

Effet de resaturation sur le comportement mécanique de mortier

I. YURTDAS^a, N. BURLION^b, J.F. SHAO^b

a. Laboratoire de Génie Civil, Université de Reims Champagne-Ardenne, UFR Sciences,
Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex 2, France, ismail.yurtdas@univ-reims.fr

b. Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR CNRS 8107, Université Lille 1, Polytech'Lille,
Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq, France, nicolas.burlion@polytech-lille.fr, jian-
fu.shao@polytech-lille.fr

Résumé :

Le présent travail s'intéresse à l'effet de resaturation sur le comportement mécanique d'un mortier normal mature. Aussi, des essais de compression uniaxiale et triaxiale déviatorique ont-ils été réalisés en fonction de l'état de saturation (saturé, séché à 60°C jusqu'à poids constant, resaturé à différents degrés). Il a été observé que les résistances à la compression uniaxiale et triaxiale déviatorique diminuent avec la resaturation après une première augmentation due au séchage. Les éprouvettes resaturées sous vide ont une résistance plus faible que les éprouvettes saturées à cause de la microfissuration induite par séchage notamment, mais cette chute est moins prononcée dans le cas de la compression déviatorique du fait de la présence d'un confinement. Une diminution du module d'Young, venant s'ajouter à celle due au séchage, a également été constatée après resaturation sous vide mais uniquement en compression uniaxiale. Par ailleurs, la contrainte de limite élastique dépend du degré de resaturation. L'ensemble des résultats obtenus montre ainsi la nécessité de prendre en compte les effets de séchage et de resaturation dans l'évaluation de la durabilité des matériaux à matrice cimentaire.

Abstract :

This work deals with the effect of re-saturation on the mechanical behaviour of a mature standard mortar. For that purpose, uniaxial and triaxial compression tests were performed as a function of saturation state (saturated, dried at 60°C up to constant weight, re-saturated in different proportions). It was observed that the uniaxial and triaxial deviatoric compressive strengths decrease with re-saturation after a first increase due to drying. The strength of vacuum re-saturated samples is lower than that of the saturated samples mainly because of the drying induced micro-cracking, but the decrease is less marked in the case of triaxial deviatoric compression because of the presence of confining pressure. A reduction of Young's modulus under uniaxial compression, adding further to that due to drying, is also observed after vacuum re-saturation. In addition, the elastic limit stress depends on the degree of re-saturation. Thus, the results obtained show the need to take into account the effects of drying and re-saturation in the evaluation of the durability of cement-based materials.

Mots clefs : séchage, microfissuration, resaturation, mortier, compression multiaxiale

1 Introduction

Les effets générés par le mouvement d'eau dans les matériaux cimentaires ont une importance cruciale sur la durabilité des structures en béton. Le séchage conduit à un retrait de dessiccation par variation de la dépression capillaire [1], de la pression de disjonction et de la tension de surface [2], la prépondérance de chacun de ces mécanismes dépendant de l'humidité relative régnant dans le matériau. Par ailleurs, comme la perméabilité de ces matériaux est faible, des gradients hydriques sont créés du fait d'un séchage non-uniforme. Les déformations de retrait sont alors empêchées par un effet structurel, ce qui induit une microfissuration dans la zone externe dès que la résistance à la traction est dépassée. Une microfissuration a également lieu à l'interface pâte de ciment hydraté/inclusions rigides (grains de ciment non hydraté, granulats) du fait de l'existence d'une matrice rétractante et des inclusions notamment. Ce deuxième effet, relativement superficiel pour de faibles tailles de granulats, conduit à une microfissuration diffuse dès que la taille du granulat atteint 6 mm [3] et semble être dominant [4]. Ainsi, le matériau cimentaire s'endommage avant application d'un chargement mécanique, les propriétés élastiques et le processus de rupture du matériau en sont alors modifiés. Des études menées sur bétons [5-7] et mortiers [8] ont montré qu'il existe un effet compétitif entre la rigidification du matériau et la microfissuration induite en cours de dessiccation. La rigidification est due aux mécanismes précités qui agissent comme une précontrainte isotrope du matériau, et aux gradients hydriques qui conduisent au confinement du cœur de l'éprouvette par la surface externe [5, 7]. Cet effet rigidifiant est contré par la microfissuration induite par ces mêmes gradients hydriques (effet de structure) et par la différence de rigidité entre les constituants du matériau (effet local). Le même effet compétitif est aussi à l'origine de la diminution des coefficients élastiques générée après une microfissuration importante induite par le séchage [6, 8, 9].

Les matériaux cimentaires peuvent être également soumis à une resaturation après le séchage. Dans ce cas, les gradients hydriques se créent dans la direction inverse à celle durant le processus de séchage [5, 7] ; la zone extérieure du matériau veut se dilater alors que le cœur s'oppose à cette dilatation. Le confinement du matériau pendant le séchage laisse place à une dilatation différentielle au fur et à mesure de la resaturation. Le comportement mécanique du matériau, initialement affecté par le séchage et la microfissuration induite, évolue donc de nouveau en fonction de la resaturation. La résistance à la compression uniaxiale [5, 7, 9, 10] et le module d'élasticité diminuent [9] avec la resaturation mais l'effet de resaturation sur la déformation n'est pas suffisamment étudié. Par ailleurs, le matériau cimentaire peut être également soumis à la compression multiaxiale. Le comportement mécanique sous ce type de sollicitation est très sensible à l'intensité de la pression du confinement. Des études en compression triaxiale ont été effectuées essentiellement pour analyser l'effet de dessiccation sur le comportement mécanique [8, 11] mais relativement peu d'études se sont intéressées à l'effet de resaturation. Ainsi, l'objet principal de la présente étude est d'évaluer l'influence de la resaturation sur le comportement mécanique multiaxial (résistance, module élastique et déformation).

2 Evolution du comportement mécanique avec la resaturation après séchage

2.1 Campagne expérimentale

Un mortier normalisé a été utilisé pour conduire l'étude. Après une période de maturation dans l'eau à température ambiante pendant 6 mois, les éprouvettes ont été réparties en trois différentes séries en fonction du degré de resaturation, S_e . La première série est constituée d'éprouvettes gardées pendant 6

mois dans l'eau et supposées être complètement saturées ($S_e=100\%$). Les propriétés de ces éprouvettes ont été considérées comme état de référence pour toute comparaison. La deuxième série est formée d'éprouvettes séchées jusqu'à poids constant dans un four à 60°C et à une humidité relative de 10% au maximum afin de simuler un séchage complet. Les éprouvettes de cette série ont été considérées comme le premier point d'éprouvettes resaturées avec $S_e=0\%$. La resaturation sous vide pendant 24 heures permettant d'atteindre $S_e=88\%$ a été supposée suffisante pour pouvoir évaluer les effets négatifs de la microfissuration induite par le séchage. Notons que la resaturation peut induire une microfissuration supplémentaire. Une resaturation plus longue peut conduire à une reprise de l'hydratation, facilitée par la microfissuration induite. Deux degrés de resaturation intermédiaires, $S_e=33\%$ et 61% , ont été considérés entre l'état sec et l'état de resaturation sous vide et ont été obtenus en plaçant les éprouvettes dans l'eau à température ambiante sous pression atmosphérique. L'état hydrique des éprouvettes resaturées n'est donc pas homogène au moment des essais. Trois essais de compression uniaxiale et un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 15 MPa ont été réalisés pour chaque degré de resaturation.

2.2 Présentation et analyse des résultats

La figure 1 compare l'évolution des déformations d'une éprouvette saturée ($S_e=100\%$) et d'une éprouvette resaturée sous vide ($S_e=88\%$) sous compression uniaxiale afin de mettre en évidence l'effet de la microfissuration induite au cours du processus séchage/resaturation. L'éprouvette resaturée montre une déformation axiale plus importante pour une contrainte donnée. Sa limite élastique, correspondant à la valeur de la contrainte au-delà de laquelle la courbe de contrainte-déformation dévie de la linéarité, est observée à 24 MPa alors que celle-ci se trouve à 29 MPa pour l'éprouvette saturée (non soumise au séchage). Par ailleurs, le module d'Young et la résistance à la rupture diminuent, en passant de 27600 MPa à 20250 MPa et de 48 MPa à 38 MPa respectivement. Cette diminution du module, constatée seulement après resaturation sous vide, vient s'ajouter à celle due au séchage. L'interaction entre la microfissuration induite par le séchage/resaturation, l'eau interstitielle et sa quantité joue un rôle très important dans l'évolution du comportement mécanique. Notons que le comportement élastique au début du chargement ne semble pas être influencé par le degré de resaturation, jusqu'à $S_e=61\%$ dans le cadre de la présente étude, mais la limite élastique en dépend clairement [12]. Par ailleurs, l'application d'un confinement de 15 MPa conduit à une augmentation conséquente de la déformation axiale et de la résistance à la rupture par rapport au cas de compression uniaxiale. De plus, la chute du module après la resaturation sous vide n'est plus observée en raison de la présence du confinement [12].

La figure 2 montre l'évolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction du degré de resaturation (■). Les valeurs de la résistance à la compression des éprouvettes saturées (non soumises au séchage) (◆) sont également reportées sur cette figure. La dessiccation jusqu'à poids constant ($S_e=0\%$) conduit à une augmentation de 39% de la résistance à la compression. Celle-ci diminue, ensuite, avec la resaturation et atteint 40% pour $S_e=88\%$. Par ailleurs, la résistance à la compression de l'éprouvette resaturée sous vide ($S_e=88\%$) est de 17% inférieure à celle de l'éprouvette saturée.

Ainsi, à cause des gradients de resaturation, la zone extérieure du matériau veut se dilater tandis la zone interne, moins saturée, s'oppose à cette dilatation (ou expansion) [5, 7]. Cette expansion est donc restreinte, ce qui conduit à une contrainte de traction sur la partie interne de l'éprouvette et à une microfissuration si la résistance à la traction du matériau est atteinte. Par ailleurs, il est peu probable que la contrainte de traction induite par l'expansion sur les extrémités de l'éprouvette réduise de

manière importante la résistance, car ces parties sont confinées par les plateaux de la machine d'essai [5]. L'éprouvette est donc soumise essentiellement à une traction biaxiale latérale. Dans le même temps, la dépression capillaire et la tension de surface diminuent et la pression de disjonction augmente, en fonction du niveau de resaturation. Par conséquent, au fur et à mesure de la resaturation, la résistance à la compression diminue dans la direction du chargement axial. Par ailleurs, la résistance à la compression des éprouvettes en resaturation devient plus faible que celle des éprouvettes saturées dès que le degré de resaturation atteint un certain niveau (ici $S_e=61\%$). Une telle évolution est également observée sur les données de Wittmann [10] et Okajima et al. [9].

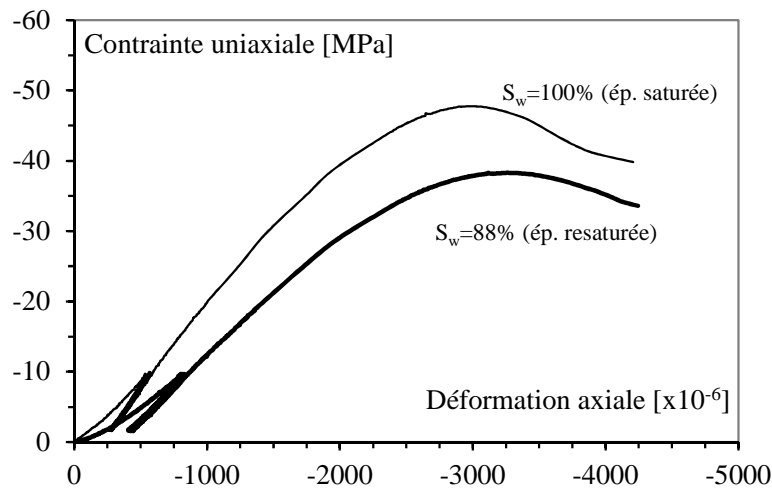


Figure 1 : Courbe contrainte de compression uniaxiale – déformation axiale d'une éprouvette saturée et d'une éprouvette resaturée sous vide.

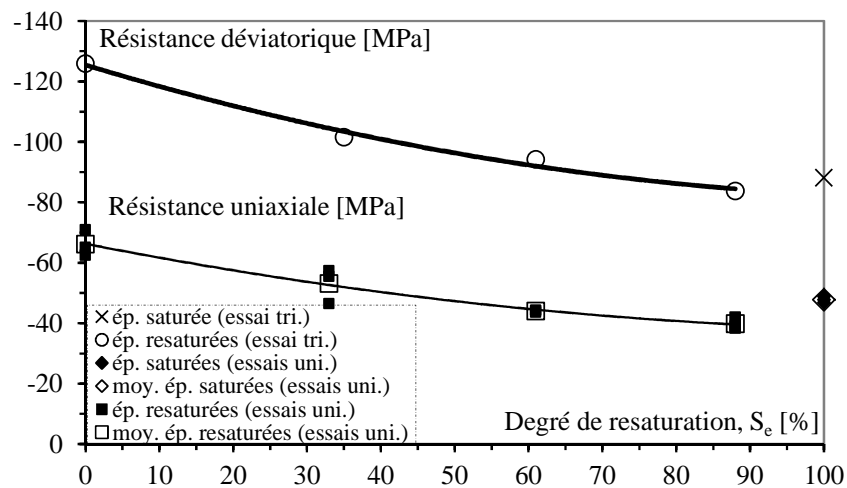


Figure 2 : Résistances à la compression uniaxiale et déviatorique (pression de confinement de 15 MPa) en fonction du degré de resaturation.

La figure 2 illustre également l'évolution de la résistance à la compression déviatorique en fonction de l'état de resaturation (○). La valeur de la résistance à la compression de l'éprouvette saturée (non soumise à la dessiccation) (x) est également reportée sur cette figure. La pression de confinement de 15 MPa conduit à une augmentation importante de la résistance déviatorique par rapport à la résistance uniaxiale quel que soit le degré de resaturation. Les effets de séchage et de resaturation sont similaires à ceux observés en compression uniaxiale. Ainsi, le séchage jusqu'à poids constant ($S_e=0\%$) augmente

la résistance déviatorique de 43% par rapport à celle de l'éprouvette saturée. La resaturation des éprouvettes jusqu'à $S_e=88\%$ provoque une chute de résistance déviatorique de 34% par rapport à l'état sec. De plus, la résistance déviatorique de l'éprouvette resaturée à $S_e=88\%$ est de 5% plus faible que celle de l'éprouvette saturée. Les phénomènes mis en jeu sont les mêmes que ceux indiqués dans le cas de la compression simple. Toutefois, la chute de résistance avec la resaturation est moins prononcée que celle observée dans le cas de la compression simple (34% contre 40%).

La figure 3 montre l'évolution du module d'Young obtenue par les essais de compression uniaxiale et triaxiale en fonction du degré de resaturation. Les modules d'Young des éprouvettes saturées sont également reportés sur cette figure (\diamond et \times). Dans le cas de compression uniaxiale, le module d'Young moyen diminue de 8% après le séchage au four ($S_e=0\%$). Au cours du processus de resaturation, le module ne varie pas même après une resaturation de 61% mais une chute supplémentaire est observée après resaturation sous vide ($S_e=88\%$). Le module moyen après resaturation sous vide diminue de 18% par rapport au module moyen des éprouvettes saturées. Dans le cas de compression triaxiale, le module d'Young diminue également, de 14%, avec le séchage ($S_e=0\%$). Par la suite, le module reste constant, même après la resaturation sous vide ($S_w=88\%$).

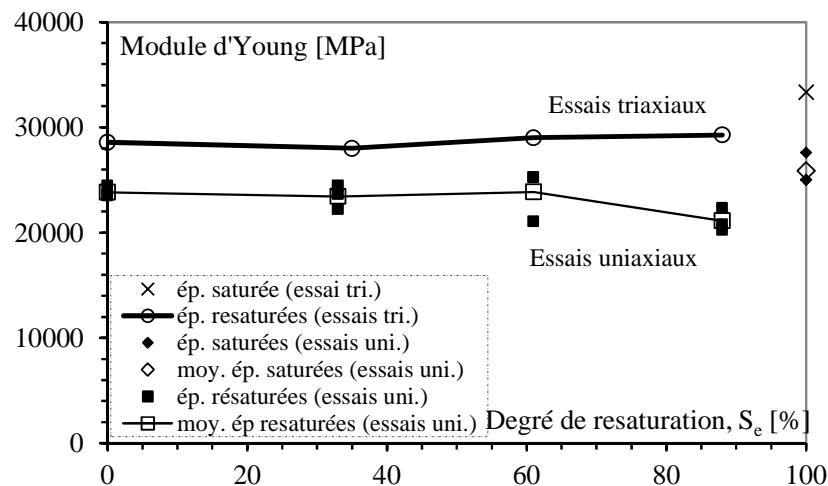


Figure 3 : Module d'Young sous compression uniaxiale et déviatorique (pression de confinement de 15 MPa) en fonction du degré de resaturation.

Ainsi, les résultats obtenus mettent en évidence une diminution supplémentaire du module d'élasticité sous compression uniaxiale après la resaturation sous vide pendant 24 heures. Comme ces éprouvettes gardées sous l'eau plus longtemps ont à la fois un degré de resaturation et une diminution des forces de cohésion plus importants, elles montrent mieux les effets négatifs de la microfissuration induite par le séchage et la resaturation. Rappelons qu'une reprise d'hydratation pourrait également avoir lieu mais son effet n'est pas détecté sur les valeurs de résistance et de module d'Young. Notons qu'Okajima et al. [9] ont aussi observé une détérioration du module de leur mortier. Ils ont enregistré au total une diminution de 30% du module entre l'état saturé et l'état resaturé.

3 Conclusions

Les résistances à la compression uniaxiale et triaxiale déviatorique des éprouvettes préalablement séchées diminuent avec la resaturation. Après la resaturation finale correspondant à la resaturation sous vide, la diminution est de 17 et 5% respectivement par rapport aux éprouvettes saturées. Notons

que la limite élastique dépend clairement de la quantité d'eau dans le matériau au moment de l'essai. Par ailleurs, le module d'Young obtenu sous compression uniaxiale des éprouvettes resaturées est de 18% plus faible que celui des éprouvettes saturées. Toutefois, le module ne semble pas varier avec la resaturation sous compression triaxiale du fait de la présence d'une pression de confinement. La détérioration des propriétés mécaniques avec la resaturation provient de la perte de l'effet rigidifiant et de l'endommagement (microfissuration) induit par le séchage qui est très probablement accentué par la resaturation. Cette perte de l'effet rigidifiant est due, d'une part, aux gradients de resaturation conduisant à une tension biaxiale, et d'autre part, à la variation de la dépression capillaire, de la tension de surface et de la pression de disjonction, dépendant de l'état de resaturation. Par ailleurs, l'eau interstitielle peut être soumise à une surpression, notamment lorsque les éprouvettes sont proches de la resaturation, ce qui peut amplifier l'ouverture et la propagation des microfissures.

Références

- [1] P. Acker, Comportement mécanique du béton : apport de l'approche physico-mécanique, Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LCP n°152, 1988.
- [2] Z.P. Bazant, F.H. Wittmann, Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley and Sons, 1982.
- [3] J. Bisschop, L. Pel, J.G.M. van Mier, Effect of aggregate size and paste volume on drying shrinkage microcracking in cement-based composites, in: F.J. Ulm, Z.P. Bazant, F.H. Wittmann (ed.) Creep, shrinkage & durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, Amsterdam, Netherlands, 2001, pp. 75-80
- [4] C. de Sa, F. Benboudjema, M. Thiery, J. Sicard, Analysis of micro-cracking induced by drying shrinkage, *Cem. Concr. Comp.*, 30 (2008) 947-956
- [5] F.M. Bartlett, J.G. MacGregor, Effect of moisture condition on concrete core strengths, *ACI Mater. J.* 91 (1994) 227-236
- [6] N. Burlion, F. Bourgeois, J.F. Shao, Effect of drying on mechanical behaviour of concrete, *Cem. Concr. Comp.* 27 (2005) 367-379
- [7] S. Popovics, Effect of curing method and moisture condition on compressive strength of concrete, *ACI Mater. J.* 83(1986) 650-657
- [8] I. Yurtdas, H. Peng, N. Burlion, F. Skoczylas, Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1286-1293
- [9] T. Okajima, T. Ishikawa, K. Ichise, Moisture effect on the mechanical properties of cement mortar, *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, 2 (1980), 125-132
- [10] F.H. Wittmann, Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste, *Mater. Struct.* 1(1968) 547-552
- [11] X.H. Vu, J. Malecot, L. Daudeville, E. Buzaud, Experimental analysis of concrete behaviour under high confinement: Effect of the saturation ratio, *Int. J. Solid Struct.* 46 (2009) 1105-1120
- [12] I. Yurtdas, N. Burlion, J.F. Shao, Evolution of mechanical behaviour of mortar with re-saturation after drying, *Mater. Struct.* 48 (2015) 3343-3355