

Étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges

II - Étude expérimentale de la pénétration des ions chlorures par différentes méthodes

RÉSUMÉ

Cet article présente l'étude comparative relative à la pénétration des ions chlorures menée sur deux bétons, l'un ordinaire (B30) et l'autre à hautes performances contenant des fumées de silice (B80).

Quatre types d'essais ont été réalisés en laboratoire sur des éprouvettes de bétons B30 et B80 conservées, après gâchage, 28 ou 90 j dans l'eau : essai AASHTO, migration sous faible champ électrique (deux méthodes différentes, l'une en régime stationnaire et l'autre en non stationnaire) et diffusion avec détermination des profils de concentration en chlorures. Les trois dernières méthodes ont permis le calcul d'une diffusivité « apparente » ou « effective » des ions chlorures dans les bétons testés.

Ces mesures ont été effectuées dans le cadre de l'étude comparative de la durabilité des deux bétons utilisés pour la réalisation des « ouvrages jumeaux » de Bourges, qui s'intègre dans le projet national « BHP 2000 ».

Quelle que soit la méthode utilisée, les mêmes tendances ont été observées. En particulier, les résultats expérimentaux ont confirmé la meilleure aptitude du béton à hautes performances B80 à limiter la pénétration des ions chlorures.

MOTS CLÉS : 32 - Béton hydraulique - Diffusion - Béton hautes performances - Éprouvette - Microsilice - Essai - Durabilité - Chlorure - Ion - Pénétration - Laboratoire - Déplacement (mouvement).

Véronique BANGHÉZ BOUHY
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Chef de la section Microstructures et durabilité des bétons
Division Bétons et composites cimentaires
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Patrick ROUGEAU*
Chargé de recherche
Service Matériaux de construction
Département Études et Ingénierie
CEBTP - Saint-Rémy-les-Chevaux

Thierry CHAUSSEMENT
Chargé de Recherche
Adjoint au chef de la section Comportement physico-chimique
des matériaux
Service Physico-chimie des matériaux
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Gilles CROQUETTE
Ingénieur de l'École centrale de Lille
Chef de la section Durabilité des matériaux
Groupe Structures et ouvrages d'art
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien

Introduction

Dans une démarche visant à prévoir la durabilité du béton armé vis-à-vis notamment des risques de corrosion des armatures, la diffusion des ions chlorures dans le béton apparaît comme un indicateur particulièrement pertinent.

En effet, d'une part, ce paramètre met en jeu les ions chlorures, principal agent, avec le gaz carbonique, susceptible de dépassiver les armatures. D'autre part, et de façon plus générale, il quantifie l'aptitude du béton au transfert sous forme liquide (ionique) par diffusion. Cette diffusion prend toutefois en compte ici les interactions entre les ions et la matrice ciment.

Pour juger de l'importance de ce coefficient de transfert, il suffit de rappeler que les processus de diffusion interviennent dans la majorité des problèmes de durabilité du béton (carbonatation, réaction sulfatique, alcali-réaction, lixiviation, etc.).

* Actuellement, Chef du département Matériaux, Division Produits ouvrages au CERIB, Épernon.

Cependant, à l'heure actuelle, il n'existe pas réellement de consensus au plan international sur la méthode de quantification de la pénétration des ions chlorures en conditions saturées sur éprouvettes en laboratoire.

Aussi, dans le cadre de l'étude visant à comparer la durabilité potentielle des deux formulations - B30 (béton ordinaire) et B80 (béton à hautes performances contenant des fumées de silice) - utilisées pour la construction de deux ponts identiques (les « ouvrages jumeaux ») sur un même site à Bourges, une attention particulière a été portée à la quantification de la pénétration des ions chlorures. Cette étude a été menée au sein du projet national « BHP 2000 ».

Cet article est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux relatifs à la pénétration des ions chlorures, obtenus par quatre méthodes différentes. Les essais ont été pratiqués en conditions saturées sur des éprouvettes confectionnées sur chantier en même temps que certaines parties des ouvrages. L'objectif est de vérifier la faisabilité des méthodes pour des bétons ordinaires ainsi que pour des bétons à hautes performances (BHP), et de comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes sur le B30 et le B80 testés.

Les résultats des autres mesures réalisées dans le cadre de l'étude de la durabilité des « ouvrages jumeaux » (porosimétrie, perméabilité aux gaz, carbonatation accélérée, etc.) sont donnés dans la référence [1], ainsi que la formulation et les caractéristiques du B30 et du B80 testés.

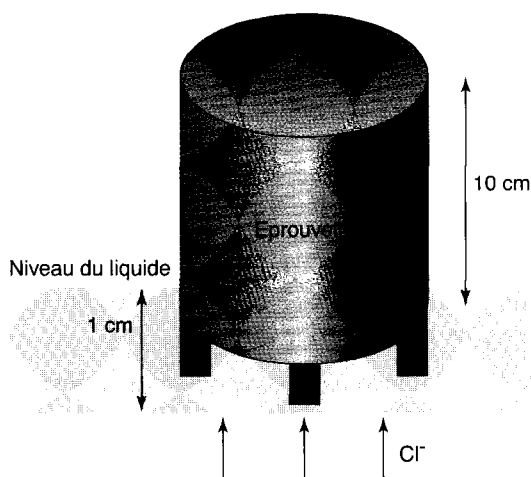


Fig. 1 - Dispositif adopté pour l'essai de pénétration de chlorures destiné à la détermination des profils et de la diffusivité « effective ».

Les quatre méthodes expérimentales utilisées ici, dont trois d'entre elles permettent le calcul d'une diffusivité « apparente » ou « effective » des ions chlorures, sont également présentées dans cet article. Il s'agit :

- ❶ d'un essai de diffusion pour la détermination des profils de concentration en chlorures « libres » et totaux et la détermination, en régime non stationnaire, de la diffusivité « effective » des ions chlorures (selon une méthode inspirée de la méthode danoise APM 302 [2]),
- ❷ de l'essai AASHTO [3],
- ❸ d'un essai de migration des chlorures sous champ électrique pour la détermination, en régime non stationnaire, de la diffusivité « effective » des ions chlorures, suivant la méthode proposée par Tang et Nilsson [4],
- ❹ d'un essai de migration des chlorures sous faible champ électrique, pour la détermination de la diffusivité « apparente » des ions chlorures en régime stationnaire, selon la méthode proposée par Andrade [5].

Détermination des profils de concentration en chlorures et de la diffusivité « effective » des ions chlorures à partir d'un essai de diffusion

La procédure adoptée ici est inspirée de la méthode danoise APM 302 [2], [6].

Elle consiste à mettre des éprouvettes de matériau en contact avec une solution de NaCl (ici dosée à 35 g de NaCl par litre de solution), pendant une durée déterminée (ici 35 ou 90 j), à $T = 20 \pm 0,5$ °C.

Éprouvettes

Les essais de pénétration de chlorures sont réalisés sur des éprouvettes Ø 11 x 10 cm, sciées à partir de cylindres Ø 11 x 22 cm, à l'issue de la cure (28 ou 90 jours).

Les éprouvettes sont recouvertes de deux feuilles de papier aluminium adhésif, excepté la face destinée à être en contact avec la solution de NaCl, afin de les protéger des échanges d'humidité avec le milieu environnant pendant toute la durée de l'essai.

Pour chaque matériau et chaque échéance, trois éprouvettes ont été testées.

Procédure

Les éprouvettes sont installées dans un bain contenant la solution de NaCl, selon le dispositif schématisé en figure 1.

La teneur en NaCl choisie pour la solution (35 g de NaCl par litre de solution) correspond à peu près à celle de l'eau de mer. La solution du bain est régulièrement renouvelée, afin d'assurer une teneur en NaCl constante au contact du béton pendant toute la durée de l'essai. La teneur en chlorures est toutefois régulièrement vérifiée par dosage de la solution.

Après 35 ou 90 j de contact avec la solution de NaCl, des tranches de béton d'épaisseur comprise entre 4 et 6 mm sont sciées à sec à partir de la surface en contact avec la solution de NaCl. Le dosage des chlorures « libres » et totaux est effectué après séchage et broyage de chaque tranche de matériau. Le mode opératoire appliqué pour l'extraction et le dosage des chlorures a fait l'objet de recommandations AFPC-AFREM [7]. Ces procédures permettent l'extraction sélective des chlorures, en fonction du temps de contact entre l'échantillon et une solution aqueuse. Les temps de contact ont été fixés à partir de l'étude de la décomposition en solution aqueuse du monochloroaluminate de calcium.

Profils de concentration en chlorures dans les bétons

Le profil de concentration en chlorures dans les bétons est déterminé à partir de la concentration en chlorures mesurée dans l'éprouvette, en fonction de la distance à la surface de contact avec la solution de NaCl (hauteur).

Cette concentration est exprimée en chlorures :

- « libres », c'est-à-dire sous forme ionique dans la solution interstitielle ou très facilement extractibles,
- totaux, qui incluent, outre les précédents, ceux fortement adsorbés sur les parois des pores et ceux chimiquement liés dans la matrice ciment, tels que les chloroaluminates [8].

La détermination de la teneur en chlorures « libres » est importante vis-à-vis des risques immédiats de corrosion des armatures du béton armé. La teneur en chlorures totaux, quant à elle, correspond à la quantité maximale de chlorures susceptibles de passer en solution dans certaines conditions (par exemple, si le béton se carbonate ou en présence d'ions sulfates) et correspond donc à des risques potentiels de corrosion.

Les profils de concentration en chlorures « libres » et totaux sont donnés, pour les bétons B30 et B80, dans les figures 2 à 5, où la concentration en chlorures est exprimée (en pourcentage) par rapport à la masse de béton.

Profils de concentration en chlorures « libres » et totaux dans les bétons B30 et B80

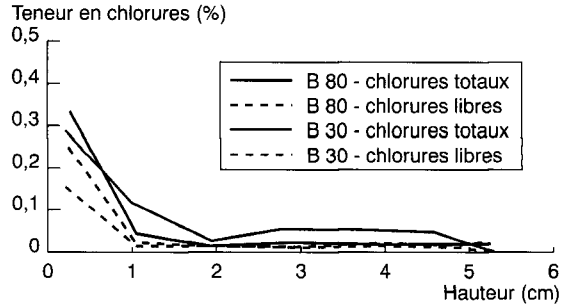


Fig. 2 - Après 28 j de cure (immersion dans l'eau) et 35 j de contact avec la solution de NaCl.

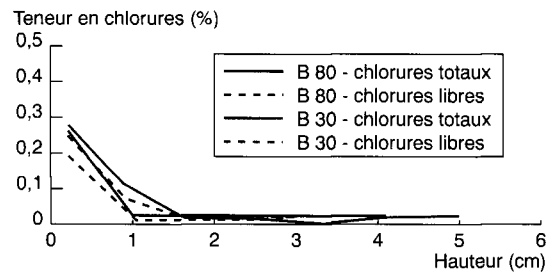


Fig. 3 - Après 90 j de cure (immersion dans l'eau) et 35 j de contact avec la solution de NaCl.

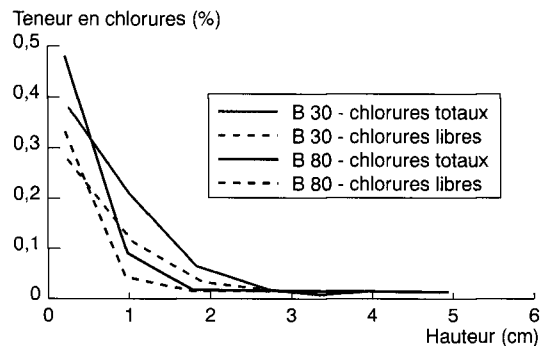


Fig. 4 - Après 28 j de cure (immersion dans l'eau) et 90 j de contact avec la solution de NaCl.

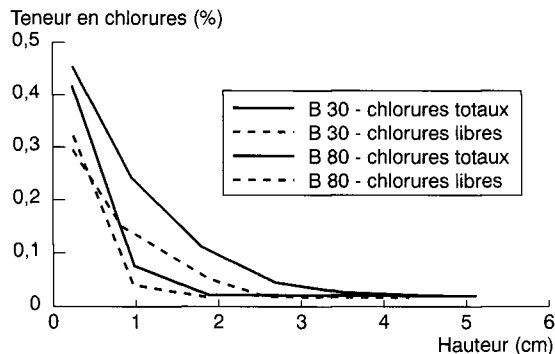


Fig. 5 - Après 90 j de cure (immersion dans l'eau) et 90 j de contact avec la solution de NaCl.

Diffusivité « effective » des ions chlorures

Si la diffusivité D des chlorures ne dépend pas de la concentration en chlorures, la pénétration des chlorures dans le béton, lors d'une diffusion « pure » et en régime non stationnaire, est généralement décrite par la seconde loi de Fick, qui néglige les éventuelles interactions physico-chimiques chlorure-matrice [8] :

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}$$

où $c(x,t)$ est la concentration en chlorures à une distance x de la surface en contact avec les chlorures et à un temps t .

Avec l'hypothèse de diffusion « pure » monodimensionnelle dans un milieu homogène semi-infini et pour une composition constante de la phase liquide en contact avec le matériau, une solution analytique de la seconde loi de Fick s'exprime par l'équation suivante :

$$\frac{c - c_0}{c_s - c_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

où c_s est la concentration en chlorures au niveau de la surface (considérée plane) de l'échantillon et c_0 est la concentration initiale au sein du matériau.

En utilisant l'approximation suivante [9] : $\operatorname{erfc}(z) \approx \left(1 - \frac{z}{\sqrt{3}}\right)^2$ pour $0 \leq z < \sqrt{3}$, on obtient :

$$(c - c_0)^{1/2} \approx (c_s - c_0)^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{x}{2\sqrt{3Dt}}\right)$$

Si l'on trace $y = (c - c_0)^{1/2}$ en fonction de x , les points expérimentaux doivent être alignés sur une droite de pente $-[(c_s - c_0)^{1/2}] / [2\sqrt{3Dt}]$ et d'ordonnée à l'origine $(c_s - c_0)^{1/2}$, ce qui permet la détermination de c_s et de la diffusivité D .

TABLEAU I
Diffusivité « effective » des ions chlorures calculée à partir des concentrations en chlorures totaux et « libres » dans les bétons B30 et B80

Matériau	Cure (jours)	Contact avec NaCl (jours)	$D_{\text{eff.}}$ (Cl ⁻ totaux) ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{eff.}}$ (Cl ⁻ « libres ») ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
B30	28	35	20,6 (*)	4,6 (*)
	28	90	8,8	9,0
	90	35	10,8	9,8
	90	90	11,4	9,3
B80	28	35	5,9	4,0
	28	90	3,7	2,2
	90	35	5,1	5,0
	90	90	4,2	2,0

(*) : résultats à considérer avec prudence : la faible pénétration des chlorures et la forte variabilité au point le plus proche de la surface entraînent ici une forte imprécision dans les calculs.

La diffusivité ainsi calculée n'est toutefois qu'un coefficient « effectif ». En effet, le calcul est effectué avec un modèle de diffusion « pure », alors que des réactions chimiques sont susceptibles d'intervenir au cours du processus. Il est cependant important de préciser que cette approximation va dans le sens de la sécurité.

Dans les calculs, on considère, pour chaque profil, que la concentration initiale c_0 a pour valeur la teneur en chlorures mesurée loin de la surface (c'est-à-dire dans la zone où cette teneur est constante). La valeur obtenue pour c_0 est toujours comprise entre 0 et 0,02. Elle se trouve donc dans le domaine d'incertitude de la mesure. Cette variabilité de c_0 n'a toutefois pratiquement pas d'influence sur le calcul de la diffusivité.

Les valeurs de la diffusivité « effective » D (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) des ions chlorures calculée à partir des concentrations en chlorures totaux et « libres » sont reportées dans le tableau I.

Analyse des résultats

Sur les profils de concentration en chlorures, dans la zone où il y a effectivement pénétration des chlorures, les résultats montrent une différence entre les teneurs en chlorures totaux et chlorures « libres » mesurées. La teneur en chlorures « libres » est systématiquement inférieure à la teneur en chlorures totaux, illustrant un piégeage des ions chlorures dans la matrice ciment. De même, les diffusivités calculées avec les teneurs en chlorures « libres » sont inférieures ou égales aux diffusivités calculées avec les teneurs en chlorures totaux.

En outre, cette différence semble plus marquée dans le cas du béton B30, malgré une teneur en ciment plus faible ($400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ au lieu de $490 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ dans le cas du béton B80). Cette constatation est en accord avec les teneurs en C_3A (10,1 %) et $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$ (19,1 %) plus élevées du ciment de Beffes (formulation B30), comparées à celles du ciment d'Airvault (formulation B80), qui sont respectivement égales à 7,6 et 17,4 %. En effet, les chlorures, qui pénètrent dans le béton, réagiront chimiquement d'autant plus avec les aluminates du ciment que ces derniers sont en quantité importante.

Les profils de concentration en chlorures mettent en évidence de façon logique que les ions chlorures pénètrent plus profondément dans le béton (B30 ou B80) après 90 j de contact avec la solution de NaCl, qu'après seulement 35 j de contact. L'essai réalisé avec une durée de contact avec NaCl de 90 j, bien qu'il soit plus long, présente ainsi l'avantage, par rapport à 35 j de contact, de fournir des résultats pour lesquels la profondeur de

pénétration des chlorures est plus importante et où les concentrations en chlorures dans cette zone sont plus fortes. L'analyse des profils s'en trouve facilitée et le calcul des diffusivités est alors plus précis et plus rigoureux, en particulier pour les BHP.

Les résultats expérimentaux montrent que les conditions de diffusion des ions chlorures dans le béton ont peu évolué entre 28 et 90 j de cure. Le réseau capillaire connecté et occupé par la phase liquide interstitielle, qui est concerné par le transfert des chlorures, est donc sensiblement le même pour ces deux échéances.

L'ensemble des profils (cf. fig. 2 à 5) met en évidence que, dans chaque expérience (sans prendre en compte le point le plus proche de la surface qui n'est pas toujours significatif compte tenu de la rétention difficilement quantifiable de liquide chargé en chlorures lors de la sortie de l'éprouvette du bain), la profondeur de pénétration des chlorures est plus faible et les concentrations en chlorures dans cette zone sont plus faibles pour le béton B80 que pour le béton B30. De même, la diffusivité calculée pour chaque expérience est toujours plus faible pour le B80 (cf. tableau I). Ceci démontre la meilleure aptitude du B80 à limiter la pénétration des ions chlorures, et donc à protéger les armatures du béton armé.

Migration des ions chlorures sous champ électrique : essai AASHTO

Procédure

L'essai AASHTO, [3] et [10], est couramment utilisé depuis plusieurs dizaines d'années pour évaluer l'aptitude des bétons à limiter la pénétration des chlorures et de là, pour « quantifier » leur durabilité. Cet essai consiste à mesurer l'intensité du courant engendré par une différence de potentiel égale à 60 V maintenue constante pendant 6 h au moyen d'électrodes en acier inoxydable entre les deux faces d'un échantillon de béton cylindrique (ici Ø 8 x 5 cm) se trouvant dans une cellule à deux compartiments (cf. fig. 6). L'une des faces de l'échantillon est au contact d'une solution de NaCl dosée à 30 g de NaCl par litre de solution (compartiment amont : cathode). L'autre face de l'échantillon est au contact d'une solution de NaOH 0,3 N (compartiment aval : anode).

Dans ce type d'essai, le mouvement des ions chlorures dans le béton est accéléré par la présence d'un champ électrique constant dans la direction de diffusion des chlorures.

Cet essai ne permet pas l'obtention d'un coefficient de diffusion. Seule la quantité d'électricité totale, ou charge électrique totale Q (exprimée en Coulombs), qui a traversé l'échantillon de béton pendant les 6 h, est déterminée.

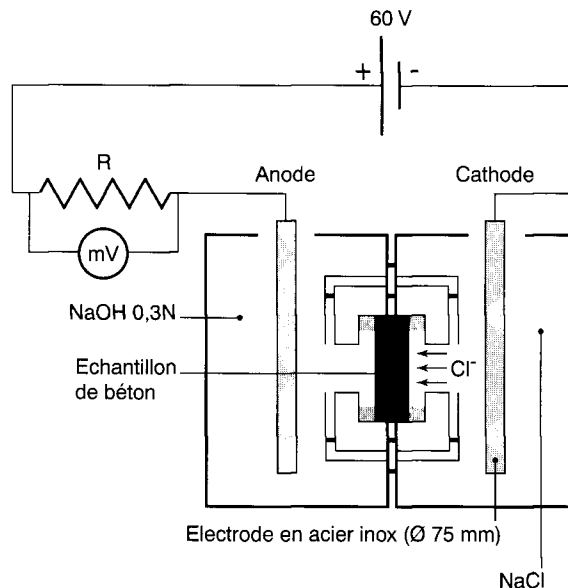


Fig. 6 - Schéma de principe du dispositif expérimental de l'essai AASHTO.

TABLEAU II
Résultats de l'essai AASHTO réalisé sur les bétons B30 et B80, après 28 ou 90 j de cure (immersion dans l'eau)

Matériau	Cure (j)	Quantité d'électricité (Coulombs)	
			moyenne
B30	28	9 250	9 200
		9 150	
B30	90	8 200	7 925
		7 650	
B80	28	1 500	1 550
		1 625	
B80	90	1 350	1 300
		1 250	

Résultats

Pour chacun des deux bétons B30 et B80, deux échantillons ont été testés.

Les valeurs mesurées pour les bétons B30 et B80 après 28 ou 90 j de cure (immersion dans l'eau) sont données dans le tableau II.

Analyse des résultats

Les résultats mettent en évidence une légère diminution de la quantité d'électricité entre 28 et 90 j, plus marquée pour le béton B30. En outre, des valeurs nettement plus faibles sont obtenues avec le béton B80. Elles représentent seulement 16 % de celles obtenues avec le béton B30.

Le paramètre déterminé à partir de l'essai AASHTO permet de classer les bétons. Si l'on se réfère à l'échelle proposée par l'ASTM [10], on peut dire que le béton B30 présente une *forte* pénétrabilité aux ions chlorures ($Q > 4\ 000\ C$), tandis que le béton B80 présente une *faible* pénétrabilité ($1\ 000 < Q < 2\ 000\ C$).

Cependant, le paramètre déterminé par l'essai AASHTO n'a pas de signification intrinsèque. Il dépend en réalité de la mobilité de tous les ions présents dans la solution interstitielle et des réactions redox se produisant aux électrodes, en particulier en présence d'un champ électrique aussi fort. Il ne représente donc pas uniquement la quantité d'ions chlorures ayant migré.

Cet essai ne fournit donc que des données comparatives permettant un classement des différents types de bétons, sous réserve que les différences d'origine chimique entre les matériaux testés (par exemple, dues au type de ciment) soient négligeables devant les différences d'origine physique (résultant par exemple du rapport E/C). Il ne permet donc pas d'effectuer un classement très fin des bétons vis-à-vis de leur aptitude à limiter la pénétration des chlorures. De plus, ce classement peut dans certains cas être remis en question du fait des processus qui surviennent simultanément avec le mouvement des chlorures, à cause du fort champ électrique appliqué (échauffement du béton, migration d'autres ions, réactions redox, etc.), et qui perturbent la mesure.

Quoiqu'il en soit, c'est-à-dire que l'essai AASHTO quantifie une « perméabilité » aux chlorures ou seulement la résistivité du matériau, les résultats obtenus ici mettent bien en évidence la plus forte compacité du B80.

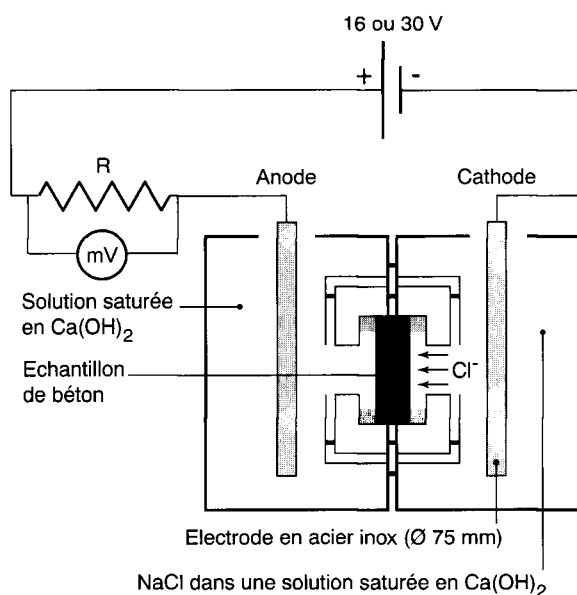


Fig. 7 - Schéma de principe du dispositif expérimental utilisé pour la détermination de la diffusivité « effective » des ions chlorures par la méthode proposée par Tang et Nilsson.

Détermination de la diffusivité « effective » des ions chlorures par la méthode proposée par Tang et Nilsson

À partir d'un essai de migration des ions chlorures sous champ électrique, une diffusivité « effective » peut être calculée par la méthode proposée par Tang et Nilsson en 1992 [4]. Celle-ci est basée sur la détermination du front de pénétration des ions chlorures dans le matériau par une technique colorimétrique (nitrate d'argent 0,1 N + fluorescéine) [11].

Procédure

Le dispositif expérimental utilisé ici est identique à celui décrit pour l'essai AASHTO. Il comprend une cellule à deux compartiments séparés par un échantillon de béton ($\varnothing\ 8\ x\ 5\ cm$). La différence de potentiel imposée entre les deux faces de l'échantillon de béton, afin que les anions chlorures migrent du compartiment amont (cathode) vers le compartiment aval (anode) en traversant l'échantillon de béton, est ici de 30 V. Le compartiment amont contient du NaCl dans une solution saturée en $Ca(OH)_2$. Le compartiment aval contient une solution saturée en $Ca(OH)_2$. Le schéma de principe du dispositif expérimental est présenté sur la figure 7. La durée de l'essai est d'au moins 24 heures.

Calcul de la diffusivité « effective » des ions chlorures

La diffusivité « effective » D des chlorures dans l'échantillon de béton est calculée en régime non stationnaire à partir de la seconde loi de Fick modifiée. Cette dernière décrit la diffusion des chlorures sous l'action d'un champ électrique constant dans la direction de diffusion (flux de convection négligé) :

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{dJ}{dx} = D \left[\frac{d^2c}{dx^2} - \frac{ZF \cdot \Delta E}{R \cdot T \cdot e} \cdot \frac{dc}{dx} \right]$$

où

- J : flux d'ions chlorures ($mol.m^2.s^{-1}$),
- Z : valence de l'ion chlorure,
- F : constante de Faraday,
- ΔE : différence de potentiel aux bornes de l'échantillon (V),
- R : constante des gaz parfaits,
- T : température absolue (K),
- e : épaisseur de l'échantillon (m).

En considérant qu'il n'y a pas d'interaction des chlorures avec la matrice ciment, pour une composition constante de la phase liquide en contact avec le matériau, et en prenant $Z = 1$,

$\Delta E = 30 \text{ V}$, $e = 0,05 \text{ m}$ et $T = 298 \text{ K}$, la diffusivité « effective » D (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) peut être calculée par la solution numérique suivante [4] :

$$D = 1,189 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(x_d - 1,061 \cdot x_d^{0,589})}{t}$$

où

- x_d : profondeur de pénétration mesurée par méthode colorimétrique (mm),
- t : durée de l'essai (h).

Résultats

Pour chacun des deux bétons B30 et B80, deux échantillons ont été testés. Les résultats des calculs sont donnés dans le tableau III.

Cet essai présente l'avantage d'être rapide (un à quelques jours). Mais, l'incertitude sur la profondeur de pénétration déterminée par méthode colorimétrique rend difficile un calcul précis du coefficient de diffusion, d'où les fourchettes données ici pour les valeurs de la diffusivité « effective ».

La diffusivité « effective » obtenue avec le béton B80 à 90 j ($0,4$ à $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) est toutefois 10 fois plus faible qu'avec le B30 (15 à $20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

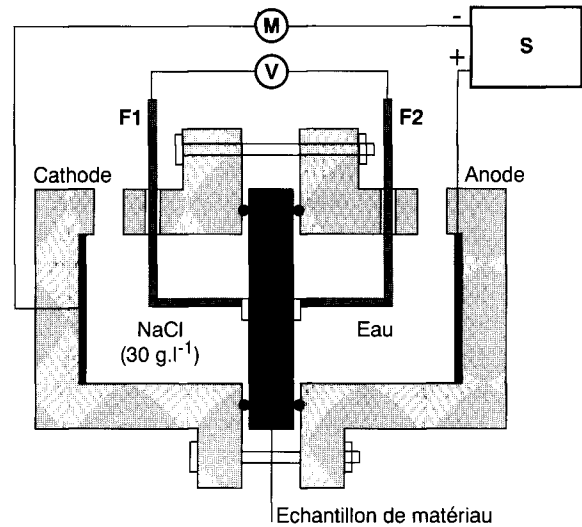
TABLEAU III
Diffusivité « effective » des chlorures déterminée par la méthode proposée par Tang et Nilsson, pour les bétons B30 et B80 après 28 ou 90 j de cure (immersion dans l'eau)

Matériau	Cure (j)	Diffusivité « effective » ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
B30	28	15 à 20 15 à 20
B30	90	15 à 20 15 à 20
B80	28	4,4 à 5,8 3,7 à 5,1
B80	90	1 à 2,3 0,4 à 1,6

Détermination de la diffusivité « apparente » des ions chlorures par la méthode proposée par Andrade

La diffusivité « apparente » des ions chlorures dans les bétons B30 et B80 a été déterminée, en régime stationnaire, à partir d'un essai de migration des chlorures sous faible champ électrique. La procédure adoptée est basée sur la méthode proposée par Andrade et al. [5].

Schémas du dispositif expérimental utilisé pour la détermination de la diffusivité « apparente » des ions chlorures par la méthode proposée par Andrade



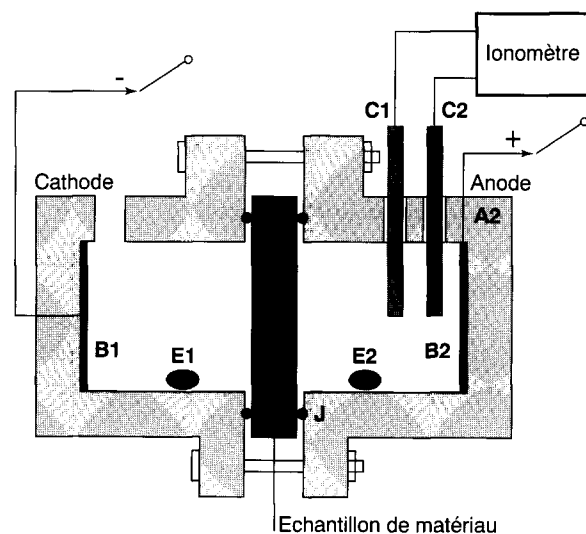
F1, F2 : tiges platiniées recouvertes de résine à l'exception d'une petite zone contre l'échantillon

V : voltmètre

S : alimentation stabilisée, réglée à une tension fixée à 15 V

M : ampèremètre introduit dans le circuit lors de la mesure du courant

Fig. 8 - Mesure de la différence de potentiel aux bornes de l'échantillon.



A1 : coquille "cathodique" en téflon

A2 : coquille "anodique" en téflon

B1 : cathode (-) disque acier inoxydable

B2 : anode (+) anneau cuivre-niobium platiné

C1 : électrode de référence au "sulfate mercureux"

C2 : électrode spécifique aux chlorures

J : joint torique d'étanchéité

E1, E2 : olives magnétiques (brassage)

Fig. 9 - Mesure hors tension de la concentration en chlorures dans le compartiment aval.

Procédure

Un disque de béton (\varnothing 11 x 2 cm) est fixé de façon étanche entre les deux compartiments d'une cellule. Le compartiment amont contient une solution de NaCl initialement dosée à 30 g.l⁻¹. Le compartiment aval contient initialement de l'eau distillée. Chaque compartiment contient une électrode métallique (en acier inoxydable pour la cathode et en cuivre-niobium platiné pour l'anode) reliée à un générateur de courant continu (cf. fig. 8). Une différence de potentiel de 15 V est appliquée entre ces deux électrodes. L'essai est réalisé à $T = 23 \pm 5$ °C. La faible tension appliquée aux bornes de l'échantillon permet d'accélérer la migration des chlorures tout en limitant les effets perturbateurs. Des valeurs de tension plus élevées réduiraient la durée de l'essai, mais engendreraient une augmentation de la température. À l'opposé, avec un champ électrique trop faible, la diffusion naturelle ne serait plus négligeable devant le processus de migration, et il serait alors nécessaire de la prendre en compte dans les calculs. La différence de potentiel aux bornes de l'ensemble de la cellule est maintenue constante à 15 V au cours de l'essai. Par contre, la différence de potentiel aux bornes de l'échantillon varie au cours de l'essai, notamment en fonction de la concentration ionique des solutions. Cette tension atteint les valeurs de 11,4 V et 13,5 V à la fin de l'essai, pour les bétons B30 et B80 respectivement. Ce sont ces valeurs (ΔE) qui sont prises en compte dans le calcul de la diffusivité « apparente ».

La concentration en chlorures dans chaque compartiment est mesurée à l'aide d'une électrode spécifique aux ions chlorures et d'une électrode de référence au sulfate mercurique (cf. fig. 9). La solution du compartiment aval n'est pas renouvelée au cours de l'essai.

La diffusivité « apparente » des chlorures dans le béton est calculée en régime stationnaire. La concentration en chlorures dans le compartiment aval augmente dans ce cas linéairement en fonction du temps.

TABLEAU IV
Diffusivité « apparente » des chlorures déterminée par la méthode proposée par Andrade, pour les bétons B30 et B80, après 90 j de cure (immersion dans l'eau)

Matériau	Diffusivité « apparente » (10 ⁻¹² m ² .s ⁻¹)	
		moyenne
B30	7,2	7,90
	8,6	
B80	1,8	1,5
	1,2	

Par rapport à des méthodes telles que celle proposée par Tang et Nilsson, où les mesures sont réalisées en régime non stationnaire, la durée de l'essai est plus grande. Elle est de l'ordre d'une semaine pour le béton B30 et de deux semaines pour le béton B80. Cependant, ceci permet d'éliminer l'influence des interactions des chlorures avec la matrice ciment sur la mesure du coefficient de diffusion des chlorures.

Calcul de la diffusivité « apparente » des ions chlorures

En régime stationnaire (flux de chlorures constant), la diffusivité « apparente » des chlorures s'exprime à partir de l'équation de Nernst-Planck, en négligeant les flux de diffusion (ce qui est classiquement reconnu comme licite à partir d'une tension de 10 V) et de convection devant ceux de migration sous champ électrique :

$$D_{app} = \frac{J.R.T.e}{Z.F.C_{Cl^-}.\gamma.\Delta E} \quad (\text{en m}^2.\text{s}^{-1})$$

avec

- T : température absolue (K),
- C_{Cl⁻} : concentration en chlorures (mol.m⁻³),
- γ : coefficient d'activité.

Résultats

La mesure est effectuée ici après 90 j de cure. Pour chacun des deux bétons, deux échantillons ont été testés. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau IV.

Les résultats mettent là encore en évidence la meilleure aptitude du B80 testé à limiter la migration des ions chlorures, comparativement au B30 testé.

Comparaison des résultats et conclusions

À partir des résultats expérimentaux présentés dans cet article, des conclusions peuvent être tirées au niveau des méthodes expérimentales et également du point de vue du comportement des matériaux.

Le tableau V récapitule, à titre de comparaison, les principaux résultats chiffrés obtenus pour les bétons B30 et B80 avec les différentes méthodes utilisées.

La méthode expérimentale la plus rapide est l'essai AASHTO (6 h). Cependant, cet essai ne fournit pas de coefficient de diffusion et sa validité est souvent remise en cause. Il ne peut aboutir qu'à un classement très qualitatif des bétons (par exemple, suivant l'échelle proposée par l'ASTM).

TABLEAU V
 Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes (valeurs moyennes)

Matériau	Âge (j)	D _{eff.} (Cl ⁻ totaux) (10 ⁻¹² m ² .s ⁻¹)		Q (Coulombs)	D _{eff.} (10 ⁻¹² m ² .s ⁻¹)	D _{app.} (10 ⁻¹² m ² .s ⁻¹)
		Profils		Méthode AASHTO	Méthode Tang et Nilsson	Méthode Andrade
		35 j	90 j			
B30	28	20,6 (*)	8,8	9 200	17,5	-
	90	10,8	11,4	7 925	17,5	7,9
B80	28	5,9	3,7	1 550	4,75	-
	90	5,1	4,2	1 300	1,3 (*)	1,5

(*) : ces valeurs sont à considérer avec prudence.

En ce qui concerne les autres méthodes, il est difficile de comparer directement et rigoureusement les coefficients de diffusion déterminés pour un même matériau à partir de méthodes différentes, dans la mesure où les processus physiques, chimiques et électriques qui interviennent dans chaque expérience et que ces coefficients quantifient de façon globale, peuvent être radicalement différents.

Cependant, à un âge et pour un béton donnés, on peut constater que les valeurs de diffusivité obtenues par les différentes méthodes sont très proches. Plus précisément, les diffusivités « effectives » (régime non stationnaire) calculées à partir d'un essai de diffusion « pure » ou d'un essai de migration sous champ électrique donnent quasiment les mêmes résultats. On peut toutefois noter, en ce qui concerne les essais de migration sous champ électrique, que les résultats obtenus sur le B30 à 90 j donnent : D_{app.} (régime stationnaire) < D_{eff.} (régime non stationnaire).

Les essais de migration sous champ électrique sont plus rapides que les expériences de diffusion naturelle. Mais, dans le cas général, les coefficients déterminés à partir des premiers permettent surtout des mesures comparatives entre différents bétons. Ils sont plus difficilement utilisables à l'heure actuelle pour une prédiction quantitative de la durée de vie des matériaux. Il est préférable, dans une optique d'évaluation de la durée de vie, d'utiliser les coefficients déterminés à partir de mesures de diffusion. En effet, bien que ces essais soient plus longs (par exemple, trois mois pour les essais de diffusion ré-

lisés ici), les mesures sont plus précises et l'essai plus conforme à la réalité.

Sur un plan plus général, la diffusivité des chlorures déterminée par les méthodes présentées ici constitue un indicateur, qui, complété par d'autres paramètres tels que la perméabilité aux gaz, peut permettre une quantification de la durabilité des bétons. Il n'en demeure pas moins nécessaire toutefois de développer des méthodes expérimentales et des modèles permettant de travailler en conditions insaturées, c'est-à-dire mettant en jeu des transferts couplés de chlorures et d'humidité, afin de quantifier et de prévoir le comportement de nombreux cas d'ouvrages sur site.

Du point de vue des matériaux, la conclusion majeure de cette étude est que, quelle que soit la méthode expérimentale utilisée (et, en particulier, la durée de contact entre le béton et NaCl), les mêmes tendances sont observées vis-à-vis des matériaux testés. D'une part, il y a peu de différence sur les résultats entre 28 et 90 j (cure par immersion dans l'eau). Mais surtout, les résultats confirment la meilleure aptitude du béton à hautes performances B80 testé à limiter la pénétration des ions chlorures, et donc à protéger les armatures du béton armé. Ces propriétés macroscopiques reflètent la microstructure plus dense et plus finement poreuse du BHP qui résulte du plus faible rapport E/C et de la teneur optimisée en fumées de silice de sa formulation [1]. En outre, ces propriétés ne semblent pas être altérées par la tendance à la microfissuration détectée sur le B80 [1].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAROGHEL-BOUNY V., ROUGEAU P., CARE S., GAWSEWITCH J. (1998), *Étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges - Partie I : Microstructure, propriétés de durabilité et retrait*, dans ce même numéro.
- [2] AEC (1991), *Chloride ingress into concrete - Test method APM 302*, AEC laboratory, AEC Consulting Engineers Ltd, Vedbaek, Denmark.
- [3] *Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete (AASHTO T 277-83)* (1983), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [4] TANG L., NILSSON L.O. (1992), Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, *ACI Materials Journal*, vol. 89, 1, pp. 49-53.

- [5] ANDRADE C. et SANJUAN M.A. (1994), Experimental procedure for the calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration tests, *Advances in cement research*, **6**, pp. 127-134.
- [6] POULSEN E. (1997), *Description of exposure to chloride of marine concrete construction works*, in Proceedings of the International RILEM Workshop, *Chloride penetration into concrete*, oct. 15-18 1995, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France, (Edited by L.O. Nilsson and J.P. Ollivier, RILEM), pp. 356-369.
- [7] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, AFPC-AFREM, « Durabilité des bétons », LMDC, 1998.
- [8] BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., RAHARINAIVO A. (1997), *Experimental investigations upon binding of chloride and combined effects of moisture and chloride in cementitious materials*, in Proceedings of the International RILEM Workshop, *Chloride penetration into concrete*, oct. 15-18 1995, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France (Edited by L.O. Nilsson and J.P. Ollivier, RILEM), pp. 290-301.
- [9] POULSEN E. (1990), The chloride diffusion characteristics of concrete (approximative determination by linear regression analysis), *Nordic Concrete Research*, **9**, Nordic Concrete Federation.
- [10] *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (ASTM C 1202-94)*, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, (1994).
- [11] COLLEPARDI M. (1997), *Quick method to determine free and bound chlorides in concrete*, in Proceedings of the International RILEM Workshop, *Chloride penetration into concrete*, oct. 15-18 1995, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France (Edited by L.O. Nilsson and J.P. Ollivier, RILEM), pp. 10-16.

Remerciements

Les auteurs remercient Stéphane Mazounie pour la réalisation des essais de diffusion et Guillaume Gavard pour le dosage des chlorures.

Dans le cadre du projet national « BHP 2000 », la DRAST (METL) et la DDE du Cher ont contribué au financement de cette étude.

ABSTRACT

**Comparative laboratory study of the durability of two types of concrete (B30 and B80) used for the « twin bridges » at Bourges
Part II - Experimental study of the penetration of chloride ions using various methods.**

V. BAROGHEL-BOUNY, P. ROUGEAU, T. CHAUSSADENT, G. CROQUETTE

This paper presents a comparative study of the penetration of chloride ions in two types of concrete, one a B30 ordinary concrete and the other a B80 high-performance concrete containing silica fume.

Four types of laboratory study were performed on the samples of B30 and B80 concrete which were conserved for 28 or 90 days in water after mixing. These were: the AASHTO test, migration in a weak electric field (two different methods, one under constant conditions, the other under varying conditions) and diffusion with a determination of the chloride concentration profiles. The last three methods have been used to calculate an « apparent » or « effective » diffusion coefficient for chloride ions in the tested types of concrete.

These measures were performed as part of a comparative study of the two types of concrete used to construct the « twin structures » at Bourges which form part of the National BHP 2000 Project.

All the methods revealed the same trends. In particular, the experimental results have shown that the B80 high-performance concrete is better able to limit the penetration of chloride ions.