

# Etude du lien entre sorptivité et capillarité pour différents types de bétons

M. LION

EDF, Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence ; maxime.lion@edf.fr

## Résumé :

*L'étude présentée dans cette communication a pour but d'étudier le lien entre la sorptivité et la profondeur de pénétration de l'eau (appelée plus brièvement « capillarité ») pour différents types de bétons. L'étude a porté sur la mesure concomitante de la sorptivité et de l'avancement du front capillaire sur différents bétons : un béton à hautes performances, deux bétons poreux et deux bétons ordinaires. L'étude a été menée sur des bétons sains préalablement séchés ainsi que sur des bétons endommagés ayant subi des cycles gel-dégel. Les autres propriétés qui ont été mesurées (vitesses soniques, modules dynamiques, porosités accessibles à l'eau, résistances à la compression) permettent en outre d'établir des corrélations globales entre la sorptivité, la capillarité et l'ensemble des propriétés physico-mécaniques. Cette communication entrevoit également l'impact du degré de saturation en eau du béton, ainsi que la présence d'endommagement localisé, sur le lien entre la sorptivité et la capillarité.*

## Abstract :

*The aim of the study presented in this paper is to understand the relationship between sorptivity and the depth of penetration of water (called more briefly "capillarity") for different types of concrete. The study focused on the concomitant measurement of the sorptivity and the advancement of the capillary front on different concretes: one high performance concrete, two porous concretes and two ordinary concretes. The study was performed on previously dried sound concretes as well as on damaged concretes subjected to freeze-thaw cycles. Some other properties that have been measured (ultrasonic pulse velocities, dynamic modulus, water-accessible porosities, compressive strengths) also make it possible to establish overall correlations between sorptivity, capillarity and all physico-mechanical properties. This paper also shows the impact of the degree of water saturation of concrete, as well as the presence of localized damage, on the link between sorptivity and capillarity.*

**Mots clefs : béton, absorption capillaire, endommagement**

# 1 Contexte général

Certains ouvrages en béton peuvent être au contact de l'eau, que ce soit de manière permanente ou provisoire (ouvrages immergés ou en zone de marnage, réservoirs, rétentions, caniveaux...). La question de la connaissance de la profondeur de pénétration de l'eau à l'intérieur du béton, et son évolution avec le temps, peut se poser dans certaines conditions. On peut citer par exemple le cas d'ouvrages ayant des fonctionnalités particulières d'étanchéité ou encore l'appréhension des aspects en lien avec la durabilité dans le cas où l'eau a une nocivité potentielle (présence de chlorures,...). Lorsque les ouvrages en béton sont soumis à une charge hydraulique, certaines expressions permettent d'évaluer relativement facilement les profondeurs de pénétration de l'eau. L'expression de Valenta [1] est l'une des plus connues et des plus utilisées. Elle nécessite la considération de certaines propriétés du béton comme la perméabilité et la porosité. En revanche, lorsque la charge hydraulique est négligeable, les phénomènes de capillarité peuvent alors devenir prépondérants. Si les phénomènes d'absorption capillaire sont largement étudiés dans les matériaux cimentaires, les études témoignent généralement de la capacité du béton à absorber l'eau à travers la définition de la sorptivité, qui traduit l'échange à l'interface eau-béton sans rendre compte de la profondeur de pénétration de l'eau [2, 3]. L'absorption capillaire suit une loi en fonction de la racine du temps :

$$i(t) = i_0 + S\sqrt{t}$$

Où  $i(t)$  est la quantité d'eau absorbée par unité de surface (mm),  $S$  est la sorptivité ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-0.5}$ ) et  $i_0$  est le taux d'absorption (mm) à  $T_0$ .

La cinétique d'avancement du front de pénétration de l'eau par capillarité suit également une loi en racine du temps [4, 5] qui peut s'écrire de la manière suivante :

$$h(t) = h_0 + k\sqrt{t}$$

Où  $h(t)$  est la hauteur du front d'eau (mm),  $k$  est le coefficient de capillarité ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-0.5}$ ) et  $h_0$  est le taux d'ascension du front d'eau (mm) à  $T_0$ .

Ainsi, le lien entre sorptivité et capillarité est généralement défini par le coefficient  $C$  [5, 6] :

$$C = \frac{k}{S}$$

Différentes valeurs de  $C$  peuvent être trouvées dans la littérature. Rabehi [5] trouve par exemple une valeur constante, de l'ordre de 10, pour des bétons avec différents E/C et différents modes de maturation. Hanzic et Ilic [6] trouvent quant à eux des valeurs comprises entre 5 et 7 pour différents mortiers. De même, certains auteurs [7] évoquent le fait que, globalement, l'eau qui pénètre dans le béton remplit l'ensemble de la porosité accessible et qu'à ce titre la profondeur de pénétration est directement liée à la quantité d'eau absorbée via la porosité  $\phi$  (ce qui revient à considérer  $1/C = \phi$ ). Cette considération peut cependant apparaître comme simplificatrice dans la mesure où il a été montré que les fronts d'eau peuvent révéler des gradients hydriques plus ou moins importants [8, 9]. Dans ce cas, pour une profondeur du front d'eau donnée, le degré de saturation en eau serait alors inférieur à 100% ; ce qui induirait alors  $1/C < \phi$ .

Dans ce contexte, l'étude en laboratoire qui est présentée a été menée dans le but d'évaluer le lien entre sorptivité et capillarité pour différents types de béton et différents états (sain, endommagé,...), pour *in fine* accumuler des données expérimentales sur ce type de problématique et identifier des corrélations.

## 2 Présentation de la campagne d'essais

### 2.1 Béton étudiés

Cinq formules de béton ont été étudiées. Elles couvrent trois familles différentes : des bétons ordinaires ayant un E/C de l'ordre de 0,5 (2 formules, dont le béton de la maquette Vercors), des bétons que l'on peut qualifier de poreux ayant un E/C largement supérieur à 0,5 (2 formules) et un béton à très haute performance ayant un E/C largement inférieur à 0,5 (1 formule). Des informations sur leur composition sont données dans le Tableau 1 (indications générales sur les quantités en ciment et fillers sans forcément représenter les mêmes produits).

Tableau 1 : Description des différents bétons étudiés.

	CEM I 52,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Fillers (kg/m <sup>3</sup> )	Fumée de silice (kg/m <sup>3</sup> )	Eau totale (kg/m <sup>3</sup> )
Béton ordinaire 1 (BO1)	350	23	-	185
Béton ordinaire 2 (BO2) <i>Béton de la maquette VeRCoRs</i>	320	-	-	197,6
Béton poreux 1 (BP1)	215	185	-	230
Béton poreux 2 (BP2)	312	104	-	252
Béton à Très Haute Performance (BTHP)	400	15	40	138

Les valeurs de résistance à la compression et de porosité accessible à l'eau mesurées à l'état durci sont recensées dans le Tableau 2. La résistance à la compression est mesurée selon la norme NF EN 12390-3 [10] sur des cylindres 11 x 22 cm et la porosité à l'eau selon la norme NF P 18-459 [11]. On note que les formules retenues permettent d'investiguer une plage relativement large en termes de propriétés : les porosités sont comprises entre 8 et 20 % et les résistances à la compression entre 26 et 95 MPa.

Tableau 2 : Propriétés des différents bétons étudiés.

	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Porosité accessible à l'eau après 28 jours
BO1	52,1	0,128
BO2	47,0	0,150
BP1	26,1	0,187
BP2	38,4	0,202
BTHP	94,5	0,083

## 2.2 Mode opératoire retenu

La norme NF EN 13057 [12] a servi de base à la réalisation des essais. Cet essai consiste à suivre la masse et l'ascension du front d'eau de corps d'épreuve dont la face inférieure est exposée à un film d'eau (profondeur d'immersion de 2 mm), comme l'illustre la Figure 1 (à noter qu'un couvercle, non illustré ici, est positionné durant l'essai pour éviter les mouvements d'air autour du corps d'épreuve). Le suivi est réalisé de manière périodique pendant 24 h selon les intervalles de temps recommandés par la norme.

Les dimensions retenues pour les corps d'épreuve sont : diamètre égal à 95 mm et hauteur de l'ordre de 100 mm. Les corps d'épreuve ont été surcarottés à partir d'éprouvettes 11 x 22 cm de manière à s'affranchir des effets de bord. La démarche adoptée s'est écartée de la norme NF EN 13057 principalement au niveau du préconditionnement des corps d'épreuve. Il a en effet été choisi de sécher les corps d'épreuve à 105°C jusqu'à masse constante pour réaliser les essais d'absorption capillaire sur bétons complètement secs (hormis pour la partie de l'étude visant à étudier particulièrement l'influence du degré de saturation initial) au lieu de 40°C tel que demandé dans la norme. De plus, les essais se sont déroulés dans une ambiance maîtrisée ( $T = 20 \pm 1^\circ \text{C}$  et  $\text{HR} = 50 \pm 5\%$ ) sélectionnée de manière à limiter les prises de masse via l'hygrométrie ambiante.

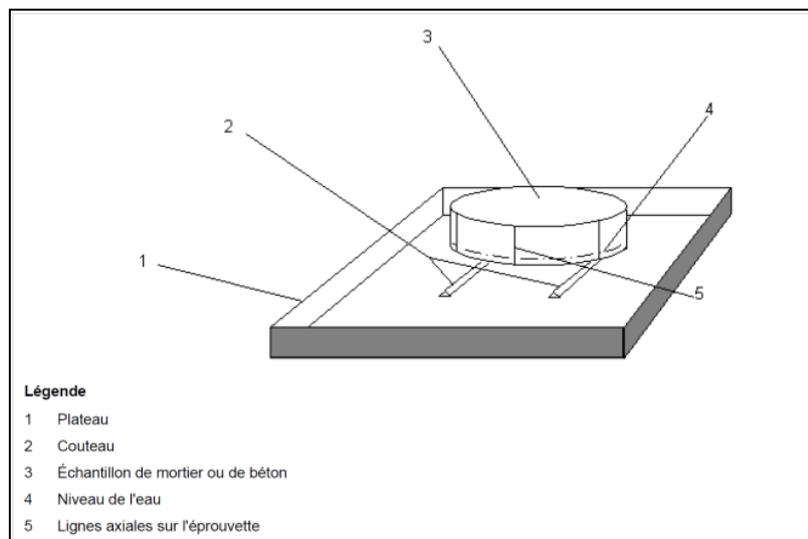


Figure 1 : Illustration de l'essai d'absorption capillaire (extraite de la norme NF EN 13057).

Les corps d'épreuve n'ayant pas leur surface latérale enrubannée, des essais préalables ont été menés pour vérifier que les résultats n'étaient pas perturbés par l'absence d'enrubannage ; le temps d'essai relativement court (24 h) et l'hygrométrie ambiante (50 % HR) devant jouer un rôle non négligeable dans ce constat. Pour améliorer le relevé visuel de l'avancement du front d'eau, de l'eau contenant de la fluorescéine aux propriétés de phosphorescence sous UV a été employée. L'ascension du front d'eau a ainsi été suivie à partir de la surface latérale pendant 24 h de manière périodique (aux mêmes échéances que celles concernant le suivi de la masse), permettant ainsi d'évaluer le coefficient de capillarité  $k$ .

A l'issue de l'essai à 24 h, les corps d'épreuve sont fendus et la hauteur maximale du front d'eau dans la masse est alors évaluée pour comparaison avec la valeur relevée en surface (cf. photographies ci-dessous). Des mesures de front d'eau après fendage avec et sans fluorescéine ont également permis de vérifier que les mesures n'étaient pas impactées par la présence de fluorescéine.



Figure 2 : Photographies du front d'ascension de l'eau contenant de la fluorescéine.

## 2.3 Présentation synthétique de la campagne expérimentale

Le programme de la campagne d'essais peut être synthétisé de la manière suivante :

- Caractérisation de bétons sains :
  - Etude sur l'ensemble des bétons à l'état sec (séchage à 105°C jusqu'à masse constante).
  - Etude prospective sur des bétons séchés partiellement.
- Caractérisation de bétons endommagés :
  - Etude sur l'ensemble des bétons ayant subi des cycles gel-dégel. Les bétons ont été exposés jusqu'à 100 cycles de gel-dégel. Les corps d'épreuve ont fait l'objet d'un séchage à 105°C jusqu'à masse constante à l'issue des cycles gel-dégel pour la réalisation des essais d'absorption capillaire.
  - Etude prospective sur des bétons fracturés (endommagement localisé) à l'état sec.

### 3 Caractérisation de bétons sains

#### 3.1 Bétons à l'état sec

La sorptivité et le coefficient de capillarité ont été mesurés pour les cinq bétons à l'état sec. Le tableau ci-après recense les valeurs obtenues ainsi que les valeurs déduites pour le coefficient  $C$  et  $1/C$  (valeurs moyennes de 2 essais).

Tableau 3 : Valeurs obtenues pour la sorptivité et le coefficient de capillarité.

	$k$ (mm.h <sup>-0,5</sup> )	$S$ (mm.h <sup>-0,5</sup> )	$C = \frac{k}{S}$	$\frac{1}{C}$
BO1	8,63	0,82	10,52	0,095
BO2	8,71	1,00	8,71	0,115
BP1	7,15	1,27	5,63	0,177
BP2	6,77	1,28	5,29	0,189
BTHP	2,68	0,23	11,65	0,085

La Figure 3 illustre un exemple de suivi de l'absorption et de l'ascension du front issu d'un essai mené sur le béton BO1, ainsi que les régressions linéaires permettant d'évaluer la sorptivité et le coefficient de capillarité.

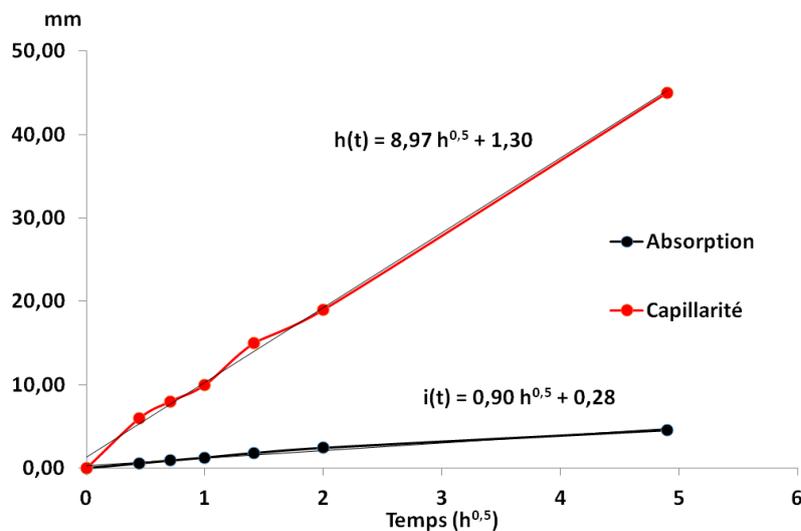


Figure 3 : Exemple de suivi et de calcul des coefficients.

Ces résultats mettent en avant des valeurs relativement différentes pour l'ensemble des paramètres évalués en fonction du type de béton étudié.

La sorptivité est très faible pour le BTHP (0,23 mm.h<sup>-0,5</sup>), elle est comprise entre 0,8 et 1,0 mm.h<sup>-0,5</sup> pour les bétons ordinaires, et elle est de l'ordre de 1,3 mm.h<sup>-0,5</sup> pour les bétons poreux. Cette tendance est illustrée dans la Figure 4 qui traduit l'évolution croissante de la sorptivité avec la porosité des bétons étudiés. On remarque que le coefficient  $C$  suit une tendance inverse, il décroît lorsque la porosité augmente. On peut trouver une certaine cohérence avec les valeurs issues de la littérature ( $C$  de l'ordre de 10 pour des bétons ordinaires et de l'ordre de 5-6 pour des bétons poreux) [5, 6].

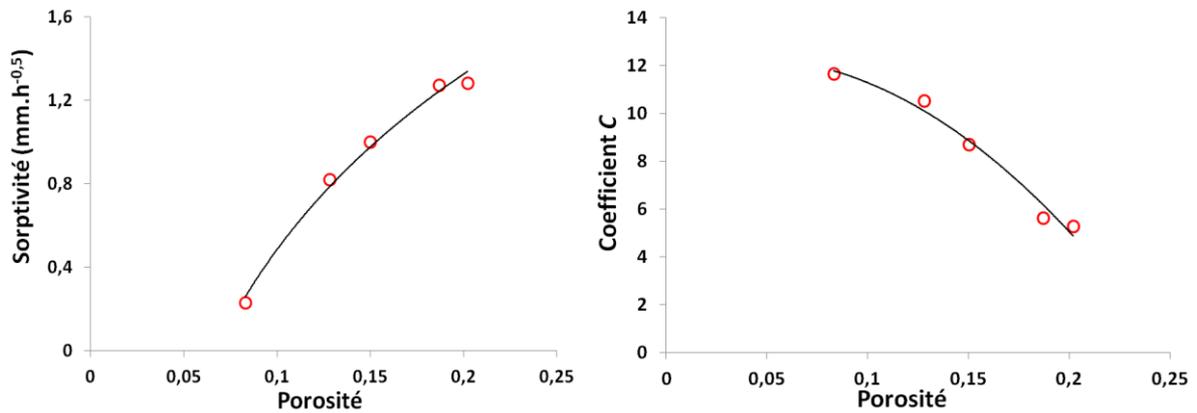


Figure 4 : Evolution de la sorptivité (à gauche) et du coefficient  $C$  (à droite) en fonction de la porosité des bétons.

La tendance d'évolution du coefficient  $C$  en fonction de la porosité est à rapprocher du lien potentiellement direct entre  $1/C$  et la porosité. En effet, il a été évoqué le fait que la valeur de  $1/C$  devrait égaler la porosité dans le cas où le front d'eau la remplirait intégralement. A ce titre, on remarque que les valeurs de  $1/C$  déduites sont relativement proches des valeurs de porosité pour les bétons BP1, BP2 et BTHP. Pour les bétons ordinaires BO1 et BO2, on note en revanche des valeurs de  $1/C$  notablement inférieures aux valeurs de porosité.

Le comportement spécifique des bétons ordinaires BO1 et BO2 se répercute sur les coefficients de capillarité  $k$  systématiquement supérieurs aux autres bétons, y compris les bétons poreux. Ce constat témoigne de hauteurs d'ascension des fronts d'eau supérieures aux autres bétons, comme l'illustre la Figure 5 (hauteurs relevées à 24 h avant et après fendage). On remarque que l'évolution des hauteurs de front d'eau en fonction de la porosité des bétons met en évidence un effet cloche. On note par ailleurs que les hauteurs maximales des fronts d'eau dans la masse (après fendage) ont tendance à être légèrement supérieures à celles mesurées en surface (avant fendage), traduisant un léger bombement du front d'eau, en particulier pour les bétons ordinaires.

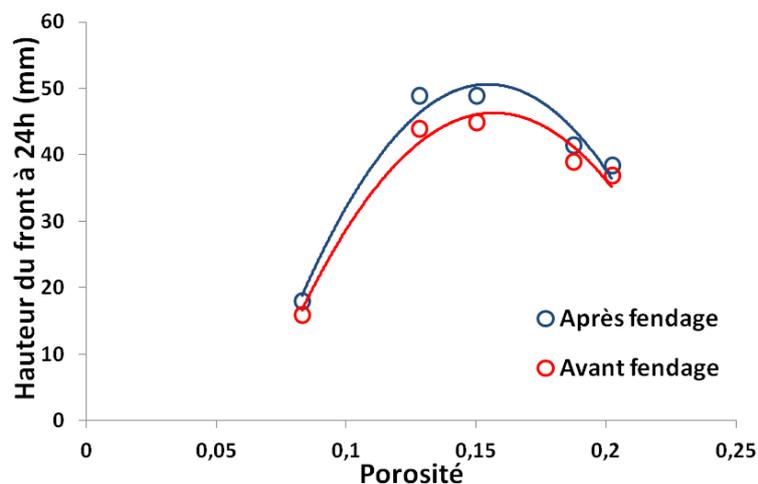


Figure 5 : Hauteurs des fronts d'eau à 24 h.

A partir de ces résultats, il est possible d'estimer le degré de saturation en eau sur l'ensemble de la hauteur du front d'eau à 24 h. L'estimation est réalisée en considérant la quantité d'eau absorbée à 24

$h$ , la hauteur moyenne du front d'eau relevée (moyenne entre les hauteurs mesurées avant et après fendage à 24 h) et la porosité accessible à l'eau :

$$\text{Degré de saturation en eau} = \frac{i(24h)}{\frac{h(24h)\text{avant fendage} + h(24h)\text{après fendage}}{2} \times \emptyset} \times 100$$

Les valeurs obtenues sont données dans le tableau ci-après. On constate que les degrés de saturation en eau estimés pour les bétons BO1 et BO2, de l'ordre de 70 %, sont significativement inférieurs à ceux obtenues pour les autres bétons. Ces résultats permettent d'expliquer la raison pour laquelle les bétons BO1 et BO2 ont les coefficients de capillarité les plus élevés, et ce même s'ils n'ont pas les sorptivités les plus élevées.

Tableau 4 : Evaluation du degré de saturation sur la hauteur moyenne du front d'eau.

	<i>h(24h) avant fendage</i> (mm)	<i>h(24h) après fendage</i> (mm)	Degré de saturation en eau estimé sur la hauteur du front d'eau à 24 h (%)
BO1	44,0	49,0	69,9
BO2	45,0	49,0	70,9
BP1	39,0	41,5	85,6
BP2	37,0	38,5	84,5
BTHP	16,0	18,0	95,6

L'ensemble de ces résultats met en avant l'importance de la microstructure des bétons, et en particulier de la structure poreuse (morphologie, connectivité,...). En effet, les bétons poreux et le BTHP représentent en quelque sorte des cas extrêmes devant respectivement avoir une porosité capillaire importante et grossière due à de forts excès d'eau et à l'inverse une porosité très faible et très fine (voire une porosité capillaire quasi-inexistante). Les bétons ordinaires, quant à eux, doivent bénéficier d'une morphologie de la structure poreuse plus graduée qui favorise les écoulements induits par capillarité.

### 3.2 Bétons séchés partiellement

L'étude de l'influence du degré de saturation en eau initial sur la sorptivité et la capillarité a été entreprise pour le béton BO1. Un essai a été réalisé à un degré de saturation initial de 17 %, soit un état hydrique proche de l'état sec. Un degré de saturation élevé, de l'ordre de 90 %, a été également investigué. Les résultats de cet essai ne sont cependant pas détaillés ici dans la mesure où la présence d'un gradient hydrique important sur les bords du corps d'épreuve a été suspectée ; rendant alors les valeurs absolues de sorptivité et de capillarité délicates à interpréter.

Les degrés de saturation partiels ont été obtenus en séchant à 105 °C les corps d'épreuve et en stoppant le séchage avant la stabilisation de la masse. Pour le retour à l'équilibre thermique, le corps d'épreuve a ensuite été ensaché et maintenu pendant 24 h dans un local régulé à 20 +/- 1 °C. La Figure 6 présente les quantités d'eau absorbée ainsi que l'avancement du front d'eau en fonction de la racine du temps. Le comportement du béton ayant un degré de saturation initial de 17 % apparaît globalement assez proche de celui du béton complètement sec.

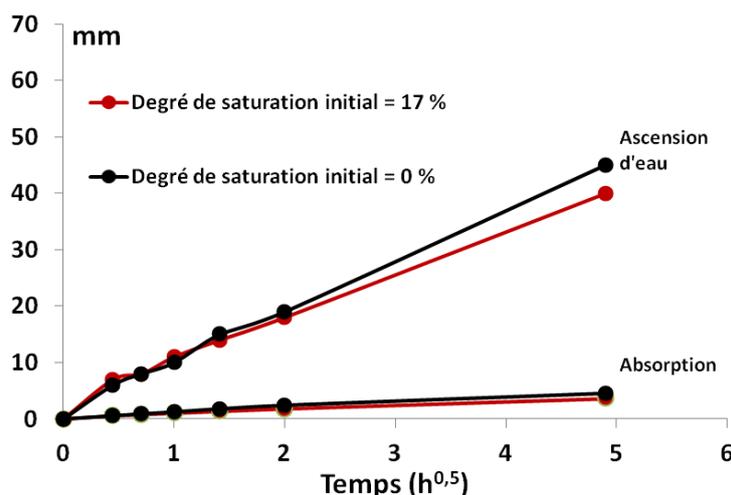


Figure 6 : Absorption et ascension de l'eau pour un degré de saturation initial de 0 et 17%.

Le Tableau 5 ci-dessous retranscrit les valeurs obtenues pour les coefficients de sorptivité et de capillarité. On constate une très légère diminution des coefficients de sorptivité et de capillarité pour le béton ayant un degré de saturation initial de 17 %. Le coefficient  $C$  reste du même ordre de grandeur que celui obtenu sur béton complètement sec.

Tableau 5 : Valeurs obtenues pour la sorptivité et le coefficient de capillarité.

	Degré de saturation initial (%)	$k$ (mm.h <sup>-0,5</sup> )	$S$ (mm.h <sup>-0,5</sup> )	$C = \frac{k}{S}$
BO1	0	8,63	0,82	10,52
BO1	17	7,79	0,71	10,97

Le Tableau 6 ci-après fournit les valeurs théoriques de porosité accessible à l'eau en fonction du degré de saturation préexistant et celles obtenues pour le ratio  $1/C$ . On peut alors remarquer que l'écart entre ces valeurs a tendance à se réduire dès lors que le béton contient initialement une certaine quantité d'eau. L'essai à un degré de saturation de l'ordre de 90 % suit également cette tendance (ratio  $1/C$  de 0,012 obtenu).

Tableau 6 : Porosité théoriquement accessible et ratio  $1/C$ .

	Degré de saturation initial (%)	Porosité accessible à l'eau (fonction du degré de saturation)	$\frac{1}{C}$
BO1	0	0,128	0,095
BO1	17	0,106 (0,83 x 0,128)	0,091

Ce constat peut être consolidé à partir de l'estimation du degré de saturation à 24 h en se basant sur la hauteur moyenne du front relevée ainsi que la quantité d'eau absorbée à 24 h (Tableau 7). On note d'abord que l'effet « bombement » disparaît lorsque le béton n'est pas complètement sec. Ensuite, considérant la porosité théoriquement accessible à l'eau, le degré de saturation estimé à 24 h apparaît plus élevé pour le béton ayant un degré de saturation initial de 17 %. L'ensemble de ces résultats a tendance à montrer que le comportement des bétons ordinaires, favorisant spécifiquement l'ascension capillaire, semble particulièrement exacerbé lorsque les bétons sont complètement secs. Le fait que cette spécificité s'atténue lorsque de l'eau est préexistante au sein du béton pourrait alors se comprendre par le fait que les dimensions des pores contenant de l'eau augmentent à mesure que le degré de saturation augmente. Cela traduit alors une incapacité progressive du réseau poreux à

favoriser l'ascension capillaire au fur et à mesure que le degré de saturation augmente. Ces conclusions mériteraient bien entendu d'être confortées à partir d'études plus approfondies comprenant différents types de béton et des investigations sur toute la plage du degré de saturation.

Tableau 7 : Evaluation du degré de saturation sur la hauteur moyenne du front d'eau.

	Degré de saturation initial (%)	$h(24h)$ avant fendage (mm)	$h(24h)$ après fendage (mm)	Degré de saturation en eau estimé sur la hauteur du front d'eau à 24 h (%)
BO1	0	44,0	49,0	69,9
BO1	17	40,0	40,0	88,0 (incluant l'eau préexistante)

## 4 Caractérisation de bétons endommagés

### 4.1 Bétons ayant subi des cycles gel-dégel

Les bétons ont été exposés jusqu'à 100 cycles gel-dégel entre + 9°C et - 18°C. Les corps d'épreuve ont été maintenus dans un état saturé en eau durant l'application des cycles. Des éprouvettes témoins 11 x 22 cm ont permis de réaliser un suivi des propriétés dynamiques en fonction du nombre de cycles appliqués : mesure de la vitesse sonique selon la norme NF EN 12504-4 [13] à partir d'un appareil Pundit 54 kHz et du module dynamique à partir d'un appareil Grindosonic selon un mode opératoire interne.

La Figure 7 illustre l'évolution des propriétés dynamiques des cinq bétons testés en fonction du nombre de cycles gel-dégel. On remarque que le béton BP1 est celui qui voit ses propriétés chuter le plus fortement ; son module chute brutalement et la vitesse sonique atteint une valeur relativement basse (de l'ordre de 3000 m/s).

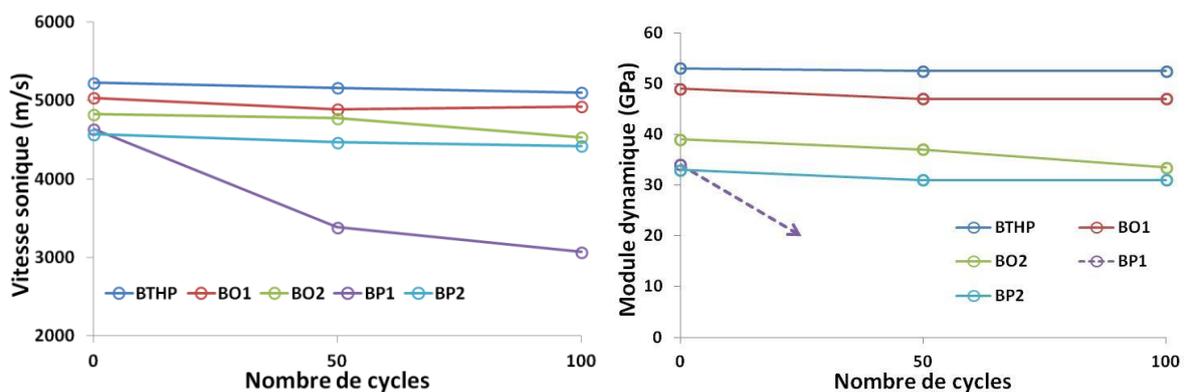


Figure 7 : Evolution de la vitesse sonique (à gauche) et du module dynamique (à droite) en fonction des cycles gel-dégel sur éprouvettes témoins 11 x 22 cm.

La mesure de la fréquence de résonance au Grindosonic n'est plus réalisable dès 50 cycles pour le béton BP1, ce qui empêche l'évaluation précise du module dynamique. Bouteille [14] a observé que les mesures de fréquence de résonance devenaient non réalisables sur des corps d'épreuve ayant subi des cycles gel-dégel dès lors que le module dynamique chutait de plus de 30 %. Ce comportement est révélateur d'un endommagement important, probablement encore plus important localement en périphérie des corps d'épreuve.

Les autres bétons ne mettent pas en évidence d'endommagement majeur. On peut cependant remarquer que les propriétés du béton BO2 diminuent de manière graduelle, pour égaler les propriétés du béton BP2 après 100 cycles, ce qui peut témoigner d'un endommagement progressif (probablement lié à la porosité particulièrement importante des granulats composant ce béton).

Les essais d'absorption capillaire ont été menés après 50 et 100 cycles gel-dégel sur des corps d'épreuve préalablement séchés à 105°C jusqu'à masse constante. La Figure 8 ci-dessous montre l'évolution de la sorptivité et du coefficient de capillarité en fonction du nombre de cycles gel-dégel.

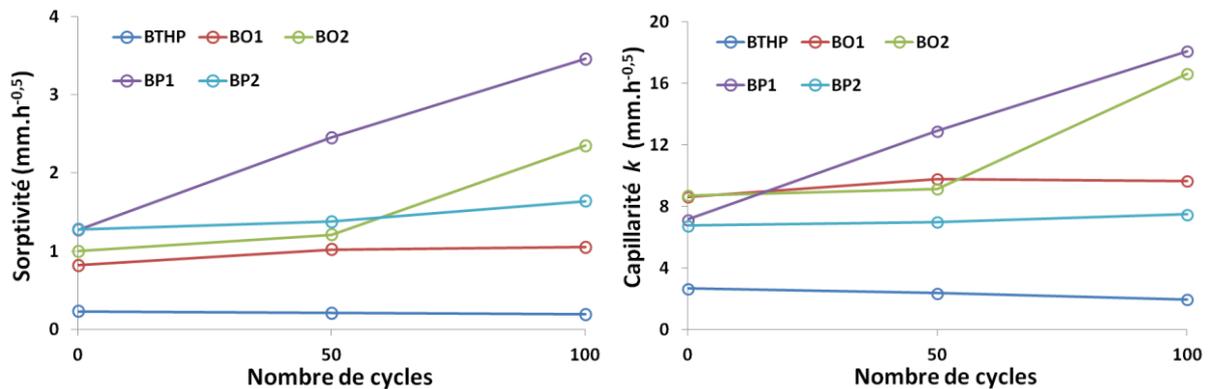


Figure 8 : Evolution de la sorptivité (à gauche) et du coefficient de capillarité (à droite) en fonction des cycles gel-dégel.

Ces résultats confirment l'endommagement important du béton BP1 ainsi que celui du béton BO2, en particulier après 100 cycles. Pour ces deux bétons, on observe en effet une nette augmentation de leur sorptivité et de leur coefficient de capillarité. Ces paramètres restent stables ou évoluent peu pour les autres bétons. On peut par ailleurs noter que l'ensemble des valeurs de sorptivité mesurées sur bétons initialement secs trouve une corrélation globalement satisfaisante avec les valeurs de vitesse sonique mesurées sur les éprouvettes témoins 11 x 22 cm maintenues à l'état saturé (Figure 9).

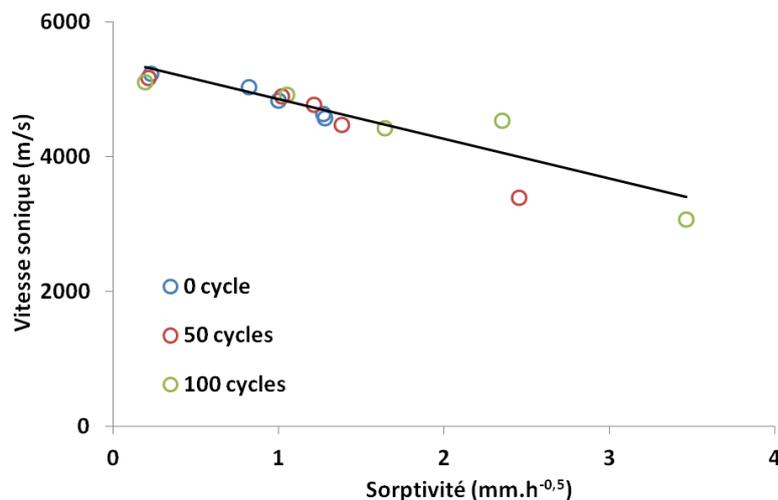


Figure 9 : Evolution de la vitesse sonique en fonction de la sorptivité.

Il est intéressant de constater que lorsque la diminution de vitesse sonique reste inférieure à 5% (soit  $V/V_0 > 95\%$ ), la sorptivité reste stable. Lorsque la diminution de vitesse sonique est plus importante ( $V/V_0 < 95\%$ ), la variation de la sorptivité (notée  $S/S_0$ ) devient alors non négligeable. La figure ci-après (Figure 10) illustre ces observations, qui se conçoivent bien entendu selon les conditions

particulières de suivi des vitesses soniques (éprouvettes témoins 11 x 22 cm maintenues à l'état saturé). On peut noter que cette tendance a également été constatée pour le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure [15].

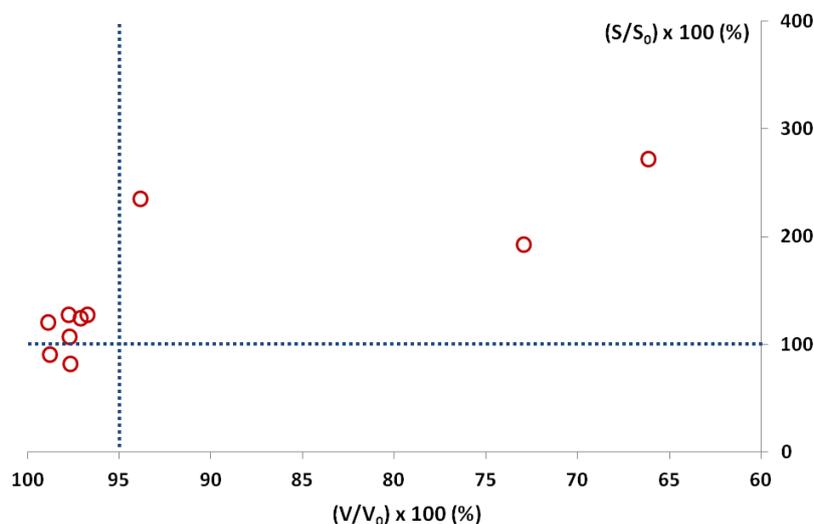


Figure 10 : Variation de la sorptivité ( $S/S_0$ ) en fonction de la variation de la vitesse sonique ( $V/V_0$ ) mesurée sur les éprouvettes témoins 11 x 22 cm.

Les évolutions respectives de la sorptivité et du coefficient de capillarité font que le coefficient  $C$  ne subit pas d'évolution majeure. Ce constat peut être illustré à partir de l'évolution du ratio  $1/C$  en fonction du nombre de cycles gel-dégel, qui fait apparaître une légère augmentation progressive (Figure 11). Cette tendance peut être reliée à l'évolution de la porosité à l'eau qui a également été mesurée au titre du suivi des propriétés des bétons en fonction des cycles gel-dégel.

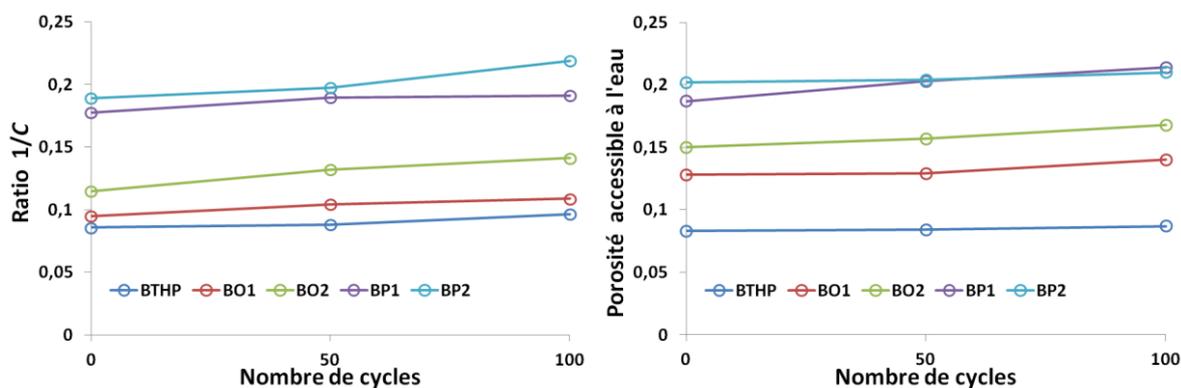


Figure 11 : Evolution du ratio  $1/C$  (à gauche) et de la porosité accessible à l'eau (à droite) en fonction des cycles gel-dégel.

Enfin, l'ensemble des taux d'absorption à  $T_0$  ( $i_0$ ) ont été déduits expérimentalement. Ils sont fournis dans la Figure 12. On observe que le paramètre  $i_0$  augmente de manière significative pour les bétons BP1 et BO2 avec les cycles gel-dégel. Une augmentation de moindre ampleur est aussi observée pour les bétons BO1 et BP2. Ce paramètre caractérisant l'état de la peau du béton, il permet de mettre en évidence l'endommagement en surface du béton. En effet, l'endommagement induit par les cycles gel-dégel n'est pas complètement homogène même s'il est diffus (endommagement plus important en peau). On remarque alors que seul le BTHP reste complètement insensible aux cycles gel-dégel (invariabilité des paramètres  $i_0$ ,  $k$  et  $S$ ).

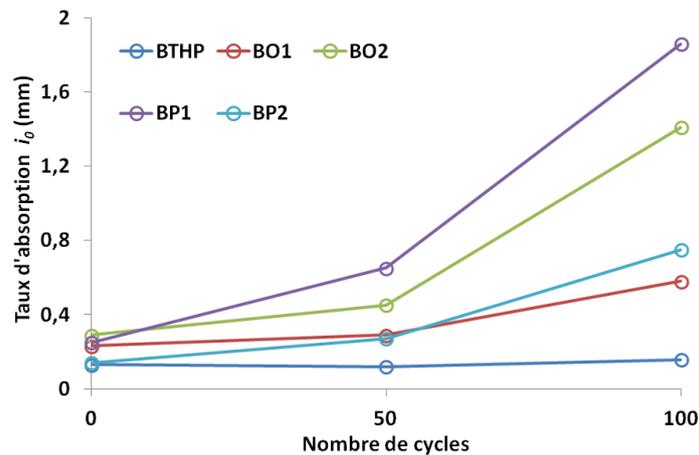


Figure 12 : Evolution du taux d'absorption  $i_0$  en fonction des cycles gel-dégel.

## 4.2 Bétons fracturés

Des corps d'épreuve de bétons BO1 et BTHP ont été fracturés par fendage en stoppant la montée en charge juste avant la rupture. Des essais d'absorption capillaire ont été menés sur des rondelles 5 x 11 cm à l'état sec. Les photographies ci-après (Figure 13) illustrent l'état des corps d'épreuve quelques minutes après le démarrage de l'essai. On voit que l'eau a atteint systématiquement la face supérieure en quelques minutes, que ce soit pour le béton ordinaire ou le BTHP. On remarque en outre que l'ascension de l'eau se fait par les fissures d'ouverture de l'ordre de 0,2-0,5 mm et non les fractures ayant les ouvertures les plus importantes.



Figure 13 : Photographies d'ascension de l'eau dans des bétons fracturés.

Un essai d'absorption a ensuite été mené sur une éprouvette 11 x 22 cm en BO1, séchée à 105°C jusqu'à masse constante, et fracturée selon la même méthodologie. Le graphique ci-dessous (Figure 14) affiche l'ascension de l'eau relevée au niveau des fissures en fonction du temps, en comparaison avec la hauteur du front d'eau relevée sur béton sain (voir aussi les photographies en Figure 15 qui illustrent l'ascension de l'eau au sein des fissures pendant l'essai et après fendage de l'éprouvette).

Le coefficient de capillarité déduit pour le béton fracturé est de l'ordre de  $13,30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-0,5}$ . Cette valeur est sensiblement plus élevée que celle obtenue à l'état sain (1,5 fois supérieure). Cependant, la différence la plus notable se situe au niveau de la hauteur d'ascension initiale  $h_0$  qui passe de 2 mm pour le béton sain à une valeur supérieure à 100 mm pour le béton fracturé (soit 50 fois plus élevée).

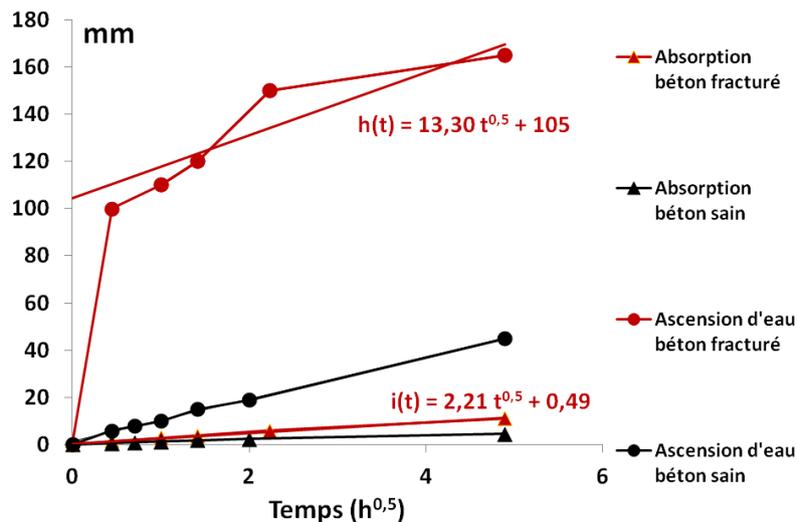


Figure 14 : Absorption et ascension de l'eau pour le béton BO1 sain et fracturé.

Une sorptivité de  $2,21 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-0,5}$  est mesurée pour le béton fracturé, soit une valeur environ 3 fois plus grande que pour le béton sain. Les quelques essais menés sur bétons fracturés permettent d'attirer l'attention quant à l'importance de la présence d'endommagement localisé sur les profondeurs d'eau atteintes ; et en particulier la faculté à engendrer des écoulements conséquents quasi-instantanés.



Figure 15 : Photographies de l'ascension de l'eau au sein du béton BO1 fracturé, avant et après fendage.

## 5 Conclusions

L'étude expérimentale qui a été menée sur des bétons de qualités variées permet de contribuer à une meilleure compréhension du lien entre sorptivité et capillarité. Il a été observé que la sorptivité mesurée sur bétons secs augmente avec leur porosité alors que le coefficient de capillarité révèle un effet cloche. Ce phénomène est probablement lié au fait que les bétons ordinaires, de par leur structure porale (morphologie, connectivité), favorisent particulièrement les écoulements par capillarité. Il a cependant été constaté sur un béton ordinaire que les écoulements par capillarité étaient moins exacerbés lorsque le béton n'est pas complètement sec, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les dimensions des pores contenant de l'eau augmentent à mesure que le degré de saturation augmente. Des essais ont également été menés sur des bétons endommagés. On a pu constater que dans le cas d'un endommagement globalement diffus, les liens entre sorptivité et capillarité ne sont pas forcément

bouleversés dans la mesure où l'endommagement a tendance à augmenter à la fois la sorptivité mais aussi la capillarité. La présence d'endommagement localisé modifie énormément le comportement ; les profondeurs d'eau atteintes au sein des fissures sont importantes et quasi-instantanées. Il a été observé pour un béton ordinaire sec que le ratio entre sorptivité et capillarité augmentait significativement. Cette tendance est certainement propre au cas étudié, faisant appel à des écoulements importants à la fois dans la masse du béton et dans les fissures. Il n'est pas certain qu'on retrouve cette tendance par exemple dans le cas d'un BTHP fracturé pour lequel l'écoulement dans la masse devrait être négligeable en comparaison avec celui dans les fissures. En termes de perspectives, on peut évoquer le fait que les études concernant l'influence du degré de saturation initial et de la présence d'endommagement localisé, simplement entrevues dans le cadre de notre travail, mériteraient d'être investiguées de manière plus détaillée (plage complète du degré de saturation, ouverture et densité des fissures maîtrisée, études sur BTHP fissurés...). Enfin, pour aller plus loin sur le plan scientifique, il pourrait être pertinent de compléter l'analyse par des essais de porosimétrie mercure et de radiographies aux neutrons (cf. investigations menées par Zhang et al. [16]), qui, à travers une meilleure connaissance de la structure poreuse et de la répartition de l'eau, permettraient d'affiner l'interprétation des résultats expérimentaux et d'envisager une appréhension de la problématique sous un angle plus théorique (modélisation de l'ascension du front d'eau et des gradients hydriques associés, prise en compte de la préexistence d'eau et de sa répartition dans le réseau poreux,...).

## Remerciements

Des remerciements sont adressés à l'ensemble des membres du laboratoire béton du département TEGG d'EDF ainsi qu'à Bastien PIOCH (stagiaire Polytech Montpellier) qui ont permis de mener à bien cette étude.

## Références

- [1] P.A. Claisse, H.I. Elsayad, E. Ganjian, Water vapour and liquid permeability measurements in cementitious samples, *Advances in Cement Research* 21 (2009) 83-89
- [2] H.H. Tremblay, Ecaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires, M.SC. Université Laval, 2009
- [3] J. DeSouza, R.D. Hooton, J.A. Bickley, A field test for evaluating high performance concrete covercrete quality, *Canadian Journal Civil Engineering* 25 (1998) 551-556
- [4] A. Piguier, B. Vernier, Méthode de mesure de la capillarité des bétons et mortiers, *Bulletin du ciment* 17 (1989)
- [5] M. Rabehi, Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire, Thèse de doctorat Université Biskra, 2014
- [6] L. Hanzic, R. Ilic, Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1385-1388
- [7] B. Aïssoun, Influence des caractéristiques rhéologiques des bétons auto-plaçants sur leur durabilité, Thèse de doctorat Cergy Pontoise, 2015
- [8] V Picandet, A. Khelidj, G. Bastian, Compared imbibitions of ordinary and high performance concrete with null or positive water pressure head, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 772-782
- [9] J. Liu, Etude expérimentale de la perméabilité relative des matériaux cimentaires et simulation numérique du transfert d'eau dans le béton, Thèse doctorat Ecole Centrale de Lille, 2011
- [10] NF EN 13057 – Détermination de l'absorption capillaire, AFNOR

- [11] NF EN 12390-3 - Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR
- [12] NF P 18-459 – Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, AFNOR
- [13] NF 12504-4 -Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son, AFNOR
- [14] S. Bouteille, Outil de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles gel-dégel en présence de sels, Thèse de doctorat Paris Est, 2013
- [15] N. Timhadjelt, M. Lion, Effet de cycles-gel-dégel sur la diffusion des ions chlorure dans les bétons – Contribution expérimentale, CFM 2019
- [16] P. Zhang, F. H. Wittmann, T-J Zhao, E.H. Lehmann, P. Vontobel, Neutron radiography, a powerful method to determine time-dependent moisture distributions in concrete, Nuclear Engineering and Design 241 (2011) 4758–4766