

# Monitoring de l'imbibition du béton par capteurs noyés de résistivité pour l'estimation de la perméabilité

Marie-Ange EID<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais

<sup>2</sup> Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint Nazaire

**RESUME** L'évaluation de la perméabilité à l'eau du béton est cruciale, parce qu'elle constitue une propriété de transfert essentielle régissant le transport des agents agressifs, notamment les ions chlorure. La perméabilité du béton peut être déterminée « directement » à l'aide de mesures expérimentales, ou « indirectement » en ajustant un modèle de transport à des profils de degré de saturation expérimentaux. Dans ce travail, la perméabilité de deux bétons, formulés sans et avec laitier, est estimée à partir de profils de degré de saturation obtenus par capteurs noyés de résistivité lors d'une campagne d'imbibition. Les profils de résistivité mesurés à différentes échéances de l'imbibition sont convertis en profils de degré de saturation grâce à des courbes de calibration. La perméabilité à l'eau est ensuite estimée en ajustant un modèle de transport hydrique aux profils de degré de saturation expérimentaux. Les résultats obtenus ont montré la capacité du capteur noyé à suivre l'évolution de l'état hydrique des éprouvettes au cours de l'imbibition. De plus, les valeurs de perméabilité estimées pour les deux bétons sont cohérentes avec les valeurs rapportées dans la littérature. Ces résultats sont très prometteurs pour le suivi continu du béton à l'aide de capteurs noyés de résistivité.

**Mots-clefs** : monitoring, résistivité, laitier, degré de saturation, perméabilité

## I. INTRODUCTION

Le travail présenté ici s'est déroulé dans le cadre du projet « ANR-DEMCOM », dont l'objectif principal est d'appliquer des méthodes d'évaluation non-destructives (END) pour l'inspection des ouvrages maritimes, puis d'intégrer directement les données collectées lors de ces inspections dans les modèles de durabilité [Bonnet et al., 2022]. Dans les zones partiellement saturées des ouvrages marins, les ions chlorure sont transportés par l'eau liquide sous l'effet d'un gradient de pression liquide (transport décrit par la loi de Darcy). La perméabilité à l'eau représente donc une propriété de transfert principale régissant le transport des chlorures en milieu non saturé [Al-Rabiah et al., 1990 ; Baroghel-Bouny et al., 2011].

Il existe différentes méthodes pour déterminer la perméabilité du béton : les méthodes « directes » qui reposent sur des mesures expérimentales permettant de remonter à la perméabilité du béton [Torrent, 1992 ; Lafhaj et al., 2007] et les méthodes « indirectes » qui consistent en une analyse inverse de profils de degré de saturation expérimentaux. En d'autres termes, la perméabilité peut être estimée par ajustement de modèles de transport aux profils de degré de saturation obtenus lors d'essais de séchage ou d'imbibition [Thiery et al., 2007 ; Eid et al., 2025]. Les méthodes END sont de plus en plus employées pour la détermination des profils de degré de

saturation, notamment les méthodes résistives fortement sensibles à l'état hydrique du béton [Lataste et al., 2003 ; Torres-Luque et al., 2014 ; Smyl, 2020]. La plupart de ces méthodes reposent sur des mesures surfaciques, qui perdent en résolution avec la profondeur et sont réalisées de manière ponctuelle, ne permettant pas un suivi continu dans le temps. De plus, ces techniques ne sont pas toujours adaptées à certaines zones des ouvrages maritimes, qui peuvent être difficilement accessibles pour l'inspection. C'est pourquoi, plusieurs dispositifs destinés à être noyés dans le béton ont été développés, en particulier le capteur noyé de résistivité développé par [Badr et al., 2019]. Ce capteur est en circuit imprimé (CI) et a une forme d'échelle, contenant plusieurs électrodes réparties de part et d'autre du CI. Le dispositif échelle a montré sa capacité à suivre l'évolution des profils de résistivité en fonction du temps, avec une résolution centimétrique sur toute la profondeur de la structure [Badr et al., 2019 ; Ibro 2020].

Dans ce travail, nous présentons une nouvelle méthode indirecte pour estimer la perméabilité du béton. Notre étude est réalisée sur deux bétons formulés sans et avec laitier de haut fourneau, une addition minérale couramment incorporée dans les ouvrages marins en raison de ses effets positifs sur les propriétés de transfert du béton [Ben Fraj et al., 2012 ; El Achrafi et al., 2023]. Le capteur noyé développé par [Badr et al., 2019] est utilisé pour monitorer des éprouvettes instrumentées soumises à une campagne d'imbibition d'eau douce. Ce choix reflète notre objectif initial, qui est l'estimation de la perméabilité à l'eau dans un cas simplifié, avant d'appliquer notre approche à des environnements plus complexes comme l'eau de mer. Les profils de résistivité sont enregistrés à plusieurs échéances réparties entre 20 minutes et 21 jours d'imbibition, puis convertis en profils de degré de saturation grâce à des courbes de calibration établies pour chaque béton. Enfin, la perméabilité des bétons est estimée par ajustement d'un modèle de transport aux profils de degré de saturation expérimentaux.

Après cette première partie introductive, la deuxième partie est consacrée à la présentation des matériels et méthodes utilisés pour la campagne expérimentale. Dans la troisième partie, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux du monitoring. Ensuite, la quatrième partie introduit brièvement le modèle de transport utilisé et présente les résultats de simulation numérique. Enfin, la dernière partie synthétise les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour des travaux futurs.

## II. MATERIELS ET METHODES

### II.1. Formulation des bétons

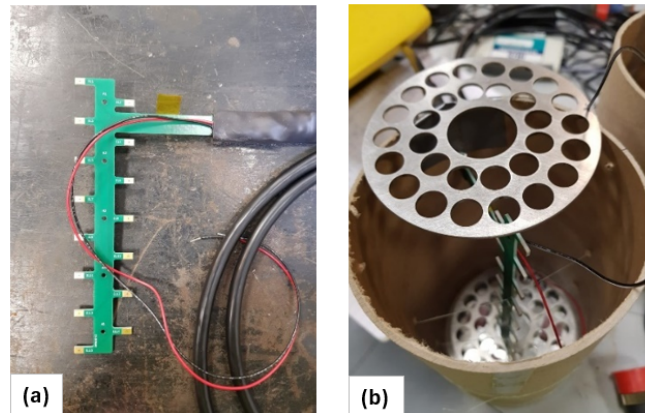
Les bétons étudiés dans ce travail ne diffèrent que par leur taux de laitier : le béton C100-0 ne contient pas de laitier, tandis que le béton C50-50 présente un pourcentage de remplacement en masse du clinker par du laitier égal à 50 %. Les deux bétons ont été formulés pour atteindre une classe de consistance S3 (similaire à celle de l'étude de [Badr et al., 2019]), afin de faciliter leur mise en œuvre dans les moules instrumentés. La composition des deux bétons est présentée dans le Tableau 1.

**TABLEAU 1. Formulation des bétons**

Constituants (kg/m <sup>3</sup> )	C100-0	C50-50
	0 % laitier	50 % laitier
Gravillons, 4-12 mm (Boulonnais)	1041,7	1038,8
Sable, 0-4 mm (Boulonnais)	910,3	907,6
CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 NF HTS (Lafarge)	302,5	151,3
Laitier Ecocem	0	151,3
Superplastifiant MasterGlenium 201 (BASF)	2,94	3,53
Eau efficace	151,7	150,7
Rapport Eau/Liant (Eeff/L)	0,50	0,50

## II.2 Instrumentation et principe de mesure

Afin de suivre l'évolution de la résistivité pendant l'imbibition, une éprouvette cylindrique de chaque formulation présentée dans le Tableau 1 a été fabriquée. Les deux éprouvettes, de dimensions  $\phi 11 \times 18$  cm, ont été instrumentées avec un capteur échelle contenant 15 électrodes, comme le montre la Figure 1(a). Ce capteur a été positionné au centre de l'éprouvette, selon l'axe vertical, entre deux grilles métalliques ancrées dans le béton et servant pour l'injection du courant (Figure 1(b)).



**FIGURE 1. Instrumentation des éprouvettes : (a) capteur échelle à 15 électrodes, (b) moule instrumenté avec le capteur et les grilles avant coulage [Eid et al., 2025]**

Après la fabrication des éprouvettes, celles-ci ont subi une cure humide pendant 90 jours afin d'assurer une stabilisation quasi complète du degré d'hydratation, en particulier pour le béton C50-50. Cette durée de cure est généralement jugée suffisante pour considérer que l'hydratation est achevée dans le cadre des essais réalisés. La cure humide a consisté à placer les éprouvettes dans un bac fermé contenant une faible quantité d'eau, juste assez pour atteindre le bas des éprouvettes sans les immerger, à une température ( $T$ ) de  $21 \pm 0,5$  °C et une humidité relative ambiante ( $HR_{amb}$ ) de  $95 \pm 2$  %.

Pendant la campagne d'imbibition, les éprouvettes instrumentées sont connectées à un résistivimètre (le Syscal Junior Switch 72 de IRIS Instruments) injectant un courant alternatif à basse fréquence, de l'ordre de 2 Hz. Les mesures de résistivité sont réalisées selon la configuration de « Transmission » [Badr et al., 2019] : le courant d'intensité  $I$  (mA) (ajusté entre 1 et 10 mA) est injecté entre les deux grilles métalliques et les différences de potentiel  $\Delta V$  (mV) résultantes sont mesurées

entre les paires d'électrodes de l'échelle. La résistivité électrique est alors calculée à l'aide de l'équation 1, où  $G$  (m) représente un facteur géométrique qui ne dépend que des conditions géométriques du problème [Marescot et al., 2006 ; Palma Lopes et al., 2023, Minagawa et al., 2023].

$$\rho_{app} = G \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Il est important de noter que la résistivité mesurée est sensible à un certain volume d'investigation, qui dépend fortement de l'espacement et de la géométrie des électrodes interrogées. Dans le cas d'un matériau hétérogène comme le béton (présentant des gradients de degré de saturation), la résistivité mesurée est une résistivité « apparente », représentant une valeur intégrante de la distribution de la résistivité « vraie » du matériau. De manière générale, le passage de la résistivité « apparente » à la résistivité « vraie » nécessite un processus d'inversion, tel que décrit dans [Fargier et al., 2021] et [Alhajj et al., 2021]. En revanche, [Badr et al., 2019] ont montré que les profils de résistivité « apparente » mesurés par le capteur noyé constituent une bonne estimation des profils de résistivité « vraie », sans avoir recours au processus d'inversion. Afin de simplifier notre approche, nous considérons que les profils de résistivité « apparente » obtenus par les capteurs noyés sont représentatifs des profils de résistivité « vraie », et nous ne développons donc pas l'approche de l'inversion dans la suite de l'article.

### II.3. Conditions expérimentales de la campagne d'imbibition

Après la période de cure et avant de débiter l'imbibition, les éprouvettes instrumentées ont été soumises à un séchage tridimensionnel dans une étuve, à  $T = 45 \pm 0,5$  °C et  $HR_{amb} = 75 \pm 2$  %, pendant une durée d'un mois. Après la phase de séchage, les éprouvettes ont été emballées dans des sacs en plastique et conservées dans une salle climatisée pendant 13 semaines, afin d'homogénéiser leur état hydrique. A l'issue de cette période d'homogénéisation, les éprouvettes C100-0 et C50-50 présentaient des degrés de saturation moyens de  $58,2 \pm 1$  % et  $67 \pm 1$  % respectivement, ces valeurs étant considérées comme les états hydriques initiaux de l'imbibition. Avant le début de l'imbibition, les éprouvettes ont été recouvertes latéralement par une couche de papier aluminium adhésif pour assurer une pénétration unidirectionnelle de l'eau.

Les éprouvettes ont été ensuite soumises à l'imbibition d'eau douce pendant 21 jours, dans une salle climatisée à  $T = 21 \pm 0,5$  °C et  $HR_{amb} = 66 \pm 2$  %. La hauteur d'eau dans les bassins a été régulièrement contrôlée tout au long de la période d'imbibition, de manière que les éprouvettes soient plongées dans 1 cm d'eau (hauteur mesurée à partir de la face de pénétration). Afin d'éviter le contact entre l'eau d'imbibition et le papier aluminium (qui est un bon conducteur du courant électrique) pendant la mesure, un ruban adhésif a été collé sur les deux premiers centimètres du côté de la face de pénétration (comme le montre la Figure 2).

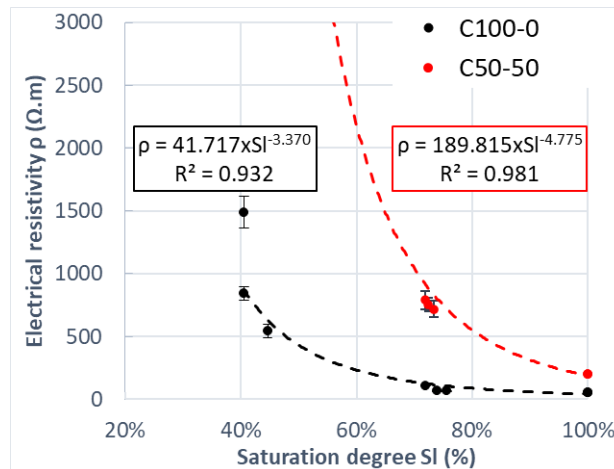


**FIGURE 2.** Eprouvettes instrumentées en imbibition

#### II.4. Campagne de calibration

Les profils de résistivité enregistrés à différentes échéances de l'imbibition sont convertis en profils de degré de saturation grâce à une campagne de calibration. Celle-ci a été réalisée sur 3 carottes (de dimensions  $\phi 75 \times 70$  mm) de chaque béton, en utilisant la cellule de résistivité développée par [Du Plooy et al., 2013]. Les carottes sont conditionnées à différents degrés de saturation et les mesures de résistivité sont réalisées à chaque état hydrique visé, afin d'établir une courbe de calibration reliant la résistivité électrique ( $\rho$ ) au degré de saturation ( $S_i$ ) [Villain et al., 2018].

La Figure 3 montre une superposition des courbes de calibration obtenues pour les bétons C100-0 et C50-50. Nous rappelons que la cellule de résistivité utilisée permet d'obtenir 6 mesures de résistivité à différentes profondeurs de la carotte et que nos mesures sont réalisées en alternant l'orientation des carottes. Ainsi, nous obtenons au total 12 mesures de résistivité pour chaque carotte. Les points expérimentaux présentés dans la Figure 3 représentent la valeur moyenne des 12 mesures de résistivités obtenues pour chaque carotte et les barres d'erreur verticales représentent l'écart-type correspondant. Les courbes de calibration (présentées en lignes pointillées) sont obtenues par ajustement d'une loi de puissance de la forme  $\rho = A \times S_i^u$ , conforme à la loi d'Archie [Archie, 1942].



**FIGURE 3.** Courbes de calibration établies pour les bétons C100-0 et C50-50

Les résultats montrent que, pour les deux bétons, la résistivité électrique diminue avec l'augmentation du degré de saturation. Pour un degré de saturation compris entre 40 % et 100 %, la résistivité du béton C100-0 varie entre 50  $\Omega.m$  et 1500  $\Omega.m$ , tandis que celle du béton C50-50 varie entre 200  $\Omega.m$  et 12000  $\Omega.m$ . Cette valeur maximale de 12000  $\Omega.m$ , correspondant au degré de saturation minimal atteint expérimentalement ( $S_i = 40$  %), n'apparaît pas sur le graphique, parce que l'échelle a été ajustée afin de ne pas écraser la courbe du béton C100-0. Ainsi, nous remarquons qu'à un degré de saturation donné, la résistivité électrique du béton C50-50 est plus élevée que celle du béton C100-0. Cela est attribué au raffinement de la microstructure et à la consommation des ions hydroxydes mobiles présents dans l'espace poral du béton [Polder et al., 2000 ; Teng et al., 2013 ; Cherif et al., 2020]. Il convient également de souligner la dispersion des résultats de résistivité observée à faible degré de saturation, aussi bien pour le béton C100-0 que pour le béton C50-50. Cette variabilité est liée à la résistance de contact élevée entre les électrodes de mesure et le béton sec.

### III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous présentons les profils de résistivité apparente obtenus par capteurs noyés à différentes échéances de l'imbibition, ainsi que les profils de degré de saturation obtenus grâce aux courbes de calibration.

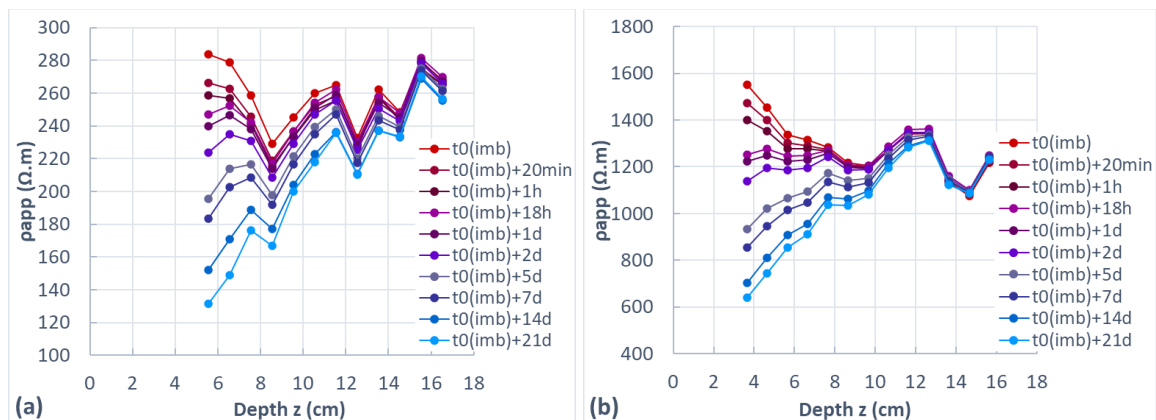
#### III.1. Profils de résistivité obtenus par capteurs noyés

La Figure 4 présente les profils de résistivité apparente obtenus par capteurs noyés à différentes échéances de l'imbibition pour les bétons C100-0 (a) et C50-50 (b). Il est important de souligner que les profils obtenus pour le béton C100-0 sont décalés par rapport à ceux obtenus pour le béton C50-50. En effet, la première mesure obtenue pour le béton C100-0 se situe à 5,55 cm de la face de pénétration (correspondant à  $z = 0$ ), tandis que celle du béton C50-50 se trouve plutôt à 3,65 cm de la face de pénétration. Ce décalage s'explique par le déplacement du capteur vers le haut dans l'éprouvette C100-0, probablement à cause de la rupture d'un fil de maintien du capteur lors du coulage.

Tout d'abord, les profils de résistivité initiaux (mesurés à  $t_0(imb)$ ) montrent qu'à profondeur comparable, la résistivité du béton C50-50 est environ six fois plus élevée que celle du béton C100-0. Cette différence s'explique par la présence du laitier dans le béton C50-50 qui entraîne un

raffinement de la microstructure et une réduction de la connectivité des pores, augmentant ainsi la résistivité électrique. En outre, pour chacun des deux bétons, les profils de résistivité initiaux présentent de légères fluctuations en profondeur, notamment entre 8 cm et 14 cm. Cette observation pourrait s'expliquer par des hétérogénéités locales du matériau (présence de granulats ou de bulles d'air entraîné), ainsi que par les conditions de pré-conditionnement et le séchage préalable subi par les éprouvettes.

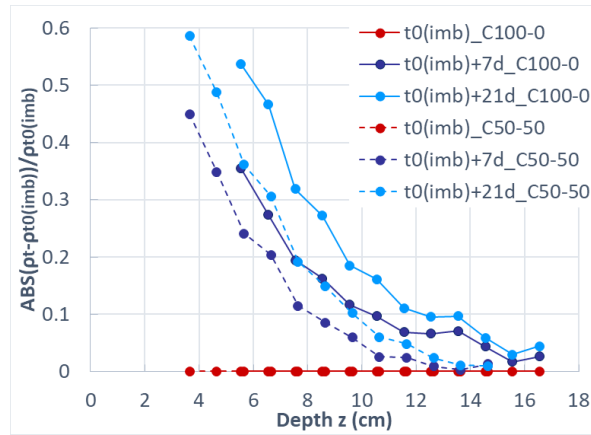
Par ailleurs, les résultats mettent en évidence une diminution progressive de la résistivité électrique au fur et à mesure de la pénétration de l'eau, reflétant un comportement typique du phénomène d'imbibition. Cette diminution est particulièrement marquée aux profondeurs proches de la face de pénétration ( $z = 0$  cm). Après 21 jours d'imbibition, la résistivité mesurée à 5,55 cm pour le béton C100-0 passe de 280  $\Omega\cdot\text{m}$  à 130  $\Omega\cdot\text{m}$  et celle mesurée à 3,65 cm pour le béton C50-50 diminue de 1600  $\Omega\cdot\text{m}$  à 600  $\Omega\cdot\text{m}$ . En revanche, les valeurs de résistivité mesurées aux profondeurs proches de la face supérieure des deux éprouvettes ( $z = 18$  cm) restent pratiquement constantes après 21 jours. Cela suggère que l'eau n'a probablement pas atteint la hauteur totale de l'éprouvette même après cette durée d'imbibition.



**FIGURE 4.** Profils de résistivité apparente obtenus par capteurs noyés à différentes échéances de l'imbibition : (a) béton C100-0, (b) béton C50-50

Afin de mieux comparer les deux bétons, la Figure 5 illustre la variation des profils de résistivité (en valeur absolue) par rapport aux profils initiaux pour différentes échéances d'imbibition :  $t_0(imb)$ ,  $t_0(imb)+7$  jours et  $t_0(imb)+21$  jours. Les résultats du béton C100-0 sont présentés en traits pleins, tandis que ceux du béton C50-50 sont présentés en pointillés.

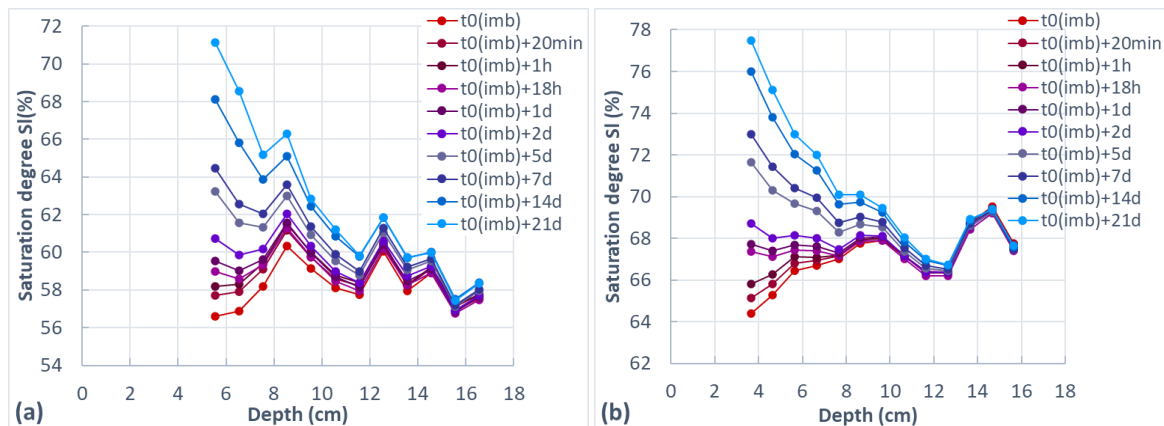
La Figure 5 met clairement en évidence le décalage entre les profils des deux bétons. En outre, à une profondeur et une échéance de temps données, la variation relative de la résistivité du béton C100-0 est plus élevée que celle du béton C50-50. Par exemple, à une profondeur de 6 cm de la face de pénétration et après 21 jours d'imbibition, la résistivité du béton C100-0 diminue de 50 %, tandis que celle du béton C50-50 diminue de 35 %. Cette différence pourrait être attribuée à la présence du laitier dans le béton C50-50, qui entraîne une modification de la distribution de la taille des pores et une réduction du diamètre critique [Fabien et al., 2021 ; El Achrafi et al., 2023]. Ces modifications microstructurales peuvent limiter la propagation du front d'eau dans l'éprouvette. Une observation similaire a d'ailleurs été rapportée par [Ibro et al., 2021], qui ont constaté une remontée capillaire moins profonde pour un béton contenant du laitier.



**FIGURE 5.** Variation relative (en valeur absolue) des profils de résistivité par rapport aux profils initiaux à différentes échéances de l'imbibition pour les bétons C100-0 (en traits pleins) et C50-50 (en pointillés)

III.2. Profils de degré de saturation

Les profils de résistivité présentés dans la partie précédente sont convertis en profils de degré de saturation, grâce aux courbes de calibration montrés dans la Figure 3. La Figure 6 montre les profils de degré de saturation obtenus à différentes échéances de l'imbibition pour les bétons C100-0 (a) et C50-50 (b).



**FIGURE 6.** Profils de degré de saturation obtenus par conversion des profils de résistivité à différentes échéances de l'imbibition : (a) béton C100-0, (b) béton C50-50

Tout d’abord, il convient de noter que l’allure des profils de degré de saturation correspond parfaitement à celle des profils de résistivité présentés dans la Figure 4. Cela s’explique par la conversion directe des profils de résistivité à l’aide des courbes de calibration.

Au fur et à mesure que l’eau pénètre, le gradient de degré de saturation se développe et devient de plus en plus marqué, notamment du côté de la face de pénétration. Après 21 jours d’imbibition, le degré de saturation obtenu à  $z = 5,55$  cm de la face de pénétration de l’éprouvette C100-0 passe de 56 % à 72 % et celui obtenu à  $z = 3,65$  cm de la face de pénétration de l’éprouvette C50-50 passe de 64 % à 78 %. En revanche, nous remarquons que la face supérieure des deux

éprouvettes conserve quasiment le même état hydrique initial. Cela peut être expliqué par le fait que les faces supérieures n'ont pas été protégées pendant l'imbibition, conduisant ainsi à un séchage dans l'air ambiant.

Enfin, les résultats montrent que les éprouvettes ne sont pas complètement saturées après 3 semaines d'imbibition. Il se peut que la durée de la campagne d'imbibition ait été insuffisante pour obtenir une saturation complète des éprouvettes. L'idéal aurait été de peser les éprouvettes à différentes échéances de l'imbibition, afin de comparer la prise de masse avec l'évolution du degré de saturation obtenu à partir des mesures de résistivité. Par ailleurs, nous rappelons que les profils de degré de saturation sont obtenus par conversion des profils de résistivité « apparente », considérés comme étant une bonne estimation de la résistivité « vraie » dans le matériau [Badr et al., 2019]. En revanche, l'hypothèse selon laquelle la résistivité « apparente » correspond à la résistivité « vraie » du matériau pourrait devenir moins fiable en présence d'un gradient hydrique assez prononcé, nécessitant peut-être un processus d'inversion afin de remonter aux profils de résistivité « vraie ».

#### IV. DES PROFILS HYDRIQUES A LA PERMEABILITE

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de l'estimation de la perméabilité par ajustement d'un modèle de transport hydrique aux profils de degré de saturation expérimentaux. Nous commençons par une brève introduction au modèle de transport retenu, avant d'exposer et d'analyser les résultats de simulation numérique.

##### IV.1. Présentation du modèle de transport utilisé en milieu non saturé

Le modèle de transport retenu est basé sur l'approche thermodynamique, décrivant le transfert de l'humidité par le mouvement de la phase liquide et de la phase gazeuse dans les milieux poreux [Coussy et al., 2001 ; Mainguy et al., 2001]. Certains travaux de la littérature ont montré que, selon l'état hydrique de l'environnement (c'est-à-dire l'humidité relative ambiante) et la nature du matériau, un modèle simplifié basé uniquement sur le transport de la phase liquide peut être appliqué [Mainguy et al., 1999 ; Thiery et al., 2007]. Ainsi, nous considérons que le transport de la phase gazeuse peut être négligé devant le transport de l'eau par capillarité et que la pression du gaz est constante et égale à la pression atmosphérique.

Ceci étant, la loi de Darcy (équation 2) est utilisée pour décrire la vitesse de la phase liquide  $v_l$  (m/s) dans la profondeur  $x$  du matériau. Dans l'équation 2,  $\eta_l$  (Pa.s) est la viscosité dynamique de la phase liquide,  $P_l$  (Pa) est la pression de la phase liquide,  $K_l$  (m<sup>2</sup>) et  $k_{r,l}$  (-) sont respectivement les perméabilités intrinsèque et relative de la phase liquide.

$$v_l = - \frac{K_l k_{r,l}}{\eta_l} \frac{\partial P_l}{\partial x} \quad (2)$$

Le phénomène de sorption dans le matériau est communément décrit par le modèle de Van Genuchten (VG) [Van Genuchten, 1980] donné par l'équation 3, permettant d'exprimer le degré de saturation en fonction de l'humidité relative. Celle-ci est définie comme étant le rapport entre la pression de la vapeur  $P_v$  et la pression de la vapeur saturante  $P_{v,sat}$  à une température donnée.

$$S_l(HR) = \left[ 1 + \left( - \frac{d_l RT}{M_l a} \ln(HR) \right)^{\frac{1}{(1-m)}} \right]^{-m} \quad (3)$$

où  $S_l(HR)$  est le degré de saturation représentant la fraction volumique de l'eau liquide dans la porosité  $\varphi$  (%) du béton,  $d_l$  (kg/m<sup>3</sup>) et  $M_l$  (kg/mol) sont respectivement les masses volumique et molaire de l'eau liquide, et  $a$  (Pa) et  $m$  (-) sont les paramètres du modèle VG ajustables aux mesures de sorption expérimentales. Certains travaux de la littérature ont montré que les paramètres VG peuvent varier en fonction du type de matériau, en particulier le paramètre  $a$  [Ben Fraj et al., 2012 ; Ibro et al., 2021].

Le degré de saturation exprimé par l'équation 3 constitue une variable clé pour l'évaluation de la pression de la phase liquide  $P_l$ , à partir de la pression capillaire  $P_c$  (Pa) présente dans les pores partiellement saturés et définie comme étant la différence entre les pressions totales du gaz ( $P_g$ ) et du liquide ( $P_l$ ) (équation 4). La pression capillaire est exprimée, selon la loi de Kelvin, en fonction du degré de saturation et des paramètres VG ajustables  $a$  et  $m$  (équation 5).

$$P_c(S_l) = P_g - P_l \quad (4)$$

$$P_c(S_l) = a \left( S_l^{\frac{-1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (5)$$

Selon [Van Genuchten, 1980], la perméabilité relative de la phase liquide dépend également du degré de saturation et peut être estimée par l'équation 6, où  $q$  (-) est un exposant ajustable généralement pris égal à 2.

$$k_{r,l} = S_l^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - S_l^{\frac{1}{m}} \right)^{m-q} \right] \quad (6)$$

Après avoir défini les différents paramètres à l'aide des relations constitutives présentées ci-dessus, le modèle de transport est formulé par l'équation bilan de conservation de la masse de la phase liquide, donnée par l'équation 7 :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_l) - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_l k_{r,l}(S_l)}{\eta_l} \frac{\partial P_l}{\partial x} \right] = 0 \quad (7)$$

Les paramètres d'entrée du modèle sont les propriétés du matériau (la porosité, la perméabilité à l'eau et les paramètres VG ajustables) et le paramètre de sortie est le profil de degré de saturation. La simulation numérique de l'imbibition est réalisée par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel FlexPDE.

#### IV.2. Estimation de la perméabilité à l'eau

La perméabilité des bétons est estimée par ajustement du modèle de transport hydrique aux profils de degré de saturation obtenus après 21 jours d'imbibition pour les deux éprouvettes.

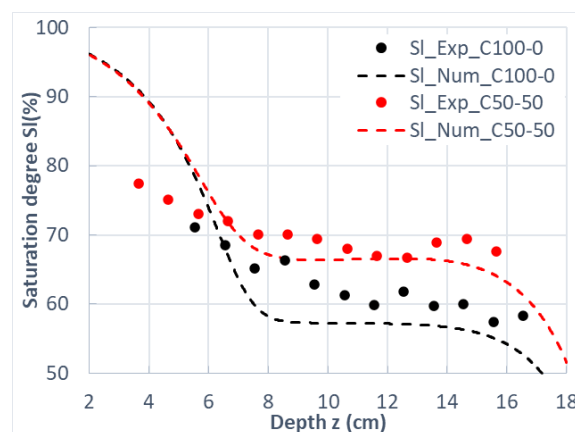
Les paramètres d'entrée adoptés pour la simulation de l'imbibition sont récapitulés dans le Tableau 2. Tout d'abord, la porosité des bétons est mesurée à 90 jours selon le mode opératoire décrit dans [AFPC-AFREM, 1997]. L'état initial des éprouvettes ( $S_{l0}$  (%)) correspond aux profils de degré de saturation initiaux mesurés en début de l'imbibition (à l'échéance  $t_0(imb)$ ) et les conditions aux limites  $S_{l_{ext1}}$  (%) et  $S_{l_{ext2}}$  (%) représentent respectivement les degrés de saturation au niveau des faces inférieures et supérieures des éprouvettes. Bien que la face inférieure des éprouvettes soit en contact direct avec l'eau, la valeur de  $S_{l_{ext1}}$  est choisie légèrement inférieure à 100 % afin d'éviter les instabilités numériques dans le modèle. Le degré de saturation au niveau de la face supérieure des éprouvettes ( $S_{l_{ext2}}$ ) dépend de l'humidité relative ambiante et est calculée à l'aide de l'équation 3.

Enfin, l'équation 6 est utilisée pour exprimer la perméabilité relative à l'eau, en fixant la valeur de l'exposant  $q$  à 2.

Il convient de noter que, dans notre cas, les paramètres VG  $a$  et  $m$  propres à nos bétons n'ont pas été déterminés. Nous avons donc commencé par attribuer à ces paramètres des valeurs issues de travaux de la littérature [Baroghel-Bouny, 1994 ; Ben Fraj et al., 2012 ; Ibro et al., 2021 ; Reuge et al., 2023], réalisés sur des bétons comparables aux bétons de cette étude. Ensuite, les paramètres  $a$  et  $m$ , ainsi que la perméabilité à l'eau  $K_i$ , ont été ajustés afin d'assurer le meilleur ajustement possible (c'est-à-dire en minimisant l'erreur quadratique moyenne RMSE entre les profils numérique et expérimentaux).

**TABLEAU 2.** Paramètres d'entrée du modèle adoptés pour la simulation de l'imbibition des éprouvettes

		<b>C100-0</b>	<b>C50-50</b>
Porosité	$\varphi$ (%)	14,1	12,7
Paramètres d'adsorption	$a$ (MPa)	18	30
	$m$ (-)	0,4	0,46
<b>Perméabilité à l'eau</b>	$K_i$ (m <sup>2</sup> )	<b>15x10<sup>-21</sup></b>	<b>5x10<sup>-21</sup></b>
Etat initial	$S_{i0}$ (%)	Profil mesuré à $t_0(imb)$	Profil mesuré à $t_0(imb)$
Humidité relative ambiante	$HR_{amb}$ (%)	66±2 %	66±2 %
Conditions aux limites	$S_{lex1}$ (%)	100 %	100 %
	$S_{lex2}$ (%)	44 % (équation 3)	52 % (équation 3)



**FIGURE 7.** Ajustement du modèle de transport hydrique aux profils de degré de saturation obtenus par capteurs noyés après 21 jours d'imbibition pour les deux bétons

La Figure 7 montre une superposition des profils de degré de saturation numériques (représentés en pointillés) et expérimentaux (représentés par des points) à 21 jours d'imbibition. Les résultats montrés dans la Figure 7 correspondent au meilleur ajustement du modèle aux profils hydriques expérimentaux, obtenu pour les paramètres d'entrée figurant dans le Tableau 2 et une RMSE de l'ordre de 5 %. La perméabilité estimée du béton C50-50 est d'environ  $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ , inférieure à celle du béton C100-0 estimée à  $15 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ , probablement en raison de la microstructure plus dense du béton C50-50 contenant du laitier. Ces ordres de grandeur de perméabilité sont cohérents avec les valeurs rapportées dans la littérature pour des bétons similaires [Baroghel-Bouny, 1994 ; Thierry et al., 2007 ; Ibro et al., 2021 ; Reuge et al., 2023], ce qui

souligne la pertinence de notre approche consistant à estimer indirectement la perméabilité du béton à partir de mesures expérimentales obtenues par capteurs noyés.

De légères divergences sont observées entre les profils numériques et expérimentaux pour les deux bétons, pouvant s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'absence de mesures expérimentales à proximité des extrémités rend l'ajustement du modèle plus complexe, en particulier près de la face de pénétration où le gradient hydrique est le plus marqué. De plus, les profils de degré de saturation expérimentaux sont obtenus par conversion de profils de résistivité « apparente », considérée comme une bonne estimation de la résistivité « vraie ». En revanche, cette hypothèse peut devenir moins fiable en présence d'un gradient hydrique prononcé.

Par ailleurs, au-delà des incertitudes expérimentales, les divergences pourraient également provenir de la simulation numérique, en particulier du fait que plusieurs paramètres d'entrée inconnus ont dû être ajustés, introduisant ainsi une source d'incertitude supplémentaire. Dans ce contexte, l'ajustement réalisé à 21 jours d'imbibition était le seul à montrer un bon alignement entre le modèle et les mesures expérimentales. Bien qu'il soit pertinent de simuler l'imbibition à d'autres échéances et de tester différentes valeurs des paramètres d'entrée, cela ne constituait pas l'objectif principal de nos travaux. Malgré les sources d'incertitude évoquées, notre approche parvient quand même à estimer la perméabilité des bétons avec une précision raisonnable.

## V. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons proposé une nouvelle approche pour la détermination de la perméabilité à l'eau, une propriété de transfert essentielle régissant le transport des agents agressifs dans le béton. La méthodologie adoptée consiste à estimer la perméabilité du béton par ajustement d'un modèle de transport hydrique à des profils de degré de saturation, obtenus par capteurs noyés lors d'une campagne d'imbibition.

L'étude a été réalisée sur deux bétons : le béton de référence C100-0 et le béton C50-50 formulé en remplaçant 50 % du clinker par du laitier, afin d'évaluer l'effet du laitier sur la perméabilité du béton. Une éprouvette instrumentée de chaque béton a été soumise à l'imbibition d'eau douce pendant 21 jours et les profils de résistivité ont été enregistrés à différentes échéances de l'imbibition. Les profils de résistivité ont été ensuite convertis en profils de degré de saturation, grâce aux courbes de calibration correspondantes. Les résultats du monitoring ont illustré l'évolution de l'état hydrique des éprouvettes pendant l'imbibition, traduite par une diminution de la résistivité électrique et donc, une augmentation du degré de saturation. En comparant les deux bétons, nous avons remarqué qu'à une profondeur et une échéance de temps données, la diminution de la résistivité dans le béton C100-0 est supérieure à celle du béton C50-50, probablement en raison de l'influence du laitier sur la microstructure et la composition de la solution porale du béton.

Les profils de degré de saturation mesurés à 21 jours d'imbibition ont été utilisés pour l'ajustement du modèle de transport hydrique et l'estimation de la perméabilité à l'eau. Les résultats de simulation numérique ont souligné l'efficacité de notre approche, montrant des valeurs de perméabilité comparables aux valeurs rapportées dans les travaux antérieurs. De plus, nous avons constaté que le béton C50-50 présente une perméabilité inférieure à celle du béton C100-0, soulignant ainsi l'effet de la présence du laitier sur la perméabilité du béton. Certaines divergences ont été observées entre les profils numériques et expérimentaux et peuvent s'expliquer par des incertitudes liées à notre campagne expérimentale, telles que l'absence de mesures à proximité de la face de pénétration, ou encore l'hypothèse selon laquelle les profils de résistivité "apparente" mesurés par capteurs noyés constituent une estimation fiable des profils de résistivité "vraie", même en présence d'un gradient hydrique prononcé. Par ailleurs, des incertitudes peuvent également

provenir de la simulation numérique, notamment la nécessité d'ajuster plusieurs paramètres d'entrée liés aux propriétés de nos matériaux, qui sont initialement inconnus. Cependant, ces incertitudes n'ont pas empêché d'obtenir de bons ajustements entre le modèle et les mesures expérimentales, permettant ainsi d'estimer correctement la perméabilité de nos bétons.

Dans le cadre de ce projet, la même méthodologie est adoptée afin d'estimer le coefficient de diffusion des chlorures, une autre propriété de transfert essentielle régissant le transport des chlorures. Cette étude est menée sur des éprouvettes instrumentées soumises à la pénétration des chlorures sous conditions saturées (diffusion) et non saturées (imbibition d'eau salée). Cette série d'essais vise à découpler l'eau des chlorures, afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors de la pénétration des chlorures dans le béton sous différentes conditions.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'« Agence Nationale de la Recherche » pour le financement du projet ANR-20-CE22-0008 DEMCOM. De plus, nous remercions toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail, de l'équipe encadrante aux techniciens des laboratoires LAMES de l'Univ Gustave Eiffel et GeM de Nantes Université.

## REFERENCES

AFPC-AFREM. (1997). Compte-rendu des Journées Techniques Durabilité des Bétons, « Méthodes Recommandées pour la Mesure des Grandeurs Associées à la Durabilité ». *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA, Toulouse*, 283.

Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

Alhajj, M. A., Bourguignon, S., Palma-Lopes, S., & Villain, G. (2021). Joint inversion of electromagnetic measurements for the determination of water saturation profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 147, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106500>.

Al-Rabiah, A. R., & Baggott, R. (1990). Durability requirements for reinforced concrete construction in aggressive marine environments. *Marine structures*, 3(4), 285-300. [https://doi.org/10.1016/0951-8339\(90\)90013-H](https://doi.org/10.1016/0951-8339(90)90013-H).

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J. P., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L.M. & Villain, G. (2019). Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>.

Baroghel-Bouny, V. (1994). Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons-Méthodes, analyse, interprétations, LCPC, Paris, France, 468p.

Baroghel-Bouny, V., Kinomura, K., Thiery, M., & Moscardelli, S. (2011). Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 832-847. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007>.

Ben Fraj, A., Bonnet, S., & Khelidj, A. (2012). New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag. *Construction and Building Materials*, 35, 761-771. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.106>.

Bonnet, S., Ventura, A., Villain, G., Cremona, C., Bignonnet, F., Palma Lopes, S. et al., 2022. DEMCOM Project: Durable and Environmental design of Monitored Concrete structures in Marine Environment. French National Conference on Wind turbines, Paris, France.

Cherif, R., Hamami, A. E. A., & Aït-Mokhtar, A. (2020). Global quantitative monitoring of the ion exchange balance in a chloride migration test on cementitious materials with mineral additions. *Cement and Concrete Research*, 138, 106240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106240>.

Coussy, O., Baroghel-Bouny, V., Dangla, P., & Mainguy, M. (2001). Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage. *Revue française de génie civil*, 5(2-3), 269-284. <https://doi.org/10.1080/12795119.2001.9692307>.

Du Plooy, R., Lopes, S. P., Villain, G., & Derobert, X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>.

Eid, M. A., Reuge, N., Villain, G., Bonnet, S., & Lopes, S. P. (2025). Monitoring of drying and imbibition of concrete using embedded resistivity sensors for the estimation of permeability. *Cement and Concrete Composites*, 157, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105900>.

El Achrafi, M. K., Bonnet, S., & Villain, G. (2023). Electrical resistivity tomography results analyzed with two inversion methods to determine chloride profiles on BFS concrete having very high electrical resistivity. *Construction and Building Materials*, 407, 133361. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133361>.

Fargier, Y., Villain, G., Lopes, S. P., & Fares, M. (2021). Optimized retrieval of 1D-resistivity profiles in cover concrete by electrical sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104413>.

Ibro, M. A. (2020). *Vers la prédiction des cinétiques de rééquilibrage entre 2 milieux initialement en conditions de saturation différentes* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Ibro, M. A., Verdier, J., Geoffroy, S., Cagnon, H., & Bourbon, X. (2021). Prediction of moisture transfer in cement-based materials: use of a porous network model to access transfer parameters. *Cement and Concrete Research*, 142, 106310. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106310>.

Lafhaj, Z., Richard, G., Kaczmarek, M., & Skoczylas, F. (2007). Experimental determination of intrinsic permeability of limestone and concrete: Comparison between in situ and laboratory results. *Building and Environment*, 42(8), 3042-3050. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.039>.

Lataste, J. F., Sirieix, C., Breysse, D., & Frappa, M. (2003, May). Improvement of electrical resistivity measurement for non-destructive evaluation of concrete structures. In *2nd International RILEM workshop on life prediction and aging management of concrete structures*, pp. 93-102. <https://doi.org/10.1617/2912143780.009>.

Mainguy, M., Coussy, O., & Eymard, R. (1999). *Modélisation des transferts hydriques isothermes en milieu poreux. Application au séchage des matériaux à base de ciment* (No. OA 32).

Mainguy, M., Coussy, O., & Baroghel-Bouny, V. (2001). Role of air pressure in drying of weakly permeable materials. *Journal of engineering mechanics*, 127(6), 582-592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:6\(582\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:6(582)).

Marescot, L., Rigobert, S., Lopes, S. P., Lagabrielle, R., Chapellier, D. (2006). A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shaped 3D structures. *Journal of Applied Geophysics*, 60(1), 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.12.003>.

Minagawa, H., Miyamoto, S., Kurashige, I., & Hisada, M. (2023). Appropriate geometrical factors for four-probe method to evaluate electrical resistivity of concrete specimens. *Construction and Building Materials*, 374, 130784. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130784>.

Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33(10), 603-611. <https://doi.org/10.1007/BF02480599>.

Reuge, N., Bignonnet, F., & Bonnet, S. (2023). Sensitivity analysis of a physicochemical model of chloride ingress into real concrete structures subjected to long-term exposure to tidal cycles. *Applied Ocean Research*, 138, 103622. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103622>.

Smyl, D. (2020). Electrical tomography for characterizing transport properties in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 244, 118299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118299>.

Teng, S., Lim, T. Y. D., & Divsholi, B. S. (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra-fine Ground Granulated Blast-furnace Slag. *Construction and Building Materials*, 40, 875-881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.052>.

Thiery, M., Baroghel-Bouny, V., Bourneton, N., Villain, G., & Stéfani, C. (2007). Modélisation du séchage des bétons : analyse des différents modes de transfert hydrique. *Revue européenne de génie civil*, 11(5), 541-577. <https://doi.org/10.1080/17747120.2007.9692945>.

Torrent, R. J. (1992). A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. *Materials and structures*, 25, 358-365. <https://doi.org/10.1007/BF02472595>.

Torres-Luque, M., Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Sánchez-Silva, M., & Osma, J. F. (2014). Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges. *Construction and building materials*, 68, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.009>.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

Villain, G., Garnier, V., Sbartai, Z. M., Derobert, X., & Balayssac, J. P. (2018). Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators. *Materials and structures*, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>.