

Liège, Belgique  
7-8 Novembre 2018

## **PERMÉABILITE A L'EAU DES BETONS : DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ESSAI ALTERNATIVE PAR SÉCHAGE**

LION Maxime<sup>A</sup>, SANAHUJA Julien<sup>B</sup>

A Electricité De France (EDF), Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

B Electricité De France (EDF), EDF Lab Les Renardières, France

**Résumé** : Cette communication présente une méthode alternative d'évaluation de la perméabilité à l'eau des bétons qui s'appuie sur une approche couplée essais-modélisation grâce à un outil développé sous Python. La méthode d'essai retenue est la suivante : séchage à 20°C - 50% HR de rondelles de béton de 6 cm d'épaisseur, initialement saturées en eau, et enrubannées latéralement. Une méthode graphique est proposée de manière à pouvoir situer rapidement le niveau de perméabilité et la classe de durabilité potentielle des bétons à partir des pertes de masse mesurées pendant les premières semaines. La méthode proposée permet d'appréhender des qualités de béton qui ne peuvent pas l'être à partir des mesures classiques au perméamètre (bétons ayant des perméabilités à l'eau inférieures à  $10^{-11}$  m/s, soit  $10^{-18}$  m<sup>2</sup>). Cette méthode permet d'entrevoir une meilleure prise en compte du paramètre perméabilité à l'eau dans la qualification de bétons ayant des fonctions d'étanchéité ou encore dans le cadre d'une approche performantielle en tant qu'indicateur de durabilité.

**Mots-clés** : perméabilité, béton, séchage

---

## 1. INTRODUCTION

La perméabilité à l'eau des bétons, qui définit la capacité de l'eau à s'écouler en leur sein sous l'effet d'un gradient de pression, est une propriété intéressante à plusieurs titres : elle peut participer à la qualification de bétons utilisés pour des ouvrages ayant des fonctions d'étanchéité, elle peut définir un indicateur de durabilité dans le cadre d'une approche performantielle et enfin elle correspond à un facteur d'influence notable de certains mécanismes (éclatement thermique des bétons, séchage,...) et est un paramètre souvent considéré dans les modélisations. Cette propriété soulève cependant la problématique de la difficulté de sa mesure, en particulier pour les bétons de bonne qualité. Cela empêche généralement sa prise en compte effective dans les démarches de qualification des bétons d'étanchéité ou les approches performantielles, et pose question sur les valeurs à considérer dans les calculs-modélisations. Un travail commun ingénierie-R&D a été mené par le passé au sein d'EDF pour modéliser le séchage unidirectionnel d'ouvrages en bétons. Ce travail a abouti au développement par EDF R&D d'un outil sous Python permettant de modéliser le séchage à partir de mesures réalisées sur éprouvettes de béton en laboratoire (Sanahuja et al., 2017). Cette modélisation intégrant une évaluation indirecte de la perméabilité à l'eau, il a été décidé de mettre à profit cette capacité pour mener une étude orientée sur l'évaluation de cette propriété à partir d'essais de séchage. Cette communication retranscrit l'étude en question et propose une méthode alternative d'évaluation de la perméabilité à l'eau des bétons.

## 2. INTÉRÊT DE LA PERMÉABILITE À L'EAU

### 2.1 Ouvrages avec fonctions d'étanchéité

La qualification de bétons ayant une fonction d'étanchéité aux liquides a longtemps été appréhendée par EDF à travers un critère de perméabilité à l'eau ( $< 10^{-11}$  m/s) via une méthode d'essai interne (perméamètre à charge constante). La figure 1 illustre la perméabilité à l'eau mesurée au laboratoire béton de la Direction Industrielle du groupe EDF (EDF, 2011) sur des bétons de différentes classes de résistance. On voit que les bétons ont une perméabilité à l'eau largement inférieure à  $10^{-11}$  m/s dès lors qu'ils respectent une classe de résistance C25/30 et qu'une évaluation précise devient impossible au-delà. Ce graphique illustre le fait que cette méthode d'essai permet surtout de discriminer les bétons de faible résistance.

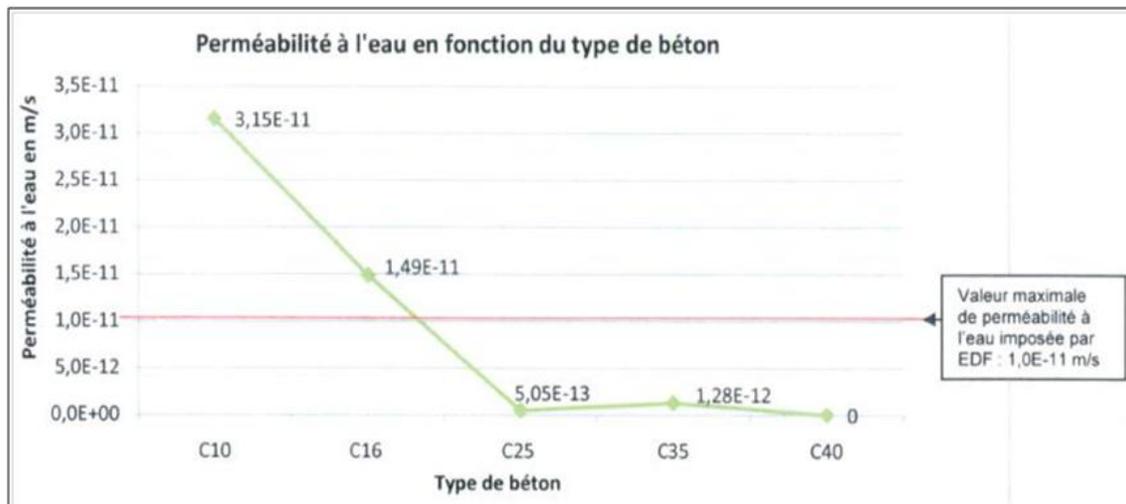


Figure 1. Perméabilité à l'eau mesurée pour des bétons de différentes classes de résistance (EDF, 2011).

Pour ces raisons, le critère de perméabilité a été retiré du CCTG 2016 (EDF, 2016) au profit d'un critère sur la porosité qui, indirectement, préjuge du respect d'une perméabilité minimale requise.

## 2.2 Approche performantielle des bétons

Le guide AFGC (AFGC, 2004) définit plusieurs classes de durabilité potentielle en fonction de certaines plages de valeurs données pour chacun des indicateurs de durabilité retenus (porosité, perméabilité à l'eau, perméabilité à l'air, coefficient de diffusion des chlorures,...). On peut noter que les classes de durabilité sont exprimées pour différentes plages de perméabilité à l'eau :

- $Keau < 10^{-20} \text{ m}^2$  ( $< 10^{-13} \text{ m/s}$ ) : classe de durabilité potentielle très élevée
- $Keau$  comprise entre  $10^{-20}$  et  $10^{-19} \text{ m}^2$  ( $10^{-13}$  et  $10^{-12} \text{ m/s}$ ) : classe de durabilité potentielle élevée
- $Keau$  comprise entre  $10^{-19}$  et  $10^{-18} \text{ m}^2$  ( $10^{-12}$  et  $10^{-11} \text{ m/s}$ ) : classe de durabilité potentielle moyenne
- $Keau$  comprise entre  $10^{-18}$  et  $10^{-17} \text{ m}^2$  ( $10^{-11}$  et  $10^{-10} \text{ m/s}$ ) : classe de durabilité potentielle faible
- $Keau > 10^{-17} \text{ m}^2$  ( $> 10^{-10} \text{ m/s}$ ) : classe de durabilité potentielle très faible

On peut alors relever que la valeur de  $10^{-11} \text{ m/s}$  permet essentiellement d'écarter les bétons de faible qualité, ce qui est cohérent avec les observations précédentes.

## 3. MÉTHODE RETENUE

La méthode retenue est le séchage par deux faces opposées de rondelles de 6 cm d'épaisseur, initialement saturées, dans un environnement  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $50 \pm 5 \text{ \% HR}$ . Ces conditions ont été sélectionnées à partir d'études antérieures (Sanahuja et al., 2017) ayant donné satisfaction. Cet environnement a été également choisi par rapport à un aspect pratique, compte-tenu qu'il s'agit de l'ambiance requise pour la mesure du retrait normalisé dans le cadre de la caractérisation des ciments.

La démarche globale de l'essai est la suivante :

- Pesées dans l'air et dans l'eau d'un corps d'épreuve (rondelle) saturé en eau
  - Détermination de la masse initiale du corps d'épreuve ( $M_i$  béton)
  - Détermination du volume du corps d'épreuve
- Enrubannage latéral du corps d'épreuve
  - 2 couches d'aluminium adhésif
  - Vernis
- Immersion dans l'eau pendant 1 semaine
  - Reprise de l'eau potentiellement libérée durant la phase d'enrubannage
- Pesée dans l'air du corps d'épreuve
  - Détermination de la masse initiale du corps d'épreuve saturé en eau avec enrubannage ( $M_i$  totale)
  - Détermination de la masse apportée par l'enrubannage ( $M_e = M_i$  totale –  $M_i$  béton)
- Mise en environnement  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $50 \pm 5 \text{ \% HR}$ 
  - Disposition permettant aux 2 faces d'être exposées à l'environnement
- Pesées dans l'air périodiques (\*)
  - Détermination de la masse du corps d'épreuve enrubanné après  $t$  jours de séchage  $M$  totale( $t$ )
  - Détermination de la perte de masse après  $x$  jours de séchage :  
% perte de masse =  $[M_i$  béton - ( $M$  totale( $t$ ) –  $M_e$ )] /  $M_i$  béton

(\*) Le matériel de pesage doit avoir une incertitude de mesure adaptée aux pertes de masse évaluées, potentiellement très faibles.

L'évaluation de la perméabilité est réalisée à partir d'un outil développé par EDF R&D sous Python qui intègre l'ensemble de la modélisation détaillée dans une communication antérieure (Sanahuja et al., 2017). La modélisation s'appuie sur le principe du mouvement seul de la phase liquide induite par les gradients de teneur en eau liquide (pression capillaire). Les écoulements induits par séchage ne sont donc pas des écoulements strictement visqueux en milieu saturé tels que la loi de Darcy décrit la perméabilité. En ce sens, on peut considérer que la perméabilité à l'eau déduite à partir d'essais de

séchage correspond à une perméabilité équivalente à l'eau. Ce concept a par exemple fait l'objet d'études poussées au LCPC (Coussy et al., 2001). Il a été cependant décidé de se baser plutôt sur les travaux de thèse de Olchitzky (Olchitzky, 2002) menés à l'ENPC sur des argilites qui ont l'avantage d'être plus facilement implémentés dans un outil à vocation opérationnelle. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont adoptées par Olchitzky (Olchitzky, 2002) : transport darcéen du gaz et diffusion de la vapeur dans le gaz négligés par rapport au transport darcéen du liquide, pression de gaz toujours à l'équilibre et prise comme référence ( $p_g = 0$ ), incompressibilité de la phase solide du milieu poreux, domaine mécaniquement libre de contraintes et champ de contrainte nul dans tout le domaine, linéarisation de la courbe de pression capillaire-degré de saturation, termes du second ordre négligés.

À l'échelle du point matériel, pression et concentration en eau sont reliées par :

$$c - c_0 = \rho \frac{p - p_0}{p_\infty - p_0} [\phi_0 S_\infty^r - (\phi_0 - \epsilon_\infty) S_0^r] \quad (1)$$

avec  $c$  la concentration massique en eau dans le milieu poreux,  $p$  la pression (de signe négatif) dans l'eau,  $\phi$  la porosité,  $S^r$  le degré de saturation,  $\epsilon = \text{tr } \epsilon$  la déformation volumique,  $\rho$  la masse volumique de l'eau. Les indices 0 et  $\infty$  se rapportent à l'état initial et asymptotique. La pression respecte l'équation de champ suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \Delta p \quad (2)$$

équation de diffusion linéaire, avec le coefficient de diffusion  $D$ , relié à la perméabilité à l'eau  $K$  caractérisant le matériau pour le trajet hydrique considéré, selon :

$$D = K \frac{p_\infty - p_0}{\phi_0 S_\infty^r - (\phi_0 - \epsilon_\infty) S_0^r} \quad (3)$$

La perméabilité  $K$  intervient dans la loi de Darcy :

$$\underline{w} = -\rho K \underline{\text{grad}}(p) \quad (4)$$

avec  $\underline{w}$  le flux apparent de masse d'eau liquide au travers du milieu poreux. On quitte à présent le point de vue du point matériel pour s'intéresser à une structure occupant le domaine  $\Omega$ . On suppose qu'à l'instant initial comme final, la structure est dans un état homogène (pression, degré de saturation et déformation uniformes), de sorte que le rapport  $D/K$  issu de (3) soit uniforme sur  $\Omega$ . Une fois le champ de pression connu à un instant  $t$  donné, il est possible de déterminer l'écart entre la masse courante  $m(t)$  et la masse initiale  $m_0$  du domaine  $\Omega$  (éprouvette le plus souvent). En effet, comme la masse se décompose additivement entre masse de solide et masse d'eau :

$$m(t) - m_0 = \int_{\Omega} [c(\underline{x}, t) - c_0] d\Omega \quad (5)$$

En exploitant (1), il est possible de relier au champ de pression l'écart de masse relatif à l'écart final :

$$\frac{m(t) - m_0}{m_\infty - m_0} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \frac{p(\underline{x}, t) - p_0}{p_\infty - p_0} d\Omega \quad (6)$$

Il est également intéressant d'établir un lien plus opérationnel entre coefficients de diffusion  $D$  et de perméabilité  $K$ , dans la mesure où (3) fait intervenir des grandeurs nécessitant des mesures

complémentaires (porosité, déformation, degré de saturation). D'après (5) et (1), en introduisant la perte de masse finale :

$$m_{\infty} - m_0 = \int_{\Omega} (c_{\infty} - c_0) d\Omega = |\Omega| \rho [\phi_0 S_{\infty}^r - (\phi_0 - \epsilon_{\infty}) S_0^r] \quad (7)$$

on établit à partir de (3) une relation entre  $D$  et  $K$  ne dépendant plus de la porosité et du degré de saturation :

$$D = K |\Omega| \rho \frac{p_{\infty} - p_0}{m_{\infty} - m_0} \quad (8)$$

À la différence de (3), cette relation n'est pas locale (propre à un point matériel) mais intéresse le domaine  $\Omega$  dans sa globalité. Elle permet de passer du coefficient de diffusion  $D$  (2) ajusté sur des pertes de masse expérimentales (par rapport au modèle issu de la résolution de (2) puis de l'application de (6)) à la perméabilité à l'eau  $K$  (4). Les conditions initiales et aux limites du problème (2) sur la pression sont en pratique exprimées en fonction de la température  $T$  et de l'humidité relative  $h$  à l'aide de la loi de Kelvin :

$$p = \frac{\rho R T}{M} \ln h \quad (9)$$

avec  $R$  avec la constante des gaz parfaits et  $M$  la masse molaire de l'eau.

## 4. ÉTUDE SUR PLUSIEURS FAMILLES DE BÉTON

### 4.1 Présentation

Une vingtaine de corps d'épreuve ont été soumis au séchage selon la méthode retenue. Le suivi a été mené sur 200 jours. Le tableau 1 récapitule l'ensemble des corps d'épreuve testés, et précisent par ailleurs leur provenance, leur conservation ainsi que leur pré-conditionnement avant enrubannage. Les bétons testés peuvent être décomposés en trois familles : les bétons poreux, les bétons ordinaires et les bétons à très haute performance. Les bétons poreux sont issus de prélèvements dont certaines zones localisées sont reconnues poreuses (> 17 % de porosité accessible à l'eau). Les bétons ordinaires proviennent également de prélèvements mais aussi d'éprouvettes confectionnées en laboratoire. Ces bétons ont des résistances à la compression de l'ordre de 40-60 MPa et ne contiennent pas de fumée de silice. Les bétons à très haute performance proviennent d'éprouvettes confectionnées en laboratoire et ont des résistances à la compression supérieures à 90 MPa. Ils contiennent systématiquement de la fumée de silice. Différentes formulations de BTHP ont été testées. Cette dernière famille comprend également un mortier à très haute performance ainsi qu'un BFUP. Des photographies de différents corps d'épreuve sont fournies ci-dessous (figure 2).



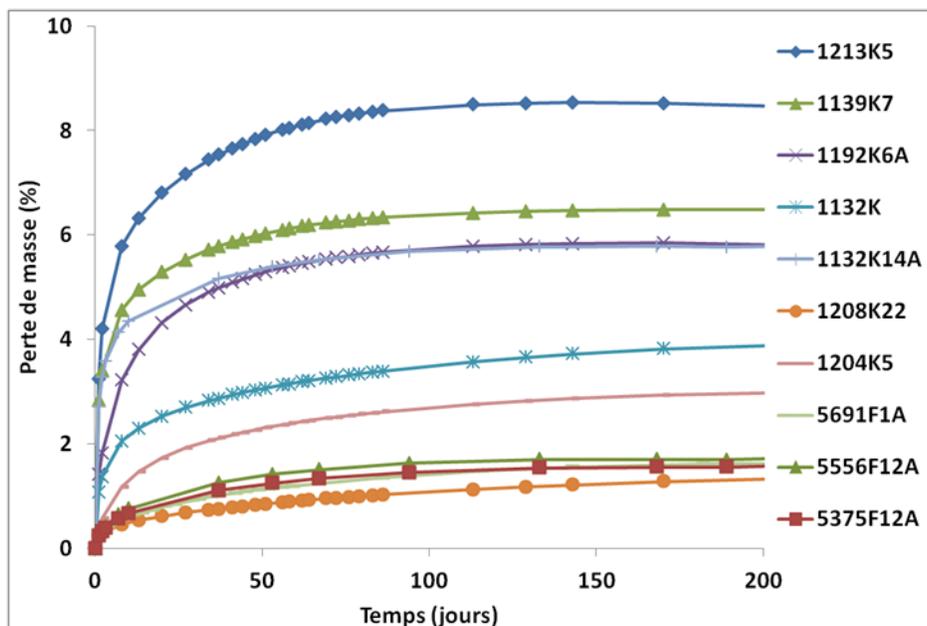
Figure 2. Photographies de rondelles de béton enrubannées.

Famille	Corps d'épreuve	Provenance-conservation	Pre-conditionnement avant enrubannage
Bétons poreux	1213K5	Prélèvements conservés à l'air libre	Conditionnement en salle humide pendant plus de 2 mois
	1192K6A		
	1132K		Saturation sous vide pendant 72h
	1139K7A		
1132K14A			
Bétons ordinaires	1204K5	Prélèvements conservés à l'air libre	Conditionnement en salle humide pendant plus de 2 mois
	1208K22		
	5691F1A	Éprouvettes de laboratoire maintenues en salle humide	Sans objet
	5556F12A		Saturation sous vide pendant 72h
5375F12A			
Bétons à très haute performance	5554F1D	Éprouvettes de laboratoire maintenues en salle humide	Sans objet
	5574F12		
	5692F21A		
	5693F21A		
	5694F21A		
	5558F15A (mortier)	Éprouvettes de laboratoire maintenues en salle humide	Saturation sous vide pendant 72h
	501K12 (BFUP)		
	5558F15B (mortier)		
	5554F12A		

Tableau 1. Récapitulatif des corps d'épreuve testés.

## 4.2 Résultats

Les pertes de masses obtenues pour les bétons poreux et ordinaires sont représentées dans la figure 3.



On note que les pertes de masse atteintes sont considérables pour les bétons poreux (jusqu'à 8,5 %). Elles approchent généralement les valeurs quantifiant l'eau libre au sein des bétons, remettant du coup en cause les principes de mouvement seul de la phase liquide (perte de continuité de la phase liquide). Pour pallier ce problème, l'ajustement des courbes au modèle a été réalisé pour les bétons poreux en tenant compte des pertes de masse sur les 10 premiers jours de séchage environ. Il a alors été remarqué que l'ajustement des courbes au modèle était ainsi satisfaisant, comme l'illustre la figure 4. Pour les pertes de masses mesurées sur les bétons ordinaires, on remarque que les valeurs atteintes sont plus faibles que celles obtenues pour les bétons poreux. On peut noter que les corps d'épreuve 5556F12A, 5691F1A et 5375F12A, qui correspondent en fait à des gâchées différentes d'une même formule de béton, se situent dans un faisceau globalement identique. Ces corps d'épreuve ont toujours été maintenus en salle humide et les corps d'épreuve 5556F12A et 5375F12A ont fait l'objet d'une saturation sous vide avant enrubannage. On peut donc voir que la phase de saturation sous vide ne change pas fondamentalement l'évolution de la perte de masse de corps d'épreuve maintenus constamment en salle humide (et donc quasiment saturés). L'ajustement des courbes au modèle est réalisé correctement pour tous ces bétons à partir des mesures effectuées sur 200 jours, comme l'illustre la figure 4.

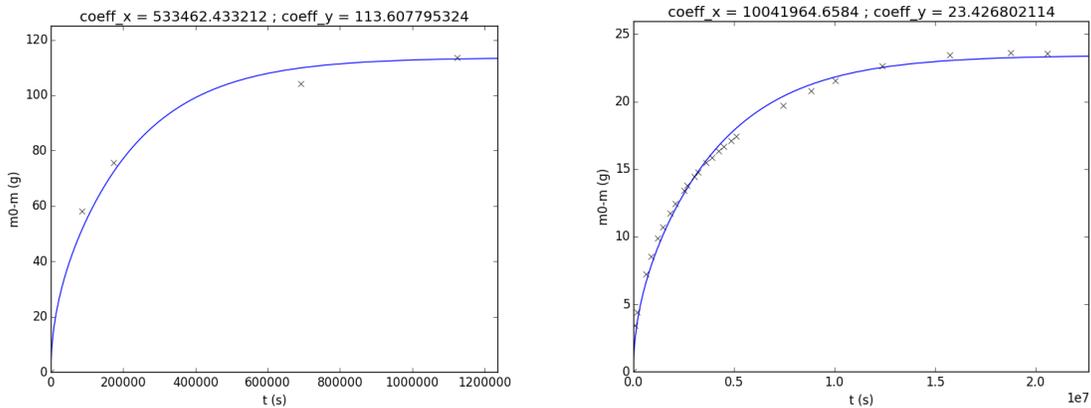


Figure 4. Ajustement des courbes pour un béton poreux à gauche (sur 10 jours) et à droite sur un béton ordinaire (sur 200 jours).

La figure 5 illustre les pertes de masses mesurées sur les bétons à très haute performance. On remarque que les valeurs atteintes sont encore plus basses que précédemment. Les corps d'épreuve de même formulation (BTHP ou mortier), conservés en salle humide, ont des comportements globalement identiques, qu'il y ait eu saturation sous vide avant enrubannage ou non. On peut ajouter que le comportement du BFUP peut se différencier de celui des BTHP après un certain temps d'essai : la courbe de perte de masse du BFUP testé commence en effet à se différencier de celles des BTHP après 60 jours de séchage. Concernant l'ajustement des courbes au modèle, celui-ci se réalise correctement sur 200 jours de mesures pour les mortiers. Pour les BTHP et le BFUP, l'ajustement au modèle est réalisable mais montre certaines imperfections (surtout pour le BFUP). Ces matériaux, très imperméables, subissent des pertes de masse très faibles. Il est observé que la perte de masse mesurée après le 1<sup>er</sup> jour d'exposition est non négligeable par rapport aux pertes de masse mesurées dans le temps. Un biais suspecté est la prise en compte dans la mesure après 1 jour de séchage de la perte d'eau sur le pourtour du corps d'épreuve, qui n'est pas liée au processus diffusif de séchage du matériau. Cette perte d'eau infime (de l'ordre de 0,10 - 0,15 %) n'a aucun impact pour les matériaux plus perméables pour lesquels elle représente une fraction négligeable. En revanche, elle représente une fraction non négligeable de la perte de masse mesurée pour des matériaux très imperméables. L'exercice a alors été fait de considérer comme état initial celui après 1 jour de séchage ; et il a été remarqué que l'ajustement au modèle était alors correctement établi. Les perméabilités ont donc été évaluées de cette manière là pour ces corps d'épreuve. L'ensemble des perméabilités évaluées pour toutes les familles de béton sont synthétisées dans le tableau 2.

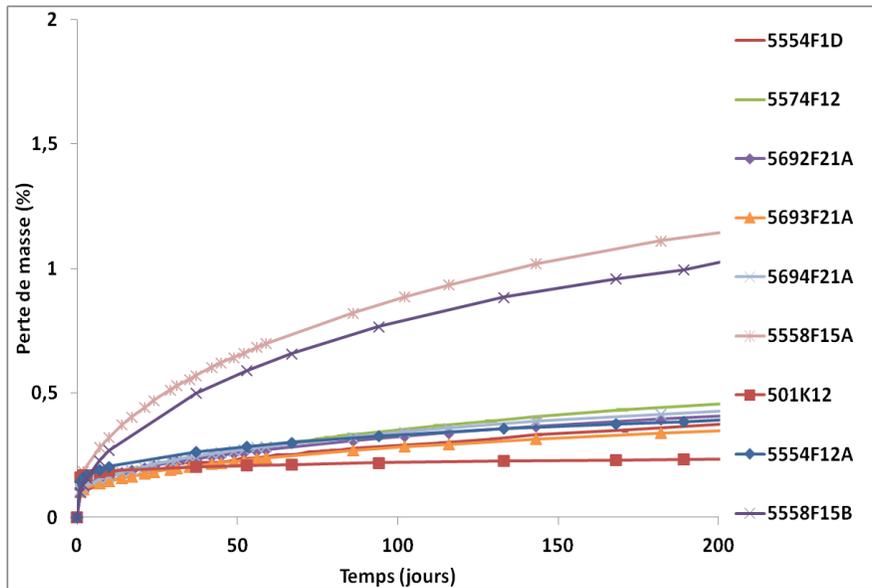


Figure 5. Pertes de masse mesurées pour les bétons à très haute performance.

Famille	Corps d'épreuve	Perméabilité équivalente à l'eau ( $m^2/(Pa.s)$ )
Bétons poreux	1213K5	$2,60.10^{-18}$
	1192K6A	$6,80.10^{-19}$
	1132K	$8,30.10^{-19}$
	1139K7A	$2,50.10^{-18}$
	1132K14A	$3,30.10^{-18}$
Bétons ordinaires	1204K5	$9,40.10^{-20}$
	1208K22	$2,40.10^{-20}$
	5691F1A	$3,70.10^{-20}$
	5556F12A	$6,00.10^{-20}$
	5375F12A	$5,00.10^{-20}$
Bétons à très haute performance	5554F1D	$2,20.10^{-21}$
	5574F12	$1,30.10^{-21}$
	5692F21A	$1,40.10^{-21}$
	5693F21A	$1,70.10^{-21}$
	5694F21A	$2,50.10^{-21}$
	5558F15A (mortier)	$1,30.10^{-20}$
	501K12 (BFUP)	$1,00.10^{-21}$
	5558F15B (mortier)	$1,00.10^{-20}$
	5554F12A	$2,00.10^{-21}$

Tableau 2. Perméabilité équivalente à l'eau évaluée pour tous les corps d'épreuve testés.

## 5. INTERPRÉTATION GRAPHIQUE EN LIEN AVEC L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

D'autres propriétés de certains bétons testés dans cette étude sont connues, en particulier leur porosité accessible à l'eau et leur résistance à la compression. Il est ainsi possible de corrélérer ces propriétés aux perméabilités équivalentes à l'eau évaluées. La figure 6 illustre les corrélations obtenues à partir des données disponibles. Les tendances obtenues sont les suivantes :

- $Keau eq. < 10^{-21} m^2/(Pa.s) \rightarrow$  Porosité à l'eau  $< 5 \%$  et résistance à la compression  $> 160$  MPa
- $10^{-21} m^2/(Pa.s) < Keau eq. < 10^{-20} m^2/(Pa.s) \rightarrow$  Porosité à l'eau comprise entre 5 et 10 % et résistance à la compression comprise entre 80 et 160 MPa
- $10^{-20} m^2/(Pa.s) < Keau eq. < 10^{-19} m^2/(Pa.s) \rightarrow$  Porosité à l'eau comprise entre 10 et 15 % et résistance à la compression comprise entre 40 et 80 MPa

- $10^{-19} \text{ m}^2/(\text{Pa.s}) < K_{\text{eau eq.}} < 10^{-18} \text{ m}^2/(\text{Pa.s}) \rightarrow$  Porosité à l'eau comprise entre 15 et 20 % et résistance à la compression comprise entre 20 et 40 MPa
- $K_{\text{eau eq.}} > 10^{-18} \text{ m}^2/(\text{Pa.s}) \rightarrow$  Porosité à l'eau  $> 20 \%$  et résistance à la compression  $< 20 \text{ MPa}$

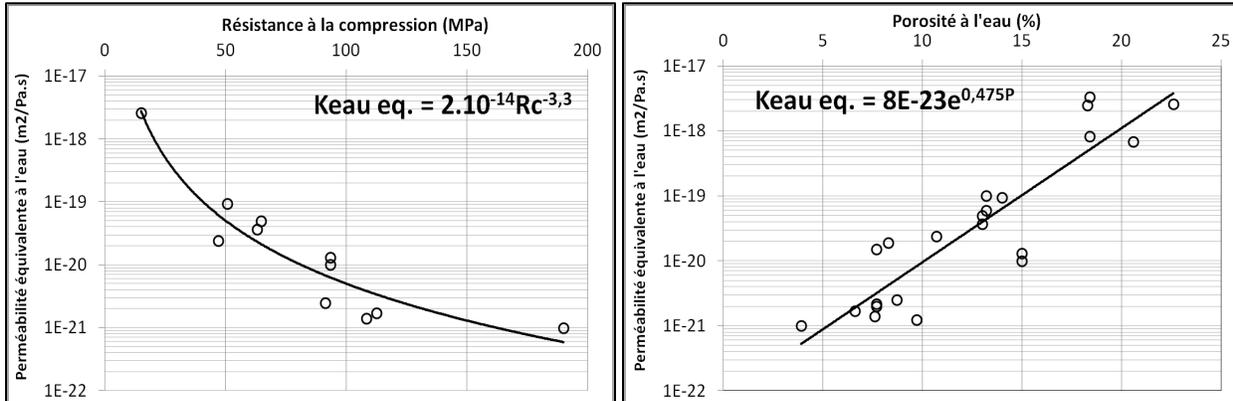


Figure 6. Lien entre la perméabilité équivalente à l'eau évaluée et la résistance à la compression moyenne (à gauche) et la porosité accessible à l'eau (à droite).

On constate une cohérence globale avec l'ensemble des plages de valeurs définies dans l'approche performantielle (AFGC, 2004) ; ce qui permet d'envisager une déclinaison sous forme de classe de durabilité potentielle. On peut par ailleurs noter que l'évolution de la perte de masse en fonction du temps est révélatrice d'un niveau de perméabilité équivalente à l'eau donné. Ce constat offre la possibilité de raisonner sur l'établissement d'une méthode graphique permettant de situer rapidement la perméabilité équivalente à l'eau des bétons ou leur classe de durabilité potentielle, uniquement sur la base de la perte de masse mesurée. Cette interprétation graphique n'est valide que pour les épaisseurs de corps d'épreuve (6 cm) et les conditions de séchage considérées dans la méthode retenue. La figure 7 montre que les pertes de masse mesurées pendant les trois premières semaines de séchage permettent de discriminer les qualités de béton, en identifiant différentes zones :

- **Zone 1** : Classes de durabilité potentielle faible et très faible =  $K_{\text{eau eq.}} > 10^{-18} \text{ m}^2/(\text{Pa.s})$
- **Zone 2** : Classe de durabilité potentielle moyenne =  $K_{\text{eau eq.}}$  comprise entre  $10^{-18}$  et  $10^{-19} \text{ m}^2/(\text{Pa.s})$
- **Zone 3** : Classe de durabilité potentielle élevée =  $K_{\text{eau eq.}}$  comprise entre  $10^{-19}$  et  $10^{-20} \text{ m}^2/(\text{Pa.s})$
- **Zone 4** : Classe de durabilité potentielle très élevée =  $K_{\text{eau eq.}} < 10^{-20} \text{ m}^2/(\text{Pa.s})$

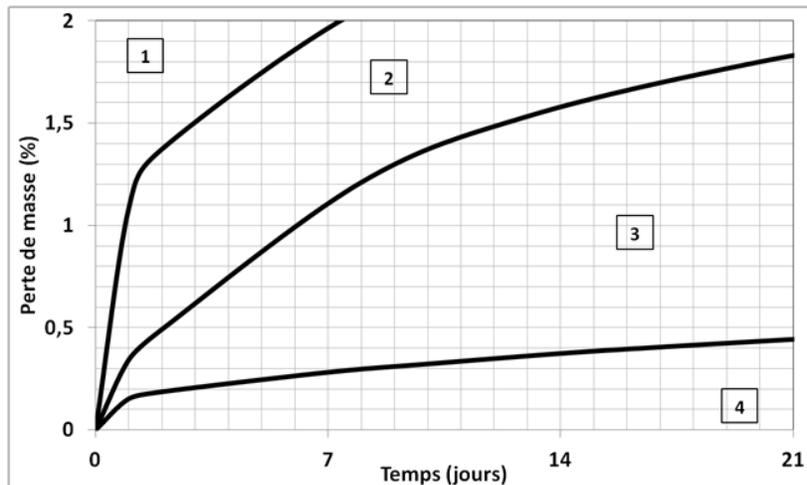


Figure 7. Détermination de la classe de durabilité potentielle en lien avec la perméabilité équivalente à l'eau.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette communication a présenté une méthode alternative d'évaluation de la perméabilité à l'eau des bétons qui s'appuie sur une approche couplée essais-modélisation grâce à un outil développé sous Python. La méthode d'essai retenue est la suivante : séchage à 20°C - 50% HR de rondelles de béton de 6 cm d'épaisseur, initialement saturées en eau, et enrubbannées latéralement. Concernant la saturation initiale, plusieurs pré-conditionnements ont été pratiqués dans cette étude. On pourra recommander d'harmoniser la pratique en réalisant systématiquement une pré-saturation sous vide pendant 72 h (quelle que soit la provenance du corps d'épreuve testé : éprouvette de laboratoire, prélèvement). L'ajustement des pertes de masse au modèle se montre très efficace pour les bétons ayant des perméabilités équivalentes à l'eau de l'ordre de  $10^{-20}$  –  $10^{-19}$  m<sup>2</sup>/(Pa.s). En dehors de cette plage, il peut être nécessaire d'adapter légèrement l'ajustement au modèle (retrait de la 1<sup>ère</sup> pesée ou réduction du temps à considérer selon les cas) pour qu'il soit optimisé. Les valeurs obtenues se révèlent être du même ordre de grandeur que celles fournies dans l'approche performantielle, bien qu'il s'agisse dans notre cas de valeurs « équivalentes ». Ceci permet en particulier d'entrevoir une interprétation des données en tant qu'indicateur de durabilité. La considération des valeurs de perméabilité obtenues pour des calculs ou des modélisations n'est cependant pas évidente (conditions et mécanismes d'écoulements différents).

Une méthode graphique est proposée de manière à pouvoir situer rapidement la classe de durabilité potentielle des bétons en lien avec leur perméabilité équivalente à l'eau, et ce à partir uniquement de leur perte de masse mesurée pendant les premières semaines. Cette pratique peut se concevoir en première approche avant l'évaluation plus fine à partir de l'outil de modélisation. Au final, il ressort que la méthode proposée permet d'appréhender des qualités de béton qui ne peuvent pas l'être à partir des mesures classiques au perméamètre (bétons ayant des perméabilités à l'eau inférieures à  $10^{-11}$  m/s, soit  $10^{-18}$  m<sup>2</sup>). Cette méthode peut donc se concevoir comme un complément très intéressant aux techniques habituelles. Elle permet en outre d'investiguer des qualités de bétons de type BFUP, de qualités encore supérieures à celles qui sont appréhendées dans l'approche performantielle. Cette méthode pourrait même être une alternative aux essais de perméabilité au gaz préconisés pour les BFUP dans la norme NF P 18-470 qui ne s'avèrent pas forcément adaptés.

### Remerciements

Les auteurs remercient le laboratoire béton du département TEGG ainsi que Pauline Audibert (stagiaire Polytech Montpellier) qui a participé à la campagne expérimentale.

### RÉFÉRENCES

- Sanahuja J. et Lion M. (2017), Modélisation à partir d'essais sur éprouvettes de la teneur en eau résiduelle d'une structure béton exposée à plusieurs ambiances environnementales, *Congrès Français de Mécanique*.
- EDF (2011), *Domaine de validité du banc de perméabilité à l'eau sur bétons – Essais de caractérisation de l'étanchéité à l'eau des bétons*, Rapport interne EDF.
- EDF (2016), *Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicables aux travaux de gros œuvre*.
- AFGC (2004), *Conception des bétons pour une donnée de vie données des ouvrages Maitrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité*, Guide technique.
- Coussy O., Baroghel-Bouny V., Dangla P., Mainguy M. (2001), Évaluation 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) 269-284.
- Olchitzky E. (2002), *Couplage hydromécanique et perméabilité d'une argile gonflante non saturée sous sollicitations hydriques et thermiques : courbe de sorption et perméabilité à l'eau*, Thèse de l'ENPC.
- NF P 18-470 (2016), *Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances — Spécification, Performance*, AFNOR.