

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

IMPACT DE LA FORMULATION DES BETONS SUR LE COEFFICIENT DE DIFFUSION DES IONS CHLORURE – FOCUS SUR L’EFFET DES LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU

TIMHADJELT Nassim^A, LION Maxime^B

A Den-Service d’Etude du Comportement des Radionucléides (SECR), CEA, Université de Paris-Saclay, F-91191, France

B Electricité de France (EDF), Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

Résumé : Le laboratoire béton d’EDF a mené une étude consacrée à la caractérisation du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure de nombreux types de matériaux cimentaires (bétons ordinaires, coulis, mortier, bétons à très haute performance). Il a été en particulier étudié l’effet de la substitution du ciment par des laitiers de haut-fourneau jusqu’à des proportions de 80 %, pour des bétons ordinaires mais aussi pour des bétons à très haute performance. L’ensemble des résultats permettent ainsi d’enrichir les connaissances sur les liens entre le coefficient de diffusion apparent, la composition et les propriétés mécaniques, en particulier le ratio Eau/Liant, la résistance à la compression et la teneur en laitier de haut-fourneau. Les corrélations mises en avant peuvent alors aider à la formulation des bétons dans le cas où des critères en termes de coefficient de diffusion sont établis. Elles montrent en particulier l’effet très bénéfique des laitiers de haut-fourneau sur le coefficient de diffusion apparent : un béton avec 80 % de laitier de haut-fourneau et une résistance inférieure à 40 MPa a un coefficient de diffusion apparent qui nécessiterait de formuler un BTHP sans présence de laitier de haut-fourneau. Cette étude montre par ailleurs que l’air entraîné a peu d’impact sur le coefficient de diffusion apparent.

Mots-clés : diffusion, chlorures, matériau cimentaire, béton à très haute performance, laitier de haut-fourneau

1. INTRODUCTION

Les propriétés de transport des bétons sont de plus en plus utilisées pour justifier leur durabilité vis-à-vis de la pénétration d'agents extérieurs agressifs auxquels peuvent être soumis les ouvrages de génie civil (pénétration des chlorures, carbonatation,...). Cette approche performantielle a vocation à compléter, voire dans certains cas à se substituer, aux approches existantes établies en termes de moyens. Elle montre un intérêt pour la construction d'ouvrages neufs mais aussi pour expertiser les ouvrages existants. Dans ce contexte, il apparaît important de maîtriser les méthodes de mesure des propriétés de transport et d'avoir connaissance des paramètres influents. Cette communication se concentre sur le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure déterminé selon la norme XP P 18-462. Ce paramètre porte un intérêt particulier pour EDF dans la mesure où de nombreux ouvrages de production d'électricité sont situés en bord de mer. Récemment, cette propriété a aussi été spécifiée dans le cadre d'une approche performantielle pour la construction de parcs éoliens off-shore. L'étude présentée a été menée au sein du laboratoire béton d'EDF du département TEGG ; elle est consacrée à la caractérisation de nombreux types de matériaux cimentaires : bétons ordinaires, coulis, mortier, bétons à très haute performance. Il est en particulier étudié l'effet de la substitution du ciment par des laitiers de haut-fourneau jusqu'à des proportions de 80 %, pour des bétons ordinaires mais aussi pour des bétons à très haute performance. L'ensemble des résultats permettra ainsi d'enrichir les connaissances sur les facteurs influençant la mesure du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure.

2. PRÉSENTATION DE LA CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

2.1 Matériaux étudiés

Une dizaine de matériaux cimentaires ont été étudiés. Les types de matériaux appréhendés dans cette étude sont synthétisés dans le tableau 1. On retrouve deux formules de base pour les bétons, une formule de béton ordinaire et une autre de béton à très haute performance, auxquelles du laitier de haut-fourneau est ajouté en substitution du ciment à différentes proportions (40 et 80 %). Une formule dérivée du béton ordinaire, consistant principalement à diminuer le dosage en ciment, a été réalisée dans le but d'aboutir à un béton plus poreux. L'effet de la présence d'entraîneur d'air est également évalué à travers deux formules de béton ordinaire. Enfin, un matériau de type coulis et un autre de type mortier à très haute performance sont également appréhendés dans cette étude.

Désignation	Type de matériau étudié
Coulis	Coulis
Mortier HP	Mortier haute performance
BO	Béton ordinaire
BO-EA	Béton ordinaire avec entraîneur d'air
BO-40	Béton ordinaire avec 40 % de laitier de haut-fourneau en substitution du ciment
BO-80	Béton ordinaire avec 80 % de laitier de haut-fourneau en substitution du ciment
BO-40-EA	Béton ordinaire avec 40 % de laitier de haut-fourneau en substitution du ciment et entraîneur d'air
BTHP	Béton à très haute performance
BTHP-40	Béton à très haute performance avec 40 % de laitier de haut-fourneau en substitution du ciment
BTHP-80	Béton à très haute performance avec 80 % de laitier de haut-fourneau en substitution du ciment
BP	Béton poreux

Tableau 1. Désignation des matériaux testés

Les caractéristiques principales de la composition des matériaux étudiés sont données dans le tableau 2. Leurs propriétés de résistance à la compression (sur cylindres 11 x 22 cm) et de porosité accessible à l'eau sont également fournies. Ces propriétés ont été mesurées sur les matériaux à l'état durci à des échéances correspondant à celles de la réalisation des mesures de coefficient de diffusion aux ions chlorure (3 mois minimum de maturation en ambiance conforme à la norme NF EN 12390-2).

	Ciment CEM I 52,5 (kg/m ³)	Laitier de haut-fourneau (kg/m ³)	Fumée de silice (kg/m ³)	Eau totale (kg/m ³)	Entraîneur d'air	Résistance à la compression (MPa)	Porosité accessible à l'eau (%)
Coulis	380	-	70	570	Non	24,5	51,2
Mortier HP	400	-	80	250	Non	93,3	19,6
BO	350	-	-	185	Non	57,1	12,5
BO-EA	350	-	-	185	Oui (5% d'air entraîné)	46,1	13,0
BO-40	210	140	-	-	Non	56,5	12,9
BO-80	70	280	-	185	Non	36,5	14,9
BO-40-EA	210	140	-	-	Oui (5% d'air entraîné)	46,0	13,6
BTHP	400	-	40	138	Non	111,2	8,0
BTHP-40	240	160	40	138	Non	116,8	6,8
BTHP-80	80	320	40	138	Non	94,1	8,6
BP	221	-	-	194	Non	28,0	14,9

Tableau 2. Principales caractéristiques des matériaux testés

On note que le béton ordinaire « BO », avec une résistance proche de 60 MPa, représente plutôt la plage haute des bétons ordinaires. Le béton « BTHP » a une résistance quasiment deux fois plus élevée que le béton « BO ». Concernant l'effet de la substitution du ciment par du laitier de haut-fourneau, on peut noter que les résistances obtenues sont du même ordre de grandeur de celles des bétons sans laitier dans le cas d'une substitution à hauteur de 40 %. Pour une substitution à hauteur de 80 %, des pertes de résistance sont relevées et sont de l'ordre de 35 % pour le béton ordinaire et seulement de 15 % pour le béton à très haute performance. La présence d'air entraîné induit une chute de résistance d'environ 10 MPa dans les deux cas, pour des bétons ayant une résistance du même ordre de grandeur (56-57 MPa sans entraîneur d'air, 46 MPa avec entraîneur d'air). Cette perte de résistance représente environ 20 %, ce qui est cohérent avec la quantité d'air entraîné qui est de l'ordre de 5%. Le béton poreux « BP » atteint une résistance proche de 30 MPa, ce qui démontre l'efficacité de la « dégradation » des propriétés apportée principalement par la diminution du dosage en ciment (perte de 30 MPa par rapport à la formule « BO » de base). Concernant le coulis et le mortier étudiés, ces matériaux permettent d'investiguer des niveaux de porosité plus élevés que les bétons. On peut souligner que malgré une porosité proche de 20 %, le mortier a tout de même une résistance à la compression supérieure à 90 MPa.

2.2 Principe de la mesure du coefficient de diffusion apparent

Les mesures sont réalisées selon l'essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire défini dans la norme XP P 18-462. Cet essai a pour but de déterminer le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure. Le principe de cet essai est de placer le corps d'épreuve entre deux compartiments remplis en amont d'une solution contenant des chlorures et en aval d'une solution n'en contenant pas, pour créer un gradient de concentration (Figure 1). Le corps d'épreuve est préalablement saturé dans une solution NaOH (0,1 mol NaOH). Les compartiments amont et aval contiennent également la même concentration de NaOH pour homogénéiser le dispositif. Afin d'induire la diffusion des chlorures de l'amont vers l'aval, le compartiment amont contient quant à lui une solution 0,1mol NaOH + 1mol NaCl. La diffusion des ions chlorure dans les bétons est un processus très long (plusieurs années). Pour mener des études expérimentales sur ce phénomène il est alors nécessaire de l'accélérer. Pour cela un champ

électrique est appliqué entre les deux compartiments permettant l'obtention d'un front de pénétration des chlorures en seulement quelques jours voire quelques heures pour certains bétons. Cet essai est basé sur la deuxième loi de Fick, qui prend en compte les interactions matrice cimentaire-chlorures. La donnée de sortie est le coefficient de diffusion apparent.

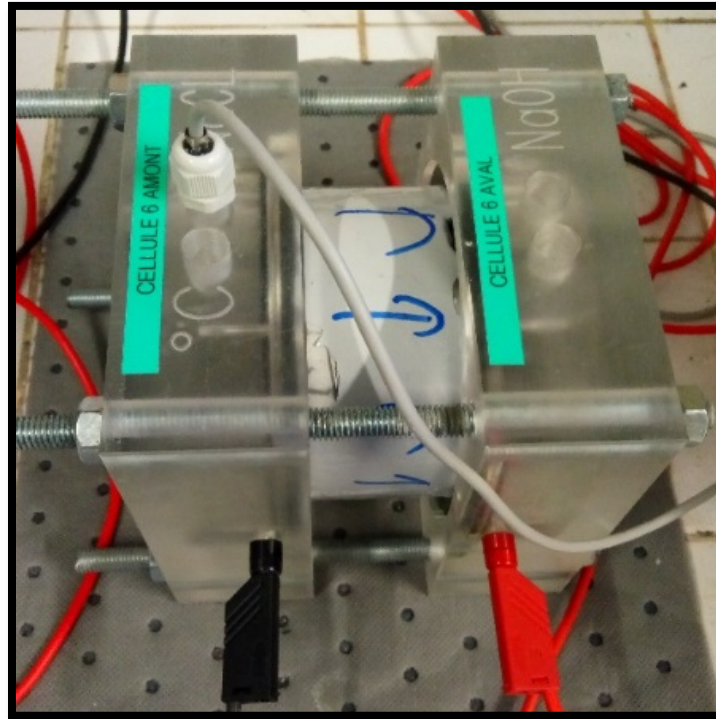


Figure 1. Montage expérimental de l'essai de diffusion

Les corps d'épreuve sont des rondelles de 5 cm d'épaisseur obtenues à partir d'éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm.

Le protocole général de l'essai de diffusion est le suivant :

- Le contour du corps d'épreuve est résiné (résine époxy).
- Une fois la résine sèche (après 24 h), on procède à la pré-saturation. Le corps d'épreuve est saturé 4 heures sous vide (< 25 mbar), puis 68 h dans une solution de NaOH (0,1 mol).
- Le corps d'épreuve est placé entre les cellules amont et aval.
- Les solutions de NaCl + NaOH et de NaOH sont introduites ensuite dans les deux compartiments.
- Une tension (20 à 30 V) est ensuite appliquée entre ces deux compartiments.
- L'intensité directement mesurée est utilisée pour déterminer, à partir de l'équation fournie dans la norme XP P 18-462, la durée d'essai nécessaire afin d'obtenir un front de pénétration mesurable.
- Une fois l'essai arrêté, le corps d'épreuve est fendu.
- La révélation du front de pénétration est réalisée par aspersion du nitrate d'argent (AgNO_3). Un front argenté apparaît après quelques heures.
- L'épaisseur du front est alors mesurée à l'aide d'un pied à coulisse en huit points espacés de 1 cm, en commençant à partir de 1 cm du bord. Les deux valeurs extrêmes sont ensuite enlevées pour obtenir une profondeur moyenne à partir des 6 autres valeurs relevées.
- Enfin, le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure est déterminé à l'aide des équations fournies dans la norme XP P 18-462.

3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La figure 2 regroupe les résultats de coefficient de diffusion apparent obtenus pour l'ensemble des matériaux étudiés. On peut voir que le fait d'étudier une gamme assez large de matériaux permet d'aboutir à une grande plage de valeurs de coefficient de diffusion mesurées (de 10^{-14} à 10^{-11} m²/s).

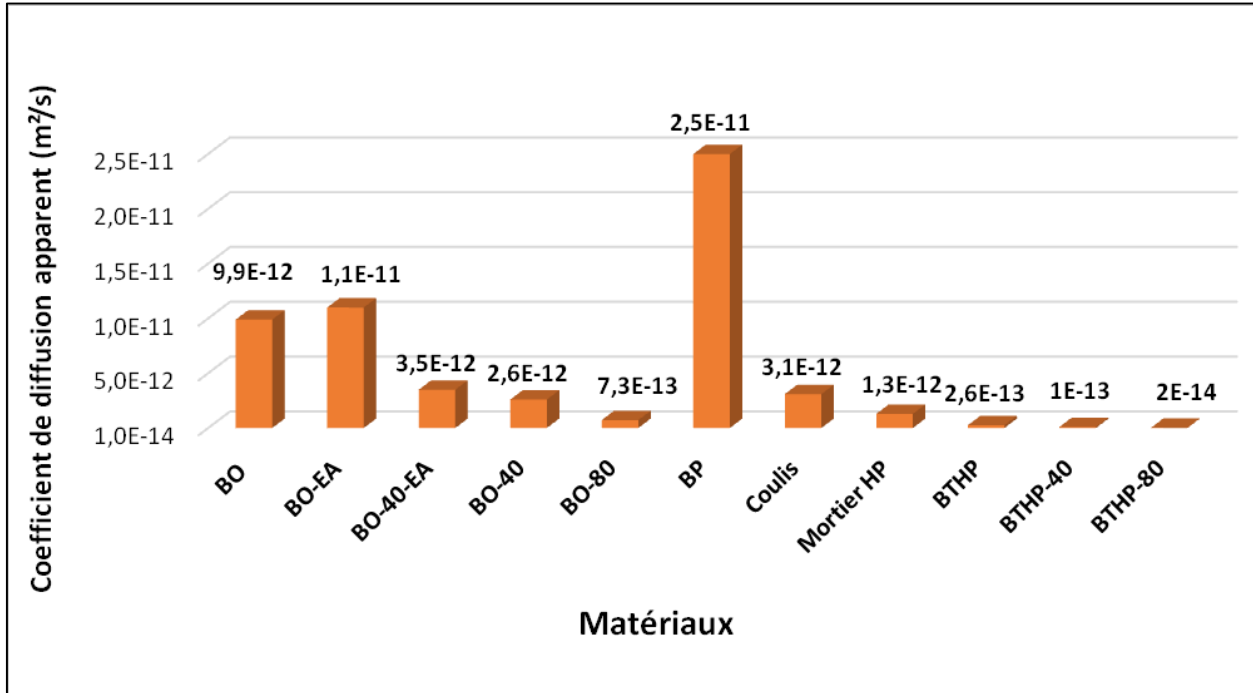


Figure 2. Résultats de coefficient de diffusion apparent aux ions chlorure

Ces résultats montrent que l'air entrainé impacte peu la mesure du coefficient de diffusion apparent aux ions chlorure (faible augmentation). Cela peut s'expliquer par l'absence d'interconnexion entre les bulles d'air introduites (air occlus) et les pores accessibles à l'eau; et par conséquent leur inaction sur les phénomènes de diffusion des ions chlorure. La figure 3 illustre des fronts de pénétration de chlorures obtenus pour deux types de matériaux étudiés.

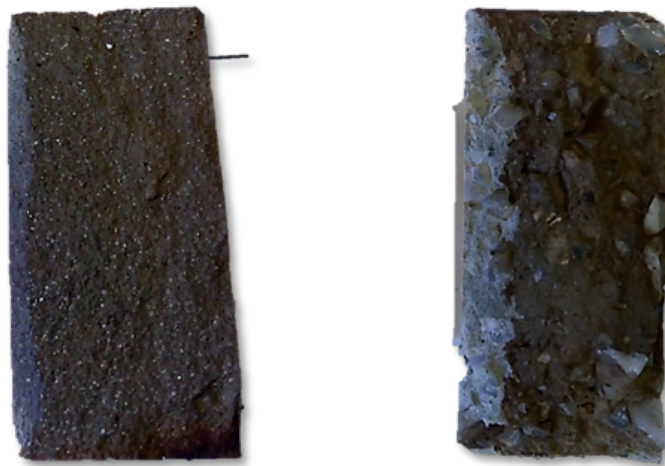


Figure 3. Photographies de corps d'épreuve : mortier HP à gauche et béton ordinaire à droite

Le graphique ci-après (figure 4) montre le lien entre l'intensité directement mesurée au lancement des essais et le coefficient de diffusion déterminé à son issue. On remarque une très bonne corrélation entre ces deux valeurs, ce qui signifie que l'ordre de grandeur du coefficient du diffusion peut déjà être estimé de manière assez fiable dès le démarrage des essais. On notera que la relation obtenue est a priori propre au banc d'essai utilisé (intégrant la résistance électrique du dispositif) et ne peut pas forcément être généralisée.

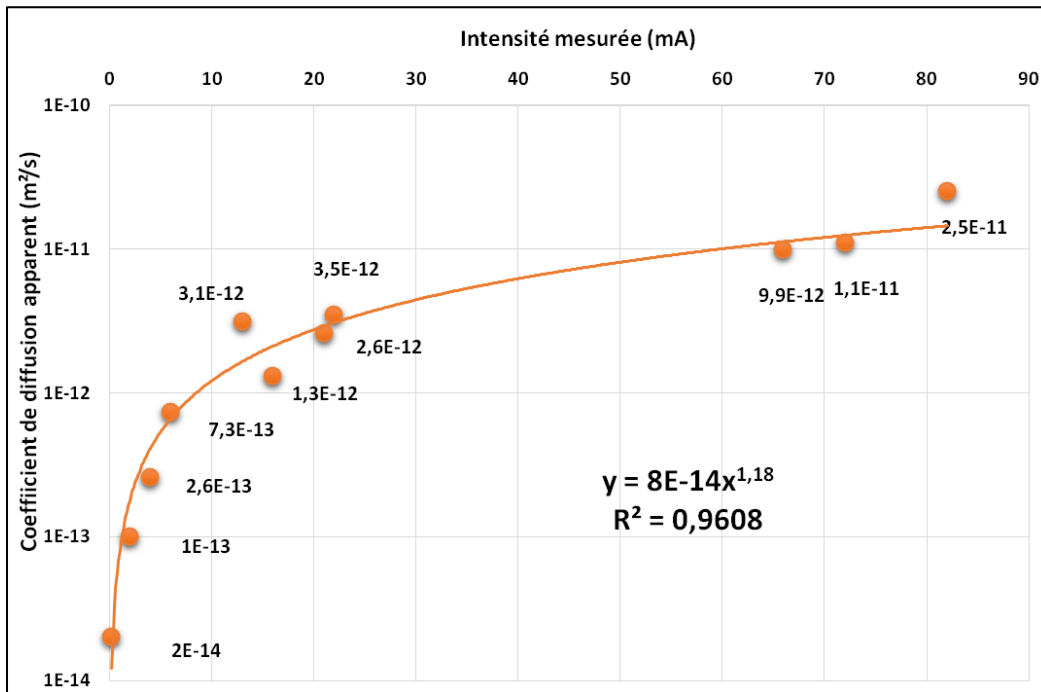


Figure 4. Relation entre l'intensité directement mesurée et le coefficient de diffusion apparent déterminé

Il est connu que le coefficient de diffusion est influencé par la composition et la microstructure des matériaux (Allahyari, 2016). La figure 5 illustre l'évolution du coefficient de diffusion en fonction du ratio Eau/Liant et de la résistance à la compression. Le ratio Eau/Liant est considéré ici comme le ratio entre l'eau efficace et le liant total incluant l'ensemble des fines (fumées de silice, laitiers de haut-fourneau, fillers...).

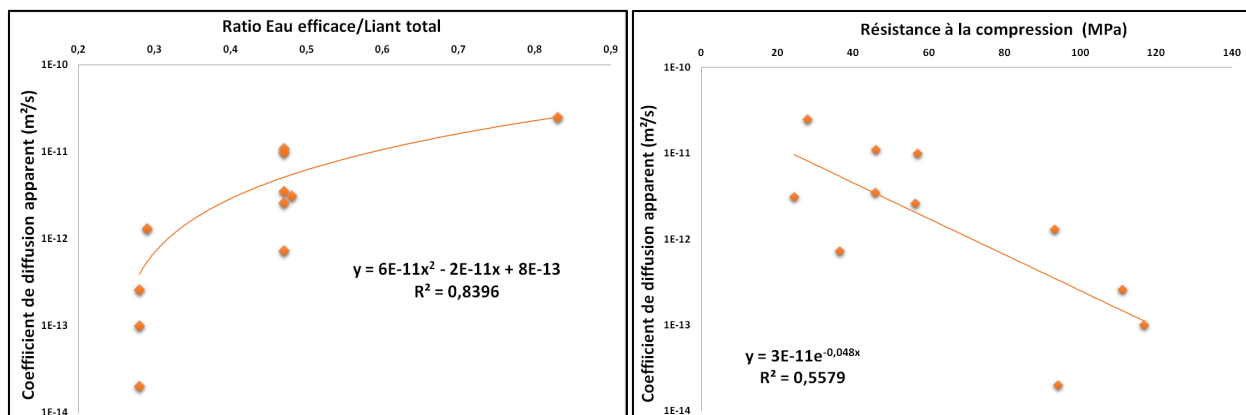


Figure 5. Coefficient de diffusion apparent en fonction du ratio Eau/Liant (à gauche) et de la résistance à la compression (à droite)

On observe les tendances globales selon lesquelles le coefficient de diffusion augmente avec le ratio Eau/Liant et diminue quand la résistance à la compression augmente. Ces tendances connues témoignent de l'affinement progressif de la structure poreuse lorsque le ratio Eau/Liant diminue, lié également à l'effet des composants de type fillers/fumée de silice dans le cas des ratios Eau/Liant très faibles. On remarque en effet que les matériaux de type haute performance, intégrant systématiquement des fillers et fumées de silice avec un ratio Eau/Liant inférieur à 0,3, sont ceux qui ont le coefficient de diffusion le plus faible. Ce constat est cohérent avec le fait que l'usage de fumée de silice associé à un ratio Eau/Liant bas permet de développer un réseau poreux très fin et de diminuer le rayon critique des pores capillaires, qui est reconnu comme un facteur influent vis-à-vis du transport diffusif (Bajja, 2016; Bajja et al., 2017).

On peut cependant soulever que les tendances obtenues restent globales et que pour un ratio Eau/Liant donné, ou encore une résistance à la compression donnée, on relève une plage de valeurs de coefficient de diffusion relativement large. Ce constat laisse présager l'influence de la nature du liant et en particulier des laitiers de haut-fourneau sur le coefficient de diffusion, qui induisent des phénomènes de fixation des chlorures venant alors s'ajouter à l'effet microstructural (Nguyen, 2006).

Si on applique le classement de l'approche performantielle de l'AFGC (AFGC, 2004) aux matériaux testés, on observe (tableau 3) que la classe de durabilité augmente d'autant plus que les matériaux montent en grade (bétons poreux → bétons ordinaires → bétons à très haute performance). Cette tendance globale fait cependant apparaître un comportement particulier des bétons contenant des laitiers de haut-fourneau. Les bétons ordinaires contenant 40 % de laitier de haut-fourneau ont une classe de durabilité supérieure (au moins) aux bétons ordinaires n'en contenant pas. Et le béton ordinaire contenant 80 % de laitier de haut-fourneau se situe dans la classe de durabilité la plus élevée, au même titre que l'ensemble des BTHP, alors que sa résistance à la compression ne dépasse pas 40 MPa.

Classes et valeurs limites (durabilité potentielle)					
	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Élevée (E)	Très élevée (TE)
Coefficient de diffusion apparent des chlorures : D_{app} (mig) en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	>50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Classement des matériaux étudiés		BP BO-EA	BO	BO-40 BO-40-EA Coulis Mortier HP	BO-80 BTHP BTHP-40 BTHP-80

Tableau 3. Application de l'approche performantielle AFGC avec les matériaux étudiés

4. FOCUS SUR L'EFFET DES LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU

Il a été remarqué précédemment que le coefficient de diffusion pouvait varier de manière non négligeable pour un niveau de résistance à la compression donné (variations de 1 à 2 ordres de grandeur), conférant un niveau de confiance moyen dans cette corrélation. La corrélation entre le coefficient de diffusion et la résistance à la compression a alors été considérée de telle manière à distinguer la teneur en laitiers de haut-fourneau intégrée en substitution au ciment. La figure 6 illustre cette démarche à partir des formules béton testées avec différents teneurs en laitiers de haut-fourneau (*i.e.* excluant le coulis et le mortier HP). On constate alors que des tendances se démarquent beaucoup plus nettement en distinguant la teneur en laitiers de haut-fourneau. Cette démarche permet d'intégrer l'effet spécifiquement bénéfique des laitiers de haut-fourneau vis-à-vis du transport des chlorures (effet microstructural et effet de l'interaction matrice-chlorures) et d'aboutir ainsi à une corrélation « coefficient de diffusion – résistance à la compression – teneur en laitiers de haut-fourneau ». Cette lecture permet d'apporter une cohérence avec l'ensemble des tendances obtenues, comme par exemple l'obtention d'un coefficient de diffusion apparent du même ordre de grandeur pour le béton ordinaire avec 80 % de laitiers de haut-fourneau et celui obtenu pour le BTHP n'en contenant pas.

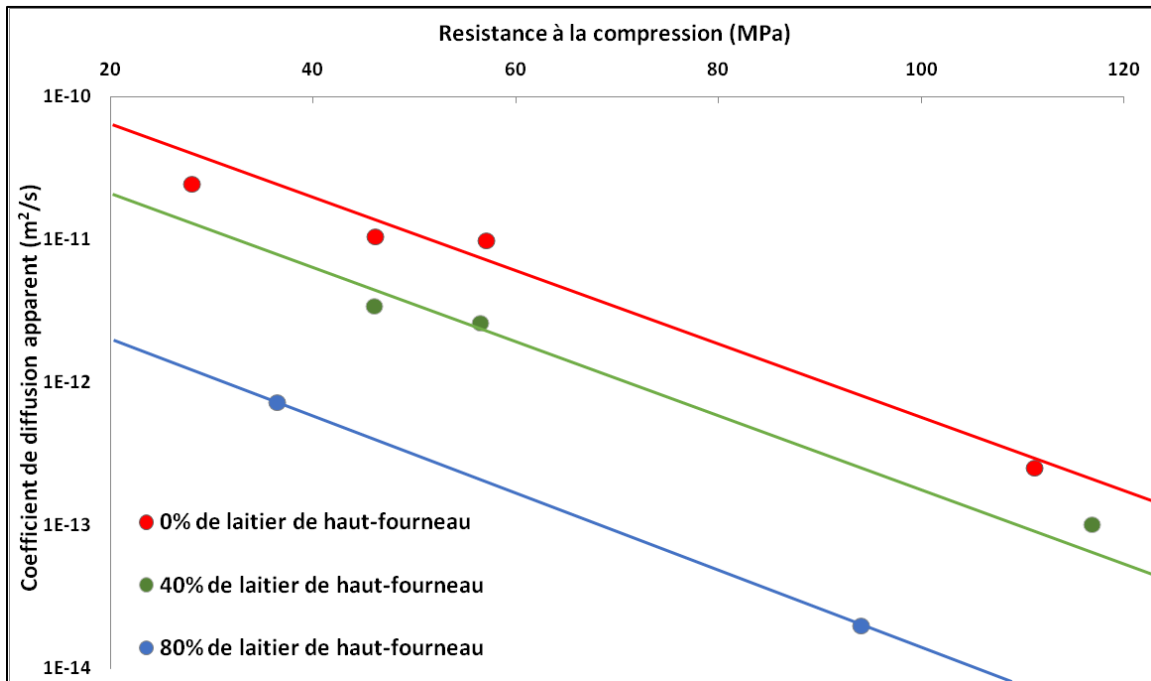


Figure 6. Corrélation entre le coefficient de diffusion apparent et la résistance à la compression pour différentes teneurs en laitiers de haut-fourneau

L'influence des laitiers de haut-fourneau sur le coefficient de diffusion peut également être mise en avant en illustrant l'évolution du coefficient de diffusion en fonction de la proportion en laitier de haut-fourneau pour chaque famille de béton (famille « BO » et famille « BTHP »). La figure 7 traduit les tendances observées et montre qu'une teneur en laitiers de 80 % permet de faire diminuer le coefficient de diffusion apparent d'un ordre de grandeur environ, que ce soit pour le béton ordinaire ou le béton à très haute performance. Cette figure, à travers l'écart observé entre la famille « BO » et la famille « BHP », permet également d'illustrer indirectement l'effet de la fumée de silice et du ratio Eau/Liant.

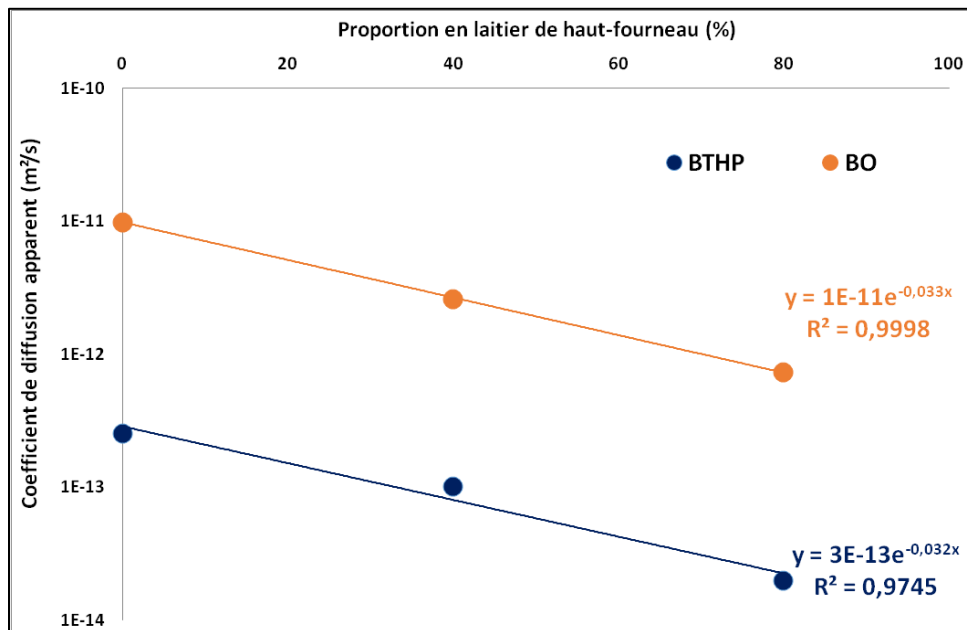


Figure 7. Effet de la proportion en laitier de haut-fourneau sur le coefficient de diffusion apparent

5. CONCLUSIONS

Une campagne d'essais a été menée sur différents types de matériaux cimentaires (bétons, coulis, mortiers) de différentes compositions (avec et sans laitier de haut-fourneau, avec et sans entraîneur d'air,...). Les apports de cette étude sont multiples. Tout d'abord, il est intéressant de noter que la méthode d'essai confirme sa capacité à évaluer des coefficients de diffusion apparents de matériaux de qualités très diverses (valeurs comprises entre 10^{-14} et 10^{-11} m²/s dans cette étude).

L'ensemble des essais effectués a permis de faire émerger une technique rapide d'estimation du coefficient de diffusion apparent à partir de l'intensité directement mesurée, ce qui permet d'avoir un indicateur instantané relativement fiable. Cette étude a en outre permis d'enrichir les connaissances sur les liens entre le coefficient de diffusion apparent et la composition et les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, en particulier le ratio Eau/Liant, la résistance à la compression et la teneur en laitier de haut-fourneau.

Les corrélations mises en avant peuvent d'ailleurs se concevoir comme un outil d'aide à la formulation dans le cas où des bétons doivent être spécialement conçus pour respecter des critères en terme de coefficient de diffusion. Ces corrélations montrent en particulier l'effet très bénéfique des laitiers de haut-fourneau sur le coefficient de diffusion apparent ; un béton avec 80 % de laitier de haut-fourneau et une résistance inférieure à 40 MPa a un coefficient de diffusion apparent qui nécessiterait de formuler un BTHP sans présence de laitier de haut-fourneau.

RÉFÉRENCES

XP P 18-462 (2012), *Essai sur béton durci – Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure*, AFNOR.

NF EN 12390-2 (2012), *Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance*, AFNOR.

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.

Allahyari I. (2016), *Approche performantielle des bétons : vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité*, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.

Bajja Z. (2016), *Influence de la microstructure sur le transport diffusif des pâtes, mortiers et bétons à base de CEM I avec ajout de fumée de silice*, Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay.

Bajja Z., Dridi W., Darquennes A., Bennacer R., Le Bescop P. et Rahim M. (2017), Influence of slurried silica fume on microstructure and tritiated water diffusivity of cement pastes, *Construction and Building Materials*, (132) 85-93.

Nguyen T.S. (2006), *Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires*, Thèse de doctorat de l'INSA Toulouse.