

## Evaluation expérimentale des propriétés hydrodynamiques des matériaux cimentaires

Jean-Philippe Carlier, Gong Fan-Chao & Nicolas Burlion

Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR 8107 CNRS, Equipe Mécanique des Géomatériaux Cohérents  
Polytech'Lille  
Cité Scientifique  
59655 Villeneuve d'Ascq France  
[nicolas.burlion@polytech-lille.fr](mailto:nicolas.burlion@polytech-lille.fr)

### Résumé :

Plusieurs expériences de séchage isotherme sur des échantillons de matériaux cimentaires de natures, de compositions et de tailles différentes sont réalisées afin d'étudier l'influence des paramètres intrinsèques du matériau sur les transferts hydriques diffusifs. La loi proposée par van Genuchten et Mualem pour les milieux poreux est identifiée à partir des valeurs expérimentales de l'évolution de la teneur en eau en fonction de la pression capillaire dans le matériau. Une modélisation de l'équation de diffusivité permet ensuite d'estimer la perméabilité intrinsèque. La relation de van Genuchten-Mualem ne s'ajuste qu'imparfaitement aux résultats et apparaît sensible à la nature du matériau et à la taille de l'éprouvette utilisée. On met également en évidence une augmentation importante de la perméabilité intrinsèque du matériau au cours du séchage probablement due à l'apparition de microfissuration. Une modification de la formulation des propriétés hydrodynamiques est proposée pour permettre une meilleure représentation des ces expériences.

### Abstract :

Several isothermal drying experiments are conducted on cementitious material samples of various nature, composition and size to study the impact of the intrinsic properties of the material on diffusive water transfers. The equation proposed by van Genuchten and Mualem for porous medium is identified from the experimental data of water content versus capillary pressure in the material. A modelling of the diffusivity equation allows the estimation of the intrinsic permeability. The van Genuchten-Mualem relation fits only imperfectly to the results and appears sensible to material nature and sample size. A large increase of the intrinsic permeability during drying is also outlined, probably due to microfissuration. A modification of the hydrodynamical properties formulation is proposed to allow a better representation of these experiments.

### Mots-clefs : Matériau cimentaire ; séchage ; simulation

## 1 Introduction

La durabilité des structures de Génie Civil en matériaux cimentaires est fortement liée à la diffusion d'espèces chimiques dans le réseau poreux du matériau. De nombreux auteurs ont ainsi montré que l'évolution des propriétés physico-mécaniques de ces matériaux dépend principalement de leur état de saturation (par ex. Coussy *et al.* (1998)). Pour quantifier la dégradation des matériaux de construction, il apparaît donc nécessaire d'étudier et de modéliser les déplacements de l'eau et de l'air dans ces matériaux considérés dans ce qui suit comme des milieux poreux partiellement saturés en eau.

*A priori*, les phénomènes régissant ces déplacements sont nombreux et aboutissent à une description complexe impliquant à la fois convection et diffusion pour l'air et pour l'eau sous forme gazeuse et liquide. En confrontant une telle modélisation à des résultats expérimentaux,

Mainguy (2001) a toutefois montré qu'au cours du séchage l'essentiel des transferts avaient lieu sous forme Darcéenne pour l'eau liquide, couplée avec l'évaporation à la surface du matériau. L'équation permettant de décrire ces transferts prend alors la forme d'une équation de diffusion non-linéaire faisant intervenir la saturation en eau du matériau  $S_w$  :

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} - \nabla \cdot (D(S_w) \nabla S_w) = 0 \quad [1]$$

Le coefficient de diffusion hydrique  $D$  introduit ici est supposé ici ne rendre compte que du transport de l'humidité sous forme liquide, et s'exprime simplement par :

$$\phi D(S_w) = -\frac{k}{\eta} k_{rl}(S_w) \frac{dp_c}{dS_w} \quad [2]$$

Avec :  $\phi$  la porosité ;  $k$  la perméabilité intrinsèque ;  $k_{rl}$  la perméabilité relative  
 $\eta$  la viscosité cinématique de l'eau et  $p_c$  la pression capillaire

La résolution de cette équation, fortement non-linéaire, passe par la connaissance des relations liant la pression capillaire et la perméabilité à la saturation du matériau. Ces relations, liées à la nature du milieu poreux, à sa porosité, à la granulométrie et à l'organisation des éléments qui le composent, sont *a priori* difficiles à établir. De nombreux modèles ont été proposés par différents auteurs pour permettre une détermination de ces relations à partir d'un petit nombre de paramètres reliés à la nature du matériau. Le plus utilisé est celui proposé par Mualem (1976) et van Genuchten (1980) :

$$S_w = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad \text{et} \quad k_{rl} = S_w^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - S_w^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [3]$$

Avec  $m=1-1/n$  et  $h$  la charge hydraulique

Pour un matériau donné, ces relations sont complètement définies par la connaissance des deux paramètres  $\alpha$  et  $n$ . La détermination expérimentale de ces paramètres est effectuée à partir d'une mesure indirecte en utilisant des données expérimentales plus simples à obtenir, comme la courbe pression capillaire/saturation.

L'objectif de la présente étude est, à partir de la définition d'un protocole expérimental simple permettant de déterminer les relations nécessaires à l'évaluation des paramètres de perméabilité relative d'échantillons de ciment ou de mortier, d'étudier la sensibilité des résultats obtenus à différents paramètres expérimentaux. Après avoir rapidement présenté le dispositif utilisé, nous nous attacherons dans un premier temps à l'évaluation des paramètres de van Genuchten-Mualem en étudiant plus particulièrement l'influence de la géométrie et de la taille de l'échantillon pour mettre en évidence le caractère non-local des mesures effectuées et nous proposerons une alternative pour affiner la description des propriétés des matériaux. Dans un second temps, nous étudierons la cinétique du séchage des matériaux cimentaires et en particulier l'évolution de la perméabilité de ces matériaux avec la décroissance de la saturation.

## 2 Protocole expérimental

Afin de déterminer les relations nécessaires à l'évaluation des paramètres permettant de décrire les propriétés hydrodynamiques d'échantillons de ciment ou de mortier (paramètres de van Genuchten-Mualem et perméabilité), des expériences de séchage isotherme ont été menées en laboratoire. Les matériaux étudiés sont des pâtes de ciment et des mortiers pour lesquels des échantillons parallélépipédiques ont été réalisés à partir de ciment CEMI 55 HTS du Teil.

Les différents échantillons se distinguent par leur rapport eau sur ciment (E/C) et les dimensions de leur section transversale. Pour chaque jeu de paramètres, trois éprouvettes sont réalisées. Les paramètres des échantillons sont présentés dans le tableau I :

Taille [cm]	E/C = 0.4	E/C = 0.5	E/C = 0.6	E/C = 0.8
1*1*16	C	C (Pâte de Ciment)	C	C
2*2*16	C	C et M (Mortier)	C	C et M
4*4*16	C	C et M	C	C et M

TAB. 1 – Paramètres des échantillons.

Après le coulage, les échantillons sont laissés au repos pendant 24 heures puis subissent une maturation de 28 jours dans de l'eau saturée en chaux. Ensuite, les échantillons sont mis dans une enceinte climatique dans laquelle sont maintenues une température constante de 40 °C et une humidité relative contrôlée. Les variations de masse et de longueur de chaque échantillon sont alors suivies quotidiennement. Lorsque le poids des éprouvettes est stabilisé et l'équilibre hydrique atteint, une nouvelle consigne d'humidité est imposée. Celle-ci évolue au cours de l'expérience de 100 à 40%.

### 3 Evaluation des paramètres hydrodynamiques

Afin d'évaluer les paramètres hydrodynamiques des matériaux étudiés, on convertit dans un premier temps les variations de masse mesurée pour chacune des éprouvettes en variation de saturation. Pour cela, il est nécessaire de connaître la porosité totale du matériau, qui sera ici assimilée à la teneur en eau à saturation. Les expériences de séchage n'étant pas encore parvenues à terme, nous avons estimé arbitrairement cette valeur à 40% pour l'ensemble des matériaux, excepté pour la pâte de ciment E/C = 0.8 pour laquelle la valeur de 50% a été retenue. Cette estimation a été faite en adéquation avec les résultats déjà à notre disposition, et ne met pas en question les conclusions essentiellement qualitatives des présents travaux. Pour obtenir la relation entre pression capillaire et saturation, on suppose que l'air contenu dans l'échantillon suit la loi de Kelvin décrivant l'équilibre thermodynamique liquide - vapeur

#### 3.1 Sensibilité des résultats obtenus

On a ainsi pour chaque consigne d'humidité relative, à chacun des moments où la masse de l'échantillon est stabilisée, un point expérimental reliant la saturation relative de l'échantillon à la pression capillaire. Pour chaque éprouvette, on ajuste ainsi sur le jeu de points obtenus la relation de van Genuchten. Les résultats obtenus pour les ciments sont reportés dans la figure 1.

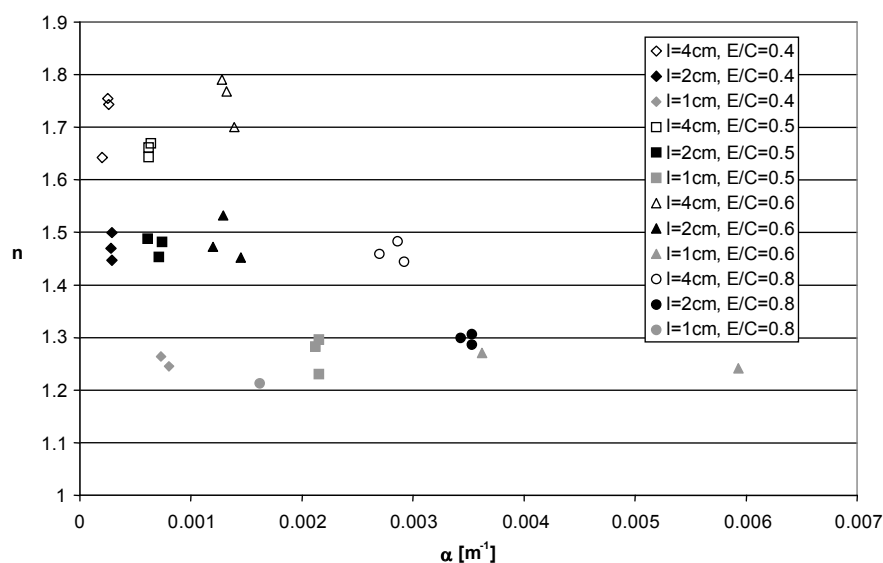


FIG. 1 – Paramètres de van Genuchten-Mualem – Pâtes de ciment.

L'examen de la figure 1 permet de tirer plusieurs informations qualitatives et quantitatives sur les résultats obtenus. A une ou deux exceptions près, les valeurs obtenues varient peu d'un échantillon à l'autre pour un même matériau et une même taille d'éprouvette, laissant augurer une bonne reproductibilité des mesures. De façon globale, on remarque tout d'abord que la valeur de  $\alpha$  et  $n$  ne sont pas *a priori* des constantes pour les matériaux cimentaires, mais que ces paramètres dépendent de la nature du matériau (mortier ou pâte de ciment) et de la constitution (rapport E/C) de celui-ci. Pour un même matériau en particulier, la valeur du rapport E/C semble n'avoir d'influence significative que sur la valeur de  $\alpha$  qui croît avec celui-ci, se traduisant par un séchage plus rapide.

Le résultat le plus significatif à l'examen de cette figure est cependant la relative sensibilité du paramètre  $n$  à la taille de l'éprouvette considérée. Pour un même matériau, la valeur de  $n$  croît systématiquement avec la taille de l'échantillon, ce qui reflète le fait que les mesures dont sont issus ces résultats ne sont que des résultats de l'évaluation de paramètres non locaux (masse totale de l'échantillon), et peut soulever le problème de l'applicabilité de tels résultats à l'échelle de l'ouvrage de Génie Civil.

### 3.1 Validité de la loi de van Genuchten-Mualem

La figure 2 représente à titre d'exemple le calage obtenu pour une éprouvette de pâte de ciment E/C = 0,5.

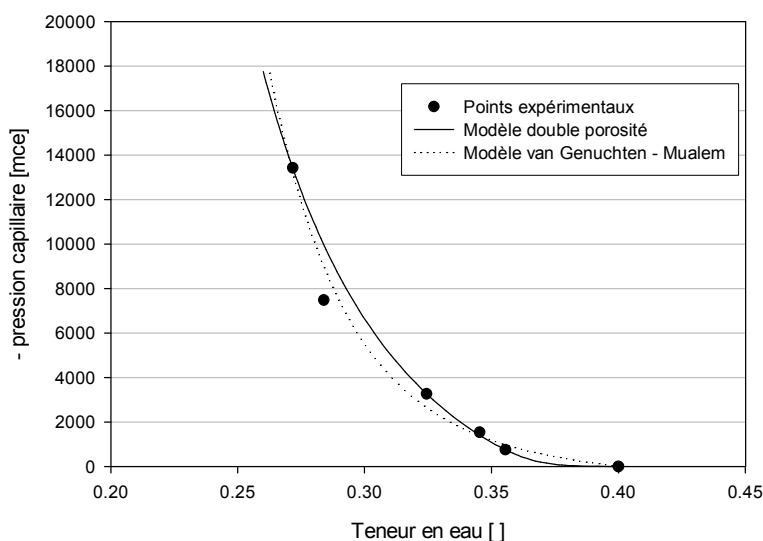


FIG. 2 – Courbe de rétention – Pâte de ciment – E/C = 0,5

En observant cette figure, on peut remarquer, et ceci est valable pour la très grande majorité des échantillons, que la courbe de rétention prédite par le modèle de van Genuchten-Mualem ne restitue qu'imparfaitement la relation pression capillaire/teneur en eau près de la saturation.

Pour remédier à ce problème, nous avons utilisé une description alternative des propriétés hydrodynamiques des milieux poreux non saturés proposée par Durner (1994) qui s'appuie sur la description de van Genuchten, mais appliquée à un milieu dans lequel cohabitent deux types de porosités ayant des propriétés de transfert différentes, et donc ayant chacune leur propres paramètres  $\alpha$  et  $n$ . Les équations pour ce type de milieu sont :

$$S_w = w_1 \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + w_2 \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2} \text{ et}$$

$$k_{rl} = \frac{\left( w_1 S_{w_1} + w_2 S_{w_2} \right)^{1/2} \left( w_1 \alpha_1 \left[ 1 - \left( 1 - S_{w_1}^{1/m_1} \right)^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[ 1 - \left( 1 - S_{w_2}^{1/m_2} \right)^{m_2} \right] \right)^2}{\left( w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2 \right)^2} \quad [5]$$

avec  $w_1$  et  $w_2$  deux paramètres à ajuster quantifiant le volume relatif occupé par les porosités 1 et 2.

Comme on peut l'observer sur la figure 2, l'ajustement de telles lois aux résultats expérimentaux permet d'obtenir une meilleure adéquation, ce qui permet d'émettre l'hypothèse de l'existence d'une double porosité structurale dans les matériaux cimentaires.

#### 4 Modélisation hydrodynamique

Les paramètres hydrodynamiques étant évalués, la description des propriétés de transfert hydrique dans les matériaux cimentaires est complète et nous pouvons modéliser la cinétique de ces transferts. Comme première approche nous avons choisi, au regard des symétries et des dimensions relatives des éprouvettes, d'utiliser une description unidimensionnelle des transferts au sein du matériau.

Une discrétisation aux différences finies de l'équation de diffusivité a ainsi été réalisée, permettant une utilisation du modèle de van Genuchten-Mualem ou de celui de Dürner. Les conditions à la limite imposées au modèle sont d'une part une saturation fixée au bord externe de l'éprouvette, et une condition de flux nul au centre de celle-ci.

A titre d'illustration, les résultats obtenus pour l'éprouvette présentée au 3.1 sont représentés sur la figure 3. Les valeurs de perméabilité intrinsèque obtenues par calage pour cette modélisation sont de  $5.4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  et  $2.7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  pour les modèles de van Genuchten-Mualem et Dürner respectivement.

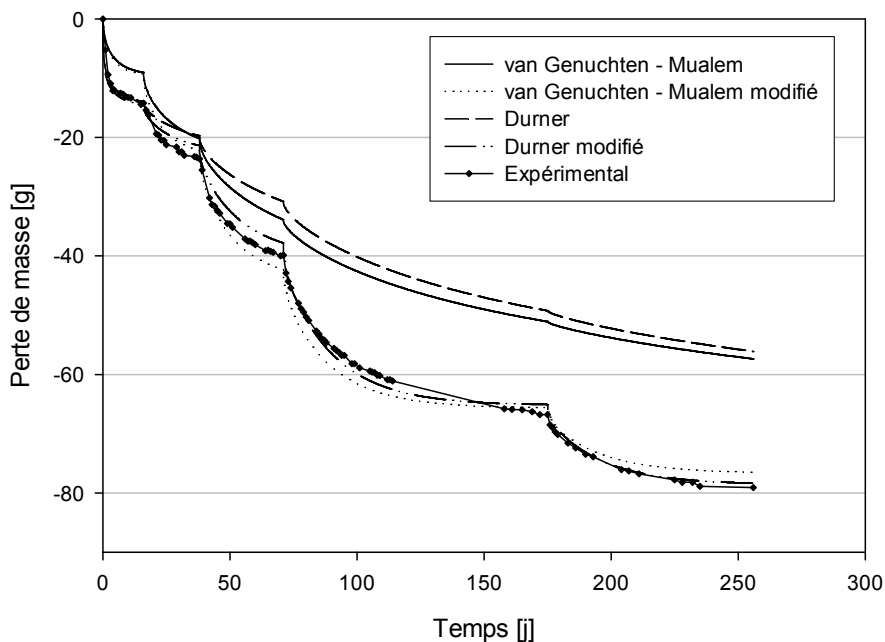


FIG. 3 – Modélisation du séchage – Pâte de ciment – E/C = 0.5

L'examen de cette figure met en évidence l'impossibilité pour les deux modèles (courbes pointillées) de rendre compte de façon correcte de la dynamique du séchage de cette éprouvette. Le modèle à double porosité fournit cependant des résultats plus satisfaisants au début de l'expérience, du fait de sa meilleure prédiction de la courbe de rétention.

On remarque dans les deux cas une sous-estimation de la masse perdue au cours du temps, venant du fait que l'évolution de perméabilité hydraulique globale de l'éprouvette n'est pas correctement décrite par les modèles, qui prédisent une diminution de cette dernière beaucoup plus importante que la réalité.

Cette divergence pourrait s'expliquer par l'apparition avec le séchage d'une microfissuration interne du matériau qui augmenterait au cours du temps sa perméabilité à l'eau. Ce phénomène n'étant pas pris en compte par les modèles sélectionnés (et développés à l'origine pour des sols, plus perméables et peu sujets à ce phénomène), il est nécessaire d'y apporter des modifications pour obtenir des résultats satisfaisants.

Nous proposons ici de modifier les expressions de perméabilité relative proposées par van Genuchten et Dürner en divisant simplement celles-ci par  $S_w^3$  (valeur obtenue par calage). Cette modification, comme on l'observe sur la figure 3, donne des résultats très satisfaisants sur la globalité des éprouvettes, ce que ne permet pas un simple ajustement de la perméabilité intrinsèque du matériau. Cette démarche reste à inscrire dans une démarche de modélisation plus globale des relations entre état mécanique et état hydrique du matériau.

#### 4 Conclusions

Les résultats de cette étude constituent une première étape vers une meilleure compréhension des phénomènes de transfert hydrique dans les matériaux cimentaires, et en particulier vers une meilleure détermination des paramètres qui régissent ces mécanismes. Ils mettent en évidence la nécessité de prendre en compte les modifications des propriétés de transfert induites par l'évolution de l'état du matériau lors du séchage. Pour ce faire, il apparaît comme nécessaire de s'engager dans la voie d'une modélisation intégralement couplée hygromécanique de ces matériaux.

D'un point de vue expérimental, cette étude permet de vérifier qu'une expérience de séchage simple donne une évaluation correcte des paramètres hydrodynamiques d'un matériau cimentaire, en soulignant cependant le caractère non local des propriétés ainsi mesurées, et donc l'attention particulière à porter à la taille de l'échantillon considéré et à la transposition à d'autres échelles des résultats obtenus.

#### Références

- Coussy, O., Eymard, R. et Lassabatère, T. 1998 Constitutive modelling of unsaturated drying deformable material. *J. Eng Mech.* **124(6)**, 658-667
- Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* **32 (9)**, 211-223.
- Mainguy, M. 1999. Modèles de diffusion non linéaire en milieu poreux. Application à la dissolution et au séchage des matériaux cimentaires. *Thèse de doctorat de l'ENPC.*
- Mualem, Y., 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous-media. *Water Resources Research* **12 (3)**, 513-522.
- Van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898.