Larrard F. et Torrentini J.M. (1992) Une nouvelle méthode de surfaçage des éprouvettes en béton à hautes performances et très hautes performances. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées-179-Mai-Juin-PP. 43-56.

Certu (1998) Remblayage de tranchées, Utilisation de matériaux autocompactants. Etat des connaissances au 31 décembre 1997. Certu, Cete Normandie Centre.

Crouch L.K., Dotson V.J., Badoe D.A., Maxwell R.A., Dunn T.R. and Sparkman A. (2004) Long term Study of 23 Excavatable Tennesse Flowable Fill Mixtures. Journal of ASTM International, Vol.1, No.6, June 2004.

de Larrard (2000) Structures granulaires et formulation des bétons. Etudes et Recherches des Laboratoires des ponts et Chaussées. Ouvrages d'art OA34. 414 pages.

Desai C.S., Siriwardane H.J. (1984) Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Dolen T. P. and Benavidez A.A. (1998) Properties of Low-strength Concrete for meeks cabin dam modification project, Wyoming. In the Design and Application of Controlled Low-strength materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, A.K. Howard and J.L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998.

Du L., Folliard K.J. and Trejo D. (2002) Effects of constituent materials and quantities on water demand and compressive strength of controlled low-strength material. Journal of Materials in Civil Engineering, 485-495.

Duncan J. M. and Chang C.-Y. (1970) Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

Herr O., Vachon M., Sedran T., de Larrard F. et Balay M. (2001). Les matériaux autocompactants essorables de structures (MACES). Etude de faisabilité d'une nouvelle gamme de matériaux hydrauliques pour les assises de chaussées. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées-232-Mai-Juin-NT 4360-PP. 99-103.

Hitch J.L. et al. (2004) Innovations in Controlled Low-Strength Material (Flowable Fill). ASTM STP 1459. USA.

Hoopes R.J. (1998) "Engineering properties of air-modified controlled low-strength material", The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, A. K. Howard and J.L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998.

Howard A.K. and Hitch J.L. (1998) The Design and Application of Controlled low-strength Materials (Flowable Fill). ASTM STP 1331. USA.

Maso J.-C. (1982) L'étude expérimentale du comportement du béton sous sollicitations monoaxiales et pluriaxiales dans "le béton hydraulique, connaissance et pratique". Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.

Mathias V. (2005) Recyclage des fraisats d'enrobés dans les bétons hydrauliques routiers. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussée-CR 38-227 pages.

McGrath T.J. and Hoopes R.J. (1998) Bedding factors and E'values for buried pipe installations backfilled with air-modified CLSM", The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill) ASTM STP 1331, A. K. Howard and J.L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998.

Mestat et Riou (2001) Méthodologie de détermination des paramètres pour la loi de comportement élastoplastique de Vermeer et simulations d'essais de mécanique des sols, Bulletin des Ponts et Chaussées, 225, mars-avril 2001, réf. 4391, pp. 19-39.

Pons F., Landwermeyer J.S. and Kerns L. (1998) "Development of engineering properties dor regular and quick-set flowable fill", The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (flowable Fill), ASTM STP 1331, A. K. Howard and J.L. Hitch, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998.

NRMCA "Recommended Guide Specification for controlled Low Strength Materials (CLSM)", NRMCA Publication 2PFFGS, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD.

Norme Française NF P 98 231-1 Essais de compression simple.

Norme Française NF P 18-408 Essais de traction par fendage.

Norme Française NF P 94-074 (1994) Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution.