



HAL
open science

Caractérisation des propriétés hydrauliques et acoustiques d'un mortier dégradé chimiquement : étude expérimentale

Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Bahia Talbi

► **To cite this version:**

Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Bahia Talbi. Caractérisation des propriétés hydrauliques et acoustiques d'un mortier dégradé chimiquement : étude expérimentale. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-04279471

HAL Id: hal-04279471

<https://hal.science/hal-04279471>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation des propriétés hydrauliques et acoustiques d'un mortier dégradé chimiquement : Etude expérimentale

Zoubeir LAFHAJ *, Marc GOUEYGOU**, Bahia TALBI *

*LML CNRS UMR 8107, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France

**IEMN DOAE CNRS UMR 8520, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France

Résumé :

Cet article concerne la caractérisation des propriétés hydrauliques et acoustiques d'un mortier dégradé chimiquement. Le travail se compose de deux parties. Dans la première partie, nous présenterons les dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer la dégradation, la porosité, la perméabilité et les vitesses acoustiques. Dans la seconde partie, nous analyserons les résultats de la variation de la perméabilité et des vitesses acoustiques en fonction de la porosité du matériau.

Abstract:

This paper concerns the characterization of hydraulic and acoustic properties of a chemically degraded mortar. The study was divided into two parts. In the first one, we will present the experimental devices used for degradation, porosity, permeability and acoustic velocities measurements. In the second part, we will analyse the results of variation of permeability and acoustic velocities with the variation of porosity.

Mots clefs :

Dégradation ; Perméabilité, Porosité, Mortier ; Vitesses acoustiques.

1 Introduction

La détérioration du béton résulte en général de la pénétration d'agents agressifs à travers sa peau, entraînant des dommages irréversibles non seulement à sa surface mais également dans sa structure interne. Actuellement les bétons employés, aussi bien pour la construction d'ouvrages d'art que pour le stockage des déchets radioactifs, sont souvent de haute qualité et présentent une perméabilité très faible (inférieure à 10^{-19} m²). Or, il est admis que la perméabilité d'un matériau est un indicateur fiable de sa durabilité ([2], [12]).

Nous nous sommes intéressés à la caractérisation physique et mécanique d'une dégradation d'origine hydraulique de matériaux à matrice cimentaire (mortier). En effet, l'eau (de nappe) au contact avec ces matériaux entraînera une décalcification du béton (par lixiviation) ce qui engendrera une augmentation de la porosité et de la perméabilité. La conséquence de ces variations sera alors une perte des résistances mécaniques de l'ouvrage. Afin d'étudier la dégradation du mortier au laboratoire, un dispositif expérimental a été mis au point. Ce dispositif est basé sur l'immersion d'échantillons dans une solution de nitrate d'ammonium. L'emploi du nitrate se justifie par le fait que ce dernier dégrade la matrice cimentaire de manière similaire à l'eau mais avec un facteur accélérateur de 100 ([1], [3], [4]).

Par ailleurs, les méthodes non destructives appliquées au béton sont des outils très pratiques pour l'évaluation de la qualité de ce dernier [8]. Parmi ces méthodes, le contrôle par ultrasons se distingue par sa facilité d'utilisation en plus de son faible coût ([5], [11]). L'objectif de cette étude est de corréler les propriétés hydrauliques (méthodes directes) avec les vitesses acoustiques (méthodes non destructives) d'un mortier dégradé chimiquement. Le travail se compose de deux parties. Dans la première partie, nous présenterons les dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer la dégradation, la porosité, la perméabilité et les vitesses acoustiques. Les essais ont été effectués sur des mortiers dont le rapport Eau/Ciment variait

entre 0,3 et 0,63. Dans la seconde partie, nous analyserons les résultats de la variation de la dégradation, de la perméabilité et des vitesses acoustiques avec la porosité du matériau.

2 Méthodes expérimentales

2.1 Préparation témoin

Les échantillons sont des cylindres de 37mm de diamètre et de 70mm de longueur. Ils ont été prélevés par carottage dans des éprouvettes cylindriques. Ces cylindres ont été ensuite rectifiés. La composition du mortier utilisé est donnée dans le tableau ci dessous (CPA CEM I 52,5 de Portland, du sable d'Origny et de Hostun). Le mélange est préparé avec plusieurs rapports Eau / Ciment (0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6).

Constituants	eau	ciment	Sable fin	Sable grossier
Quantité en kg/m ³	256	639	966	414

Tableau 1 - Composition du mortier utilisé (E/C=0,4)

2.2 Dégradation chimique

La dégradation se fait par immersion totale des échantillons dans une solution de nitrate d'ammonium. La concentration de cette dernière est de 6 Moles/Litre (480 grammes de NH₄NO₃ dans un litre d'eau déminéralisée). La Figure 1b illustre le dispositif expérimental utilisé. Les échantillons ont été placés dans des béciers étanches afin d'éviter l'évaporation des nitrates. Une fois que l'échantillon est immergé dans la solution (pH=4,5), le mécanisme d'attaque commence engendrant une forte augmentation du pH qui atteint une valeur de 8. Pour maintenir l'agressivité de la solution, cette dernière est alors renouvelée régulièrement (tous les 2 jours). Plusieurs temps de dégradation ont été retenus (4 jours, 9 jours, 16 jours et 25 jours) [10]. Après chaque dégradation, les échantillons ont été lavés à l'eau déminéralisée afin d'extraire les sels de nitrate restants dans les échantillons.

2.3 Mesure de la porosité saine et de la porosité de la zone dégradée

La Figure 1.a présente un schéma d'un échantillon dégradé partiellement. La zone de circonférence est dégradée à une épaisseur donnée et le cœur de l'échantillon reste sain. Pour la détermination de la porosité saine Φ_s et la porosité dégradée Φ_d nous utilisons les deux équations suivantes :

$$\Phi_s = \frac{M_{sat}^s - M_{sec}^s}{V_s} \frac{1}{\rho_{\text{éthanol}}} \quad \text{et} \quad \Phi_d = \frac{M_{sat}^d - M_{sec}^d}{V_d} \frac{1}{\rho_{\text{éthanol}}}$$

où M_{sat}^s et M_{sat}^d sont respectivement la Masse saturée en éthanol de la zone saine et de la zone dégradée, M_{sec}^s et M_{sec}^d sont respectivement la masse sèche de la zone saine et dégradée, $\rho_{\text{éthanol}}$ est la masse volumique de l'éthanol. Les masses ont été déterminées avec une balance dont la précision est inférieure à 0,1g. Enfin V_s et V_d sont respectivement le volume total de l'échantillon sain et dégradé.

2.4 Mesure de la perméabilité

Le principe général de l'essai consiste à injecter de l'éthanol à travers un échantillon [9]. La cellule de pression a été conçue pour soumettre l'échantillon à une pression constante P_i d'éthanol sur une extrémité et à la pression atmosphérique P_0 sur l'autre extrémité. Le dispositif expérimental utilisé est illustré dans la FIG.2. L'échantillon est placé dans une cellule de confinement. La pression de confinement est maintenue

constante par une pompe de type de Gilson. La mesure du débit se fait par lecture des tubes capillaires calibrés. Il s'agit d'une mesure directe de la perméabilité basée sur la mesure du débit d'entrée Q [10]. Connaissant ce débit, la perméabilité peut être déterminée grâce à la loi de Darcy, son expression est :

$$K_s = \frac{\mu Q}{S} \frac{h}{(P_i - P_o)}$$

K_s est la perméabilité de l'échantillon sain, Q est le débit injecté, μ est la viscosité liquide, P_i est maintenu constant à 1,5 MPa pendant l'essai et le P_o est la pression atmosphérique. S et h sont respectivement la section et la hauteur de l'échantillon.

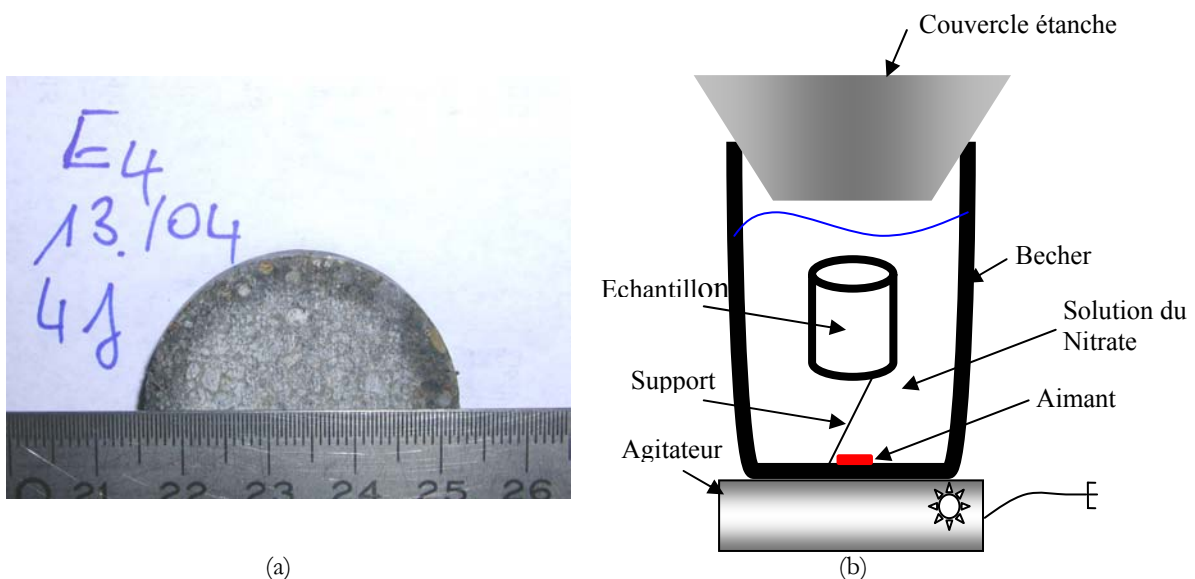
Concernant la détermination de la perméabilité d'un échantillon partiellement dégradé, un dépouillement spécifique a été adopté. En effet, le débit global injecté dans l'échantillon est la somme de deux débits relatifs à la zone dégradée et à la zone saine, la perméabilité de la zone dégradée (K_d) peut être déduite selon l'équation suivante :

$$K_d = \frac{K_t S_t - K_s S_s}{S_d}$$

Où K_t et S_t désignent la perméabilité et la section totale de l'échantillon partiellement dégradé, K_s et S_s ont été préalablement déterminés (essai sur échantillon sain). La section dégradée (S_d) peut être déduite après la mesure de l'épaisseur dégradée (voire FIG1.a).

2.5 Mesures ultrasoniques

La vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales est mesurée, pour chaque type d'onde, avec un seul transducteur, utilisé à la fois en émetteur et en récepteur (Fig.3.a). L'impulsion émise est large bande, avec une fréquence dominante non atténuée de 0,5 MHz. Cette fréquence relativement élevée permet de distinguer les réflexions multiples de l'onde à l'intérieur de l'échantillon, nécessaires à la mesure de la vitesse. Nous appliquons la « méthode du buffer » [6, 7] qui consiste à intercaler un disque en plexiglas, d'épaisseur 10 mm, entre le transducteur et l'échantillon. Le couplage transducteur-disque et disque-échantillon est assuré par une fine couche de gel, dont la nature est adaptée au type d'onde. Pour chaque test, nous enregistrons le signal réfléchi qui comprend deux impulsions : l'écho $s_1(t)$ renvoyé par l'interface plexiglas-mortier et l'écho $s_2(t)$ renvoyé par le fond de l'échantillon (Fig.3.b). Le décalage temporel Δt entre ces deux impulsions est estimé à partir de leur passage par zéro, en tenant compte de l'inversion de signe de l'impulsion réfléchie sur le fond de l'échantillon (Fig.3.c). La vitesse est alors obtenue en faisant le rapport entre la longueur du trajet de l'onde (2 fois l'épaisseur de l'échantillon) et le décalage Δt .



(a) Echantillon dégradé ; (b) Schéma du principe

FIG.1 - Dispositif expérimental de la dégradation chimique

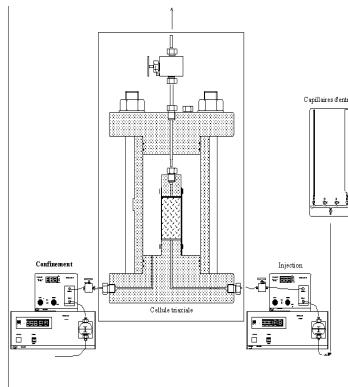


FIG.2 - Dispositif Expérimental de mesure de perméabilité au liquide.

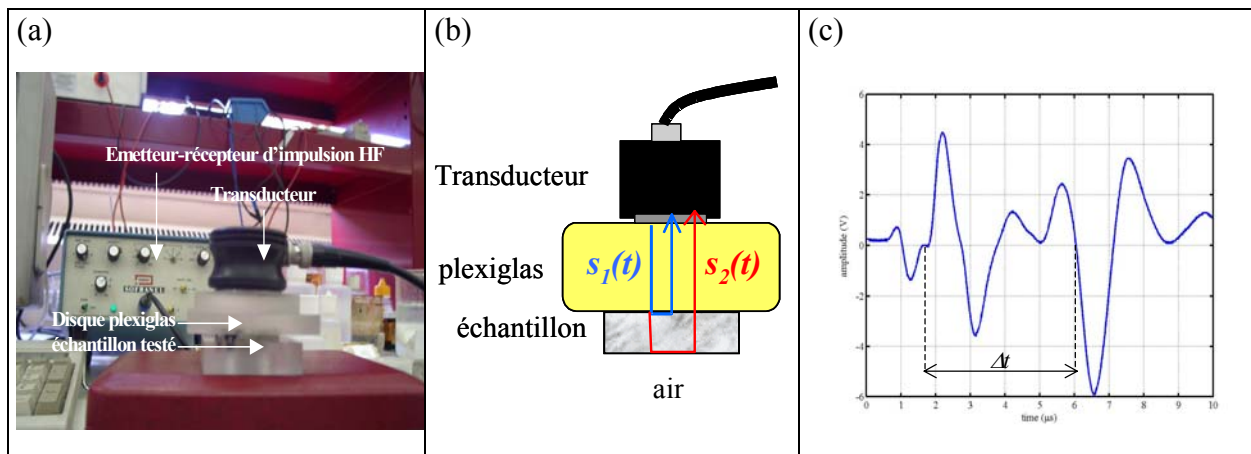


FIG.3 – Mesure des vitesses ultrasonores

(a) Dispositif expérimental ; (b) Signaux reçus ; (c) Estimation du décalage temporel.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Porosité et perméabilité

La porosité à l'éthanol des échantillons sain et dégradé a été mesurée. On peut observer que la porosité globale de chaque échantillon dégradé augmente en fonction à la fois du rapport E/C du mortier et en fonction du temps de dégradation (FIG.4a). L'augmentation maximale de porosité a atteint les 15%, ce résultat a été obtenu après une dégradation de 25 jours. Afin d'analyser plus finement les résultats, la variation de la porosité du mortier dégradé a été reportée au volume de la zone dégradée. Il ressort de la FIG.4b que l'écart entre les valeurs de porosité saine et dégradée n'est pas sensible à la durée de dégradation. Par conséquent, l'augmentation globale observée de porosité est principalement due à l'augmentation du volume dégradé. La perméabilité a été également mesurée sur les mêmes échantillons sains et dégradés (Fig.5). Nous avons noté les mêmes tendances de variation observées pour la porosité. En effet, la perméabilité augmente en fonction du rapport E/C du mortier et en fonction du temps de la dégradation.

3.2 Vitesses acoustiques des échantillons dégradés

Les Figures 6 et 7 montrent la variation de la porosité en fonction des vitesses d'ondes longitudinale et transversale. On peut noter que les valeurs des vitesses longitudinales sont plus élevées que celles des vitesses transversales. On observe également que la vitesse des deux ondes diminue quand la porosité augmente. Cependant, une ligne de régression simple ne pourrait pas être obtenue et, dans certains cas, la vitesse a été trouvée plus élevée dans l'échantillon le plus dégradé que dans l'échantillon sain. Ceci est dû au fait que le nitrate d'ammonium est resté à l'intérieur des pores masquant ainsi l'effet de la dégradation à l'onde ultrasonique. Il ressort que la phase lavage des échantillons dégradés revêt une grande importance et doit être faite avec un soin particulier.

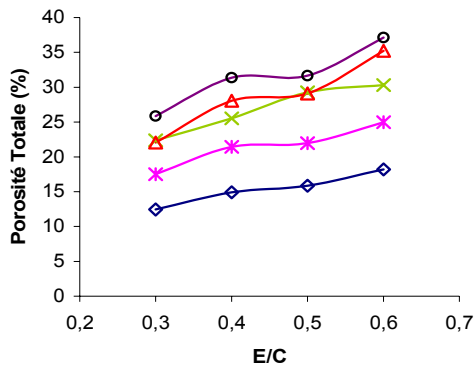


FIG.4a - Variation de la porosité globale en fonction du rapport E/C.
 ◇ échantillon sain ; échantillon dégradé pour 4j (✱), 9j (✕), 16j (Δ) et 25 jours (O).

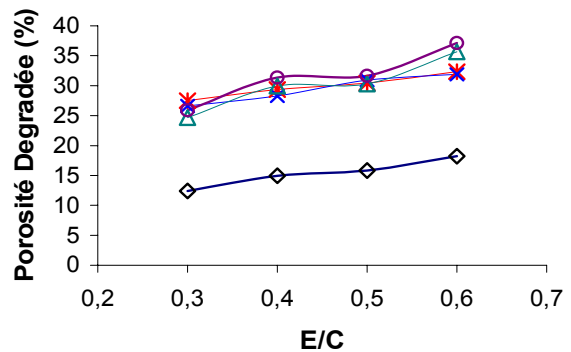


FIG.4b - Variation de la porosité dans la couche dégradée en fonction du rapport E/C.
 ◇ échantillon sain ; échantillon dégradé pour 4j (✱), 9j (✕), 16j (Δ) et 25 jours (O).

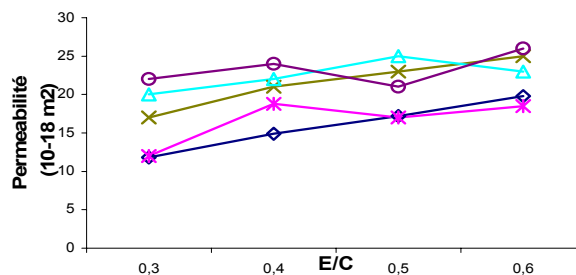


FIG.5 - Variation de la perméabilité en fonction de rapport E/C
 ◇ Échantillon sain ; échantillon dégradé pour 4j (✱), 9j (✕), 16j (Δ) et 25 jours (O).

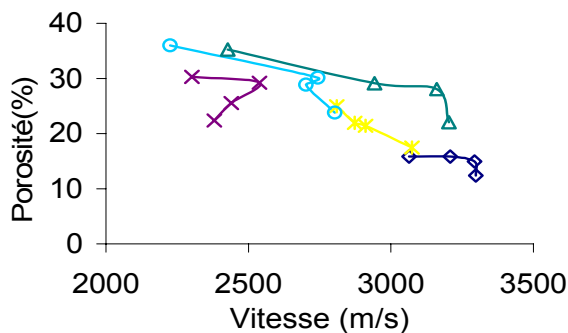


FIG.6 - Variation de la porosité en fonction de la vitesse longitudinale.
 ◇ échantillon sain ; échantillon dégradé pour 4 (✱), 9 (✕), 16 (Δ) et 25 jours (O).

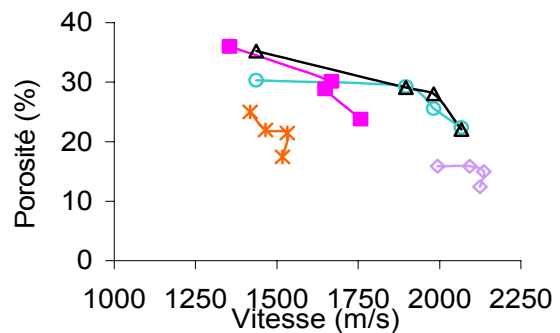


FIG.7 - Variation de la porosité en fonction de la vitesse transversale.
 ◇ échantillon sain ; échantillon dégradé pour 4 (✱), 9 (✕), 16 (Δ) et 25 jours (O).

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons réalisé une étude expérimentale dont l'objectif est la détermination des propriétés hydrauliques et acoustiques d'un mortier sain et après dégradation. Pour la détermination de la dégradation, de la porosité et de la perméabilité des dispositifs expérimentaux directes ont été utilisés. Pour les mesures non destructives, un dispositif expérimental basé sur la propagation d'ondes ultrasonores longitudinales et transversales a été utilisé. Les principaux résultats obtenus montrent que la porosité et la perméabilité du mortier augmentent en fonction de la durée de dégradation. Les vitesses de propagation longitudinales et transversales diminuent à la fois en fonction du rapport E/C du mortier et avec l'augmentation de la durée de dégradation. Le travail expérimental qui reste à faire est la corrélation entre les propriétés hydrauliques notamment la porosité et la perméabilité avec les propriétés acoustiques afin de mettre au point un dispositif expérimental pour une utilisation sur site.

References

- [1] Faucon P., Adenot F., Jacquinet J.F., Petit J.C., Cabrillac R., Jorda M. (1998). Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation. *Cement and Concrete Research*, Vol 28, n° 6, pp. 847-857.
- [2] AFREM Durabilité des bétons. (1996). Essai de perméabilité aux gaz du béton durci : mode opératoire recommandé.
- [3] Carde C., Raoul F. (1999). Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, Vol 21, n° 3, pp. 181-188.
- [4] Carde C., Raoul F. (1997). Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties. *Cement and Concrete Research*, Vol 27, n°4, pp. 539-550.
- [5] Eggers F., Kaatze U. (1996). Broad-band ultrasonic measurement techniques for liquids. *Meas. Sci. Technol*, Vol 7, pp. 1-19.
- [6] Papadakis E.P. (1968). Buffer-Rod for Ultrasonic attenuation Measurements. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 44, n° 5, pp. 1437-1441.
- [7] Papadakis E.P., Fowler K.A., Lynnworth L.C. (1973). Ultrasonic attenuation by spectrum analysis of pulses in buffer rods: Method and diffraction correction. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 53, n° 5, pp. 1336-1343.
- [8] Hernandez M.G., Izquierdo M.A.G., Ibanez A., Anaya J.J., Gomez-Ullate L.G. (2000). Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDT. *Ultrasonics*, Vol 38, pp. 531-536.
- [9] Iffly, R. (1956). Etude de l'écoulement des gaz dans les milieux poreux. *Revue IFP*, Vol XI, n°6, pp. 757-1018.
- [10] Loosveldt H., Lafhaj Z., Skoczylas F. (2002). Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar. *Cement and Concrete Research*. Vol 32, pp. 1357-1363.
- [11] Popovics J. S., Song W., Achenbach J. D., Lee J. H., Andre R. F. (1998). One-sided stress wave velocity measurement in concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 24, n°12, pp. 1346-1353.
- [12] Udegbunam O., Yaman I., Aktan H., Hohm T. (1999). Developing a Rapid Measure of Concrete Permeability for use in QA/QC Specifications. *Transportation Research Board*, 78th annual meeting, January 10-14, Washington D.C.