Etude expérimentale de l'interaction endommagement-température-perméabilité du béton

Marta Choinska

R&DO, Institut GeM / UMR CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France

RESUME. L'objectif de cette étude est de caractériser l'interaction entre endommagement, température et perméabilité du béton de structure. Les essais sont effectués sur des échantillons cylindriques creux, soumis à une compression uniaxiale et à des températures allant jusqu'à 150 °C. Les résultats obtenus montrent que, pour un chargement inférieur à 80 % du chargement maximal, la variation de la perméabilité reste faible et peu influencée par le chargement. Quand le chargement excède 80 % du chargement maximal et approche le pic, l'endommagement croit rapidement, entraînant une augmentation importante de la perméabilité. Dans la phase post-pic, l'accroissement de la perméabilité devient extrême suite à l'ouverture des fissures. L'augmentation de la perméabilité avec le chargement mécanique appliqué semble s'accroître à température élevée, provoquant la dilatation et l'altération de la structure poreuse du béton. Enfin, les résultats obtenus révèlent que les effets de l'endommagement et de la température peuvent être découplés pour l'estimation de l'évolution de la perméabilité du béton.

MOTS-CLÉS : Perméabilité, Endommagement, Température

ABSTRACT. The objective of this study is to investigate damage-temperature-permeability interactions in structural concrete. The tests are performed on hollow cylindrical concrete specimens, subjected to compressive loading and temperature up to 150 °C. The results emphasize that at stress levels lower than 80 % of the peak stress, the variation of permeability is small and it is slightly influenced by the stress. As the load exceeds 80 % of the peak stress and approaches the peak, microcracking increases rapidly, causing an important increase of the permeability. In the post-peak phase the increase of permeability is much larger due to significant crack width growth. The increase of permeability with the applied mechanical load seems to be greater with temperature, inducing the further alteration of concrete and dilation of the porous structure of the material. Finally, the obtained results reveal that the effects of damage and temperature may be decoupled for the estimation of the concrete permeability.

KEYWORDS : Permeability, Damage, Temperature

1. INTRODUCTION

La perméabilité du béton mesure la capacité de ce matériau poreux à être traversé par des fluides sous un gradient de pression. Le flux se produit dans un réseau poreux, comportant une porosité initiale (pas nécessairement connectée) ainsi que des fissures induites par les effets de chargements mécaniques, environnementaux et différés. Les fissures interconnectent généralement les chemins de percolation et diminuent la résistance du milieu au flux, provoquant ainsi une augmentation de la perméabilité. En conséquence, la perméabilité influence la durabilité des structures en béton indirectement en gouvernant la vitesse de pénétration d'agents agressifs, mais aussi directement dans le cas où la structure joue un rôle d'étanchéité (enceintes de confinement des centrales nucléaires, par exemple).

L'évolution de la perméabilité du béton peut être regardée, d'une part, en fonction de la microfissuration diffuse (reliée à l'endommagement), et d'autre part, en fonction de la largeur, de la connectivité et de la tortuosité des fissures. L'existence de l'interaction entre la perméabilité et l'endommagement diffus (microfissuration) a été prouvée théoriquement par Dormieux et Kondo (2004) qui ont employé des techniques d'homogénéisation sur un problème micromécanique. Des résultats semblables ont été obtenus par Chatzigeorgiou *et al.* (2005) basés sur les modèles discrets (réseaux). Certains résultats expérimentaux ont également démontré l'interaction entre la perméabilité et la microfissuration induite par la compression uniaxiale dans la phase pré-pic. L'augmentation de la perméabilité au gaz, mesurée sous chargement, a été observée à partir de 75-90 % de la contrainte ultime, correspondant au développement et à l'interconnexion des fissures dans la pâte de ciment (Sugiyama *et al.*, 1996 ; Hearn et Lok, 1998). Picandet *et al.* (2001) ont montré que la perméabilité résiduelle au gaz du béton augmente avec l'endommagement induit par la compression uniaxiale dans la phase pré-pic. De plus, le modèle phénoménologique de Picandet *et al.* (2001) a été corrélé avec les résultats expérimentaux pour des faibles endommagements (de 0 à 20 %, pré-pic), ceux-ci correspondant à une microfissuration diffuse de façon homogène dans le matériau. Cependant, quand une macrofissure traversante apparaît dans la structure (phase post-pic), la perméabilité est régie par l'écoulement de Poiseuille. Cet écoulement est fonction de l'ouverture, de la rugosité et de la tortuosité de la fissure (Dullien, 1979). Les essais de fendage ont mis en évidence une relation entre la perméabilité à l'eau ou au gaz, et la largeur de fissure (Wang *et al.*, 1997).

La température constitue un autre paramètre influençant la perméabilité du béton. Des phénomènes multiples au niveau microstructural apparaissent pendant la mise en température élevée du béton. Parmi les plus importants, figurent la modification de la teneur en eau due à l'évaporation de l'eau libre (jusqu'à 105 °C), la déshydratation chimique de la pâte de ciment due à la perte de l'eau liée (au delà de 105 °C - Bazant et Whittmann, 1982), la dilatation thermique, la contraction provoquée par le changement de phase, la fissuration thermique, le changement de pression de pores, etc. (Luccioni *et al.*, 2002). La perméabilité au gaz est fortement influencée par la teneur en eau du matériau (Sanjuan *et al.*, 1996 ; Gardner *et al.*, 2005). La déshydratation chimique de la pâte de ciment modifie la géométrie de la microstructure ; le comportement hydraulique du béton est alors affecté (Dal Pont et Erlacher, 2004). Lion *et al.* (2005) ont mis en évidence qu'un traitement thermique d'un mortier provoque une augmentation de la porosité et de la perméabilité au gaz, multipliant par sept sa valeur initiale (mesurée à 25 °C) après un traitement à 250 °C. Les essais réalisés par Joos et Reinhardt (2002) ont montré une augmentation de la perméabilité à l'eau de 10 à 14 % entre 20 °C et 50 °C, et de 7 à 11 % entre 50 °C et 80 °C. Selon Gawin *et al.* (2003), une relation type puissance entre la température et la perméabilité devrait être considérée.

Les données expérimentales existantes révèlent une certaine corrélation entre la perméabilité et l'endommagement mécanique du béton. Il en est de même pour l'influence de la température sur la perméabilité du béton, mais peu de données sont disponibles quant aux effets couplés de la température et du chargement mécanique sur la perméabilité du béton. Ainsi, nous cherchons à déterminer une relation régissant la perméabilité du béton soumis à une température élevée et endommagé (endommagement modéré qui génère une microfissuration diffuse, endommagement fort générant des macrofissures localisées). Afin de réaliser des essais mettant en évidence l'interaction endommagement-température-perméabilité, un dispositif expérimental a été développé. Il permet de

mesurer la perméabilité au gaz en fonction de la température allant jusqu'à 150°C sous chargement mécanique dans les phases pré-pic et post-pic du chargement.

Le programme expérimental et les résultats sont exposés ci-dessous selon le plan suivant. Dans un premier temps, le dispositif expérimental associé à la méthode d'essai pratiquée sont décrits, et dans un second temps, les résultats de l'étude expérimentale, c'est à dire, la variation de la perméabilité avec le chargement mécanique et avec la température dans les phases pré-pic et post-pic, sont présentés et analysés. En conclusion, une loi d'évolution de la perméabilité en fonction de l'endommagement et de la température est proposée et commentée.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. COMPOSITION ET CURE DU BETON ETUDIE

Un béton ordinaire de rapport Eau/Ciment = 0.6 est utilisé dans cette étude. Toutes les éprouvettes, coulées dans des moules métalliques, ont suivi la même cure et le même conditionnement. Elles ont été plongées dans l'eau pendant 28 jours et séchées dans une étuve ventilée pendant 28 jours à 80 °C, puis à 105 °C jusqu'à la masse constante.

2.2. APPLICATION DES SOLLICITATIONS MECANIQUE ET THERMIQUE

Les sollicitations mécaniques sont appliquées à l'aide d'une presse hydraulique asservie en déplacement. L'échantillon sollicité mécaniquement est placé dans une enceinte climatique à température et humidité relative contrôlées. Les températures imposées sont respectivement de 20 °C, 105 °C et 150 °C. Par souci de simplification, l'étude est limitée aux matériaux secs ; en conséquence, l'humidité relative générée par l'enceinte est constamment maintenue proche de 0 %. Cependant, des essais à des niveaux de saturation variables peuvent être également menés.

2.3. MESURE DE LA PERMEABILITE AU GAZ

Les essais sont menés dans le cadre d'un écoulement en régime permanent et isotherme. La perméabilité au gaz est mesurée en utilisant l'azote comme fluide percolant. Le gaz est injecté par la surface intérieure de l'éprouvette à l'aide d'un plateau métallique percé et adapté au diamètre de l'éprouvette cylindrique creuse utilisée. L'écoulement obtenu est radial.

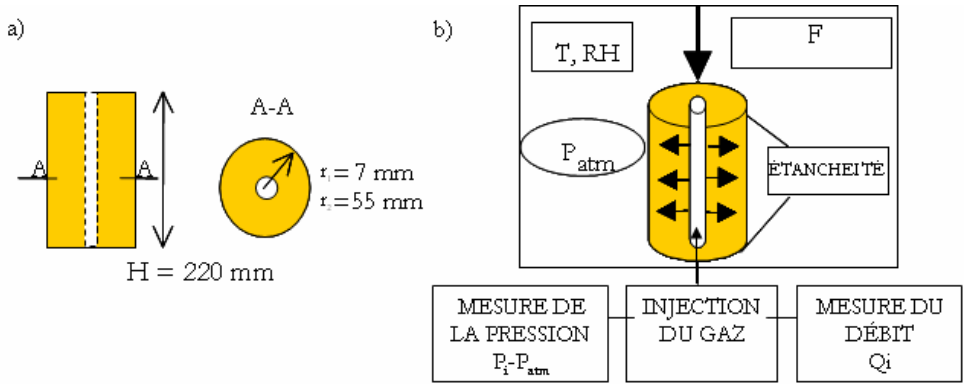

Figure 1. a) Géométrie de l'éprouvette b) Schéma du dispositif expérimental.

La géométrie de l'éprouvette est représentée sur la Figure 1a), alors qu'un schéma de principe du perméamètre utilisé est montré sur la Figure 1b).

Le coefficient de perméabilité, appelé perméabilité dans la suite, est calculé à partir de la loi de Darcy adaptée pour un fluide visqueux compressible (gaz) en écoulement laminaire à travers un milieu poreux. La perméabilité k_a [m^2], se basant sur la mesure du débit d'injection, est calculée de la manière suivante :

$$k_a = \frac{Q_i \cdot P_i \cdot \mu \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi \cdot H \cdot \left(P_i^2 - P_{atm}{}^2\right)} \qquad \text{[Eq. 1]}$$

où Q_i [m^3/s] est le débit volumique de gaz à pression d'injection, P_i [Pa] est la pression absolue d'injection, μ [Pa.s] est la viscosité dynamique de l'azote, P_{atm} [Pa] est la pression atmosphérique, et r_1, r_2, H [m] sont respectivement le rayon intérieur, le rayon extérieur et la hauteur de l'éprouvette cylindrique. La perméabilité k_a dépend de la pression d'injection ; elle n'est pas alors une caractéristique intrinsèque du matériau. Cependant, avec l'approche de Klinkenberg (1941), la perméabilité intrinsèque, due uniquement à l'écoulement visqueux, peut être déterminée à partir de plusieurs mesures de perméabilité apparente k_a pour différentes pressions d'injection P_i.

2.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE

L'éprouvette, instrumentée par trois capteurs de déplacement LVDT, est placée entre les plateaux de la presse. Cet ensemble est mis à l'intérieur d'une enceinte climatique régulée en température et en humidité relative (Figure 2). La procédure d'essai est la suivante : premièrement, une mesure de la *perméabilité initiale* du matériau est effectuée (à 20 °C). La suite de l'essai comprend la mise en température de l'enceinte climatique (à 20 °C, 105 °C ou 150 °C). Une fois la température à travers le matériau stabilisée, la perméabilité, influencée uniquement par la température, est mesurée (*perméabilité de référence*). Ensuite, les mesures de la *perméabilité* sont effectuées pour différents taux de déformation. Après chaque chargement, l'éprouvette est déchargée et la mesure de la perméabilité est à nouveau effectuée.

Tous les résultats présentés ci-dessous se rapportent aux valeurs de la perméabilité intrinsèque, obtenues au minimum avec trois échantillons par température.

Figure 2. Dispositif expérimental a) éprouvette instrumentée b) enceinte climatique c) vue de l'ensemble.

3. RESULTATS

La perméabilité initiale du béton testé (coulé en trois gâchées) varie dans une plage de 6.10^{-17} m^2 à 12.10^{-17} m^2. Cette variation est relativement faible et illustre une bonne reproductibilité de mesures d'une part. D'autre part, ces valeurs de la perméabilité initiale sont surestimées, comparé au béton habituel (qui n'est jamais complètement sec), en raison du taux de saturation et de la fissuration induite

par le séchage (Hearn, 1999). Néanmoins, tous les spécimens considérés ici possèdent le même état initial. Les valeurs de la perméabilité initiale ne sont considérées qu'en guise de valeurs de référence dans les résultats présentés ci-dessous.

3.1. PHASE PRE-PIC

Les résultats obtenus montrent clairement des phases caractéristiques dans la phase pré-pic de l'évolution de la perméabilité relative (perméabilité à la température de 20, 105 ou 150 °C sur la perméabilité de référence à 20, 105 ou 150 °C, respectivement) avec la contrainte subie pendant le chargement (Figure 3). Ces résultats restent indépendants de la température testée. Notons que les résultats présentés ci-dessous considèrent uniquement la perméabilité mesurée sous chargement.

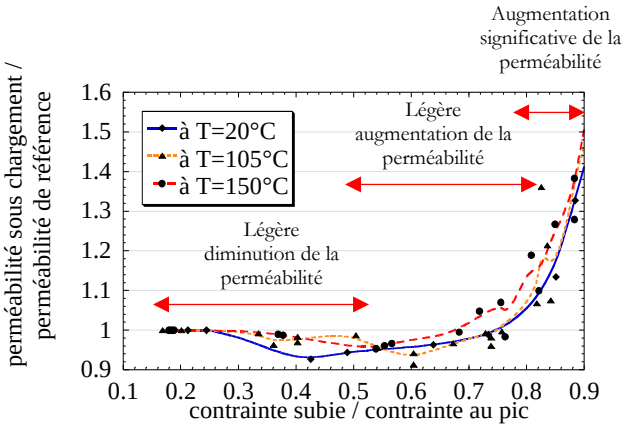

Figure 3. Variation de la perméabilité relative sous chargement avec la contrainte relative maximale subie pour trois températures (les lignes correspondent aux courbes d'ajustement des données expérimentales).

Indépendamment de la température testée, la perméabilité relative varie de la façon suivante : une légère diminution apparaît entre 40 et 60 % de la contrainte maximale. Lorsque le chargement atteint une valeur supérieure à 60 % de la contrainte maximale, la perméabilité augmente, d'abord légèrement, puis, à partir de 80 % de la contrainte maximale, significativement. Le phénomène de diminution, puis d'augmentation de la perméabilité, est la conséquence du changement du comportement volumique du béton sous la compression uniaxiale (Sugiyama *et al.*, 1996), celui-ci étant d'abord contractant (écrasement de la porosité initiale), puis finalement dilatant (ouverture des fissures). Un réseau de microfissures interconnectées se propage dans la pâte de ciment à partir du chargement proche du pic.

3.2. PHASE PRE-PIC, PIC ET PHASE POST-PIC

Les résultats présentés dans la Figure 4 montrent l'évolution complète de la perméabilité relative sous chargement et après déchargement (perméabilité à la température de 20, 105 ou 150 °C sur la perméabilité initiale à 20 °C) en fonction de la déformation relative maximale appliquée pour les trois températures considérées. Il s'avère qu'au pic (déformation relative égale à 1), la perméabilité mesurée sous chargement à température élevée (105 °C ou 150 °C) est multipliée par dix par rapport à sa valeur initiale. Mesurée à 20 °C, elle est multipliée par cinq. Jusqu'au pic, la variation de la perméabilité est modérée par rapport à la phase post-pic, où l'accroissement de la perméabilité devient extrême (variation de plusieurs ordres de grandeur), suite à l'augmentation d'ouverture des fissures.

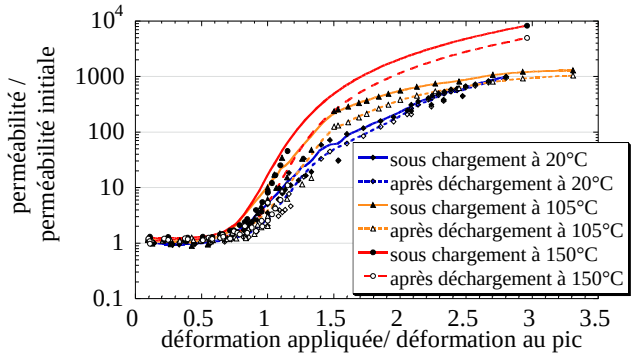

Figure 4. Variation de la perméabilité relative (sous chargement et après déchargement) en fonction de la déformation relative maximale appliquée pour trois températures (les lignes correspondent aux courbes d'ajustement des données expérimentales).

La variation de la perméabilité devient plus importante avec la température (Figure 4) (Choinska *et al.*, 2006). De plus, on note que la cinétique de la perméabilité augmente avec la température. A 105 °C, bien que cette température ait été appliquée à tous les spécimens pendant le séchage, la cinétique de la perméabilité est plus grande qu'à 20 °C. A 150 °C, la perméabilité n'a pu être mesurée en continu dans la phase post-pic en raison de la fragilité du béton. Les résultats expérimentaux présentés dans la Figure 4 pour 150 °C dans la phase post-pic correspondent aux mesures à la rupture.

Les résultats présentés sur la Figure 4 soulignent aussi l'existence de plusieurs régimes de variation de la perméabilité en fonction de la déformation appliquée pour les trois températures considérées. Les tendances observées sont en accord avec celles des résultats expérimentaux obtenus par Wang *et al.* (1997) et Gérard (1996). L'existence des différents régimes de variation de la perméabilité (donc divers régimes d'écoulement à travers le milieu poreux endommagé) est la conséquence de différents régimes d'endommagement. Dans le régime d'endommagement diffus (phase pré-pic), la perméabilité du milieu dépend de la densité de microfissuration et ainsi de la variable d'endommagement diffus (Dormieux et Kondo, 2004 ; Chatzigeorgiou *et al.*, 2005). Par contre, dès la formation d'une macrofissure traversante (phase post-pic), le régime d'écoulement du fluide au travers du milieu change. Le flux devient totalement tributaire de la largeur de la macrofissure, tout en restant indépendant du réseau des pores et microfissures (variation significative de la perméabilité pour une variation très faible de la déformation). En effet, la perméabilité du milieu devient dépendante de l'ouverture de la macrofissure(s) par l'intermédiaire de la loi de Poiseuille.

La Figure 5 a) et 5 b) montre l'évolution des perméabilités relatives (après déchargement) avec l'endommagement et avec la température, respectivement. Nous avons noté qu'il existe une très bonne corrélation (indépendante de la température), entre la perméabilité relative et l'endommagement diffus (perte relative de la rigidité). De même, une très bonne corrélation, restant indépendante de l'endommagement, apparaît entre la perméabilité relative et la température. Ces résultats révèlent que les effets de l'endommagement et de la température peuvent être finalement découplés pour l'estimation de l'évolution de la perméabilité du béton.

L'identification de ces deux fonctions f et g nous a permis de proposer une loi d'évolution de la perméabilité : $k = k_0 \; f(endommagement)\, g(température)$, où k est la perméabilité, k_0 la

perméabilité initiale et les fonctions f et g représentent respectivement les relations présentées sur la Figure 5 a) et 5 b). Ce précepte est également conforme au format de la loi d'interaction initialement proposée par Gawin *et al.* (2003), à l'issue d'une étude numérique. Cette loi d'interaction découplée reste valable dans le domaine de validité de l'endommagement diffus (phase pré-pic).

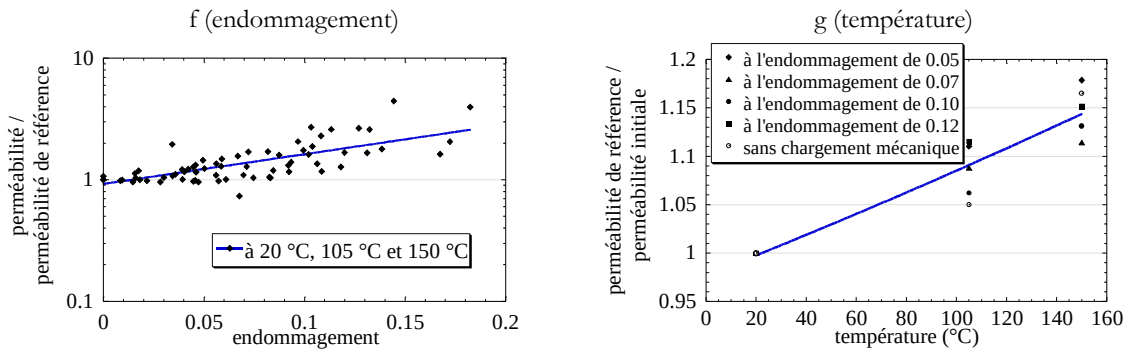

Figure 5. Variation des perméabilités relatives (après déchargement) avec a) l'endommagement b) la température (les lignes correspondent aux courbes d'ajustement des données expérimentales).

4. CONCLUSIONS

Cette étude a permis de caractériser l'interaction entre endommagement, température et la perméabilité du béton. Les résultats apportés dans cette étude amènent les conclusions suivantes :

- Dans la phase pré-pic, indépendamment de la température, plusieurs phases d'évolution de la perméabilité apparaissent clairement. Suite au changement du comportement volumique du béton sous la compression uniaxiale, une légère diminution, suivie par une légère augmentation de la perméabilité est observée. Cette phase correspond à la création des microfissures qui ne sont pas encore interconnectées. A partir de 80 % du chargement au pic, puis au pic, une nette augmentation de la perméabilité est détectée. Elle est attribuée à la coalescence de microfissures. Cette augmentation s'intensifie avec l'augmentation de la température.

- Dans la phase post-pic, la perméabilité augmente significativement en raison de l'ouverture des fissures sous la compression uniaxiale. Ainsi, le flux à travers le milieu poreux fortement endommagé devient totalement tributaire de l'ouverture de la (les) macrofissure(s), tout en restant indépendant du réseau poreux et microfissures. En effet, suite à la localisation de l'endommagement, la localisation du flux apparaît.

- Les effets de l'endommagement et de la température peuvent être découplés pour l'estimation de l'évolution de la perméabilité. La loi d'interaction proposée reste valable dans le domaine de validité d'endommagement diffus (phase pré-pic). Afin de modéliser également l'accroissement de la perméabilité avec l'endommagement localisé (au pic et dans la phase post-pic), un autre paramètre comme l'ouverture de fissure devrait être pris en compte dans cette loi d'évolution. Cependant, l'intégration de ce paramètre demande d'abord d'établir un lien au niveau mécanique entre les modélisations de l'endommagement diffus et localisé, ce qui constitue une autre partie de l'étude présentée.

5. BIBLIOGRAPHIE

Bazant Z.P. and Whittmann F.H., *"Creep and shrinkage in concrete structures"*, John Wiley & Sons (1982).

Chatzigeorgiou G., Picandet V., Khelidj A., Pijaudier-Cabot G., "Coupling between progressive damage and permeability of concrete: analysis with a discrete model", *Int. J. Anal. Meth. Geomech.* 29 (2005) 1005-1018.

Choinska M., Khelidj A., Chatzigeorgiou G., Pijaudier-Cabot G.,"Interaction between Damage, Temperature, Stress Level and Permeability in Structural Concrete", submitted to *Cement and Concrete Research*, 2006.

Dal Pont S. and Erlacher A., "Numerical and experimental analysis of chemical dehydration, heat and mass transfers in a concrete hollow cylinder submitted to high temperatures", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 135-147.

Dormieux L. and Kondo D., "Approche micromécanique du couplage perméabilité-endommagement", *C.R. Mecanique* 332 (2004) 135-140.

Dullien F.A.L., "*Porous Media. Fluid Transport and Pore Structure*", Academic Press (1979).

Gardner D.R., Lark R.J., Barr B., "The effect of conditioning to a predetermined weight loss on the permeability of concrete", *Construction and Building Materials* (2005), in press.

Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A., "Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation", *Comput. Methods* Appl. Mech. Engrg. 192 (2003) 1731-1771.

Gérard B., "Contribution des couplages mécanique-chimie-transfert dans la tenue à long terme des ouvrages de stockage de déchets radioactifs", Thèse de doctorat, ENS Cachan, 1996.

Hearn N. and Lok G., "Measurement of Permeability under Uniaxial Compression-A Test Method", *ACI Materials Journal* 95 (1998) 691-694.

Hearn N., Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete, ACI Materials Journal 96 (1999) 234-241.

Joos M. and Reinhardt H.W., "Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature", *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1497-1504.

Klinkenberg L.J., "The permeability of porous media to liquids and gases", *American Petroleum Institute, Drilling and Production Practice* (1941) 200-213.

Lion M., Skoczylas F., Lafhaj Z., Sersar M., "Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature", *Cement and Concrete Research* (2005), in press.

Luccioni B.M., Figueroa M.I., Danesi R.F., "Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures", *Eng. Structures* 25 (2002) 729-742.

Picandet V., Khelidj A., Bastian G., "Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete", *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1525-1532.

Sanjuan M.A. and Munoz-Martialay R., "Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrete", *Material Letters* 27 (1996) 263-268.

Sugiyama T., Bremner T.W., Holm T.A., "Effect of Stress on Gas Permeability in Concrete", *ACI Materials Journal* 93 (1996) 443-450.

Wang K., Jansen D.C., Shah S.P., Karr A.F., "Permeability study of cracked concrete", *Cement and Concrete Research* 27 (1997) 381-393.