

## Influence des paramètres de composition et de cure sur la diffusivité des bétons à base de matériaux locaux

Mohamed HASSOUNE,<sup>a</sup> Fouad GHOMARI,<sup>a</sup> Abdelhafid KHELIDJ,<sup>b</sup> Abdelillah BEZZAR,<sup>a</sup>  
 Brahim TOUIL<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire Eau et Ouvrages dans leur environnement BP230, Université de Tlemcen, 13000, Algérie*

<sup>b</sup> *GeM, IUT de Saint-Nazaire, Université de Nantes, France*

---

### Résumé

La durabilité constitue l'une des préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation et la maintenance des ouvrages de génie civil. Parmi les maladies des ouvrages exposés au milieu marin, la corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé et la plus importante en termes de maintenance. Ce phénomène est la conséquence de nombreux paramètres, plus ou moins couplés, liés au matériau et au milieu environnant. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité dépend intrinsèquement de plusieurs paramètres : E/C, nature du ciment, formulation, conditions et durée de cure, etc. Un programme expérimental nous a permis d'effectuer au laboratoire, l'essai de l'isotherme d'interactions afin de déterminer la quantité des chlorures fixés sur un béton ordinaire où la matrice cimentaire utilise deux ciments de classe de résistance différentes (CEMII/A-42.5 de Béni Saf et CEMII/A-32.5 de Zahana), nos résultats obtenus montrent que l'influence du rapport E/C et la nature des ciments composés utilisés, sur la fixation des chlorures dans les bétons étudiés n'est pas très significative. Nous avons effectué également des essais de migration en régime stationnaire en vue de mesurer le coefficient de diffusion des chlorures et on a pu constater une augmentation de ce coefficient avec l'accroissement du rapport E/C pour l'ensemble des bétons étudiés, En revanche, le coefficient de diffusion diminue avec l'augmentation de la classe de résistance de ciment. De plus, une durée de cure plus longue favorise la diminution relative du coefficient de diffusion.

*Mots-clés* : Ciment, béton, porosité, durabilité, environnement marin, chlorures, coefficient de diffusion, isotherme d'interaction

### Abstract

Durability is one of the main concerns in the design, realization and maintenance of civil engineering works. Among the diseases of structures exposed to the marine environment, the reinforcement corrosion is the main cause of deterioration of reinforced concrete structures and the largest in terms of maintenance. This phenomenon is the result of many factors, more or less coupled, and related material to the environment. Concrete is more durable that it resists the penetration of aggressive agents. This quality is intrinsically dependent on several parameters: W/C, type of cement, formulation, conditions and duration of cure... An experimental program has enabled us to perform in the laboratory, test of the interactions isotherm to determine the amount of chlorides attached to a plain concrete using two strength classes of cement (CEMII/A-42.5 Beni Saf and CEMII/A-32.5 Zahana), our results show that the influence of the W/C ratio and the nature of cements used in the determination of chlorides in concrete is not considered very significant. We also performed tests of migration to measure the diffusion coefficient of chlorides and there has been an increase in the diffusion coefficient of chloride with increasing W/C ratio for all studied concretes, however, this ratio decreases with increase in the strength class of cement. In addition, a longer duration of cure favors the relative decrease of the diffusion coefficient.

*keywords* : Concrete, béton, porosity, durability, marine environment, chloride ions, diffusion coefficient, isothermal interaction.

---

### 1. Introduction

La dégradation des structures en béton armé exposés au milieu marin où à des sels de déverglaçage est en grande partie liée au transfert des ions chlorures à travers le

matériau béton. En effet, les chlorures sont un catalyseur de la dépasseivation de l'acier qui conduit à la corrosion des armatures dans le béton. La qualité du béton, en particulier sa formulation, ainsi que la nature des composants du ciment jouent un rôle prépondérant sur les transferts.

Nous nous sommes intéressés, dans ce travail, au cas du béton saturé. Lorsqu'un matériau cimentaire saturé est exposé à une solution contenant des chlorures sans gradient de pression, la pénétration des chlorures en son sein s'effectue uniquement par diffusion. Ce phénomène peut être décomposé par un processus physique qui correspond à la mobilité des ions présents en solution et un processus chimique d'interaction entre les ions chlorures et le matériau cimentaire. Donc, les chlorures peuvent être libres dans la solution interstitielle, comme on peut les trouver sous forme de nouveaux produits à base de chlorures dont le plus courant est le sel de Friedel, on dit alors que les chlorures sont liés chimiquement. Ils peuvent également être adsorbés à la surface des hydrates où intercalés entre les feuillettes de C-S-H, dans ces cas on dit que les chlorures sont physiquement liés [1]. De ce fait, la pénétration des chlorures dans les matériaux cimentaires dépend de deux paramètres fondamentaux : le coefficient de diffusion qui régit le déplacement physique des ions dans la solution interstitielle et les interactions physico-chimiques qui se créent entre les ions chlorures et la matrice cimentaire. Dans cette optique, nous avons mené les deux principaux essais suivants : essai de l'isotherme d'interaction : afin de déterminer la quantité des chlorures fixés et l'essai de migration en régime stationnaire : en vue de déterminer le coefficient de diffusion effectif.

Cette étude s'inscrit dans la continuité d'autres travaux de recherche réalisés sur un béton de référence à base de matériaux locaux mis en point par notre équipe de recherche intitulée : matériaux granulaires, affiliée au laboratoire E.O.L.E de l'université de Tlemcen (Algérie). De nombreuses données expérimentales sont maintenant disponibles sur les bétons de la région. Donc, ce travail vient compléter celui élaboré par [2] qui a effectué des essais de migration sur trois types du béton à base de matériaux locaux : un béton ordinaire, un béton auto-plaçant et un béton de haute performance (avec l'incorporation de fumée de silice). Il y a aussi le travail de [3] qui a élaboré un programme expérimental sur l'effet du couplage concentration en chlorure et gradient thermique sur la résistance à la pénétration des chlorures dans un béton ordinaire. Dans le présent travail, on s'intéresse à mesurer le coefficient de diffusion effectif, et de déterminer la capacité de fixation des ions chlorures par la matrice cimentaire d'un béton ordinaire (béton de référence) en faisant varier :

- Le rapport E/C, puisque ce rapport contrôle la plupart des propriétés du béton à l'état frais et durci.
- Le ciment, les deux ciments retenus pour cette étude sont : un CEMII/A-42.5 (Béni Saf) et un CEMII/A-32.5 (Zahana), ce choix se justifie par le fait que ces deux ciments sont les plus utilisés dans la construction dans la région de Tlemcen
- La durée de cure, étant aussi un facteur important de la qualité du béton, elle influe en effet sur le degré de

l'hydratation, donc, sur la porosité, sur la perméabilité et les propriétés de transfert du béton.

## 2. Matériaux d'étude

### 2.1. Constituants

○ Granulats : pour la composition des bétons étudiés, nous avons utilisé les granulats de la carrière de l'ENG (Sidi-Abdelli) située dans la wilaya de Tlemcen. Leurs propriétés physiques sont consignées sur le Tableau 1.

Tableau 1

Granulométrie et masses volumiques des granulats utilisés

	M <sub>v</sub> app. (g/cm <sup>3</sup> )	M <sub>v</sub> abs. (g/cm <sup>3</sup> )
Sable (0/3)	1.43	2.50
Gravillon (3/8)	1.35	2.59
Gravier (8/16)	1.42	2.59
Gravier (16/25)	1.37	2.56

○ Eau de gâchage : eau du robinet, distribuée par le réseau public de la daïra de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen. L'analyse chimique de cette eau est présentée dans le Tableau 2. Elle répond aux prescriptions de la norme [NF P 18-303].

Tableau 2

Composition de l'eau de gâchage (mg/l)

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	pH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

○ Ciment : Rappelons que le but de notre recherche n'est pas de formuler des bétons résistants à des environnements marins ; mais d'étudier l'incidence de certains paramètres sur la diffusion des chlorures au sein des bétons ordinaires. Il s'agit de bétons, à base de ciments composés de classes de résistance différentes.

Les ciments retenus pour la composition de nos bétons sont : un CEM II/A-42.5 (Béni Saf) et un CEM II/A-32.5 (Zahana). Ce choix se justifie par le fait que ces deux ciments sont les plus utilisés dans la construction dans notre région (Tlemcen - Algérie). La composition chimique, les composants minéralogiques de ces deux ciments ainsi que leurs caractéristiques physiques sont consignés dans le tableau 3 :

Tableau 3. Composition chimique, minéralogique et caractéristiques physiques des ciments utilisés

Composants (%)	CEM II/A-42.5 (Béni Saf)	CEM II/A-32.5 (Zahana)
Clinker	minimum 80%	80 à 94%
Pouzzolane naturelle	15±5%	6 à 20%
Gypse	≤5%	≤5%
Composition chimique (%)	CEM II/A-42.5	CEM II/A-32.5
SiO <sub>2</sub>	27.95	17.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.43	5.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.05	3.50
CaO	56.37	62.02
SO <sub>3</sub>	2.53	3.83
MgO	0.71	1.84
K <sub>2</sub> O	0.43	0.94
PAF	3.11	1.80
Insolubles	9.11	4.52
Composants minéralogiques (%)	CEMII/A-42.5	CEMII/A-32.5
C <sub>3</sub> S	66.89	62.14
C <sub>2</sub> S	6.91	4.21
C <sub>3</sub> A	2.23	8.36
C <sub>4</sub> AF	15.27	10.64
Caractéristiques	CEM II/A-42.5	CEM II/A-32.5
Masse volumique app. (kg/m <sup>3</sup> )	976.0	1001.3
Masse volumique abs. (kg/m <sup>3</sup> )	3071.2	3122.1
Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	3598.13	3458.0

2.2. *Formulation et caractéristiques du béton à l'état durci*

Dans le cadre de cette étude, l'ensemble des bétons testés, ont été formulés selon la méthode de Dreux-Gorisse. Ces bétons sont largement étudiés par notre laboratoire E.O.L.E, université de Tlemcen (Bétons de référence) pour lesquels de nombreuses données expérimentales sont disponibles (Tableau 4) :

Tableau 4. Composition du béton ordinaire (E/C=0.5)

Constituant	Composition (kg/m <sup>3</sup> )
Sable (0/3)	660
Gravier (3/8)	144
Gravier (8/16)	432
Gravier (16/25)	533
Ciment	350
Eau	175

Note. — Afin d'étudier l'effet du rapport E/C et de la classe de résistance du ciment dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de faire varier le E/C et de travailler à dosage constant en ciment pour la formulation de l'ensemble des bétons testés.

Le béton est fabriqué au Laboratoire de Structures (faculté de Technologie de l'université de Tlemcen - Algérie). Après un malaxage à sec durant 1 minute et un malaxage avec de l'eau durant 2 minutes, le mélange est mis en place dans des cylindres en PVC dont les dimensions sont : hauteur 22 cm et diamètre 11 cm pour les essais de diffusion et la porosité accessible à l'eau. Des éprouvettes cylindriques de dimensions 16x32 cm sont également confectionnées pour la détermination de la résistance à la compression. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures de conservation à l'air, ensuite immergées totalement dans l'eau pendant la cure.

En plus des essais principaux, d'autres essais ont été menés pour mesurer les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons étudiés, à savoir : la masse volumique sèche apparente, la porosité accessible à l'eau et la résistance à la compression à 28 jours. Ces caractéristiques sont représentées dans le tableau 5.

Tableau 5. Propriétés mécaniques et physiques des bétons

Béton	Caractéristique	E/C=0.45	E/C=0.5	E/C=0.55	E/C=0.60
CEM II/ A-42.5	R <sub>c</sub> à 28j (MPa)	38.4	35.9	29.5	25.8
	Porosité (%)	13.9	14.3	15.1	15.9
	M <sub>v</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2440	2430	2380	2340
CEM II/ A-32.5	R <sub>c</sub> à 28j (MPa)	34.2	31.5	25.8	21.5
	Porosité (%)	14.4	14.9	15.6	16.5
	M <sub>v</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2432	2396	2358	2315

On peut constater à partir du tableau 5, que la perte des résistances mécaniques à la compression est relativement forte avec l'augmentation du rapport E/C. Le rapport E/C exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage [4]. Plus le E/C est faible, plus la porosité accessible à l'eau diminue et la résistance à la compression augmente.

Aussi, la résistance mécanique à la compression à 28 jours des bétons à base du ciment CEM II/A-32.5 (Zahana) est plus faible que celle des bétons à base du ciment CEM II/A-42.5 (Béni Saf) pour le même rapport E/C, et la porosité accessible à l'eau des bétons à base du ciment CEM II/A-32,5 est plus grande. Ceci est dû à la quantité des C-S-H. En effet, le ciment CEMII/A-42.5 de Béni Saf, génère des produits d'hydratation (gel C-S-H et la portlandite) en quantités plus importantes pour remplir les pores dans la matrice [5].

### 3. Plan experimental

La figure 1, présente le programme expérimental : essai de l'isotherme d'interaction et essai de migration en régime stationnaire, avec les paramètres principaux :

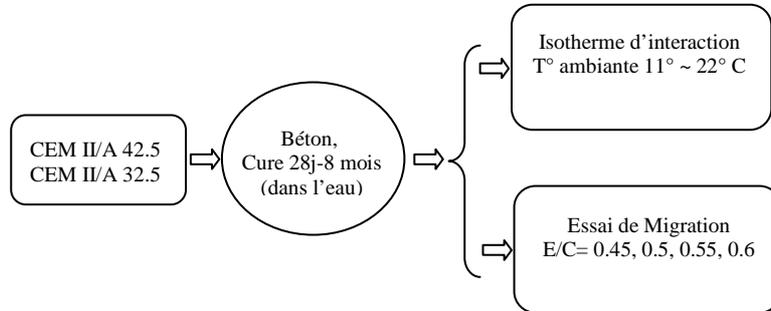


Fig. 1. Programme expérimental

#### 3.1. Essai d'isotherme d'interaction

Nous avons effectué les essais d'isotherme d'interaction suivant la méthode de L. Tang et L.O. Nilsson [6]. Cette méthode est basée sur l'adsorption des ions chlorés par un matériau réduit en poudre puis mis en contact avec une solution chlorée.

La masse d'ions chlorés fixée  $C_b$  par unité de masse solide du matériau, est donnée par l'équation (1) :

$$C_b = \frac{35.453 V (C_o - C_f)}{M} \quad (1)$$

Avec:  $C_o$  : la concentration initiale en chlorures de la solution d'immersion (mol/l),  $C_f$  : la concentration obtenue à l'équilibre (mol/l),  $V$  : le volume de solution (ml),  $M$  : la masse sèche de l'échantillon.

Les paramètres de cet essai sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6

Essais d'isotherme d'interaction – Paramètres

Ciment	CEM II/A 42.5 et CEM II/A 32.5
Durée de cure	≈ 03 mois
Granulométrie des poudres	de 0.25 à 2 mm
Température d'essai	Température ambiante (11~22°C)
Solution	NaCl, [NaOH]= 1 g/l, [KOH]= 4,65 g/l et eau déminéralisée
Concentration initiale	0.05, 0.25, 0.5, 1, 1.5, et 2 (mol Cl <sup>-</sup> /l)

La solution support préalablement préparée contient 1g/l de NaOH et 4.65g/l de KOH dans de l'eau distillée (pour limiter la modification du pH et des équilibres chimiques). Le sel NaCl a été ajouté ensuite dans la

solution support pour obtenir les concentrations en Cl<sup>-</sup> désirées : 1.775, 8.87, 17.75, 35.5, 53.25 et 71 g/l (gamme couvrant les concentrations en chlorures en milieu marin et dans les sels de déverglage).

#### 3.2. Essai de migration en régime permanent

L'essai de migration en régime permanent est une méthode accélérée qui permet de mesurer rapidement le coefficient de diffusion des ions chlorés à travers un matériau cimentaire grâce à un champ électrique.

Cet essai consiste à placer un échantillon du béton saturé sous vide par une solution basique à 1 g/l de NaOH et 4,65g/l de KOH entre deux compartiments remplis de la même solution alcaline. Le compartiment amont contient en plus, une solution chargée de 30 g/l en NaCl (concentration de la mer méditerranée). L'application du champ électrique est effectuée par l'intermédiaire de deux électrodes, l'une en acier inoxydable (cathode), placée dans le compartiment amont, l'autre en cuivre-niobium platiné (anode), placée dans le compartiment aval (Fig. 2). La tension obtenue sur les faces du disque en contact avec les solutions est contrôlée à l'aide de deux électrodes de référence. Les ions chlorures vont se déplacer au sein du béton saturé à la fois par diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration et par migration sous l'effet d'un champ électrique. La relation de Nernst-Planck 'équation (2)', permet d'obtenir le flux d'ions chlorure  $J$  créé par ces deux phénomènes dans le cas d'un béton saturé.

$$J(x, t) = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} + D_e \frac{zF}{RT} \frac{\partial E}{\partial x} C(x, t) \quad (2)$$

Avec :  $C(x,t)$  : concentration dans le béton (mol/m<sup>3</sup>),  $D_e$  : coefficient de diffusion effectif du béton (m<sup>2</sup>/s),

F: constante de Faraday = 9,648.104 J/V.mol,  
 R : constante des gaz parfaits = 8,3144 J/mol.K,  
 T : température (K), z : valence du chlore, E : potentiel électrique (V), x : distance parcourue (m), t : temps (s).

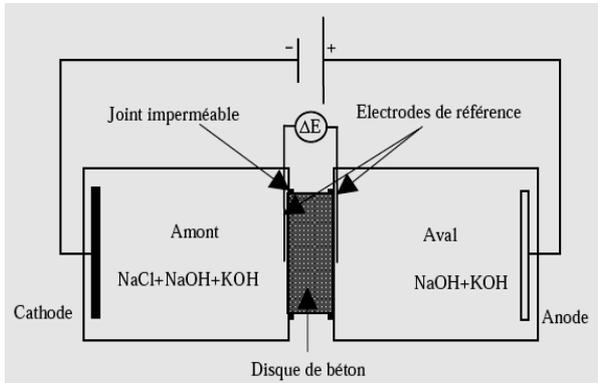


Fig. 2. Cellule de migration [DJE 07]

L'application d'un champ électrique E, suffisamment important (supérieur à 10 V) permet de négliger le premier terme de l'équation (2) relatif au flux diffusif par rapport au second relatif au flux causé par le gradient électrique [7]. Donc, le coefficient de diffusion  $D_e$  est déterminé par l'équation (3) avec  $\delta E/\delta x = \Delta E/L$ , L est l'épaisseur du disque du béton. La tension mesurée aux bornes de l'échantillon varie autour d'une valeur moyenne de 12 V.

$$D_e = \frac{JRTL}{zFC\Delta E} \quad (3)$$

Le coefficient de diffusion effectif est déterminé à partir de la mesure de la concentration en chlorures dans le compartiment aval, par dosage de solutions prélevées à intervalle de temps régulier (toutes les 24h). Ce dosage se fait par titration au nitrate d'argent  $AgNO_3$ .

Les paramètres de cet essai sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7  
 Paramètres de l'essai de migration

Béton	CEM II/A-42.5	CEM II/A-32.5
Age	1 et 8 mois	1 mois
E/C	0.45, 0.5, 0.55 et 0.6	
Volume de la solution dans la cathode	1.82 litres	
Température d'essai	Température ambiante (≈ 21°C)	
Diamètre d'échantillon	≈ 11cm	
Epaisseur d'échantillon	≈ 5cm	

Solution à la cathode	[NaCl] =30 g/l, [NaOH] = 1 g/l, [KOH] = 4,65 g/l et eau déminéralisée
Solution à l'anode	[NaOH] = 1 g/l, [KOH] = 4,65 g/l, et eau déminéralisée
Champ électrique	≈ 12 V
Méthode de saturation des échantillons	Sous vide, dans un dessiccateur, avec une solution de NaOH] = 1 g/l, [KOH] = 4,65 g/l et eau déminéralisée

## 4. Résultats et interprétation

### 4.1. Influence sur le coefficient de diffusion

Sur les figures 3, 4 et 5, nous présentons les résultats obtenus pour les essais de migration.

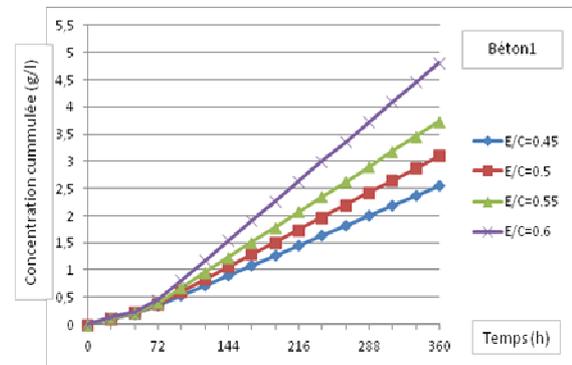


Fig. 3. Evolution de la concentration des  $Cl^-$  en fonction du temps (béton1)

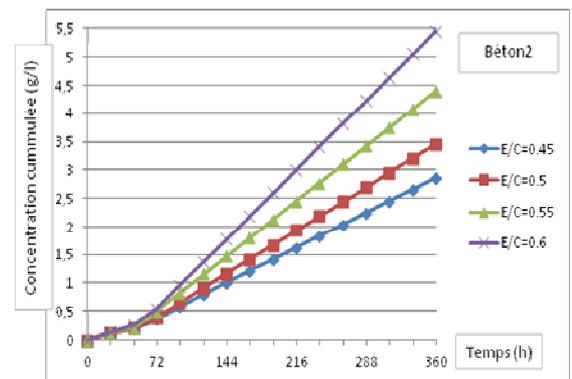
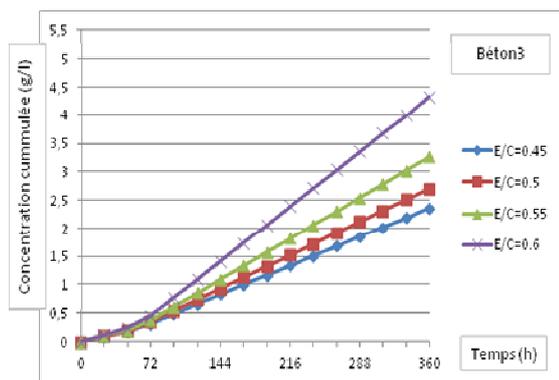


Fig. 4. Evolution de la concentration des  $Cl^-$  en fonction du temps (béton2)


 Fig. 5. Evolution de la concentration des Cl<sup>-</sup> en fonction du temps (béton3)

Avec :

Béton1 : béton à base d'un ciment CEM II/A-42.5 de BéniSaf (≈ 1 mois de cure)

Béton2 : béton à base d'un ciment CEM II/A-32.5 de Zahana (≈ 1 mois de cure)

Béton3 : béton à base d'un ciment CEM II/A-42.5 de BéniSaf (après 8 mois de cure)

On constate d'après ces résultats que le régime permanent est atteint après 2 à 3 jours, la variation de la quantité de chlorures passant à travers les échantillons est devenue linéaire en fonction du temps.

Les valeurs des coefficients de diffusion mesurées sont reportées dans le Tableau 8.

Tableau 8

Essai de migration - Résultats des coefficients de diffusion

Rapport E/C	0.45	0.5	0.55	0.6
$D_e \cdot 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s) (Béton1)	2.86	3.52	4.32	5.65
$D_e \cdot 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s) (Béton2)	3.22	3.96	5.04	6.35
$D_e \cdot 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s) (Béton3)	2.65	3.05	3.73	5.02

o Les résultats montrent que le coefficient de diffusion des chlorures  $D_e$ , déterminé pour les bétons testés, augmente avec l'augmentation du rapport E/C (Fig. 6) ; ce qui conduit à une augmentation de la pénétration des chlorures dans les bétons dont le E/C est élevé. Ce résultat s'accorde bien avec les recherches de [1] et [8]. Ainsi, ce coefficient de diffusion est réduit de 50% lorsque le rapport E/C passe de 0,60 à 0,45.

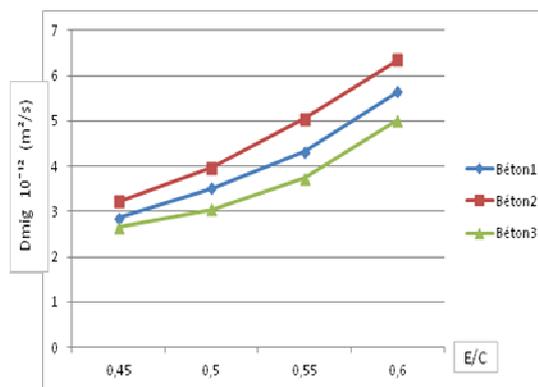


Fig. 6. Evolution du coefficient de diffusion en fonction de E/C

Selon [9], plus le rapport E/C est faible, plus, initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates. Aussi, l'utilisation d'une très grande quantité d'eau par rapport à la masse de ciment (E/C élevé), a pour conséquence l'éloignement des grains de ciment les uns des autres et, après leur hydratation complète, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La diffusion du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles. Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible), les grains de ciment sont très proches les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire. La diffusion du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées.

La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible, la porosité capillaire est constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu [9]. En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnection y est plus faible [10]. La diffusion s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des ions chlorures.

La diminution de  $D_e$  avec le rapport E/C, peut être expliquée aussi par l'augmentation de la tortuosité du cheminement poreux et par la présence dans ces chemins, de régions constituées de gel hydraté microporeux [11]. Une diminution du rapport E/C, réduit la porosité totale, réduit la connectivité, et augmente le resserrement et la tortuosité et donc, améliore la qualité et les performances du béton [11].

o Ces résultats permettent aussi de constater une diminution du  $D_e$  en utilisant un CEM II/A-42.5 de BéniSaf par rapport à un CEM II/A-32.5 de Zahana (Fig. 6). On peut expliquer cette diminution de coefficient de

diffusion en utilisant un CEM II/A-42.5 de Béni Saf, par la quantité de silice dans ce ciment qui est plus importante par rapport à celle dans le ciment CEM II/A-32.5 de Zahana. Le SiO<sub>2</sub> et le CaO se combinent pour former le silicate tricalcique et bicalcique (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S), et l'hydratation de ces deux constituants permet la formation du gel de C-S-H, qui remplit progressivement la porosité.

○ On peut également constater que D<sub>e</sub> diminue si on augmente la période de cure du béton. En effet, une cure plus longue favorise la formation d'une plus grande quantité d'hydrates (notamment les C-S-H) qui viennent combler et fractionner davantage la porosité capillaire, particulièrement pour les bétons à base de ciments composés. La durée de la période de cure influence fortement la diffusivité du béton ; une période de cure humide plus longue réduit le coefficient de diffusion.

4.2. Influence sur la fixation des Cl

Sur les figures 7 et 8, nous présentons les résultats obtenus pour les essais de l'isotherme d'interaction.

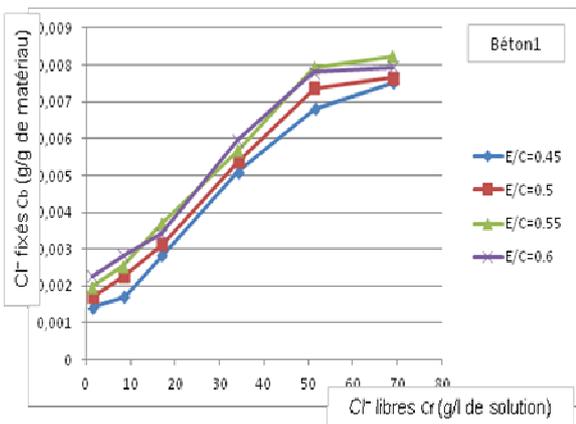


Fig. 7. Tracé des isothermes d'interaction du Béton 1

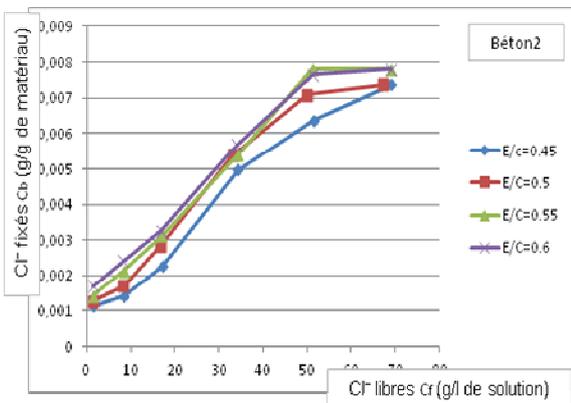


Fig. 8. Tracé des isothermes d'interaction du Béton 2

○ Nos résultats obtenus par l'essai de l'isotherme d'interaction (figures 7 et 8), montrent que la quantité des chlorures fixés augmente avec la concentration des

chlorures dans la solution initiale, ce qui confirme, entre autres, les résultats de [2], [5] et [12], etc. Selon [12], la fixation des chlorures dans les bétons augmente avec la concentration de la solution initiale du fait d'un phénomène d'adsorption multicouche par présence de charges électriques sur les surfaces des hydrates, notamment les C-S-H qui sont à l'origine de formation d'une double couche, dans laquelle il existe un certain nombre de sites d'échanges.

○ Nous constatons aussi que, l'influence du rapport E/C sur la fixation des chlorures dans toutes les gammes n'est pas très significative. Une très légère augmentation de cette fixation avec le E/C, qu'on peut remarquer sur les deux figures 7 et 8, pourrait s'expliquer par l'augmentation de la capacité de formation des C-S-H particulièrement responsables de la fixation physique des chlorures, pour les bétons à E/C élevés. Mais il faut aussi noter, que le rapport E/C influence la fixation des chlorures par la matrice cimentaire, notamment la fixation physique qui dépend de la taille des pores et de la quantité des C-S-H (fixation physique). De plus, la porosité et la perméabilité d'un mélange qui augmentent avec le rapport E/C, procurent ainsi une plus grande accessibilité aux chlorures vers les particules de ciment non-hydraté, particulièrement le C<sub>3</sub>A (fixation chimique). Et comme le E/C présente une incidence sur la porosité capillaire, il en va de même pour la fixation des chlorures. Toutefois, comme la détermination de cette interaction se fait souvent sur les bétons broyés, rares sont les auteurs qui ont vu cette influence. Donc, c'est plus la manière dont est effectuée la détermination qui masque l'effet de E/C sur la fixation des chlorures par la matrice cimentaire. Il faudrait alors envisager d'effectuer les mesures par d'autres méthodes pour vérifier cette influence.

○ On peut constater également à partir de ces résultats que, la capacité de fixation des chlorures par la matrice cimentaire, n'est pas très influencée par les deux types de ciment utilisés (CEM II/A-42.5 de Béni Saf et CEM II/A-32.5 de Zahana). Cela peut être expliqué par la quantité des C-S-H formée qui est plus importante dans le ciment de Béni Saf. Sachant que, les chlorures sont susceptibles de s'adsorber physiquement sur la paroi des C-S-H. En revanche, la quantité des aluminates, notamment le C<sub>3</sub>A dans le ciment CEM II/A-32.5 de Zahana étant plus grande que celle du Ciment CEM II/A-42.5 de Béni Saf, ce paramètre, conduit à une fixation chimique plus grande des chlorures [13] (le C<sub>3</sub>A réagissant avec les chlorures pour produire le sel de Friedel). Il y a donc, une compétition entre deux types de fixation (chimique et physique) des chlorures. Ce qui pourrait conduire à une quantité de chlorures fixés plus ou moins similaires dans les deux bétons.

## 5. Conclusion

Dans le cadre de cette étude expérimentale, le coefficient de diffusion et les interactions physico-chimiques des Cl<sup>-</sup> au sein des bétons ordinaires à base du CEM II/A-42.5 de Béni Saf et CEM II/A-32.5 de Zahana et à différents rapport E/C ont été étudiés.

Nous avons effectué des essais de l'isotherme d'interactions suivant la méthode de L. Tang et L.O. Nilsson. Les résultats obtenus montrent que l'influence du rapport E/C et la nature des ciments composés utilisés, sur la fixation des chlorures dans les bétons étudiés n'est pas très significative.

Nous avons effectué également des essais de migration en régime stationnaire pour étudier l'influence des paramètres précités sur le coefficient de diffusion des chlorures. Nous constatons une augmentation du coefficient de diffusion effectif des chlorures avec l'accroissement du rapport E/C pour les bétons étudiés. En revanche, ce coefficient diminue avec l'augmentation de la classe de résistance des ciments. De plus, une durée de cure plus longue favorise la diminution relative du coefficient de diffusion.

Les résultats de nos travaux montrent implicitement que les bétons ordinaires testés présentent une durabilité potentiellement faible eu égard aux coefficients de diffusion des chlorures mesurés. Il n'est donc pas recommandé de les utiliser pour la réalisation d'ouvrages en mer où sur les différentes façades maritimes de la région.

## Remerciements

Nos remerciements s'adressent au projet de coopération Algéro-Français Tassili 10MDU811.

## Références

- [1] A. Ben Fraj, 'Transfert dans les bétons non saturés : influence des laitiers et de l'endommagement mécanique', Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2009.
- [2] B. Touil, 'Etude de la diffusion des bétons locaux', Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2009.
- [3] A. Belarouci, 'Influence de la température sur la diffusion dans les bétons locaux', Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [4] A. Djerbi, 'Influence de l'endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlorure des bétons', Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2007.
- [5] S. Mamouri, F. Ghomari, A. Baghli 'Evolution de la porométrie des pâtes de ciment', Séminaire National de Génie Civil, Chlef, Algérie, 2008.
- [6] L. Tang and L.O. Nilsson, 'Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars', *Cement and Concrete Research*, vol. 23, pp. 247-253, 1993.
- [7] C. Andrade, 'Calculation of chloride diffusion coefficient in concrete from ionic diffusion measurements', *Cement and Concrete Research*, vol. 23, pp. 724-742, 1993.
- [8] H. Yigiter, H. Yazici, and S. Aydin, 'Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete. Building and environment, 42(4), 1770-1776, 2007.
- [9] Gagné et Aïtcin, 'Superplasticizers for durable concrete', Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, 1993.
- [10] D. Quénard, H. Sallée, 'Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment', *Cahiers du CSTB*, n° 2525, 1991.
- [11] K. Scrivener, 'The development of microstructure during the hydration of Portland cement', Impérial collège de Londres, Angleterre, 1984.
- [12] K. Byfors, 'Chloride-initiated reinforcement corrosion, Chloride binding', CBI Report, 1990.
- [13] M. Tahlaïti, 'Etude de la pénétration des chlorures et de l'amorçage de la corrosion en zone saturée et en zones de marnage', Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, France, 2010.