

Influence du chargement mécanique, de la température et du fluide percolant sur la perméabilité des bétons

C.Aubernon^a, A. Khelidj^b, A. Loukili^a, G. Nahas^c

a. Institut de Recherche en Génie Civil et de Mécanique (GeM-UMR-CNRS 6183), rue de la Noë, 44321 Nantes

b. IUT de Saint Nazaire, 58 rue Michel Ange 44600 Saint Nazaire

c. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, 31 avenue de la Division Leclerc, 92260 Fontenay-aux-roses

Résumé :

Dans le cadre de la sûreté des enceintes de confinement interne des réacteurs à eau pressurisée des centrales nucléaires, nous nous intéressons à l'étanchéité du béton en cas d'accident grave. Durant ce type de cataclysme, le réfrigérant primaire occupe tout le volume de l'enceinte et provoque des conditions hydriques, mécaniques et thermiques extrêmes. Dans ce contexte, notre recherche vise à étudier l'influence de ces sollicitations sur la perméabilité du béton. Nous proposons à travers cette étude de déterminer l'évolution de la perméabilité du béton à des mélanges azote-vapeur d'eau, sous haute température et sous chargement mécanique.

Abstract :

For the safety of a nuclear power station, a containment made with concrete is built to hinder the gas to escape into the atmosphere. So we have to know more about the permeability of concrete. During an accident, the moisture, the pressure and the temperature are very high. In this way, we are looking about the evolution of the concrete permeability. We conceive an experimentation to measure the vapour permeability of concrete under a compressive loading and temperature.

Mots clefs : béton, perméabilité, chargement mécanique, vapeur d'eau, couplage

1 Introduction

Dans le cadre de la sûreté des enceintes de confinement interne des réacteurs à eau pressurisée des centrales nucléaires (types 1300 MW et 1450MW), nous nous intéressons à l'étanchéité du béton en cas d'accident grave. Durant ce type de cataclysme (Accident par Perte de Réfrigérant Primaire ou Accident Grave), le réfrigérant primaire occupe tout le volume de l'enceinte et provoque des conditions hydriques, mécaniques et thermiques extrêmes : 150°C, 5 bars de pression et une humidité relative proche de 100%. Dans ce contexte, notre recherche vise à étudier l'influence de ces sollicitations sur la perméabilité du béton. Afin de s'abstenir de la grande variabilité de cette caractéristique d'un matériau à un autre, nous formulons notre béton avec les mêmes granulats et le même ciment que ceux utilisés pour le béton utilisé pour la construction de la centrale de Civaux. Des travaux antérieurs au sein de notre laboratoire nous ont renseignés sur l'évolution de la perméabilité du béton sous différents chargements. En effet, V. Picandet [1] et [2] a réalisé un ensemble d'essais sur des éprouvettes cylindriques de 5 cm d'épaisseur par lesquels il a étudié l'influence de la teneur en eau et de l'endommagement (mesures réalisées après chargement et déchargement mécanique) sur la perméabilité du béton. Il a mis en évidence une relation entre la perméabilité au gaz et l'endommagement. Ensuite, M. Choinska [3] et [4] a étudié l'évolution de la perméabilité au gaz sec du béton sous chargement de compression en pré-pic et post-pic en faisant varier la température sur des éprouvettes sèches cylindriques creuses. A partir de la loi de Darcy, la perméabilité apparente à une pression d'injection donnée du matériau est déterminée. La perméabilité intrinsèque est calculée par la suite en utilisant le concept de Klinkenberg [5]. Dans ce contexte, nous proposons à travers cette étude de déterminer l'évolution de la perméabilité du béton à des mélanges azote-vapeur d'eau, sous haute température et sous chargement mécanique. Dans une

première partie, nous décrivons le banc expérimental dimensionné pour soumettre le matériau à un tel couplage thermo-hydro-mécanique. Dans une deuxième partie, nous exposons le protocole expérimental et procédons à une analyse des résultats obtenus.

2 Description du banc expérimental

L'objectif de cette partie est de décrire l'ensemble du dispositif expérimental permettant de mesurer la perméabilité du béton à la vapeur d'eau sous chargement mécanique et à température élevée. Il se compose de quatre parties assurant le chargement mécanique, les mélanges azote-vapeur d'eau, la régulation en température et en pression, et l'ensemble des capteurs pour la mesure du débit azote, de la vapeur d'eau, de température et de l'humidité relative.

2.1 Principe général

L'éprouvette en béton testée est cylindrique et creuse comme dans les travaux de M. Choinska [2]. Le matériau est placé sous une presse hydraulique pour appliquer le chargement en compression. Le mélange gazeux est injecté au cœur de l'éprouvette (par la partie cylindrique) et diffuse radialement au sein de matériau. Les propriétés hydriques du mélange sont contrôlées en amont par une sonde d'humidité relative et de température. Le mélange gazeux est ensuite récupéré en sortie où ses propriétés hydriques sont mesurées à l'aide d'une deuxième sonde d'humidité. L'ensemble tige de vérin de la presse, éprouvette, sondes d'humidité est placé dans une enceinte climatique contrôlée en humidité et température pour éviter tout problème de condensation d'origine thermique. En sortie d'enceinte climatique, la température de rosée du mélange s'abaisse à la température extérieure (température laboratoire). Le débit d'azote est ensuite mesuré à l'aide d'un débitmètre massique. La figure 1 expose de manière schématique l'ensemble du dispositif.

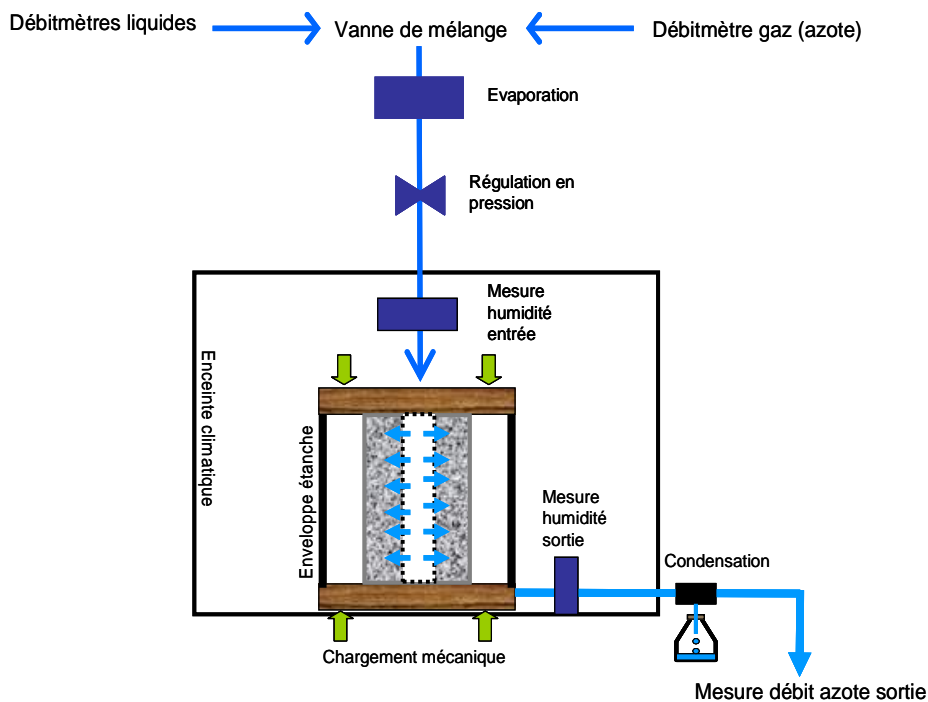


FIG. 1 - Schéma de principe du dispositif expérimental

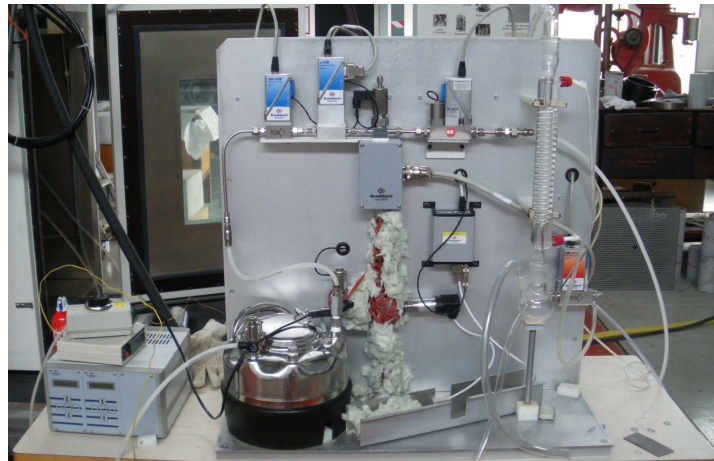


FIG. 2 - Photo du dispositif de production de vapeur

2.2 Production du mélange azote-vapeur d'eau

Le mélange gazeux est assuré par quatre appareils différents : deux débitmètres liquides, un débitmètre gaz (ici azote), une vanne de mélange et organe d'évaporation comme sur la figure 2. Les débitmètres gaz et liquide imposent les débits souhaités de chacun des constituants. L'évaporateur apporte l'énergie nécessaire pour transformer l'eau liquide (deminéralisée) en gaz. Afin de caractériser la perméabilité du matériau, on se doit de travailler à pression constante. Ainsi, une vanne réglée par un capteur de pression permet de contrôler et d'imposer la pression totale injectée souhaitée.

2.3 Contrôle de la température

L'ensemble des éléments à l'extérieur de l'enceinte sont à température ambiante. De ce fait, la tuyauterie transportant le mélange azote-vapeur du dispositif de production jusqu'à l'enceinte climatique doit être chauffée pour amener la température au-dessus du point de rosée et éviter toute condensation éventuelle. Pour ce faire, une ligne chauffante thermo-réglée a été mise en place. De plus, un grand nombre de points froids existent comme le point de contact entre le capteur de pression et le mélange ou le dispositif de vanne de surpression. Ainsi, on se doit de chauffer aussi de manière locale tous ces matériels qui constituent des endroits privilégiés de condensation de vapeur d'eau. Cette dernière perturbe très fortement l'hygrométrie du mélange gazeux. Nous avons installé sur tous ces contacts froids un fil chauffant. Il est thermo réglé à l'aide d'une sonde de température et d'un thermostat. La laine de roche est utilisée comme isolant.

3 Protocole expérimental et analyse de résultats

Dans cette partie, nous décrivons le protocole expérimental des différents essais effectués et d'analyser les résultats obtenus.

3.1 Formulation du matériau et conservation des éprouvettes

La formulation du matériau est identique à celle de la centrale de Civaux. Le ciment utilisé est celui d'Airvault CEM II/A-LL42,5R. La formulation du matériau est donnée dans le tableau 1 :

Constituants	Ciment	Sable	Gravier (5-12,5 mm)	Gravier (12,5-25 mm)	Eau efficace	Plastifiant
kg/m ³	350	772	316	784	201	1,225

Tableau 1 : Formulation du béton de Civaux

Les essais sont effectués sur des éprouvettes sèches. Ainsi, après 28 jours de cure, le béton est placé dans une étuve à 80°C pendant au moins un mois jusqu'à stabilisation de la masse de l'éprouvette.

3.2 Déroulement de l'essai

L'éprouvette est placée entre les plateaux de la presse hydraulique. Nous imposons une température uniforme à tous les éléments présents dans l'enceinte climatique (tige de vérin, éprouvette, sondes d'humidité relative) pour empêcher toute condensation de la vapeur d'eau d'origine thermique au contact des réseaux hydrauliques ou des différentes pièces. Une fois la température uniforme, nous injectons, à débits constants, le mélange de vapeur d'eau et d'azote suivant les conditions souhaitées. La vanne de surpression nous permet de travailler à pression constante. Ainsi, nous contrôlons les conditions hydriques et thermiques du mélange gazeux en amont et au cœur de l'éprouvette et nous mesurons, en fonction du temps, l'humidité absolue en sortie et le débit d'azote.

3.3 Analyse des résultats

3.3.1 Mise en évidence du débit de fuite azote et vapeur

L'essai que nous présentons dans cette partie est effectué à 120°C. L'éprouvette n'est pas soumise à un chargement mécanique. Le but est de déterminer les perméabilités des différents constituants du mélange gazeux à travers le béton sec. Le débit d'azote est de 200 mLn/min (litre normalisé, obtenu à une température de 0°C et une pression de 1,013 bars) et le débit liquide d'eau est de 7,8 g/h. La pression totale absolue d'injection est de 3,4 bars. La figure 2 nous montre l'évolution de l'humidité relative en entrée et de l'humidité absolue (g/m³) en sortie en fonction du temps. Nous constatons une grande différence d'échelle de temps d'établissement du régime permanent pour les deux gaz. En effet, il est atteint au bout d'une dizaine de minutes pour l'azote alors qu'il est de plusieurs jours pour la vapeur d'eau. Ce phénomène démontre la différence d'affinité chimique entre les deux gaz et le béton. La discontinuité de la mesure est due à l'absence d'acquisition la nuit.

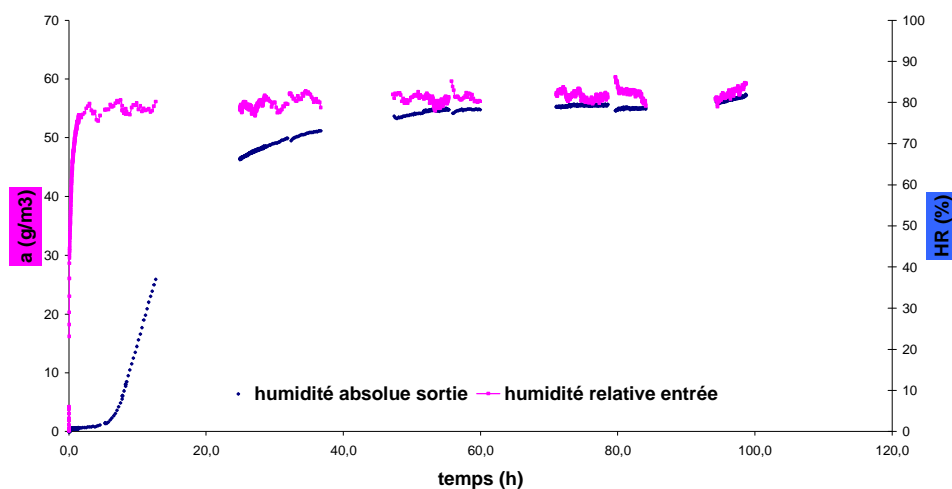


FIG. 3 - Essai sans chargement mécanique à 120°C

3.3.2 Calcul de la perméabilité intrinsèque à l'azote

Le calcul de la perméabilité s'effectue à partir de la loi de Darcy :

$$v = -\frac{K_a}{\mu} \text{grad}P \quad (1)$$

où v est la vitesse du fluide, K_a la perméabilité apparente du matériau (m²), μ la viscosité (Pa.s) et P (Pa) la pression du fluide. Pour notre éprouvette cylindrique creuse, on en déduit l'expression de la perméabilité apparente K_a :

$$K_a = \frac{P_2 Q_2 (r_2 - r_1) \mu}{\pi r_2 H (P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

Où P_1 , P_2 et r_1 , r_2 sont respectivement les pressions du gaz et les rayons intérieur et extérieur de l'éprouvette en entrée et en sortie, H la hauteur de l'éprouvette et Q_2 le débit en sortie d'éprouvette. Pour calculer la perméabilité intrinsèque, nous utilisons l'approche de Klinkenberg [3] qui rend compte de l'écoulement par glissement des gaz le long d'un tube capillaire lorsque celui-ci a les mêmes dimensions que le libre parcours moyen des molécules du gaz. On a alors la relation suivante entre la perméabilité apparente K_a et la perméabilité intrinsèque K_v :

$$K_a = K_v \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad (3)$$

Où P_m est la pression moyenne et β le coefficient de Klinkenberg qui rend compte de la finesse du réseau poreux. En effet, plus ce coefficient est grand, plus l'écoulement par glissement est important et plus le réseau poreux est fin.

Sur la figure 4, nous avons présenté deux mesures de perméabilités : une avant les essais avec vapeur d'eau et l'autre après deux séries d'essais avec vapeur d'eau (l'un avec une pression totale de 2,8 bars et l'autre de 3,4 bars avec les mêmes ratios molaires entre l'azote et la vapeur d'eau). Nous constatons que la perméabilité intrinsèque est plus importante avant les essais à la vapeur d'eau qu'après (elle passe de $9,6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ à $8,9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$). De plus, le coefficient de Klinkenberg diminue après les essais avec la vapeur d'eau (0,49 MPa à 0,25 MPa). Ces deux phénomènes montrent que le volume de percolation de l'azote diminue après les essais à la vapeur et que le réseau poreux est plus grossier. En effet, la vapeur condense dans les pores les plus fins et, de plus, on peut penser qu'il y a une réhydratation du ciment en présence de cette eau.

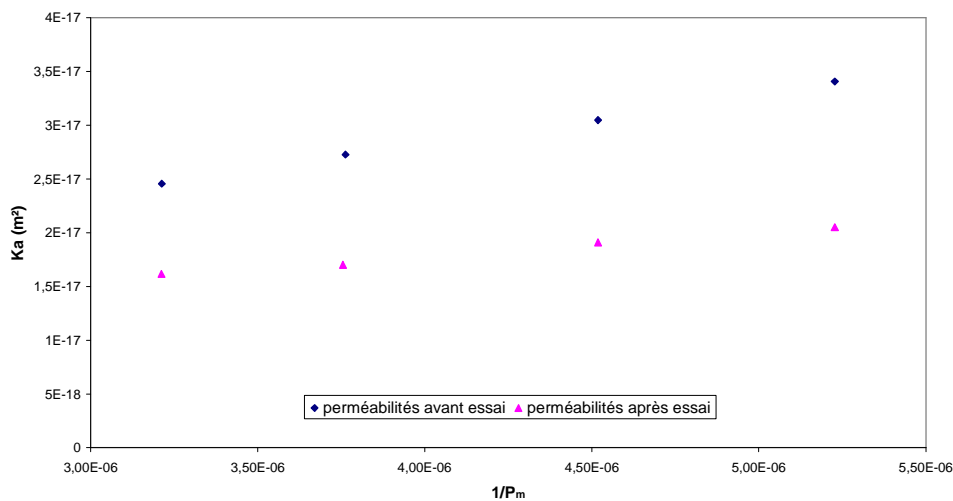


FIG. 4 - Mesure de la perméabilité apparente avant injection de la vapeur d'eau et après à 120°C

3.3.3 Influence du chargement mécanique

Dans cette partie, nous montrons l'influence du chargement mécanique sur trois essais : deux sont effectués à une température de 120°C et un autre à 130°C, pour se rapprocher des conditions d'un accident grave. Le tableau 2 décrit les conditions des différents essais sur chaque éprouvette.

Eprouvettes	Température (°C)	Humidité relative (%)	Pression vapeur d'eau de	Pression d'azote	Pression totale
6-5	120	87.3	1,73	1,67	3,4

6-6	120	67,2	1,33	1,47	2,8
6-7	130	46,6	1,26	1,54	2,8

Tableau 2 : Conditions d'essais pour le couplage perméabilité-chargement mécanique

La figure suivante montre que l'humidité absolue en sortie d'éprouvette augmente avec la pression de vapeur d'eau en entrée. Ensuite, pour les trois éprouvettes, à environ 80% de la résistance du béton, le débit de fuite de vapeur augmente très fortement. Ce phénomène s'explique par l'endommagement du matériau qui facilite l'écoulement du mélange gazeux par le réseau de fissures qui s'y développe.

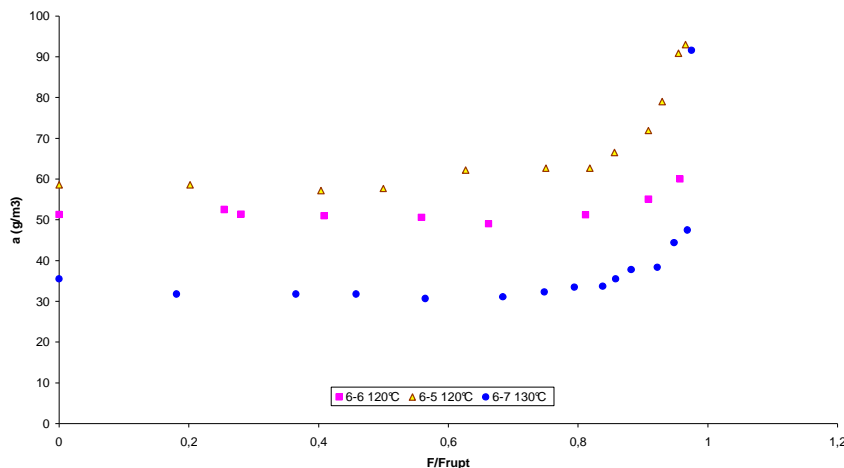


FIG. 5 - Evolution de l'humidité absolue en sortie d'éprouvette en fonction du chargement mécanique

Conclusion

Cette étude expérimentale montre la forte interaction entre la vapeur d'eau et le béton. Grâce à un dispositif original, nous avons pu isoler l'écoulement de la vapeur au sein du matériau en excluant tout phénomène de condensation d'origine thermique. Les proportions molaires à l'entrée et à la sortie de l'éprouvette mettent en évidence la différence entre l'écoulement d'azote et celui de la vapeur dans le béton sec. De plus, le temps d'établissement du régime permanent de la vapeur d'eau est beaucoup plus long que celui de l'azote. L'étude portant sur la perméabilité des bétons sous chargement de compression montre que la perméabilité à la vapeur d'eau augmente très fortement à partir 80% de la résistance au pic du béton. Ce résultat rejoint celui obtenu pour la perméabilité à l'azote.

Références

- [1] Picandet V., influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons, Thèse de Doctorat, université de Nantes, 2001.
- [2] 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, 1525-1532, 2001.
- [3] Choinska M., Effet de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité de béton de structure, Thèse de Doctorat, université de Nantes, 2006.
- [4] Choinska M., Khelidj A., Chatzigeorgiou G., Pijaudier-Cabot G., Effects and interactions of temperature and stress level related damage on permeability of concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 79-88, 2007.
- [5] Klinkenberg, The permeability of porous media to liquids and gases, *Drilling and Product Practice*, 200-213, 1941.