
Perméabilité des pâtes de ciment à l'état frais

El Houssain Rochdi — Vincent Picandet — Sofiane Amziane

Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux, Université de Bretagne Sud, Rue de Saint maudé, B.P 92116, 56321 Lorient Cédex, France

{El-Houssain.Rochdi, Vincent.Picandet, Sofiane.Amziane}@univ-ubs.fr

RÉSUMÉ. Dans l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais, la conductivité hydraulique du matériau est un paramètre déterminant vis-à-vis de sa stabilité en général (ressuage, ségrégation lors de son pompage ou de son extrusion) ainsi que ses propriétés rhéologiques. Deux méthodes expérimentales ont été utilisées sur des pâtes de ciment avec des rapports E/C variants entre 0,3 et 0,4. L'une est basée sur un essai de perméabilité classique, l'autre, sur un essai de consolidation spécialement développé à cet effet. Ces deux méthodes donnent des résultats cohérents, et plus particulièrement lorsque les e/c sont importants. Ces résultats confirment également l'importante évolution de la structure du matériau dès les premiers instants du processus d'hydratation.

ABSTRACT. The hydraulic conductivity of the material is a key parameter for the study of fresh cementitious materials. It allows to evaluate its global stability (bleeding, segregation during pumping or extrusion) and it is also linked to its rheological properties. Two experimental methods were used with cement paste. The water to cement ratio ranges between 0.3 et 0.4. One method is based on a classical permeability test and the other one is based on a soil consolidation test specially adapted. These two methods give consistent results, especially with high water to cement ratio. These results also confirm the great evolution of the structure of the material since the beginning of hydration process.

MOTS-CLÉS : Perméabilité, consolidation, pâte de ciment, matériaux cimentaires à l'état frais, rhéologie.

KEYWORDS: Permeability, consolidation, cement paste, fresh cementitious materials, rheology

1. Introduction

La conductivité hydraulique d'un milieu poreux exprime la capacité de résistance à l'écoulement que manifeste le milieu face à un fluide sous un gradient de pression. Dans le cas des matériaux cimentaires, la détermination de ce paramètre, communément appelé perméabilité, joue un rôle important dans la compréhension des phénomènes gouvernant la qualité du matériau au jeune âge (Picandet *et al.*, 2005). Ainsi les phénomènes de ressuage et ségrégation sont fortement

influencés par la perméabilité (Josserand, 2004). La rhéologie et la stabilité du béton lors des opérations de pompage (Brown et Bamforth, 1977) ou d'extrusion (Perrot, 2006) sont également directement liées aux propriétés de conductivité hydraulique. Les facteurs dont dépend la perméabilité relèvent aussi bien de la texture du matériau (granulométrie des particules, surface spécifique) que de sa structure (mode d'arrangement des particules) (Musy, 1991). Au niveau textural, la distribution granulométrique des particules détermine la surface spécifique du matériau et ainsi l'intensité des forces d'adsorption dont découlent les frottements. Au niveau structural, le mode d'arrangement de ces particules, en définissant le réseau poreux du milieu, détermine le profil de vitesse ainsi que les trajectoires d'écoulement. De ces considérations, il ressort que la perméabilité des matériaux cimentaires découle essentiellement de la finesse des particules (granulométrie) et de la compacité du mélange (rapport E/C).

Les techniques de mesure de perméabilité ont été développées en grande partie pour l'étude du comportement mécanique des sols et peuvent être classées en deux catégories :

- méthodes directes basées sur la loi de Darcy et exprimant la vitesse de percolation du fluide entre deux points de l'échantillon en fonction de la différence de charge hydraulique imposée (Appleby, 1996),
- méthodes indirectes basées sur la théorie de consolidation unidimensionnelle correspondant aux conditions de l'essai œdométrique (Bolton 1997).

Dans le cadre de ce travail, un dispositif expérimental permettant de réaliser des essais de perméabilité pour chacune des deux méthodes a été développé. Les tests ont été effectués sur des pâtes de ciment avec des rapports E/C variant de 0,30 à 0,40. Les résultats obtenus par ces deux méthodes sont présentés et analysés.

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux

Tableau 1. Composition des mélanges étudiés

Mélange	E/C	Eau (l/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Masse volumique (kg/m ³)
PC30	0.30	487	1622	2109
PC33	0.33	510	1547	2057
PC36	0.36	532	1478	2010
PC40	0.40	558	1396	1954

Un ciment de type CEM I 52,5 a été utilisé. Sa granulométrie est comprise entre 0 et 100 μm . Sa surface spécifique Blaine est de 350 m^2/kg . Quatre mélanges ont été mis au point avec des rapports E/C variant de 0,3 à 0,4 (voir tableau 1).

2.2. Dispositif expérimental

Un perméamètre et un œdomètre spécialement adaptés aux pâtes de ciments ont été développés.

2.1.1. Essais au perméamètre

L'appareillage est constitué principalement d'une cellule de 1880 cm^3 (15 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) dans laquelle on met en œuvre le matériau à tester (figure 1).

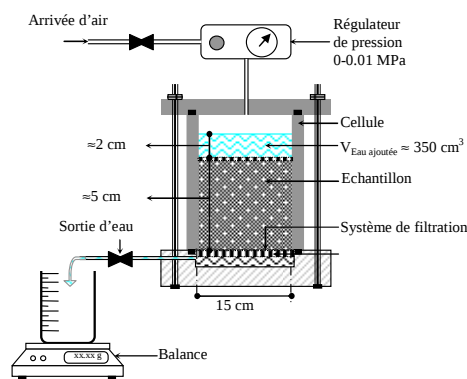


Figure 1. Schéma de principe du dispositif de perméamétrie

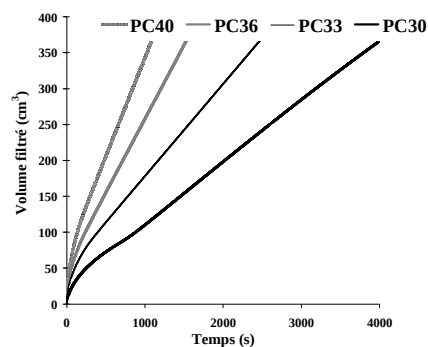


Figure 2. Evolution du volume filtré en fonction du rapport E/C lors de l'essai de perméabilité

Juste après le malaxage, on introduit le matériau dans la cellule et on rajoute 2 cm d'eau sur sa face supérieure afin de garder la même compacité tout au long de l'essai. Après fermeture de la cellule on applique une pression différentielle d'air égale à 0,3 bars et on commence les mesures du volume percolé. La pression exercée doit être suffisamment forte pour permettre l'écoulement de l'eau à travers l'échantillon dans un temps compatible avec la prise du matériau. Seules les mesures obtenues pour un volume d'eau percolé inférieur à 350 cm^3 sont par la suite considérées pour le calcul de la perméabilité (i.e. tant que le volume d'eau recueilli en sortie est inférieur à celui ajouté initialement au dessus de l'échantillon).

Les résultats expérimentaux se présentent sous forme de courbes exprimant l'évolution dans le temps du volume d'eau cumulé sortant de l'échantillon (voir figure 2). On remarque que les différentes courbes présentent la même allure. Le

débit est initialement élevé et diminue progressivement jusqu'à annulation. Comme attendu, l'accroissement du rapport E/C induit un débit plus important. Le débit mesuré pour une pâte de ciment de $E/C = 0,3$ est quatre fois moindre que pour un $E/C = 0,4$.

2.2.2. Essai à l'œdomètre

L'idée maîtresse de ce dispositif est de pouvoir réaliser un essai permettant de mesurer à la fois la perméabilité et la consolidation. Dans cet essai, un échantillon cylindrique de pâte de ciment est drainé sur ses faces supérieure et inférieure à l'aide d'une pierre poreuse et d'un papier filtre calibré à $2\ \mu\text{m}$. Une contrainte effective est appliquée par l'intermédiaire d'un piston équipé de capteurs de déplacement (figure 3). Sous l'action du poids de ce piston, l'échantillon subit une pression de 5,72 kPa. L'enfoncement du piston δ relatif au tassement de l'échantillon est enregistré au cours du temps par les capteurs de déplacement (voir figure 4). Ce tassement engendre une diminution du volume de l'échantillon correspondant à l'évacuation de l'eau contenue dans le matériau).

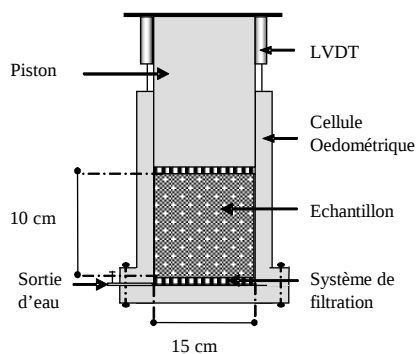


Figure 3. Schéma du principe de l'œdomètre

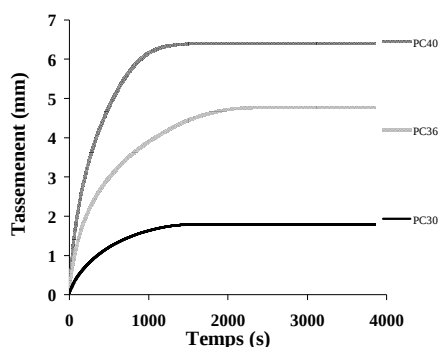


Figure 4. Evolution du tassement en fonction du rapport E/C lors de l'essai œdométrique

3. Analyse des résultats

3.1. Perméabilité à partir de l'essai au perméamètre

La perméabilité du matériau est calculée par application directe de la loi de Darcy (équation 1)

$$K = \frac{Q \cdot l}{A \Delta h} \quad [1]$$

Avec, Q le débit volumique du fluide traversant le matériau, A la section droite de l'échantillon, Δh la charge hydraulique appliquée et l , la longueur de l'échantillon.

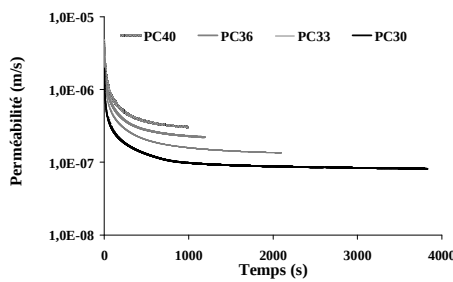


Figure 5. Evolution de la perméabilité en fonction du rapport E/C lors de l'essai au perméamètre

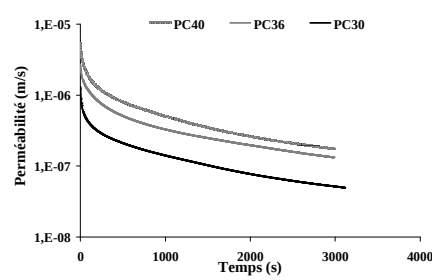


Figure 6. Evolution de la perméabilité en fonction du rapport E/C lors de l'essai à l'œdomètre

La figure 5 illustre l'évolution de la perméabilité pour les différentes pâtes de ciment testées. On observe un accroissement de la perméabilité plus E/C augmente. La perméabilité tend à se stabiliser plus rapidement lorsque le rapport E/C est faible. A titre d'exemple, on observe qu'après 10 minutes, la perméabilité varie peu avec le temps pour finalement se stabiliser à une valeur variant de $0,79 \cdot 10^{-6}$ m/s pour la PC30 à $2,7 \cdot 10^{-6}$ m/s pour la PC40.

3.2. Perméabilité à partir de l'essai de consolidation

Dans un essai de consolidation le tassement $\delta(t)$ en fonction de l'indice des vides initial e_i et l'indice des vides $e(t)$ de l'échantillon de hauteur initiale l_i est donné par la relation suivante :

$$\delta_{(t)} = l_i \frac{e_i - e_{(t)}}{1 + e_i} \quad [2]$$

$$\text{avec } e_i = \frac{M_{wi}}{M_c} \frac{\rho_c}{\rho_w}$$

L'indice des vides $e(t)$ est déterminé à partir des valeurs expérimentales du tassement (équation 3)

$$e_{(t)} = \frac{M_{wi} - \delta_{(t)}}{M_c} \frac{\rho_c}{\rho_w} \quad [3]$$

où M_{wi} est la masse initiale d'eau, M_c est la masse du ciment et ρ_w et ρ_c sont les masses volumiques de l'eau et du ciment respectivement. En considérant le matériau parfaitement saturé en eau, le débit d'eau sortant de l'échantillon est donnée par la dérivée temporelle de $\delta(t)$. En homogénéisant l'échantillon sur toute sa hauteur lors d'un drainage sur ses deux faces, une conductivité hydraulique moyenne K peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$\delta_{(t)} = K \frac{4\Delta h}{l_i - \delta_{(t)}} \quad [4]$$

Nous faisons l'hypothèse que la contrainte effective au centre de l'échantillon demeure nulle au cours de l'essai. La valeur de la pression interstitielle équivaut à σ/γ_w où σ est la contrainte effective exercée aux extrémités de l'échantillon au contact de la pierre poreuse, et γ_w est le poids volumique de l'eau. L'équation 4 peut alors s'écrire :

$$K = \frac{\delta_{(t)}(l_i - \delta_{(t)})}{4 \frac{\sigma}{\gamma_w} t} \quad [5]$$

Les courbes de perméabilité ainsi calculées sont présentées en figure 6. Elle confirme que la perméabilité que la perméabilité augmente avec le rapport E/C. Les écarts relatifs de perméabilité entre différentes pâtes sont du même ordre que ceux obtenus avec le perméamètre. En revanche, la perméabilité ainsi mesurée ne se stabilise pas durant une période d'essai comparable.

3.3. Comparaison des deux méthodes

La comparaison des résultats suivant les deux méthodes montre que les valeurs obtenues par l'essai de perméabilité sont plus élevées par rapport à celles obtenues par l'essai de consolidation (figure 7 et 8). L'écart entre les valeurs est fortement influencé par la teneur eau du mélange (plus E/C est faible plus l'écart est important). De plus cet écart est particulièrement élevé au début de l'essai (jusqu'à 100 % pendant la première minute). Cette différence diminue avec le temps. Au moment précis où la courbe obtenue au perméamètre se stabilise, les deux perméabilités sont très proches. L'influence du rapport E/C sur les résultats peut s'expliquer par l'importante hypothèse faite sur la nullité des contraintes effectives au centre de l'échantillon durant l'essai de consolidation. Cette hypothèse n'est valable que pour des mélanges à teneur en eau suffisamment élevée de telle manière

que les grains n'entrent pas en contact entre eux (i.e. contraintes effectives négligeables). Ainsi en augmentant E/C, les conditions de l'essai de consolidation deviennent proches de celles de l'essai de perméabilité et l'écart entre les résultats des deux méthodes diminue.

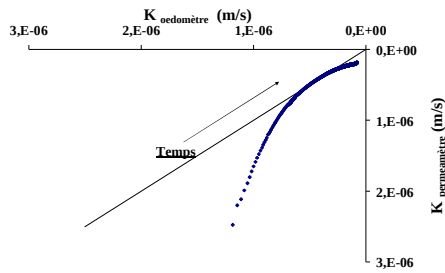


Figure 7. Comparatif des perméabilités perméamètre - oedomètre pour la pâte PC36

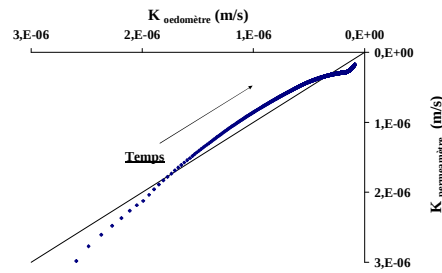


Figure 8. Comparatif des perméabilités perméamètre - oedomètre pour la pâte PC40

4. Conclusion

Deux dispositifs expérimentaux ont été adaptés dans le but de comparer deux techniques de mesure de perméabilités applicables aux pâtes de ciments à l'état frais. L'une est basée sur un essai classique de percolation sous gradient de pression constant et l'autre sur un essai de consolidation. Le profil de la perméabilité ainsi déterminé est caractérisé par une chute brutale pendant les premières minutes, particulièrement dans l'essai de perméabilité. La comparaison des résultats montre que les deux méthodes donnent des valeurs proches pour des fortes teneurs en eau. En réduisant la teneur en eau du matériau, la perméabilité à partir de l'essai de consolidation devient plus faible par rapport à celle déterminée à partir de l'essai de perméabilité. En ce qui concerne l'évolution de la perméabilité dans le temps, l'essai au perméamètre reflète au mieux le comportement du matériau à l'état frais du fait que la compacité de l'échantillon est maintenue à une valeur proche de sa valeur initiale. En revanche, l'essorage du matériau pendant l'essai de consolidation augmente davantage sa compacité et réduit sa perméabilité durant l'essai.

Ces résultats initiaux montrent clairement que la formulation des matériaux cimentaires a une influence significative sur ses propriétés de drainage. Notamment, la perméabilité reflète la stabilité du matériau sous un gradient de pression. De celles-ci dépendent le comportement sous contrainte lors des opérations de mise en place du matériau (pompage, extrusion, coulage de grande hauteur). En conséquence, des investigations de l'influence des pressions sur la perméabilité

doivent être menées. Compte tenu de cette expérience l'essai de filtration de conception plus simple permet une facilité d'expérimentation et une exploitation directe des résultats en comparaison de l'essai de consolidation.

Bibliographie

- Appleby S., Wilson A., Permeability and suction in setting cement, *Chemical Engineering Science*, vol. 51, n° 2, 1996, p. 251-267.
- Bolton M. D, McKinley J. D., Geotechnical properties of fresh cement grout – pressure filtration and consolidation tests, *Géotechnique*, vol. 47, n° 2, 1997, p. 347-352.
- Josserand L., Ressuage des bétons hydrauliques, Thèse de doctorat, ENPC, 2004.
- Musy A., Soutter M. Physique du sol, Lausanne, Presse Polytechnique et Universitaire Romandes, 1991
- Perrot A., Condition d'extrudabilité des matériaux à base cimentaire, thèse de doctorat INSA de Rennes 2006
- Picandet V., Amziane S., Tchamba J.C., "Study of early age shrinkage, hydraulic pressure and conductivity of cement paste", pp.405-410, CONCREEP 7 conference, Nantes 05, Hermes Science Publishing, isbn 1 905209 50 9, 2005
- Roger D. Browne and Phillip B. Bamforth, "Tests to Establish Concrete Pumpability", *ACI Structural Journal*, V.74, N° 5, May 1, 1977, pp. 193-203