



UNIVERSITE DE LIEGE – FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

*Année académique 2014 – 2015*

---

# **Effet des hydrofuges sur la diffusion des ions chlorés**

---

Travail de fin d'études réalisé par

LOREDANA CASASANTA

en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil des Constructions

Promoteur : Luc COURARD

Jury : Boyan MIHAYLOV

Jean-Marc FRANSSSEN

Pierre PAQUET

Emmanuel CAILLEUX (membre extérieur)

## Énoncé : Effet des hydrofuges sur la diffusion des ions chlorures

La protection du patrimoine historique en béton (armé) est un défi pour les années à venir. De nos jours, un grand nombre de ces ouvrages présente des dégradations qui menacent à long terme la durabilité de la structure. Étant donné que ces dégradations sont principalement dues aux infiltrations d'eau et autres agents agressifs provenant de l'environnement, l'utilisation de produits d'entretien est essentielle afin de prolonger la durée de vie de ces ouvrages. L'une des techniques les plus prometteuses consiste à appliquer un agent hydrofuge de surface sur le béton de façon à ce que la mouillabilité de celui-ci soit diminuée. Par conséquent, la pénétration de l'eau dans les capillaires du béton est empêchée, ou du moins retardée, et l'apparition de nombreuses pathologies est limitée.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, l'influence des hydrofuges de surface sur la perméabilité aux chlorures des bétons est étudiée. L'objectif est de pouvoir confirmer ou infirmer, au moyen de différents essais, que ces derniers constituent un bon produit de protection afin de garantir la durabilité du patrimoine en béton armé. Le travail est réalisé en collaboration avec la société « Sika » qui fournit les hydrofuges étudiés.

D'abord, une recherche bibliographique est effectuée. D'une part, elle reprend une brève présentation de la situation actuelle du patrimoine, suivie d'une explication théorique des processus de transport et des différents mécanismes de dégradations. D'autre part, les divers types de réparations et protections possibles, en particulier les produits hydrofuges pour des structures en béton armé, y sont exposés.

Ensuite, la partie expérimentale est abordée. Celle-ci comporte une description du choix des matériaux utilisés pour la composition et la fabrication des mortiers. Puis, l'efficacité de deux types d'hydrofuges est étudiée ainsi que leur influence en fonction de différents rapports  $E/C$ . Pour ce faire, non seulement des essais d'absorption capillaire et d'angle de contact, mais également des essais de diffusion en régime stationnaire et transitoire et un essai de conduction sont réalisés.

Enfin, la dernière partie de ce travail comporte l'observation et l'analyse des résultats obtenus. En premier lieu, une interprétation des résultats pour chaque essai individuellement est effectuée en vue de mettre en évidence l'influence des hydrofuges et des rapports  $E/C$ . En second lieu, des comparaisons entre les résultats des différents essais sont réalisées afin de pouvoir éventuellement démontrer une corrélation entre les essais.

Signatures des membres du jury :



L. COURARD



B. MIHAYLOV



J.-M. FRANSSSEN



P. PAQUET



E. CAILLEUX

# Résumé

Loredana Casasanta

Deuxième année du grade de master en ingénieur civil des constructions, à finalité approfondie

Année académique 2014-2015

---

## **Effet des hydrofuges sur la diffusion des ions chlorures**

---

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'étudier l'influence des hydrofuges de surface sur la pénétration des ions chlorures. Étant donné que l'absorption d'eau par capillarité est à l'origine de la diffusion des ions chlorures dans le béton, c'est ce phénomène qui doit être réduit.

Les hydrofuges de surface vont diminuer l'absorption d'eau en modifiant les tensions de surfaces afin de repousser l'eau. En effet, les agents hydrofuges pénètrent à l'intérieur du béton où ils se fixent aux parois internes des pores. Ces produits ne bouchent pas les pores, mais les tapissent avec un film très fin qui conduit à la réduction des tensions superficielles. Dès lors, une goutte d'eau restera sous forme sphérique sur la surface et ne s'étalera pas.

Les deux types d'hydrofuges choisis pour l'étude sont, un silane avec un taux de matière active de 99 % sans solvant et un silane avec un taux de matière active de 40 % en phase aqueuse. Par ailleurs, trois rapports  $E/C$  ont été sélectionnés afin de mettre en évidence l'influence des hydrofuges sur la porosité. Il s'agit de rapports  $E/C = 0,5; 0,6$  et  $0,7$ .

Cinq essais ont été réalisés ayant comme but l'estimation de l'efficacité des hydrofuges contre d'une part l'absorption d'eau et d'autre part la diffusion des ions chlorures. En outre, pour avoir une idée de la durabilité de ces hydrofuges, des échantillons ont été soumis à un essai de vieillissement artificiel simulant des conditions similaires à celles trouvées dans l'environnement.

Les essais sont :

- l'absorption d'eau par capillarité (sur échantillons non vieillis et vieillis)
- l'angle de contact (sur échantillons non vieillis et vieillis)
- la diffusion en régime stationnaire
- la diffusion en régime transitoire
- la conduction sous champ électrique

Finalement, sur base des observations et analyses réalisées, l'hydrofuge fortement actif est légèrement plus efficace à courte durée, mais beaucoup plus efficace à longue durée. De plus, les deux hydrofuges ont plus d'effet pour des rapport  $E/C$  plus élevé.

# **Abstract**

Loredana Casasanta

Second year of the Master's degree in Civil Engineering

Academic year 2014-2015

---

## **Hydrophobic treatment effect on the diffusion of chloride ions**

---

The purpose of this Master's thesis is the study of influence of hydrophobic surface treatment on the penetration of chloride ions. Since the capillary water absorption is responsible for the diffusion of chlorides ions in the concrete, it is this phenomenon, which must be reduced.

Hydrophobic surface treatment will decrease the absorption of water by changing the tension surfaces to repel water. Indeed, the water repellent agents penetrate into concrete where they attach to the inner walls of the pores. These products will not clog pores, but lining them with a very thin film, which leads to the reduction of surface tension. Therefore, a drop of water will remain in spherical form on the surface and will not be spread.

The two types of hydrophobic treatment selected for the study are a silane with an active matter content of 99% without solvent and a silane with an active matter content of 40% in aqueous phase. In addition, three  $W/C$  ratios were selected to highlight the influence of hydrophobic treatment on porosity. These ratios are  $W/C = 0,5; 0,6 \text{ and } 0,7$ .

Five trials were conducted with the objective of assessing the efficacy of repellent products against on one hand the absorption of water and on the other hand the diffusion of chloride ions. Moreover, to get an idea of the durability of these waterproof treatments, samples were subjected to an artificial aging test simulating similar conditions to those found in the environment.

The tests are:

- capillary water absorption (on unaged and aged samples)
- contact angle (on unaged and aged samples)
- diffusion in steady-state
- bulk diffusion test
- rapid chloride permeability test

Finally, based on observation an analysis, the highly active hydrophobic treatment is slightly more effective in short-term, but much more effective in long term. In addition, the two hydrophobic treatment are more effective for a higher  $W/C$  ratio.

## **Remerciements**

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Courard, promoteur de ce travail de fin d'études, pour sa présence et son suivi tout au long du quadrimestre et pour ses réponses aux questions ou problèmes rencontrés.

De même je remercie vivement Monsieur Michel, pour ses suggestions et conseils apportés pendant toute la durée de ce travail.

Par ailleurs, un grand merci s'adresse à l'ensemble des membres du laboratoire de matériaux de construction, en particulier à Amaury Daras, Monique Denotte, Fabienne Libioule et Véronique Szepetiuk pour leur disponibilité, pour leurs aides et leurs précieuses explications lors des essais.

Je remercie également Vincent Lucquiaud pour son aide.

De plus, j'adresse mes remerciements à Monsieur Mihaylov, Monsieur Franssen, Monsieur Paquet et Monsieur Cailleux pour la lecture pour ce travail.

Finalement, je remercie ma sœur et mon père pour leur soutien tout au long de mes études.

---

# *Table des matières*

---

Introduction générale .....	1
Partie A : Partie théorique.....	3
Chapitre I : Patrimoine historique en béton (armé).....	4
1 Situation du patrimoine.....	4
2 Durabilité du patrimoine historique .....	5
Chapitre II : Types et origines des dégradations.....	7
1 Dégradations subies uniquement par le béton.....	7
1.1 Causes physiques.....	7
1.1.1 Cycles gel/dégel.....	7
1.1.2 Effet des sels de déverglaçage.....	8
1.2 Causes chimiques.....	8
1.2.1 Dissolution .....	8
1.2.1.1 Attaque par les acides .....	8
1.2.1.2 Attaque par l'eau de mer.....	8
1.2.2 Démembrement-Attaques par les sulfates .....	9
1.3 Réaction alcali-granulats .....	9
2 Corrosion des armatures en acier .....	9
3 Dégradation combinée entre le béton et l'armature.....	11
3.1 Carbonatation.....	11
3.2 Par les chlorures.....	12
3.2.1 Origine des chlorures .....	12

3.2.2	Types de chlorures .....	13
3.2.3	Processus.....	13
Chapitre III :	Mécanismes de transport (des chlorures) dans le béton .....	15
1	La porosité.....	16
2	La perméation.....	16
3	Absorption d'eau par capillarité.....	17
4	Migration sous champ électrique.....	18
5	Diffusion.....	18
5.1	Loi de diffusion en régime permanent.....	19
5.2	Loi de diffusion en régime non permanent (cas où l'espèce ionique et le solide n'interagisse pas) .....	19
5.2.1	Formulation de la deuxième loi de Fick.....	19
5.2.2	Résolution de la deuxième relation de Fick .....	20
5.3	Les facteurs influençant la diffusion .....	21
6	Conclusion .....	21
Chapitre IV :	Techniques et matériaux de réparation d'une construction en béton.....	23
1	Types de dégradation et matériaux d'intervention.....	23
1.1	Causes et traitement des fissures.....	23
1.2	Causes et traitement des épaufrures et désagrégations.....	24
1.3	Corrosion des barres d'armatures.....	24
2	Techniques de protection par revêtement .....	24
2.1	Les Membranes d'imperméabilisation.....	25
Chapitre V :	Les hydrofuges .....	26
1	Les effets des hydrofuges.....	26
1.1	Le comportement capillaire .....	27

1.2	L' « effet perlant » .....	28
2	Les types d'hydrofuges.....	29
2.1	Hydrofuges de masse .....	29
2.2	Hydrofuges superficiels.....	29
2.3	Hydrofuges pénétrants.....	30
Chapitre VI : Pourquoi choisir des hydrofuges comme technique de protection pour le patrimoine ? .....		35
Partie B : Partie expérimentale .....		36
Chapitre VII : Choix et caractéristiques des matériaux utilisés.....		37
1	Choix des hydrofuges utilisés.....	37
2	Matériaux utilisés.....	37
2.1	Le ciment.....	37
2.2	Les sables .....	38
Chapitre VIII : Composition et fabrication des mortiers.....		39
1	Introduction.....	39
2	Détermination du nombre d'échantillons nécessaires .....	39
3	Composition des mortiers.....	40
3.1	Malaxage du mortier et test de consistance sur mortier frais .....	43
4	Réalisation des mortiers.....	45
4.1	Test sur mortier frais (33) .....	47
4.2	Test sur béton durci.....	47
5	Confection des échantillons .....	48
6	Application des hydrofuges.....	50
Chapitre IX : Description des essais.....		51
1	Introduction.....	51

2	Efficacité des hydrofuges .....	51
2.1	Absorption d'eau par capillarité.....	51
2.1.1	But de l'essai.....	51
2.1.2	Mode opératoire .....	52
2.1.3	Détermination du coefficient de transmission de l'eau liquide .....	53
2.2	Angle de contact.....	53
2.2.1	But de l'essai.....	53
2.2.2	Préparation des échantillons.....	53
2.2.3	Mode opératoire .....	53
3	Vieillessement artificiel .....	54
3.1.1	But de l'essai.....	54
3.1.2	Préparation des échantillons.....	54
3.1.3	Mode opératoire .....	54
4	Diffusion en régime stationnaire .....	55
4.1	But de l'essai .....	55
4.2	Composition des cellules de diffusion.....	55
4.3	Préparation des échantillons .....	56
4.4	Mode opératoire.....	56
4.5	Détermination du coefficient de diffusion effectif .....	57
5	Diffusion en régime transitoire .....	58
5.1	But.....	58
5.2	Préparation des échantillons .....	58
5.3	Mode opératoire.....	58
5.4	Prélèvements.....	59

5.5	Filtrage et titrage .....	60
5.6	Détermination du coefficient de diffusion apparent.....	60
6	Essai de conduction.....	62
6.1	But.....	62
6.2	Préparation des échantillons .....	62
6.3	Mode opératoire.....	62
6.4	Principe de mesure .....	63
7	Récapitulatif du nombre d'échantillons à tester pour chaque essais .....	65
Partie C : Observation et analyse des résultats .....		66
Chapitre X : Observations .....		68
1	Absorption d'eau par capillarité.....	68
1.1	Échantillons non vieillis .....	68
1.1.1	Évolution de l'absorption capillaire $w$ au cours du temps.....	68
1.1.2	Coefficients d'absorptivité $w$ .....	70
1.2	Échantillons vieillis .....	71
1.2.1	Évolution de l'absorption capillaire $w$ au cours du temps.....	71
1.2.2	Coefficients d'absorptivité $w$ .....	73
1.3	Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis.....	74
1.3.1	Comparaison des coefficients d'absorptivité $w$ .....	74
2	Angles de contact.....	74
2.1	Échantillons non vieillis .....	74
2.2	Échantillons vieillis .....	76
2.3	Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis.....	77
3	Diffusion en régime stationnaire .....	78

3.1	Béton cellulaire.....	78
3.2	Mortier .....	79
4	Diffusion en régime transitoire .....	83
4.1	Profils de concentration en chlorures.....	83
5	Conduction sous champs électrique.....	85
5.1	Évolution de l'intensité du courant au cours du temps .....	85
5.2	Charge électrique totale .....	86
Chapitre XI : Analyse et interprétation des résultats.....		87
1	Absorption d'eau par capillarité.....	87
1.1	Échantillons non vieillis .....	87
1.2	Échantillons vieillis .....	88
1.3	Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis.....	89
2	Diffusion en régime stationnaire .....	89
2.1	Béton cellulaire.....	89
3	Diffusion en régime transitoire .....	91
4	Conduction sous champs électrique.....	92
Chapitre XII : Tendances entre les différents résultats .....		94
1	Absorption capillaire et angle de contact.....	94
2	Diffusion des ions chlorures.....	94
Chapitre XIII : Conclusions générales.....		95
Bibliographie .....		97
Partie D : Annexe.....		i
Annexe 1	Consommation appliquée en hydrofuge sur les échantillons.....	ii
Annexe 2	Essai d'absorption d'eau par capillarité .....	iv
Annexe 3	Angles de contact.....	xi

Annexe 4	Diffusion en régime stationnaire .....	xiv
Annexe 5	Diffusion en régime transitoire .....	xix
Annexe 6	Conduction sous champs électrique .....	xxi

---

# *Table des figures*

---

Figure 1 : Diagramme de Pourbaix .....	10
Figure 2 : Processus de carbonatation.....	12
Figure 3 : Corrosion initiée par la carbonatation .....	12
Figure 4 : Corrosion initiée par des chlorures .....	14
Figure 5 : Zones d'exposition aux chlorures .....	15
Figure 6 : Action des traitements de surface .....	26
Figure 7 : Effet de l'application d'un hydrofuge sur la tension superficielle et la capillarité... 27	
Figure 8 : Angle de contact et énergies libres de surface.....	28
Figure 9 : Bonne et mauvaise mouillabilité.....	28
Figure 10 : Exemple de formulation des silicones/polysiloxane .....	30
Figure 11 : Hydrolyse.....	31
Figure 12 : Condensation .....	31
Figure 13 : Formation du polysiloxane .....	32
Figure 14 : Molécule de silane .....	32
Figure 15 : Molécule de siloxane .....	33
Figure 16 : Granulométrie des sables utilisés.....	38
Figure 17 : Courbes normalisées « EN 196 » .....	40
Figure 18 : Granulométrie pour sable normalisé .....	41
Figure 19 : Granulométries pour 2 quantités en fines.....	42
Figure 20 : Résistance à la flexion.....	47
Figure 21 : Résistance à la compression .....	48

Figure 22 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,5$ non vieilli.....	68
Figure 23 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,6$ non vieilli.....	69
Figure 24 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,7$ non vieilli.....	69
Figure 25 : Coefficients d'absorption pour les échantillons non vieillis.....	70
Figure 26 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,5$ vieilli.....	71
Figure 27 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,6$ vieilli.....	72
Figure 28 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour $E/C = 0,7$ vieilli.....	72
Figure 29 : Coefficients d'absorption pour les échantillons vieillis.....	73
Figure 30 : Comparaison entre <i>w<sub>nonvieilli</sub></i> et <i>w<sub>vieilli</sub></i> pour un $E/C = 0,5$ .....	74
Figure 31 : Angles de contact pour échantillons non vieillis.....	75
Figure 32 : Angles de contact pour $E/C = 0,5$ non vieilli.....	75
Figure 33 : Angles de contact pour échantillons vieillis.....	76
Figure 34 : Angles de contact pour $E/C = 0,5$ vieilli.....	77
Figure 35 : Comparaison des angles de contact pour $E/C = 0,5$ .....	77
Figure 36 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures pour béton cellulaire....	79
Figure 37 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures pour Série 1.....	80
Figure 38 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures pour Série 2.....	80
Figure 39 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures pour Série moyenne.....	81
Figure 40 : Comparaison des courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures.....	82
Figure 41 : Profils de concentration en chlorures totaux.....	83
Figure 42 : Profils de concentration en chlorures totaux pour l'hydrofuge A.....	84
Figure 43 : Profils de concentration en chlorures totaux pour l'hydrofuge B.....	84
Figure 44 : Intensité du courant pour tous les échantillons testés.....	85
Figure 45 : Charge électrique totale ayant traversées l'échantillon.....	86

Figure 46 : Coefficients de diffusion effectifs pour béton cellulaire .....	90
Figure 47 : Coefficients de diffusion apparents.....	91
Figure 48 : Courbe de titrage potentiométrique (10).....	xv

---

# *Table des tableaux*

---

Tableau 1 : Teneur en chlorures admissible selon la norme « NBN EN 206-1 » (2).....	12
Tableau 2 : Classification de la mouillabilité en fonction de l'angle de contact (24).....	28
Tableau 3 : Pourcentage de passant pour les trois types de sables .....	40
Tableau 4 : Masses pour les trois rapports <i>E/C</i> .....	42
Tableau 5 : Masses pour les deux compositions .....	43
Tableau 6 : Étalements et classe de consistance pour les trois rapports <i>E/C</i> .....	44
Tableau 7 : Masses des constituants.....	45
Tableau 8 : Masses finales pour la réalisation des mortiers .....	45
Tableau 9 : Étalements mortiers finaux .....	47
Tableau 10 : Informations sur les échantillons .....	49
Tableau 11 : Consommations admissibles pour chaque dimension d'échantillon.....	50
Tableau 12 : Classe de perméabilité pour béton.....	64
Tableau 13 : Nombre d'échantillons à tester.....	65
Tableau 14 : Classification de la perméabilité à l'eau liquide.....	70
Tableau 15 : Diminutions pour échantillons non vieillis.....	87
Tableau 16 : Diminutions pour échantillons vieillis.....	88
Tableau 17 : Augmentation des coefficients d'absorption .....	89
Tableau 18 : Coefficients de diffusion effectifs .....	89
Tableau 19 : Diminution de la charge électrique totale.....	93

---

# *Table des photos*

---

Photo 1 : Saint-Nazaire, entrée de « L'escale atlantique » .....	5
Photo 2 : Malaxeur pour <b>4l</b> de mortier .....	43
Photo 3 : Étalements.....	44
Photo 4 : Constituants utilisés.....	46
Photo 5 : Malaxeur.....	46
Photo 6 : Moule.....	46
Photo 7 : Table à secousses.....	46
Photo 8 : Confection (carottage et sciage) des échantillons.....	49
Photo 9 : Dispositif pour l'essai.....	52
Photo 10 : Appareillage pour mesure l'angle de contact.....	54
Photo 11 : Cellules de diffusion stationnaire.....	55
Photo 12 : Échantillons après <b>35 jours</b> dans la solution de <b>NaCl</b> .....	59
Photo 13 : Grignoteuse .....	59
Photo 14 : Mise à ébullition et filtrage .....	60
Photo 15 : Cellule de diffusion accélérée et générateur .....	63
Photo 16 : Titracteur automatique .....	xv

## *Introduction générale*

---

À l'heure actuelle, nombreux sont les ouvrages ayant subis les affronts du temps et présentant des dégradations plus ou moins « dangereuses ». Cette dangerosité des dégradations est fonction d'un seuil de dégradation et aussi longtemps que les dégradations se trouvent au-delà, la structure est considérée comme étant durable et elle est sans aucun risque pour les gens. Cependant, dès que la dégradation tombe en-dessous de cette valeur seuil, il y a imminence de réagir (1).

Dès lors, beaucoup d'ouvrages considérés comme faisant partie du patrimoine, se voient dégradés, transformés voire démolis puisque la restauration de ce dernier exige des règles strictes, tels que le respect de l'apparence, de la couleur et de la texture d'origine (2) et s'avère parfois plus chère que la démolition. De plus, étant donné que la plupart de ces dégradations sont dues aux infiltrations d'eau, pouvant contenir des agents agressifs de l'environnement, il devient nécessaire de réduire ces absorptions d'eau. Ainsi, pour la protection du patrimoine, des techniques présentant les 3 caractéristiques sont recherchées, à savoir :

- pas de modification de l'apparence
- faible coût
- limitation de l'absorption d'eau

C'est là, que les hydrofuges font face. En effet, en ne modifiant que très peu voire pas du tout l'esthétique de la surface, tout en la protégeant des infiltrations d'eau pour un prix convenable, l'utilisation des produit hydrofuge est une des techniques les plus prometteuses pour la protection du patrimoine dans les années à venir.

Dans le cadre de ce travail, l'effet des hydrofuges sur la diffusion des ions chlores est analysé. Étant donné que les ions chlores pénètrent d'abord par absorption capillaire dans le béton, lorsque celui-ci est sec, l'effet des hydrofuges sur ce mécanisme doit également être étudié.

La première partie de ce travail consiste à résumer les connaissances théoriques. D'abord, une brève description des différents types de dégradations subies par le béton est faite. Ensuite, les divers mécanismes de transport sont décrits et quelques méthodes de protection sont illustrées. Enfin, une explication plus détaillée sur les hydrofuges est faite.

La deuxième partie appelée « partie expérimentale » explique dans un premier temps la composition et fabrication des échantillons. Dans un second temps, une description des différents essais réalisés est faite. Cinq essais seront effectués, afin d'étudier l'effet des hydrofuges. Dans un premier temps, un essai d'absorption capillaire et angle de contact est réalisé. Dans un second temps, trois essais seront réalisés pour représenter la diffusion des ions chlores, notamment la diffusion en régime stationnaire, la diffusion en régime transitoire et la conduction sous champs électrique.

En outre, deux types d'hydrofuges pénétrants seront examinés, l'un qualifié comme étant le « bon » hydrofuge « Hydrofuge A » et l'autre le « mauvais » hydrofuge « Hydrofuge B ». De plus,

pour étudier l'effet des hydrofuges sur la porosité, trois rapports  $E/C = 0,5; 0,6$  et  $0,7$  ont également été testés.

La troisième et dernière partie, comporte l'observation et l'analyse des résultats. En premier lieu, une interprétation des résultats pour chaque essai individuellement est effectuée en vue de mettre en évidence l'influence des types et consommation d'hydrofuges et des rapports  $E/C$ . En second lieu, des comparaisons entre les résultats des différents essais sont réalisées afin de pouvoir éventuellement démontrer une corrélation entre les essais. Cette comparaison est faite uniquement sur base de ce que peut être observé à l'œil, sans analyse statistique.

En conclusion, le but de ce travail de fin d'études est de pouvoir confirmer ou infirmer un empêchement, ou du moins un retardement, de la pénétration des ions chlorures à l'intérieur du béton.

---

## **Partie A : Partie théorique**

---

## **Chapitre I : Patrimoine historique en béton (armé)**

---

Le patrimoine peut avoir différentes significations en fonction du pays. En Belgique, le patrimoine est défini dans le « code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, du patrimoine et de l'énergie » comme suit :

*« Par patrimoine, il faut entendre l'ensemble des biens immobiliers dont la protection se justifie en raison de leur intérêt historique, archéologique, scientifique, artistique, social, technique ou paysager*

*a. à titre de monument : toute réalisation architecturale ou sculpturale considérée isolément, y compris les installations et les éléments décoratifs faisant partie intégrante de cette réalisation ;*

*b. à titre d'ensemble architectural : tout groupement de constructions urbaines ou rurales, en ce compris les éléments qui les relie, suffisamment cohérent pour faire l'objet d'une délimitation topographique et remarquable par son homogénéité ou par son intégration dans le paysage ; [...]*» (3)

Dans le cadre de ce travail, le « patrimoine historique » représente des structures âgées en béton (armé), comme des monuments, des églises, des ponts, des routes ou encore des maisons.

### **1 Situation du patrimoine**

À partir du 19<sup>ième</sup> siècle, commence à naître les premiers bâtiments entièrement en béton. En effet, grâce à son faible coût, ses performances mécaniques, la disponibilité des matériaux sur chaque site, il s'est montré comme bon matériau de construction. La première église en béton, « the United Church », a été bâtie en Illinois par Frank Wright (6). Cependant, ce n'est qu'au lendemain de la deuxième guerre mondiale, que la demande en béton (armé ou précontraint) croît significativement. Dès lors, par tout au monde, des constructions en béton armé ont été réalisées (4) (5) (6).

De nos jours, les ouvrages construits en béton massif ne présentent pas de dégradations significatives. Par contre, ne connaissant pas les différents mécanismes de dégradations, un grand nombre de structures en béton armé présente des fissures ou épaufrures. En effet, les causes principales de ces types de dégâts sont l'utilisation de mauvais composants lors de la fabrication du béton et surtout une épaisseur d'enrobage beaucoup trop faible conduisant à la corrosion des armatures. Il peut être constaté que des ouvrages d'une même époque et du même type exposent les mêmes types de dégradations (1).

Comme ce travail de fin d'études traite de la problématique des ions chlorures quelques exemples du patrimoine ayant subi des attaques de chlorures sont illustrés. Premièrement, les ponts peuvent être comptés parmi ces ouvrages. En effet, ayant été construites depuis longtemps, ces structures ont subi « l'outrage du temps » (1), à savoir les cycles de gel dégel et les sels de déverglaçage.

Un autre exemple, c'est le « mur de l'Atlantique » (7) et la base de sous-marins à Saint Nazaire, en France. Construits lors de la deuxième guerre mondiale, ils ont subi beaucoup de dégradations. D'abord, par bombardements et ensuite par les attaques des chlorures puisque ces ouvrages se situent le long de la mer. En effet, la base de Saint Nazaire a longtemps été abandonnée et elle s'est dégradée de plus en plus. C'est en 1990 que la réparation a eu lieu afin de transformer cette base en lieu public. Aujourd'hui, cette base est utilisée comme musée, salles d'exposition...



Photo 1 : Saint-Nazaire, entrée de « L'escale atlantique » (7)

Ainsi, pour assurer la durabilité de ce patrimoine bâti en béton, tous ces ouvrages doivent être maintenus, protégés ou réparés.

La conservation du patrimoine historique en béton est un défi pour les années futures. En effet certains monuments, églises en béton, ponts, maisons sont une partie importante de notre patrimoine architectural et culturel, et subissent les ouvrages du temps.

## 2 Durabilité du patrimoine historique

La durabilité d'une structure représente « sa capacité de remplir, pendant toute la durée de son existence, les fonctions pour lesquelles la construction a été conçue (2)» Dès lors, une structure peut présenter des diminutions d'une ou de plusieurs caractéristiques tant qu'elles ne mettent pas en danger la stabilité, la sécurité, l'aspect esthétique ou les performances fonctionnelles (1).

La durabilité d'un ouvrage en béton nécessite (2) :

- Une bonne conception et un bon dimensionnement
- Un choix adéquat des constituants ainsi qu'une bonne composition
- Une mise en œuvre suivant les règles de l'art

Cependant, « *l'interaction entre le béton et l'environnement auquel il est exposé (2)* » joue un rôle important dans la durabilité d'une structure. En effet, la plupart des dégradations est due aux infiltrations d'eau et autres agents agressifs comme les ions chlorures, provenant de l'environnement. Étant donné que la porosité du béton est le facteur dominant en ce qui concerne les différents mécanismes de transport, il est primordial de diminuer le système poreux.

Afin de prolonger la durée de vie des structures en béton, différentes techniques de protection et réparation existent. Toutefois, il est très important de noter que toutes ces techniques ne compensent pas une mauvaise composition de béton.

## **Chapitre II : Types et origines des dégradations**

---

Dans ce chapitre, les différents effets et causes des dégradations d'une structure en béton armé seront expliqués. En particulier, les effets néfastes dus aux ions chlorures puisque ce travail traite de la problématique de ces derniers.

Les dégradations sont dues à plusieurs facteurs qui sont plus ou moins graves. D'abord, il y a les facteurs climatiques et environnementaux qui jouent un rôle important sur le type de dégradations d'un ouvrage en béton (8). En effet, celui-ci se comportera de manière différente en fonction de l'exposition. Par exemple si l'ouvrage est situé dans un milieu marin ou pas. Ensuite, la qualité du béton peut fortement influencer la durabilité d'une structure. Il est donc primordial de choisir une bonne composition du béton afin que celui-ci puisse résister aux agents agressifs. Enfin, une conception et une mise en œuvre adéquates sont essentielles pour éviter un grand nombre de types de dégradations (9).

Les causes des dégradations d'une structure en béton armé peuvent être de trois origines différentes. Soit il s'agit de dégradations subies uniquement par le béton, soit il s'agit d'une simple corrosion des barres d'armatures en acier soit il s'agit de dégradations combinées entre le béton et les armatures (8) (9) (10).

### **1 Dégradations subies uniquement par le béton**

Les causes de dégradation du béton peuvent être regroupées en trois catégories. La première catégorie comprend les causes physiques, la deuxième concerne les processus chimiques et la troisième traite de la réaction alkali-silicate (8) (11).

#### **1.1 Causes physiques**

Les causes physiques des dégradations peuvent être distinguées en deux groupes, à savoir les dégradations de surface, comme l'abrasion, l'érosion etc. et les fissurations internes dues aux gradients de température ou aux cycles de gel/dégel (8)

##### **1.1.1 Cycles gel/dégel**

*« L'eau est un des rares éléments ayant un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide (9). »* Dès lors, lorsque l'eau libre, qui se trouve dans les pores les plus grands, gèle, il y a une augmentation du volume d'environ 10 % ce qui a comme conséquence l'écaillage du béton. En effet, *« la glace se forme d'abord dans les pores les plus grands et ensuite, lors d'un abaissement plus important de la température, dans les plus petits (2). »* C'est pourquoi, il faut assurer une quantité suffisante de bulles d'air à l'intérieur du béton permettant l'expansion de l'eau lors du gel, afin d'éviter le risque d'écaillage et de résister aux pressions (2) (11).

### **1.1.2 Effet des sels de déverglaçage**

En premier lieu, l'utilisation de sels de déverglaçage dégèle la glace et la neige et l'eau est absorbée par capillarité dans le béton. Lors d'une utilisation répétée de ces sels, une fine couche d'eau peut stagner sur la surface ce qui peut provoquer l'atteinte du taux critique de saturation dans la couche superficielle (2) (8).

Deuxièmement, la couche superficielle du béton fournissant la chaleur nécessaire pour faire fondre la glace et la neige subit un choc thermique dû à la diminution brusque de température. Par conséquent, il y a formation de contraintes internes pouvant conduire à une fissuration de la zone superficielle (11).

Après le dégel, l'eau obtenue, à concentration élevée en chlorures, pénètre par absorption capillaire dans le béton. Un abaissement du point de congélation a lieu en fonction de la concentration en chlorures. En d'autres termes, plus la concentration augmente, plus le point de congélation s'abaisse. Dès lors, il se peut qu'une couche intermédiaire non gelée soit enfermée entre deux couches gelées provoquant l'écaillage du béton, lorsque la température chute de nouveau. En effet, l'eau de cette couche va geler et ne pouvant pas s'étendre, la couche supérieure se voit repousser (2) (9).

## **1.2 Causes chimiques**

Les causes chimiques responsables des dégradations du béton peuvent être regroupées en trois catégories de mécanismes de désintégration. Le premier mécanisme est la dissolution soit de la matrice soit des granulats. Le deuxième mécanisme est le démembrement qui est caractérisé par un gonflement de la matrice cimentaire, des granulats ou dans les capillaires. Le dernier mécanisme s'agit de l'érosion (11).

### **1.2.1 Dissolution**

#### **1.2.1.1 Attaque par les acides**

Les acides peuvent provenir de différentes sources comme les pluies acides, les produits chimiques, les eaux usées domestiques etc. Ces acides peuvent réagir avec l'hydroxyde de calcium présent dans le béton et former des sels très solubles qui peuvent provoquer la corrosion des armatures. En somme, la réaction entre les acides et les produits à base de calcium provoque la désintégration de la matrice cimentaire et le déchaussement des granulats calcaires (11).

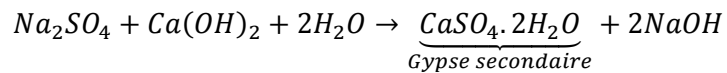
#### **1.2.1.2 Attaque par l'eau de mer**

L'eau de mer contient un grand nombre d'ions (chlorures, sulfates, nitrates, etc.) qui pénètrent dans le béton par absorption capillaire ou par diffusion et y réagissent avec les produits d'hydratation du ciment. Les conséquences engendrées par l'attaque de l'eau de mer sont multiples, elles sont dues aux différentes réactions ayant lieu au même moment et à différents niveaux.

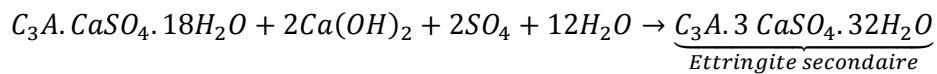
### 1.2.2 Démembrement-Attaques par les sulfates

Les sulfates peuvent avoir leur origine dans l'eau de mer, les sols, les eaux souterraines etc. La réaction de ces ions avec les produits d'hydratation peut induire l'expansion de volume dans la pâte de ciment. En effet, cette expansion est due à la formation d'ettringite secondaire qui est le produit de deux réactions chimiques (11).

1. Formation de gypse secondaire par la réaction entre le sulfate de sodium et l'hydroxyde de calcium :



2. Formation d'ettringite secondaire à partir du gypse secondaire et les aluminates de calcium hydratés :



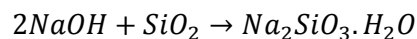
L'ettringite secondaire possède comme propriété de gonfler énormément conduisant à la fissuration du béton voire à sa destruction. Les sulfates de magnésium comptent parmi les sels les plus agressifs à cause de leur double action. « D'un côté, les ions de sulfate réagissent et forment le gypse et l'ettringite, de l'autre côté, les ions de magnésium s'attaquent aux silicates de calcium hydratés et décomposent pour ainsi dire la structure du ciment durci (8). »

### 1.3 Réaction alcali-granulats

Cette réaction se fait entre les produits alcalins ( $Na_2O, K_2O$ ) contenus dans la solution interstitielle du béton et les silices contenus dans certains granulats. En effet, pour que cette réaction puisse avoir lieu, trois conditions doivent être remplies simultanément (8):

- Les granulats doivent être potentiellement réactifs
- Le taux d'humidité dans le béton doit être assez élevé
- La teneur en alcalis du béton doit dépasser un certain seuil

Ainsi, il y a formation d'un gel de silice qui peut gonfler et conduire à des fissurations.

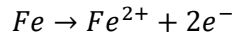


## 2 Corrosion des armatures en acier

Le phénomène de corrosion des armatures est une des causes principales de la dégradation des structures en béton armé ou précontraint. En effet, il s'agit d'un processus électrochimique complexe produisant la rouille des armatures en acier. Ce processus peut être très expansif et une augmentation de volume d'environ 7 % des barres d'armatures est possible. Ainsi, si l'enrobage (béton protégeant les barres d'armatures) n'est pas assez épais, il y a un risque d'éclatement du béton dû à ce gonflement (2) (12).

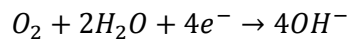
Pour que la corrosion ait lieu, il faut la présence d'eau et d'air. Dans ce cas, l'acier des barres d'armatures se dissout dans la solution aqueuse et les réactions principales d'oxydoréduction peuvent se dérouler. Ainsi, les atomes de fer entrent en solution sous forme d'électrons négatifs et l'acier attire des ions de fer positifs à cet endroit (2).

Réaction d'oxydation sur les armatures en acier (anode) :

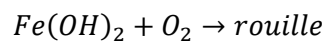
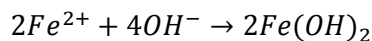


Ensuite, en présence d'oxygène, celui-ci se transforme en ions hydroxyles en utilisant les électrons négatifs libérés lors de la réaction précédente. En effet, un courant se crée entre l'anode et la cathode et les électrons se déplacent dans l'acier de l'anode vers la cathode.

Réaction de réduction dans le béton (cathode) :



Enfin, ces ions hydroxyles, se déplaçant vers l'anode, réagissent avec les ions fer, qui eux se dirigent vers la cathode, pour produire l'hydroxyde de fer. Ce-dit « *se précipite et se transforme alors, par réaction avec l'oxygène, en oxyde de fer (2)* », appelé rouille.



Ce type de dégradation peut être évité en assurant un enrobage en béton assez épais autour des armatures. En effet, le pH élevé de la solution interstitielle du béton garantit la protection des armatures contre la rouille. Dans un milieu à si haute alcalinité (pH de 12 à 13), les hydroxyles sont présents en excès et l'oxyde de fer peut former une couche protectrice « quasi impénétrable », sur la surface de l'acier, empêchant la dissolution d'autres ions de fer. Cette couche joue le rôle de couche de passivation et l'armature est dite « passivée » (12).

La corrosion des armatures est initiée lorsque cette couche de passivation est endommagée ce qui peut avoir lieu soit par carbonatation (pénétration de  $CO_2$ ), soit par l'attaque d'ions chlorures.

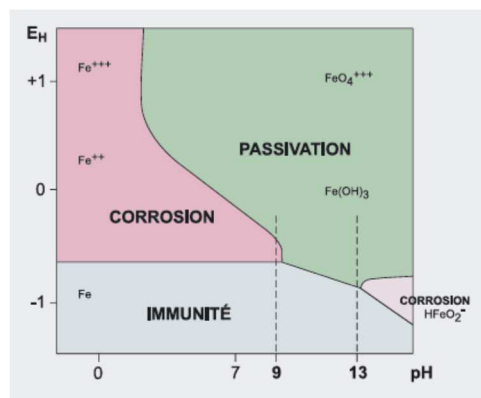


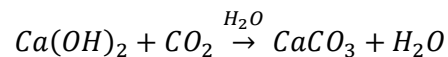
Figure 1 : Diagramme de Pourbaix (12)

## 3 Dégradation combinée entre le béton et l'armature

### 3.1 Carbonatation

#### Phase d'initiation (2) (12)

La carbonatation est la réaction entre le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) provenant de l'air et l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ), encore appelé chaux hydratée ou portlandite, contenu dans le béton. Le produit de cette réaction est la formation du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ). Cette réaction ne se déroule qu'en milieu aqueux.



En effet, le dioxyde de carbone, étant un gaz, pénètre facilement dans le béton où il réagit avec la portlandite et l'eau des pores pour former du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) entraînant une chute du pH de la solution interstitielle, qui passe alors 12 – 13 à 9 – 10. Cette réaction ne peut avoir lieu que lorsque les trois éléments sont présents. Il faut donc un apport permanent en  $CO_2$ . Cependant, étant donné que la diffusion du dioxyde de carbone est plus rapide dans l'air que dans l'eau, la réaction a lieu au front d'humidité, c'est-à-dire à l'interface air-eau. En outre, l'humidité relative ne doit ni être trop faible ni trop importante pour avoir une carbonatation maximale. La vitesse de carbonatation diminue au fur et à mesure que le front de carbonatation (zone où cette réaction se déroule) progresse puisque le  $CO_2$  doit pénétrer plus en profondeur dans le béton pour trouver les substances alcalines nécessaires à la réaction.

L'évolution de la carbonatation dépend donc des caractéristiques de l'environnement (9) :

- Pour un ouvrage en béton, immergé en permanence dans l'eau, le risque de carbonatation est très faible voire nul à cause de la faible diffusion du  $CO_2$  dans l'eau.
- Un béton, exposé à un climat intérieur normal, subira une carbonatation rapide, mais très superficielle par manque d'eau.
- Pour un béton exposé à la pluie, le risque de carbonatation est relativement faible puisque les pores sont souvent remplis d'eau et l'apport en  $CO_2$  est donc plus difficile.
- Pour un béton exposé à l'extérieur et protégé de la pluie, le risque de carbonatation est le plus important. En effet, dans ce cas, les pores sont soit remplis d'eau, soit sec de façon que le processus de carbonatation puisse se dérouler plus vite.

#### Phase de propagation

Pour le béton non armé, la carbonatation n'a pas d'effet néfaste sur la durabilité puisque le produit de cette réaction (carbonate de calcium insoluble) aura plutôt tendance à réduire la porosité (12). En effet, il s'agit d'un produit gonflant qui a tendance à fermer les pores. Dès lors, la perméabilité superficielle diminue tandis que la résistance superficielle augmente.

Par contre, pour le béton armé, la carbonatation peut être dangereuse à cause de la diminution du pH. Le  $CO_2$  n'attaque pas l'acier des armatures, mais le béton qui perd alors son alcalinité et devient plus acide. Ainsi, plus le front de carbonatation progresse, plus la couche de

passivation des armatures diminue, ce qui favorise le risque de corrosion généralisée des armatures. Celles-ci vont rouiller et gonfler, ce qui provoque la fissuration et l'éclatement du béton d'enrobage. Ce processus se manifeste par des épaufrures (détachement de morceau de béton autour de l'armature) sur les ouvrages en béton armé.

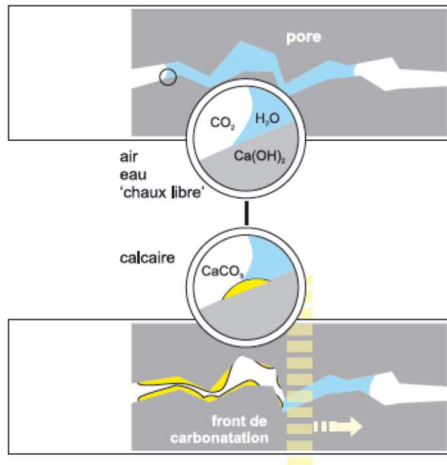


Figure 2 : Processus de carbonatation

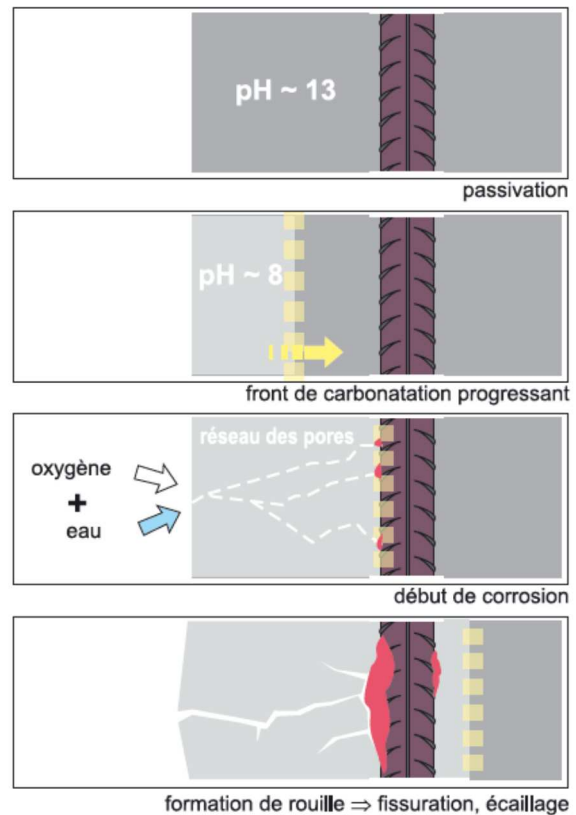


Figure 3 : Corrosion initiée par la carbonatation

## 3.2 Par les chlorures

### 3.2.1 Origine des chlorures

Les chlorures présents dans le béton peuvent avoir deux origines bien distinctes. Ils peuvent provenir soit de l'intérieur soit de l'extérieur.

D'une part, les ions chlorures peuvent être introduits involontairement dans le béton frais lors de sa fabrication en utilisant de l'eau saline comme eau de gâchage, des granulats marins ou des accélérateurs de prise. Pour limiter cette source de contamination, la teneur initiale en chlorures dans le béton frais doit être limitée et la concentration maximale admissible pour du béton, du béton armé et du béton précontraint est donnée dans des normes afin de limiter les risques de corrosion des armatures (11) (13).

Type d'ouvrage	Teneur maximale en $Cl^-$ rapportée à la masse du ciment
Béton non armé	$\leq 1\%$
Béton armé	$\leq 0,4\%$
Béton précontraint	$\leq 0,2\%$

Tableau 1 : Teneur en chlorures admissible selon la norme « NBN EN 206-1 » (2)

D'autre part, l'environnement extérieur, dans lequel la structure en béton se situe, est la source principale de l'apport en chlorures. Parmi ces sources, les sels de déverglaçage jouent un rôle important. En plus, il y a les constructions situées proches de la mer qui sont exposées aux chlorures de l'eau de mer et aux vents marins (14). La pénétration de ces ions chlorures à l'intérieur du béton peut se faire par différentes voies comme décrites dans le Chapitre III : Les chlorures peuvent pénétrer par absorption capillaire (sur une surface sèche) ou par diffusion (si le béton est saturé). La pénétration par absorption capillaire est bien plus rapide que la diffusion.

### 3.2.2 Types de chlorures

Il existe deux types de chlorures particuliers, les chlorures libres et les chlorures totaux. Il est donc important de distinguer ces types de chlorures et leur origine afin de pouvoir lutter contre leurs effets néfastes (13).

Le premier type de chlorures rassemble les chlorures libres provenant notamment d'agents agressifs environnementaux. Ces chlorures pénètrent soit par capillarité, soit par diffusion à l'intérieur du béton où ils restent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ce sont ces chlorures qui sont dangereux. En effet, une fois à l'intérieur du béton, ils peuvent attaquer l'armature et donner naissance à la corrosion de cette dernière provoquant ainsi la dégradation de la structure en béton (15).

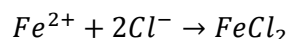
Le deuxième type de chlorures regroupe, en plus des précédents, les ions chimiquement fixés et adsorbés physiquement sur les parois solides des pores. En effet, il s'agit là des chlorures introduits dans le béton dès son mélange. Ces chlorures sont fixés en grande majorité et seul un pourcentage faible reste libre.

### 3.2.3 Processus

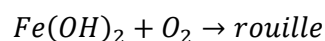
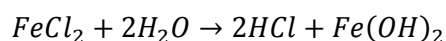
Pour que la corrosion des armatures initiée par des chlorures ait lieu, les conditions suivantes doivent être remplies (2):

- Présence d'une quantité suffisante d'eau et d'oxygène
- Présence d'une teneur critique en chlorures

En supposant que l'eau des pores entourant l'armature est chargée en chlorure de sodium  $NaCl$ , le processus de corrosion vu précédemment se modifie comme suit : les ions chlorures  $Cl^-$  réagissent avec les ions de fer dissous à l'anode pour former du chlorure de fer :



Celui-ci se dissout facilement donnant lieu à l'hydroxyde de fer qui lui s'oxyde pour former la rouille :



Les ions chlorures ne sont pas consommés, mais recyclés. C'est pourquoi, la rouille ne contient pas de chlorures. Ainsi, le processus peut se poursuivre au même endroit provoquant la corrosion locale par piqûres de l'armature. Cette attaque est une des attaques les plus dangereuses pour le béton armé. Non seulement, elle entraîne une réduction locale de la section qui pourra se rompre soudainement ayant des conséquences horribles, mais elle est également difficilement détectable. En effet, contrairement à la carbonatation qui provoque une dégradation globale de l'armature, la corrosion par piqûres se déroule de manière inaperçue ne formant que quelques taches de rouille à la surface du béton (12).

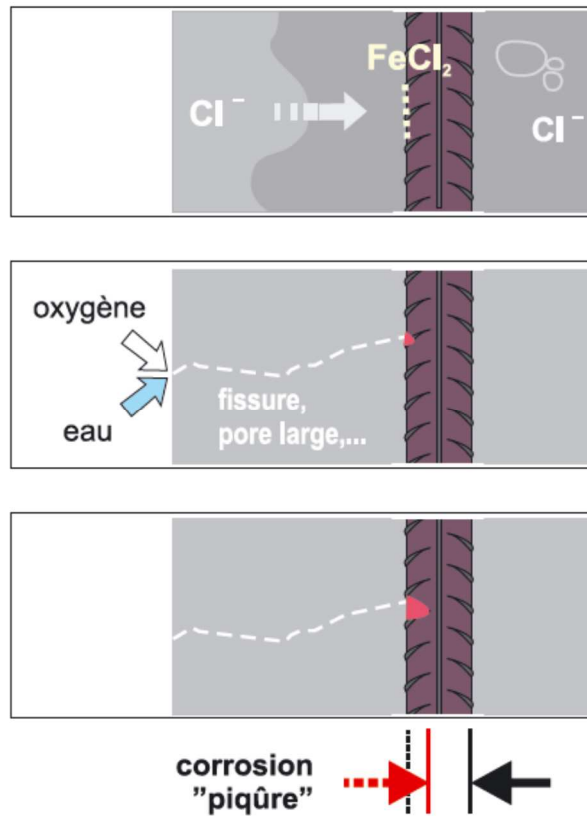


Figure 4 : Corrosion initiée par des chlorures (12)

## Chapitre III : Mécanismes de transport (des chlorures) dans le béton

La pénétration des ions chlorures à l'intérieur et la migration de ceux-ci dans la solution interstitielle du béton sont gouvernées par nombreux phénomènes physiques et chimiques. Ces mécanismes dépendent de beaucoup de facteurs, comme les écoulements de l'eau interstitielle, la perméabilité, la porosité, du degré de saturation des pores, des conditions environnementales,... (14)

Les différents mécanismes qui peuvent se dérouler dans les bétons sont les suivants :

- la perméation
- l'adsorption
- l'absorption capillaire
- la migration sous champs électrique
- la diffusion

Dès lors, le transport de l'eau ou des chlorures n'est rarement lié qu'à un seul mécanisme, mais plutôt à une combinaison ou succession de ceux-ci. Cependant, « dans certaines conditions, un mécanisme peut être prédominant sur les autres (15) » En effet, dans un environnement marin, les ions chlorures vont d'abord pénétrer dans le béton sec par absorption capillaire ou par perméabilité. Une fois à l'intérieur, la diffusion peut débiter dans les pores saturés. Ainsi, les écoulements de l'eau interstitielle peuvent avoir lieu soit dans un béton (11):

- durci soumis à un gradient de pression hydraulique (perméation)
- sec se saturant progressivement (absorption capillaire)
- saturé subissant une dessiccation (diffusion)

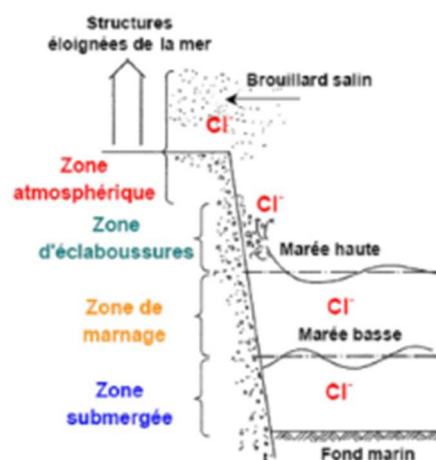


Figure 5 : Zones d'exposition aux chlorures (16)

Il faut noter qu'en laboratoire, toutes les expériences sont menées dans des conditions permettant de ne calculer et déterminer que les coefficients caractéristiques à cet essai, c'est-à-dire les conditions sont créés de telles manière à ne mesurer qu'un seul mécanisme. (14)

## 1 La porosité

La porosité est un des facteurs les plus importants influençant les mécanismes de transport et joue donc un rôle primordial dans la durabilité des bétons (13).

La porosité est définie comme suit :

$$p = \frac{v}{V} = \frac{v}{v + V_s}$$

Avec :

- $v$  : le volume des pores
- $V$  : le volume total
- $V_s$  : volume de la phase solide

La porosité est formée par différents types de pores (17) (15):

- les *pores de compactages* (diamètre  $> 1 \text{ mm}$ ) : bulles d'air restées emprisonnées dans le mélange lors du malaxage du béton
- les *pores de la zone de transition* : à l'interface ciment/granulat, la porosité est plus grande
- les *pores capillaires* ( $0,01 \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5 \mu\text{m}$ ) : proviennent des vides laissés par l'eau en surplus évaporée
- les *pores de gel de ciment* (diamètre  $< 40 \text{ \AA}$ ) : résulte de l'adsorption d'eau à la surface des feuillettes de C-S-H. Ils n'influencent pas significativement la perméabilité.

Par ailleurs, une différenciation entre porosité et facilité de déplacement de matières dans un milieu poreux doit être faite. En effet, cette dernière dépend du type de pores qui peuvent être fermés, ouverts d'un côté ou ouverts des deux côtés. Dès lors, dans le cas d'une porosité fermée, la résistance au transfert de substance est importante, par contre pour une porosité ouverte, le transfert peut se faire facilement.

## 2 La perméation

La perméabilité indique la facilité avec laquelle un fluide peut pénétrer et traverser un matériau poreux et dépend de 5 paramètres particuliers (11):

- La connectivité : plus la connectivité est faible, plus la perméabilité est faible
- La constrictivité : plus la constrictivité est forte, plus la perméabilité est faible
- La porosité : plus la porosité est faible, plus la perméabilité est faible
- La tortuosité : plus la tortuosité est forte, plus la perméabilité est faible

La force motrice de la perméabilité est due à une différence de pression. Chaque matériau poreux est représenté par un coefficient de perméabilité  $K$  qui caractérise la facilité avec laquelle un liquide ou un gaz pénètre et se déplace dans ce matériau sous l'effet d'un gradient de pression (18). Le coefficient de perméabilité à l'eau est exprimé par l'équation :

$$K_w = \frac{q}{t} \cdot \frac{l}{A} \cdot \frac{\mu}{\Delta p}$$

Où :

- $K_w$  : le coefficient de perméabilité [ $m^2$ ]
- $q$  : le volume du liquide s'écoulant [ $m^3$ ]
- $t$  : le temps [s]
- $l$  : l'épaisseur de la section pénétrée [m]
- $A$  : la section de pénétration [ $m^2$ ]
- $\mu$  : la viscosité dynamique du fluide [ $Ns/m^2$ ]
- $\Delta p$  : différence de pression [ $N/m^2$ ]

Le coefficient de perméabilité est une caractéristique intrinsèque du matériau et ne dépend pas des propriétés du liquide. Ainsi, il est souvent exprimé par la loi de Darcy :

$$K_w^* = \frac{q}{t} \cdot \frac{l}{A} \cdot \frac{1}{\Delta h}$$

Où :

- $K_w^*$  : le coefficient de perméabilité de l'eau [ $\frac{m}{s}$ ]
- $\Delta h$  : le gradient de pression [m]

### 3 Absorption d'eau par capillarité

L'absorption capillaire est un processus d'aspiration de liquide à l'intérieur du matériau afin de remplir les pores et capillaires de ce dernier. Cette succion capillaire ne dépend pas uniquement de la structure poreuse du matériau, mais également du degré d'humidité des pores. Ce phénomène est donc dû aux tensions superficielles qui agissent entre le liquide et la surface des pores. En d'autres termes, un ménisque au niveau du capillaire se produit par équilibre de ces tensions superficielles (15).

*« La force motrice de l'aspiration capillaire est due à une différence de pression au niveau du ménisque et est régie par la loi de Jurin. Cette dernière donne la pression  $P_i$  qui fait pénétrer le fluide dans un capillaire de rayon  $r_i$ . La remontée capillaire  $h_i$  et la vitesse d'ascension capillaire  $v$  peuvent en être déduites »*

$$P_i = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_i} \left[ \frac{N}{m^2} \right];$$

$$h_i = \frac{P_i}{\rho h} [m];$$

$$v = \frac{r_i \gamma \cos \theta}{4d\mu} [m/s]$$

Avec :

- $\gamma$  : la tension superficielle du fluide [ $N/m$ ]
- $\theta$  : l'angle de contact [ $^\circ$ ]
- $\rho$  : la masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ]
- $d$  : la profondeur de pénétration [ $m$ ]
- $\mu$  : la viscosité dynamique du liquide [ $Ns/m^2$ ]

D'une part, l'absorption d'eau par capillarité est fonction des caractéristiques du solide, notamment de la porosité du solide, du rayon des capillaires et de leur tortuosité. D'autre part, elle dépend également des caractéristiques du liquide, comme la viscosité et la tension superficielle. Pour des mortiers, les facteurs influant sont les suivants (13) :

- Le rapport  $E/C$  : plus le rapport  $E/C$  est important, plus l'absorption capillaire augmente
- L'âge du mortier : plus le mortier est vieux, plus l'absorption capillaire diminue
- Le diamètre intérieur du capillaire : plus le diamètre est petit, plus l'absorption capillaire est d'autant plus grande et plus le liquide monte d'autant plus haut

#### 4 Migration sous champ électrique

Une solution soumise à un champ électrique extérieur, a comme effet de provoquer un mouvement des particules chargées, notamment les ions. Dès lors, l'équation traduisant ce processus de transport est donnée par l'équation de Nernst-Planck :

$$-J_i(x) = \underbrace{D_e \frac{dC_i(x)}{dx}}_{diffusion} + \underbrace{\frac{z_i F}{RT} D_e C_i \frac{dE(x)}{dx}}_{migration}$$

Dès lors, un champ électrique accélère le processus de diffusion.

#### 5 Diffusion

La diffusion est défini comme étant un « processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentrations entre deux points du milieu, il y aura un transport du constituant de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée (11). » Ainsi, la force motrice est due à un gradient de concentration.

Les transports par diffusion peuvent se produire sous deux formes, notamment en phase liquide (pénétration des ions chlorés) et en phase gazeuse (pénétration de  $CO_2$ ). En outre, la diffusion de ces différents constituants à l'intérieur du béton dépend de la porosité ouverte interconnectée et du degré de saturation des pores de celui-ci.

## 5.1 Loi de diffusion en régime permanent

Le processus de diffusion dans les matériaux poreux en régime permanent peut être décrit par la première loi de Fick. En effet, il s'est basé sur la loi de Fourier décrivant le phénomène de conduction de chaleur et il l'a adoptée au phénomène de diffusion. La loi donne le flux ou transport d'une espèce en fonction du gradient de sa concentration au sein d'un fluide. Ce flux de particules s'effectue dans le sens opposé à celui de l'augmentation de la concentration (15) (19).

La 1<sup>ère</sup> loi de Fick s'écrit :

$$J_i = -D_e \frac{\partial C_i}{\partial x}$$

Avec :

- $J_i$  : le flux [ $kg/m^2s$ ]
- $D_e$  : le coefficient de diffusion effectif [ $m^2/s$ ]
- $C_i$  : la concentration en ions i dans la solution présente dans les pores [ $kg/m^3$ ]
- $x$  : la distance [ $m$ ]

Le coefficient de diffusion effectif  $D_e$  permet de caractériser la capacité qu'ont certains ions à diffuser au travers d'un milieu donné. Il dépend de plusieurs paramètres, comme l'ion considéré, la concentration des ions au sein de la solution interstitielle, la structure poreuse ainsi que l'âge et le degré d'hydratation du matériau.

## 5.2 Loi de diffusion en régime non permanent (cas où l'espèce ionique et le solide n'interagisse pas)

### 5.2.1 Formulation de la deuxième loi de Fick

Dans le cas où le processus de diffusion est en régime transitoire, une seconde équation différentielle doit être trouvée. Pour ce faire, l'équation de la conservation de la matière sur un élément de volume du matériau poreux est appliquée ce qui mène à la 2<sup>ème</sup> loi de Fick (13):

$$\frac{\partial C_{m,i}}{\partial t} = -\frac{\partial J_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) = D_e \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial D_e}{\partial x} \left( \frac{\partial C_i}{\partial x} \right)$$

Lorsque le coefficient de diffusion ne dépend pas de la concentration de la solution d'exposition, l'équation peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial C_{m,i}}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

Avec :  $C_{m,i}$  : la concentration de l'ion considéré rapporté à l'unité de volume du matériau en  $[kg/m^3]$

La relation entre la concentration dans le matériau et celle dans la solution peut être exprimée en fonction de la porosité accessible, notée  $p$ .

$$C_{m,i} = p \cdot C_i$$

Dès lors, en remplaçant dans la deuxième équation, la loi de Fick peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D_e}{p} \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} = D_a \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$$

Les deux coefficients des lois de Fick sont liés par la porosité et ne sont donc pas identiques.

$$D_a = \frac{D_e}{p}$$

La 2<sup>ème</sup> loi de Fick n'est valable que si :

- La diffusion est le mécanisme de transport dominant
- Le coefficient de diffusion ne dépend pas de la concentration de la solution d'exposition

### 5.2.2 Résolution de la deuxième relation de Fick

La solution de type  $C(x; t)$  de la deuxième loi de Fick est obtenue en imposant deux conditions aux limites (19).

#### 1<sup>ère</sup> condition de bord :

L'épaisseur de la couche  $d$  dans laquelle se déroule le processus de diffusion est supposé être beaucoup plus importante comparée aux profondeurs de diffusion expérimentales. Ce qui peut être décrit par l'équation :

$$C(d) = C(\infty; t) = 0$$

#### 2<sup>ème</sup> condition de bord :

a) Cas où la source d'impuretés est illimitée

$$C(0; t) = C_i = \text{Constante}$$

À partir de ces deux conditions, la solution suivante peut être obtenue :

$$C(x; t) = C_i \cdot \operatorname{erf}(z)$$

Avec :  $\operatorname{erf}(z)$  : la fonction erreur

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta$$

Ce qui revient à :

$$C(x; t) = C_i \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right] = C_i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right)$$

En tenant compte, de l'impureté initiale, l'équation prend la forme suivante :

$$C(x; t) = C_l + (C_i - C_l) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right]$$

Avec  $C_i$  la teneur initiale de l'impureté considérée en  $[kg/m^3]$

b) Cas où la source d'impuretés est limitée

$$\int_0^{\infty} C(x) dx = Q = \text{Constante}$$

$$C(x; t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}$$

### 5.3 Les facteurs influençant la diffusion

La liste des facteurs influençant la diffusion est longue. Ces facteurs peuvent être liés à des grandeurs extérieures comme la température et la concentration de la solution d'exposition ou à des caractéristiques des échantillons testés comme par exemple le rapport  $E/C$ , le degré d'hydratation, le type du ciment, du temps d'exposition.

Cependant, étant donné que, dans ce travail, les échantillons sont tous dans les mêmes conditions initiales sauf les rapports  $E/C$  changent, ces facteurs ne jouent pas un rôle prédominant.

## 6 Conclusion

Dans le cadre de ce travail, deux de ces mécanismes de transport vont être analysés plus en détail, notamment l'absorption d'eau par capillarité et la diffusion des ions chlorés. Le but du travail est la réduction de la diffusion des ions chlorés au sein des mortiers. Pour ce faire, l'absorption d'eau par capillarité doit être diminuée puisque c'est elle l'origine de la diffusion.

En effet, dans un premier temps, les ions chlorures vont pénétrer dans les bétons par absorption capillaire. Ce mécanisme a lieu sur des surfaces sèches du béton. Dans un deuxième temps, lorsque cette surface est soumise à des cycles de séchage-humidification, les ions chlorures se trouvant à l'intérieur du béton peuvent facilement diffuser. Il peut être noté, que dans ce cas, la concentration en ions chlorures est plus faible à la surface d'exposition qu'à l'intérieur. Ceci est dû au fait qu'à la surface l'eau va emporter les ions chlorures tandis qu'à l'intérieur ceux-ci peuvent facilement bouger (20).

Par ailleurs, l'absorption capillaire dépend beaucoup de la dimension des pores tandis que la diffusion dépend de l'interconnexion des pores et non spécialement de leur taille. En effet, la résistance au transport par diffusion procède de chocs entre les molécules remplissant le capillaire (13).

Sur base de la loi de Jurin, un moyen de réduire l'absorption d'eau par capillarité, c'est d'augmenter l'angle de contact. Dès lors, plus l'angle de contact  $\theta$  est grand, plus la pression est faible et plus la vitesse d'ascension pour un même diamètre de capillaire est faible.

## **Chapitre IV : Techniques et matériaux de réparation d'une construction en béton**

---

D'abord, il est primordial d'effectuer un diagnostic précis de la pathologie de la structure en béton. Il faut donc repérer tous les effets des dégradations et identifier les causes qui sont à l'origine de ceux-là afin de pouvoir choisir les bonnes techniques de réparations. Il est important de noter qu'une cause peut en entraîner une autre et que plusieurs origines peuvent conduire à la même cause, c'est pourquoi une évaluation, la plus précise possible, de l'état de la structure doit être réalisée (1). Il s'agit là, soit d'une simple inspection visuelle, soit de prélèvements ou analyses in situ (non destructif ou destructif) ou en laboratoire.

Ensuite, une fois que les causes des dégradations sont identifiées, les surfaces de l'ouvrage en béton doivent bien être préparées afin de garantir une bonne adhérence entre la surface en béton et la réparation ou la protection. Il existe différentes techniques de préparation de surface en fonction du type de dégradation, de la cause et du type de surface à traiter.

Enfin, de nombreuses méthodes de réparation et protection du béton existent. Le plus important est donc de choisir la technique et les matériaux d'intervention les plus appropriés en fonction du type de dégradation afin d'assurer leur efficacité et durabilité. En effet, cette dernière dépend beaucoup de la compatibilité entre les deux matériaux (21).

Ce chapitre donne une brève description des types de dégradations possibles d'un ouvrage en béton. De plus différentes techniques d'intervention ainsi que de protection par revêtement, en particulier les hydrofuges, y sont présentées.

### **1 Types de dégradation et matériaux d'intervention**

#### **1.1 Causes et traitement des fissures**

Presque tous les ouvrages en béton présentent des fissures dont l'ouverture doit être inférieure à 0,3 mm pour que un bon comportement structurel et une bonne durabilité soient assurés. Ces fissures sont causées la plupart du temps par des déformations excessives dues d'une part aux chargements et au climat (variation de température peut induire des dilatations thermiques dans la structure), d'autre part aux problèmes de mise en œuvre du béton lors de la construction (9) (1).

Avant de traiter les fissures, il faut connaître les causes qui sont à l'origine des dégradations et les éliminer. Ainsi, l'activité (dormante, active ou évolutive) d'une fissure doit être déterminée afin de choisir la technique de réparation à appliquer. En effet, celle-ci dépend de la situation (type d'environnement, type de fissures, ...) dans laquelle la structure se situe et de l'objectif du traitement (monolithisme, étanchéité, ...) (1).

Le but principal des techniques d'intervention pour les fissures est de limiter leur espacement progressif en les stabilisant ou refermant. Les différentes méthodes envisageables consistent d'une part en l'injection de résines époxy ou coulis dans la fissure afin de restituer « l'intégrité structurale » et de lui rendre son étanchéité et d'autre part en le calfeutrement des fissures. Ces techniques sont bien adaptées aux fissures dormantes et stabilisées. Une autre technique c'est l'agrafage grâce à des agrafes ou des plats métalliques pour empêcher un écartement supplémentaire de la fissure et restaurer la capacité structurale. Par contre, cette technique ne permet pas de refermer les fissures et ne garantit donc pas leur étanchéité. Par ailleurs, pour les fissures actives un scellement flexible peut être utilisé (22).

## 1.2 Causes et traitement des épaufrures et désagrégations

L'effet d'une telle dégradation se manifeste par le décollement de morceaux de béton qui peut être entraîné soit par (1):

- des effets physico-chimiques : corrosion et gonflement des barres d'armatures
- des effets thermiques : cycles de gel dégel
- des effets mécaniques : surcharge mécanique

Lors de ce type de dégradation, il y a lieu d'appliquer une ou plusieurs couches d'un matériau à la partie altérée afin de lui rendre sa forme initiale. Par contre, lorsque l'objectif de l'intervention est de restaurer l'état de surface ou de garantir la protection des armatures, des techniques de ragréage peuvent être utilisées.

Le ragréage est un système complet comportant des étapes précises de travail. En premier lieu, les surfaces doivent bien être préparées afin d'assurer une bonne adhérence et parfois il s'avère utile de retirer une partie du béton si la dégradation est trop importante. Les techniques de réparation des surfaces vont du béton coulé en place derrière une paroi coffrée jusqu'au béton projeté (9).

## 1.3 Corrosion des barres d'armatures

Plusieurs méthodes existent pour lutter contre ce type de dégradation. Une première méthode est basée sur le remplacement des barres d'armatures. Une deuxième technique consiste à recréer la passivation autour de l'armature ou encore à rendre l'armature cathodique partout.

Les différents moyens pour remplacer le béton dépendent de l'étendue de la corrosion superficielle et du front de carbonatation (10).

## 2 Techniques de protection par revêtement

Ces protections de revêtement forment une sorte d'écran entre l'environnement et le matériau. En effet, puisque l'environnement, principalement l'eau et les agents agressifs (le  $CO_2$ , les ions chlorure) est à l'origine de nombreuses dégradations de structures en béton, le rôle principal de cet écran est la protection du béton vis-à-vis de la pénétration d'un ou plusieurs de ces agents agressifs (1).

Il existe différents types de revêtements qui sont classés en diverses catégories en fonction de leurs caractéristiques, par exemple du mode de formation de l'écran, de la nature du liant, de la composition. Par contre ils ont tous le même but, à savoir l'empêchement de la pénétration dans le béton de l'humidité et des sels fondants. En outre, ils doivent résister aux charges de services et aux agents chimiques.

Ce travail va s'intéresser aux hydrofuges décrits dans le chapitre suivant Chapitre V :

## **2.1 Les Membranes d'imperméabilisation**

Le rôle principal des membranes d'imperméabilisation est donc, comme mentionné plus haut, l'empêchement de la pénétration de l'eau et des ions chlorures à l'intérieur du béton à travers les pores. Ainsi, elles empêchent, ou du moins réduisent fortement, l'absorption d'eau par capillarité. Ces membranes doivent être capables de colmater les fissures se formant dans le béton afin de les rendre de nouveau étanches (22).

## Chapitre V : Les hydrofuges

(23) (22) (24) (25) Une imprégnation hydrophobe est un traitement incolore de protection pour des matériaux poreux comme le béton. Elle est surtout utilisée pour protéger les façades, soumises aux intempéries, contre la pénétration de l'eau et des agents agressifs. Cependant, une imprégnation hydrophobe n'est pas destinée à ralentir la carbonatation du béton (1). L'hydrofuge est appliqué en surface du support par lequel il est absorbé afin de revêtir les parois internes des pores d'un film protecteur très mince. Il ne bouche donc pas les pores et est « non filmogène » c'est-à-dire qu'il ne forme pas de film sur la surface du béton contrairement aux imprégnations et peintures qui, elles, remplissent les pores et capillaires. Dès lors, un avantage des hydrofuges est que l'aspect esthétique de la surface n'est pas ou très peu modifié.

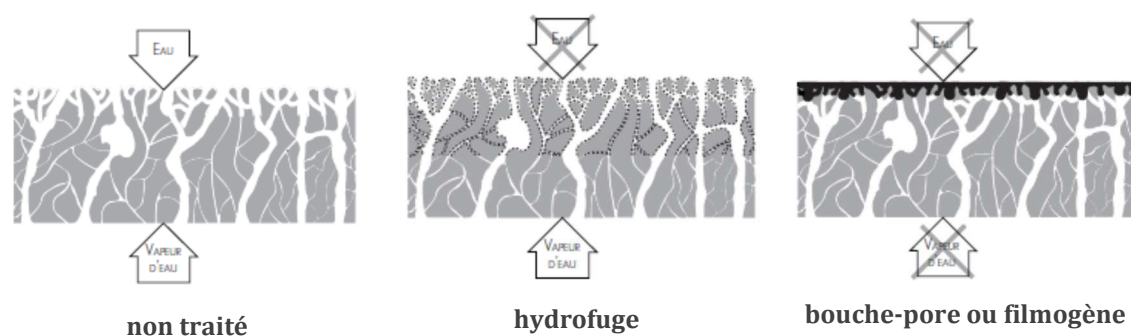


Figure 6 : Action des traitements de surface (25)

Par ailleurs, comme l'eau est la cause principale d'altération pour les structures en béton, la fonction principale des hydrofuges est de réduire l'absorption d'eau dans le béton sans modifier considérablement la diffusion de la vapeur d'eau (25) c'est-à-dire en laissant le béton respirer. Ainsi, l'eau ne sait pas pénétrer à l'intérieur, mais elle sait s'évaporer. Cette action a comme effet de diminuer les risques d'infiltration d'eau, d'ions chlorés ainsi que les dégâts dus aux cycles de gel dégel et d'augmenter ainsi la durabilité des structures en béton.

### 1 Les effets des hydrofuges

L'application d'un hydrofuge sur une surface de béton rend cette surface hydrophobe ainsi elle repoussera l'eau sans empêcher le passage de la vapeur d'eau. En effet, l'hydrofuge pénètre à l'intérieur du matériau poreux où il tapisse les pores et capillaires sur une certaine profondeur. Ainsi, une goutte d'eau ne s'étalera pas sur une surface hydrophobe, mais gardera sa forme sphérique.

Étant donné que le but des hydrofuges est la réduction de la capacité d'absorption d'eau par capillarité et en sachant que celle-ci est régie par la loi de Jurin (voir Chapitre III : 3) qui s'écrit comme suit :

$$P_i = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_i} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

l'application d'un hydrofuge va principalement jouer sur la tension superficielle  $\gamma$  du matériau et sur l'angle de contact  $\theta$ . Dès lors, deux effets dus aux hydrofuges sont observables. Le premier concerne le comportement capillaire et le deuxième l'effet perlant (24) (10).

### 1.1 Le comportement capillaire

L'attraction ou la répulsion de l'eau par un matériau minérale est due aux tensions de surface de celui-ci. En effet, une surface, ayant une tension superficielle plus importante que celle de l'eau, va attirer les molécules d'eau et absorber l'eau par capillarité (26). Tandis qu'une surface présentant une tension superficielle moins importante, par exemple une surface hydrophobe, repousse l'eau puisque « l'attraction intermoléculaire des molécules d'eau est plus importante que l'attraction de l'eau par le béton (23). »

Le béton non protégé possède une tension superficielle d'environ  $80 \text{ mN/m}$  contre  $73 \text{ mN/m}$  pour l'eau (25), c'est pourquoi l'eau est attirée par absorption capillaire par une surface en béton non traité. Au contraire, l'application d'un hydrofuge va diminuer les tensions superficielles à des valeurs proche de  $14 \text{ à } 24 \text{ mN/m}$  (25). Une surface hydrophobe possède donc une tension superficielle nettement inférieure à celle de l'eau ce qui explique que l'eau est repoussée hors du réseau capillaire. Les molécules d'eau sont donc attirées les unes aux autres dues aux tensions superficielles presque identiques ce qui se manifeste par l'« effet perlant ».

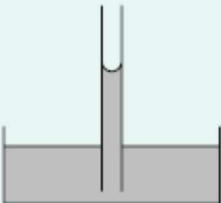

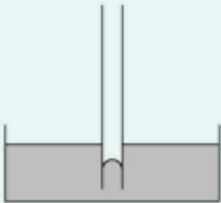
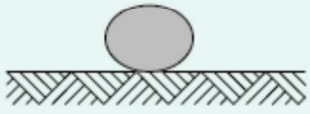
TYPE D'EFFET	COMPORTEMENT CAPILLAIRE	COMPORTEMENT EN SURFACE
<p>EFFET HYDROPHILE :</p> <p>matériaux pierreux non hydrofugés</p>	<p>ATTRACTION</p> 	<p>ÉTALEMENT</p>  <p>tension superficielle <math>\approx 80 \text{ mN/m}</math></p>
<p>EFFET HYDROPHOBE :</p> <p>matériaux pierreux hydrofugés</p>	<p>RÉPULSION</p> 	<p>EFFET PERLANT</p>  <p>tension superficielle <math>\approx 14 \text{ à } 24 \text{ mN/m}</math></p>

Figure 7 : Effet de l'application d'un hydrofuge sur la tension superficielle et la capillarité (25)

## 1.2 L' « effet perlant »

« La mouillabilité exprime la facilité avec laquelle une goutte de liquide va s'étaler sur une surface solide (1). » La relation entre l'angle de contact, qui permet d'estimer la mouillabilité, et les énergies libres de surface est définie dans la loi de YOUNG-DUPRE :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

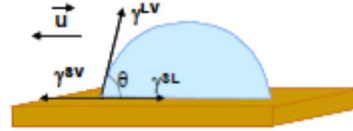


Figure 8 : Angle de contact et énergies libres de surface (27)

Où :

- $\gamma_{SV}$  : l'énergie libre de surface solide/vapeur
- $\gamma_{SL}$  : l'énergie libre de surface solide/liquide
- $\gamma_{LV}$  : l'énergie libre de surface liquide/vapeur
- $\theta$  : l'angle que forme la tangente à la goutte du liquide, comme l'eau, au point de contact avec la surface du solide

Pour une surface non traitée possédant une tension superficielle élevée, l'angle de contact  $\theta$  est faible et la goutte d'eau s'étalera (bonne mouillabilité). Par contre, plus la surface est hydrophobe et plus la tension superficielle est faible, plus l'angle de contact  $\theta$  est élevé et plus la goutte d'eau restera sphérique (mauvaise mouillabilité).

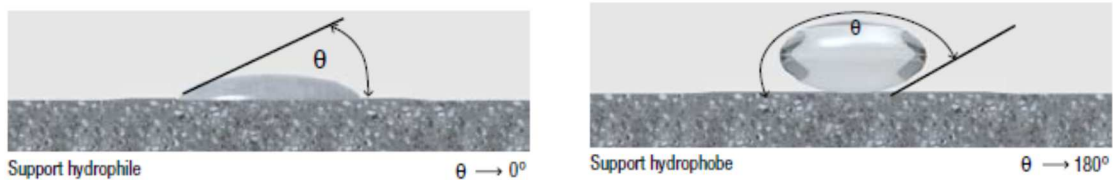


Figure 9 : Bonne et mauvaise mouillabilité (23)

La classification suivante en fonction des valeurs d'angles de contact peut être utilisée afin de déterminer si le support présente une mauvaise ou une bonne mouillabilité.

Classe	Angle de contact $\theta$
Très bonne	$> 130^\circ$
Bonne	$110^\circ - 130^\circ$
Légèrement mouillé	$90^\circ - 110^\circ$
Fortement mouillé	$30^\circ - 90^\circ$
Complètement mouillé	$< 30^\circ$

Tableau 2 : Classification de la mouillabilité en fonction de l'angle de contact (24)

Cependant, l'angle de contact  $\theta$  mesuré pour l'élément testé n'est pas unique. En effet, l'état de la surface de contact joue un rôle important sur la valeur mesurée de cet angle. En fonction de la rugosité de cette surface, mais également de la présence de contaminants ou d'huile qui s'y

sont déposés, la grandeur de l'angle peut être comprise « *dans une certaine plage autour de l'angle déterminé par la loi de Young-Dupré* » (28). Ou plus exactement, la valeur de l'angle mesuré se situe entre deux valeurs limites correspondant aux angles de contact d'avancement et de retrait. Ce phénomène est appelé « hystérésis de l'angle de contact » (27).

## 2 Les types d'hydrofuges

Il existe deux types d'hydrofuges (26):

- les hydrofuges de masse qui sont utilisés pour de nouvelles constructions en béton. Il s'agit de traitement « préventif »
- les hydrofuges de surface qui sont utilisés pour la protection des ouvrages historiques. Il s'agit de traitement « curatif ». Parmi ces derniers hydrofuges, il existe les hydrofuges superficiels et les hydrofuges pénétrants.

### 2.1 Hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse sont des adjuvants qui sont ajoutés à la fabrication du béton dès son malaxage afin d'améliorer l'étanchéité à l'eau en obturant les pores et capillaires. En effet, l'hydrofuge va réagir avec la chaux libre du ciment et former des cristaux fins qui eux vont boucher les pores et capillaires de petites dimensions et diminuer ainsi l'absorption capillaire. Ces hydrofuges sont donc utilisés lors de nouvelles constructions en béton afin de les protéger des risques de dégradations dues à une trop importante porosité du béton (11) (2).

### 2.2 Hydrofuges superficiels

Les hydrofuges superficiels, appelés également enduits superficiels, sont appliqués à la surface du béton à laquelle ils adhèrent pour former une pellicule. Ils ne sont efficaces que quand ils adhèrent fortement à la surface et leur effet imperméabilisant ne dépend pas des propriétés du béton. Ces hydrofuges ne pénètrent pas plus que 2 mm à l'intérieur du béton (22).

#### **Les acryliques**

Les résines acryliques adhèrent bien aux surfaces sèches et résistent bien aux rayons UV et à l'humidité. Cependant, elles sont cassantes et résistent mal à l'usure (22).

#### **Les uréthanes**

« Les enduits au polyuréthane sont des produits à base d'un ou deux composants. Ils laissent un fini brillant qui tend à jaunir et à peler. De plus, ils sont toxiques puisqu'ils renferment des groupes isocyanates (22). »

#### **Les alkydes**

Les résines alkydes possèdent une faible résistance aux alcalis et ont tendance à jaunir. L'application de ces résines sur le béton est déconseillée (22).

## Les époxydes

Les époxydes sont des produits à deux composants (la résine époxy et le durcisseur) qui doivent être mélangés très peu de temps avant l'application. Une fois appliqués, ils subissent une polymérisation et durcissent rapidement pour devenir très rigides et résistants. Cependant, le coefficient de dilatation thermique des époxydes est beaucoup plus élevé que celui du béton, ce qui peut causer la fissuration de la pellicule.

## Les silicones ou polysiloxane (poids moléculaire : > 5000) (1)

Le silicone polymère est un hydrofuge inorganique, à base de silicium et d'oxygène, appliqué à l'état complètement polymérisé (25) (22). L'action hydrophobe est obtenue par le dépôt, après évaporation du solvant, de molécules à groupements hydrophobes organiques (méthyle, butyle,...)

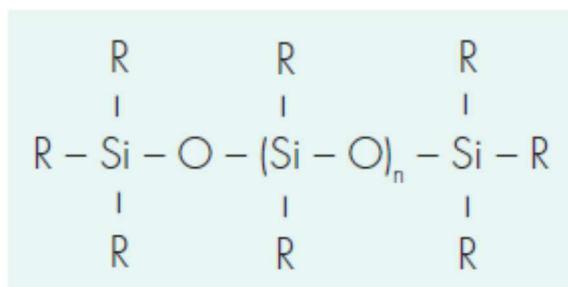


Figure 10 : Exemple de formulation des silicones/polysiloxane (26)

Les silicones forment une pellicule superficielle non-adhérente puisqu'ils ne pénètrent pas assez en profondeur. Ainsi, ils résistent mal aux rayons UV, à une chute de l'alcalinité et à l'usure et ne sont donc pas adaptés à la protection des ouvrages historiques en béton (22).

### 2.3 Hydrofuges pénétrants

Les hydrofuges pénétrants sont absorbés par le béton et réagissent avec ce dernier afin de rendre la surface, sur laquelle ils sont appliqués, hydrophobe. Ces hydrofuges tapissent les parois internes des pores et capillaires et ne forment pas de pellicule sur la surface traitée. Ce traitement est surtout adapté pour les petites fissures (29), tandis que les fissures plus larges doivent être bouchées à l'aide d'un mastic souple. En outre, au contraire des hydrofuges superficiels, le pouvoir imperméabilisant des hydrofuges pénétrants dépend des propriétés du béton (1).

## Silicones (30)

Les produits à base de silicone sont les hydrofuges les plus employés actuellement (29). Il existe plusieurs sous-familles, notamment les silanes, les siloxanes et les polysiloxanes, dépendant de la taille des molécules de la matière active. En effet, ces différents types ne se distinguent pas seulement par les groupements organiques fixés sur les chaînes  $\text{Si} - \text{O}$ , donnant lieu aux propriétés hydrofuges, mais aussi par le type de réaction chimique

conduisant à la formation du polymère. Le poids moléculaire dans une même catégorie chimique peut varier selon qu'il s'agit d'oligomères ou de polymères.

a) Fonctionnement par polymérisation

Deux réactions chimiques ont lieu afin que les produits polymérisent et présentent le fonctionnement d'hydrofuge.

La première réaction est « l'hydrolyse » : les molécules de silicones réagissent avec l'humidité contenue dans le béton pour former des groupes silanols.

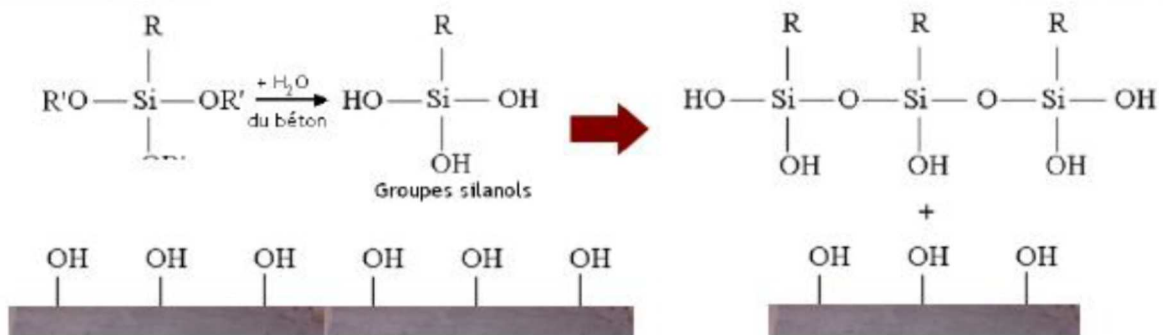


Figure 11 : Hydrolyse (31)

La deuxième réaction est « la condensation » : les silanols obtenus lors de l'hydrolyse vont réagir avec les groupes hydroxyles contenus dans le béton et se lier ainsi sur les surfaces des pores de la surface traitée.

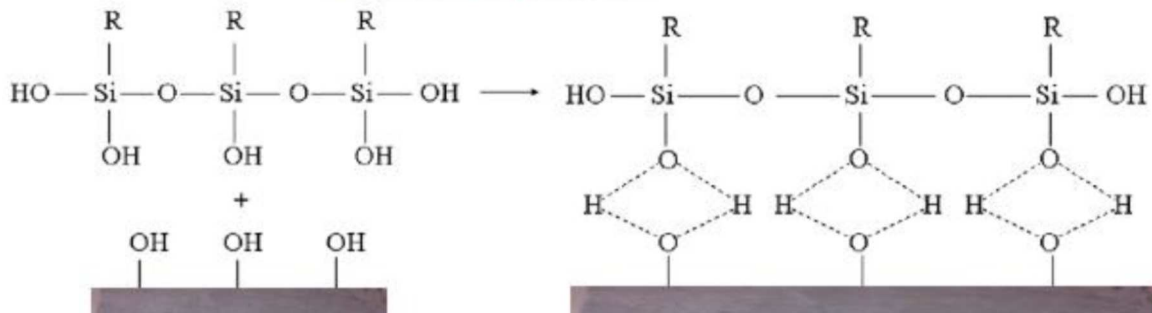


Figure 12 : Condensation (31)

Le produit final obtenu est un film de résine silicone couvrant les parois des pores du béton. Le caractère hydrophobe de la molécule est fonction du groupe alkyl qui est substitué sur le silicium (groupe  $R$ ). Cette chaîne diminue la tension de surface du béton et apporte ainsi l'hydrophobicité. La chaîne  $O - Si - O$  représente des liaisons covalentes inorganiques. Elle contrôle la profondeur de pénétration en fournissant la réactivité avec le matériau (26).

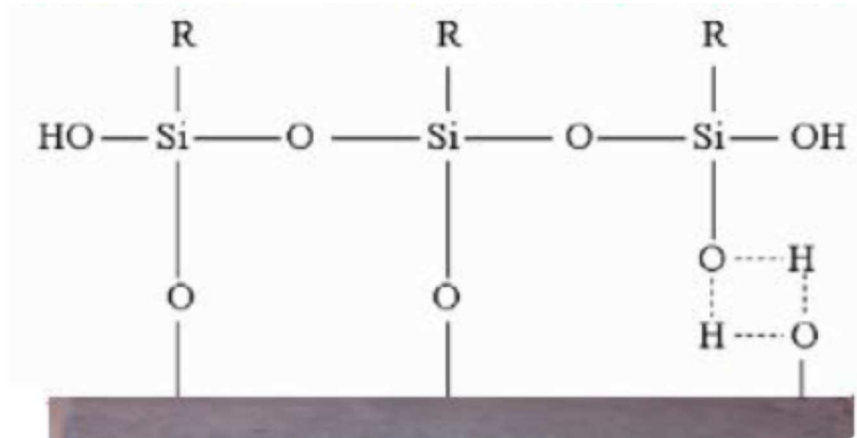


Figure 13 : Formation du polysiloxane (31)

b) Les silanes (poids moléculaire : 100 – 200) (1)

Il s'agit d'une famille de molécules monomères (alkyl-alkoxydes) formées de divers groupes alkyls liés par une molécule de silicone. L'efficacité de l'effet hydrofuge d'un silane dépend de la molécule du groupe alkyl utilisée. En effet, plus celle-ci est grosse (plus longue chaîne), meilleur est le pouvoir hydrofuge du silane (22).

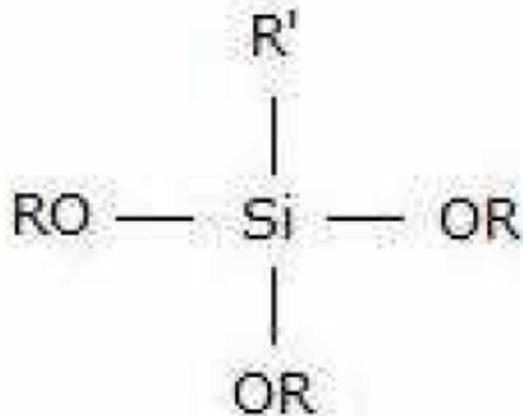


Figure 14 : Molécule de silane (30)

L'hydrophobicité des silanes résulte d'une double réaction chimique (la « polymérisation ») entre l'hydrofuge et le béton (22):

- La première est l'«hydrolyse» : Cette réaction se déroule en milieu alcalin, c'est-à-dire à pH élevé. En effet, les silanes réagissent avec l'eau contenue dans le béton pour produire des groupes silanols.
- La deuxième est la « condensation » : Les groupes silanols réagissent avec la silice des granulats contenus dans le béton pour former une couche hydrophobe sur les parois des pores internes du béton.

Dès lors, « le groupe alkyl joue le rôle de molécule hydrofuge et les groupes silanols permettent d'ancrer cette molécule sur les surfaces internes du béton (1)»

Les avantages des silanes sont liés à la taille des molécules. En effet, grâce aux molécules de silane qui sont très petites, l'hydrofuge peut pénétrer même dans les bétons extrêmement denses à capillaires très fins. La profondeur de pénétration pour les bétons peut être supérieure à 5 mm.

Néanmoins, le principal inconvénient des silanes réside dans la perte de matière active (60 à 80 %) (25). D'une part, la réaction de polymérisation avec le béton peut entraîner une perte du pouvoir pénétrant du produit. D'autre part, sa propriété volatile et la formation éventuelle d'alcool peuvent conduire à l'évaporation de la matière active pendant l'application. Pour lutter contre ces pertes de matières, des solutions concentrées de silanes contenant 40 à 100 % de matière active sont utilisées afin de garantir une quantité résiduelle suffisante de produit dans le béton (25) (22)

c) Les siloxanes (poids moléculaire : 600 – 1000) (1)

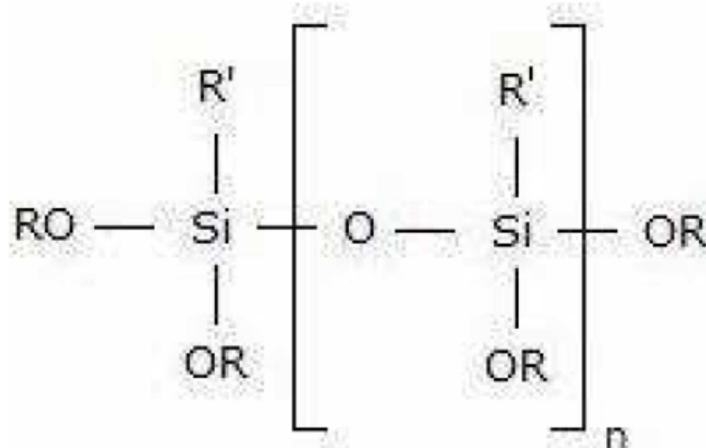


Figure 15 : Molécule de siloxane (30)

Il s'agit d'une famille de molécules oligomères (alkyl-alkoxi-siloxanes) composées de silanes partiellement hydrolysés. La couche hydrophobe est obtenue grâce à la seule réaction chimique qui se produit entre les siloxanes et la silice contenue dans les granulats du béton (22).

Étant oligomères, les molécules de siloxane sont plus grosses que les molécules de silane et ne pénètrent donc pas aussi profondément dans le béton. Ainsi, elles sont plus sensibles à l'abrasion et ne sont pas adaptées dans la protection des bétons denses (22).

Les siloxanes contiennent moins de matière active que les silanes puisqu'ils sont moins volatils et la perte de matière active pendant l'application est donc moins importante (20 à 30 %) (25).

### L'huile de lin

*« L'huile de lin pénètre dans le béton, mais des essais ont montré que ce produit possède un pouvoir imperméabilisant très limité et n'empêche à peu près pas l'infiltration de chlorures. Elle fait jaunir les surfaces et se détériore sous l'effet des rayons UV. De plus, l'huile de lin peut réduire le rendement des silanes et siloxanes (1). »*

### **Les silicates (1)**

Les sels insolubles vont colmater les pores des bétons et rendre la surface plus dure. Ainsi, ils vont réduire l'absorption d'eau et de sels. Toutefois, ils ne sont utilisés qu'en hydrofugation horizontale et lors de l'application sur la surface, celle-ci doit être parfaitement sèche, il ne faut pas que les pores soient remplis d'eau.

## ***Chapitre VI : Pourquoi choisir des hydrofuges comme technique de protection pour le patrimoine ?***

---

Cette partie traite, les différents types de dégradations et les mécanismes de transport. De plus, diverses techniques de protection sont illustrées, en particulier les hydrofuges. La question se pose donc pourquoi utiliser des hydrofuges comme technique de protection pour le patrimoine ?

En effet, la plupart des dégradations rencontrées sur le patrimoine en béton sont dues aux infiltrations d'eau et agents agressifs. Dès lors, l'utilisation d'hydrofuges semble être un bon choix puisqu'ils ne luttent pas seulement contre la pénétration d'eau, mais ils présentent également d'autres avantages tels qu'un coût faible et une application simple. Par ailleurs, ils permettent de respecter les besoins spécifiques exigés par la restauration du patrimoine qui sont le « *respect de l'apparence, de la couleur, de la texture d'origine* (31). »

L'efficacité d'un hydrofuge est mesurée sur base des trois critères suivants :

- la capacité de réduction de l'absorption d'eau par capillarité et ainsi l'empêchement, ou du moins le retardement, de la pénétration d'agents agressifs
- la profondeur de pénétration
- la modification des tensions de surfaces et donc l'augmentation de l'angle de contact

En effet, pour que l'hydrofuge soit durable, il faut qu'il adhère bien à la surface du béton. L'application de celui-ci sur la surface à traiter doit donc être soignée et suivre des règles précises (22).

À court terme, les hydrofuges présentent donc une bonne technique pour lutter contre la pénétration d'eau à l'intérieur du béton, cependant leurs comportements à long terme ne sont pas encore très bien connus. De même, l'influence sur l'intrusion des ions chlorures et la pénétration d'eau sous pression sont mal connus.

C'est donc dans ce but, que ce travail a été réalisé afin de pouvoir affirmer ou infirmer d'une part l'efficacité à réduire la pénétration d'eau et d'ions dans le sein du béton et d'autre part la durabilité des hydrofuges étant soumis à des cycles de vieillissement provoquant ainsi des dégradations qu'un béton pourrait subir au cours de sa vie.

---

## **Partie B : Partie expérimentale**

---

## **Chapitre VII : Choix et caractéristiques des matériaux utilisés**

---

### **1 Choix des hydrofuges utilisés**

Comme expliqué dans le Chapitre IV : il existe deux types d'hydrofuges de surface, notamment les hydrofuges superficiels et les hydrofuges pénétrants. Ils sont tous les deux appliqués en surface des bétons déjà existants, cependant ils présentent des caractéristiques très différentes. D'après la littérature, les hydrofuges pénétrants semblent être plus efficaces contre la pénétration par capillarité de l'eau et des agents agressifs dans le béton. Ce type d'hydrofuges est donc plus adopté pour assurer la durabilité du patrimoine historique en béton.

Les silanes comptent parmi les hydrofuges, de surface pénétrants, les plus commercialisés sur le marché et sont considérés comme étant les plus performants. Par ailleurs, les produits dilués dans du solvant sont plus liquides et présentent une profondeur de pénétration plus grande par rapport aux produits dilués dans l'eau qui eux sont plus visqueux et moins pénétrants.

Le choix s'est donc porté sur deux hydrofuges pénétrants à base de silane, mais avec un taux de matière active différent. En outre, un est sans solvant tandis que l'autre est en phase aqueuse. Les deux hydrofuges ont été fournis par la société *Sika*.

Le premier hydrofuge sélectionné est le « **Sikagard® - 705 L** » (32), appelé dans la suite de ce travail « Hydrofuge A ». Il s'agit d'« *une imprégnation hydrophobe de consistance liquide, à base de Silane* ». « **Sikagard® - 705 L** est un produit sans solvant avec un taux de matière active de 99 % ». Selon la fiche technique la profondeur de pénétration est supérieure ou égale à 10 mm.

Le second hydrofuge est le « **Sikagard® - 740 W** » (33), appelé dans la suite « Hydrofuge B ». Il s'agit d'« *une imprégnation hydrophobe de consistance liquide, à base de concentré de Silane en phase aqueuse* ». « **Sikagard® - 740 W** est un alcoxysilane avec un taux de matière active de 40 % ». Selon la fiche technique la profondeur de pénétration est inférieure à 10 mm.

### **2 Matériaux utilisés**

#### **2.1 Le ciment**

Le seul type de ciment utilisé tout au long de ce travail est un ciment de type *CEMIII A 42,5*. Il s'agit d'un ciment de haut fourneau contenant du clinker et principalement du laitier de haut fourneau. En effet, ce type de ciment a tendance à fixer plus les ions chlorures libres qui veulent pénétrer à l'intérieur et il est donc bien adapté pour un environnement agressif, comme par exemple l'attaque par des ions chlorures. Néanmoins, dans l'analyse des résultats il n'intervient pas puisque tous les échantillons sont fabriqués à partir du même ciment.

## 2.2 Les sables

Trois types de sables sont utilisés pour la formulation des mortiers, notamment du sable S19 (sable de Rhin 0/4), du sable S20 (sable de Rhin 0/5) et des fines M400. Les courbes granulométriques des deux sables de Rhin sont représentées ci-dessous :

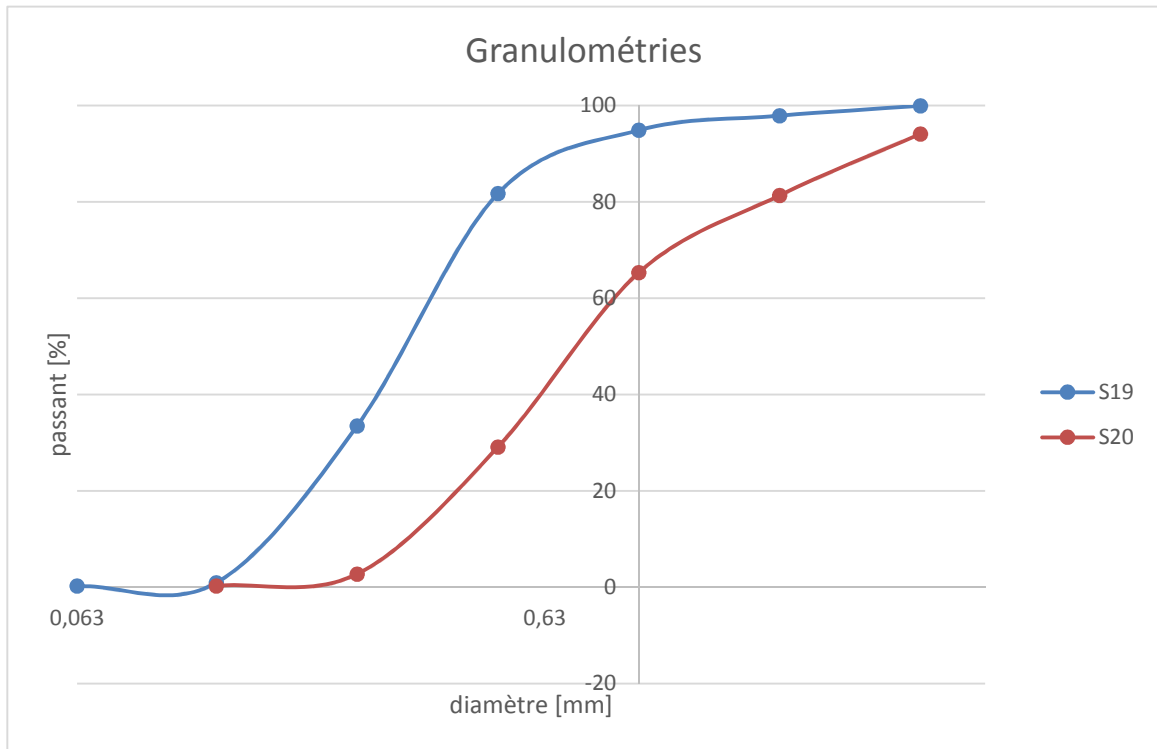


Figure 16 : Granulométrie des sables utilisés

## **Chapitre VIII : Composition et fabrication des mortiers**

---

### **1 Introduction**

Le but de ce travail de fin d'études consiste en l'étude de l'effet des hydrofuges de surfaces sur des bétons. Cependant, le choix s'est porté sur des échantillons de mortier afin de mieux évaluer le comportement des matériaux poreux vis-à-vis des différents essais. En effet, le béton est constitué de gros granulats qui peuvent poser des problèmes techniques lors des essais de diffusion. D'un côté, les ions chlorures ont tendance à traverser le béton au niveau de l'interface pâte de ciment/granulats puisque la porosité y est modifiée voire plus grande, de l'autre côté la pénétration de ces ions peut être bloquée par les gros granulats. L'utilisation d'échantillons de mortier limite dès lors ces risques.

Ce chapitre est consacré à la formulation et à la réalisation des mortiers. D'abord, le nombre d'échantillons nécessaires pour tous les essais est défini. Ensuite, la composition des mortiers est présentée, c'est-à-dire les rapports  $E/C$ , les matériaux et les quantités utilisés. Puis, une description de la procédure de fabrication des différentes gâchées de mortier ainsi que la confection des échantillons à partir de ces gâchées est faite. Par ailleurs, des résultats de tests sur béton frais et durci sont mentionnés. Enfin, une dernière section traite de l'application des hydrofuges sur les échantillons.

### **2 Détermination du nombre d'échantillons nécessaires**

D'abord, les différents paramètres à analyser ont été fixés. En particulier, les différents rapports  $E/C$ , les types d'hydrofuges ainsi que leurs consommations ont été choisis. Dès lors, la décision de travailler avec trois rapports  $E/C$ , deux hydrofuges et trois consommations a été prise. En d'autres termes, pour un essai au moins 18 échantillons de composition différente devront être testés, sans tenir compte des échantillons de référence et du fait que pour certains essais 2 échantillons de même composition devront être analysés. Ce qui fait au total 162 échantillons à tester.

Ensuite, à partir de ces données et en connaissant le nombre disponible et les dimensions des moules utilisés, notamment des dalles métalliques de  $[40 \times 40 \times 8] \text{ cm}$  et des moules métalliques rectangulaires de  $[10 \times 10 \times 40] \text{ cm}$ , des calculs ont été effectués afin de déterminer les gâchées ou dalles nécessaires aux carottages des échantillons et à leurs dispositions au niveau d'une dalle. Au final, en sachant que le volume maximal d'une gâchée vaut 46 l, six gâchées de mortier ont été réalisées contenant chacune 3 dalles. Les carottages ont été réalisés à partir de schémas de carottages.

Enfin, il a été décidé de fabriquer les six gâchées, mais de n'utiliser qu'une consommation en hydrofuge pour la plupart des essais, sauf pour l'efficacité des hydrofuges où soit 2 soit 3 consommations seront mesurées en fonction que l'échantillon est vieilli ou non vieilli. De plus, deux échantillons devront être mesurés pour chaque essai excepté pour l'efficacité des hydrofuges et la diffusion en régime transitoire où un échantillon est suffisant. Ainsi, le nombre d'échantillons à confectionner diminue considérablement à 78 échantillons.

### 3 Composition des mortiers

Avant la fabrication des six gâchées, il a fallu déterminer les bonnes quantités des différents constituants, en particulier le pourcentage des différents types de sable. En effet, pour obtenir la bonne composition, il faut que la courbe granulométrique finale, obtenue à partir de granulométries de sables différents, se trouve entre les limites de deux courbes normalisées.

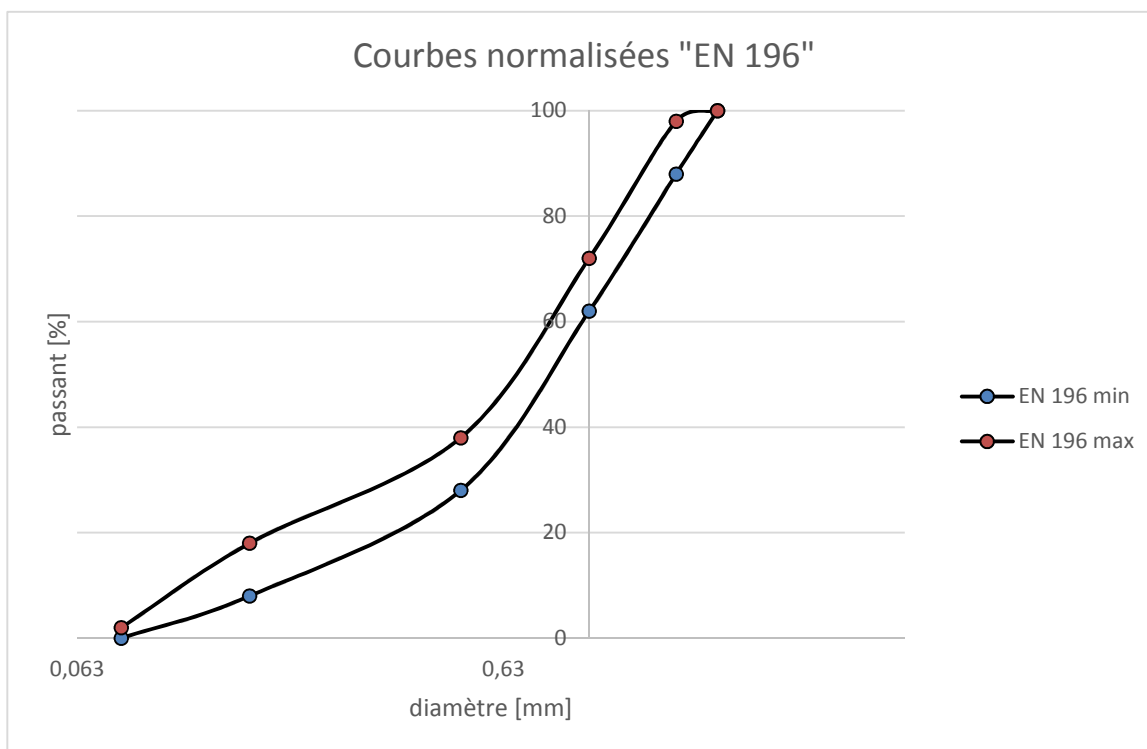


Figure 17 : Courbes normalisées « EN 196 » (32)

D'abord, trois types de sables ont été choisis, notamment du sable S19 (sable de Rhin 0/4), du sable S20 (sable de Rhin 0/5) et du sable normalisé SR 0/0,5. Ensuite, ces sables ont été tamisés afin de déterminer leur granulométrie. Pour ce faire, des tamis de [0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2 et 4] mm ont été utilisés et le pourcentage de passant, pour chaque sable, est obtenu :

tamis [mm]	passant [%]		
	S19	S20	SR
4	99,95	94,1	100
2	97,87	81,33	100
1	94,87	65,3	100
0,5	81,72	29,13	87,28
0,25	33,5	2,75	9,78
0,125	0,92	0,28	0,95
0,063	0,24	0	0,007

Tableau 3 : Pourcentage de passant pour les trois types de sables

Enfin, une fois que les 3 courbes granulométriques sont déterminées, la courbe granulométrique finale représentée ci-dessous est obtenue :

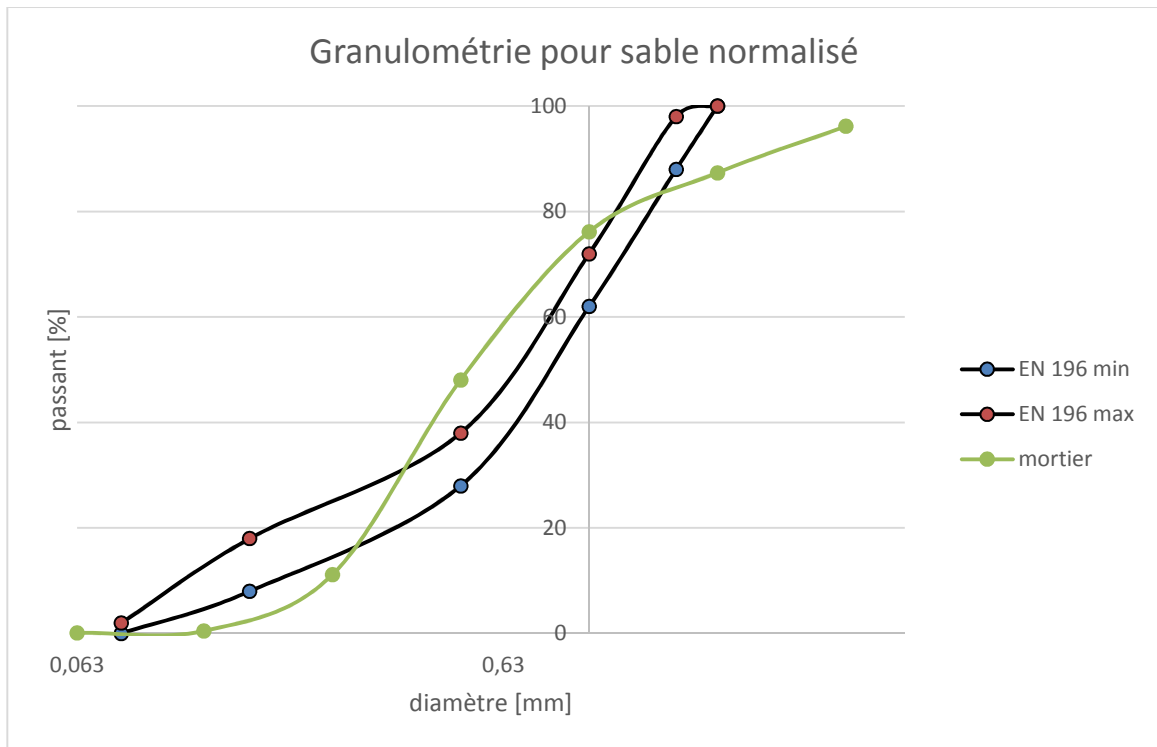


Figure 18 : Granulométrie pour sable normalisé

Néanmoins, malgré l'utilisation du sable normalisé *SR 0/0,5*, la courbe granulométrique ne se trouve pas entre les deux limites. Dès lors, la décision s'est portée sur l'ajout des fines *M 400* au lieu du sable normalisé. Le passant de ces fines est de 100 % pour un tamis de 0,063 mm. Après de nombreux essais et erreurs, la courbe granulométrique pour des teneurs en fines de 3 % à 5 % se rapproche le mieux des courbes limites. En effet, la teneur du sable *S19* a été fixée à 18 %, ce qui revient à ne changer que les teneurs du sable *S20* et des fines. Ainsi, des tests de consistance sur mortier frais pour deux compositions de sables ont été réalisés données ci-dessous :

- première composition contient : 18 % de *S19* ; 79 % de *S20* et 3 % de *M400* et
- deuxième composition contient : 18 % de *S19* ; 77 % de *S20* et 5 % de *M400*

Il est à noter que, le pourcentage des fines a dû être limité puisqu'il n'y en avait plus beaucoup.

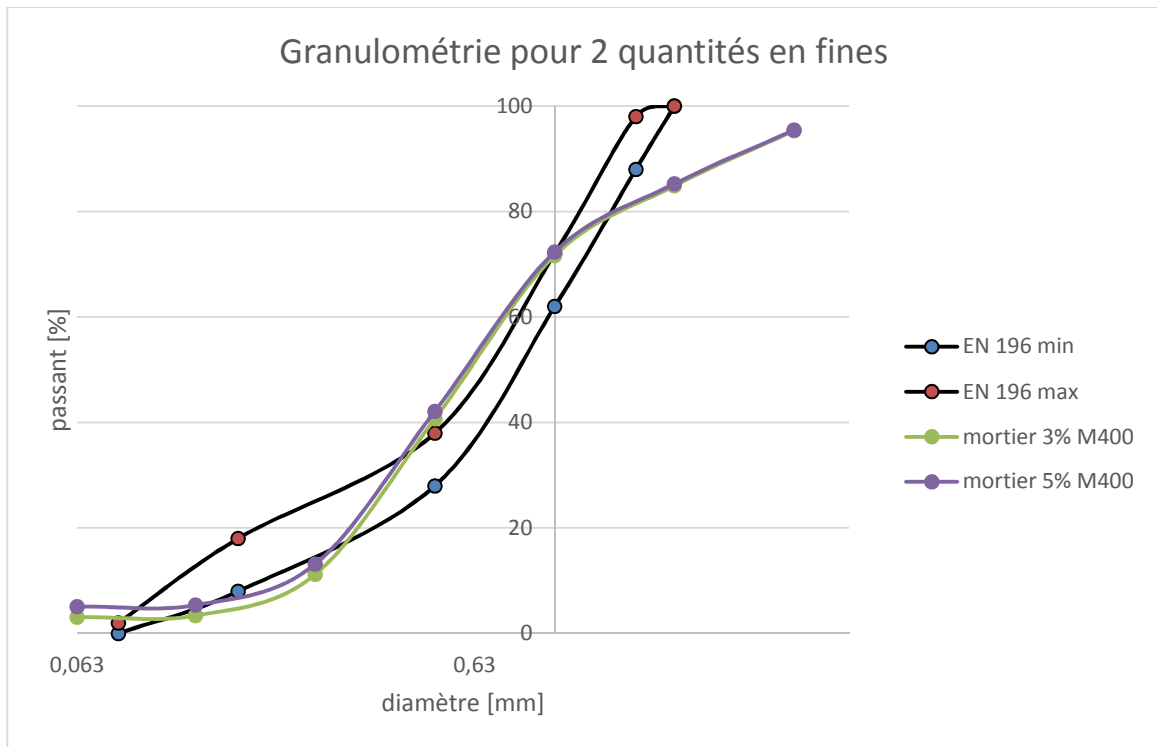


Figure 19 : Granulométries pour 2 quantités en fines

Après avoir déterminé tous les constituants, des tests de consistance pour les différents rapports  $E/C$  ont été effectués. En connaissant, la composition pour 0,9 l de mortier de rapport  $E/C = 0,5$ , la composition pour  $1\text{ m}^3 = 1000\text{ l}$  de mortier de même rapport  $E/C$  a pu être calculée. À partir de ces données et en considérant un volume de pâte constant, c'est-à-dire

- la masse du sable est toujours égale à  $1500\text{ kg/m}^3$  et
- $\frac{S}{\rho_S} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{E}{\rho_E} = \frac{1500}{2650} + \frac{500}{3100} + \frac{250}{1000}$ ,

la composition pour des rapports  $E/C = 0,6$  et  $0,7$  a pu être déterminée. En somme, la composition pour  $1\text{ m}^3$  de mortier pour les trois rapports  $E/C$  est donnée dans le tableau suivant :

$E/C$	0,5		0,6	0,7
Composition	0,9 l	$1\text{ m}^3$	$1\text{ m}^3$	$1\text{ m}^3$
Sable [kg]	1350	1500	1500	1500
Ciment [kg]	0,450	500	445,80	402,21
Eau [kg]	0,225	250	267,48	281,55
Masse volumique mortier [ $\text{kg/m}^3$ ]		2250	2213,28	2183,76

Tableau 4 : Masses pour les trois rapports  $E/C$

Puis, les deux compositions pour 4 l de mortier pour chaque rapport  $E/C$  ont pu être déterminées. Ainsi, les compositions suivantes sont testées :

E/C	0,5		0,6		0,7	
Composition	1	2	1	2	1	2
Sable [kg]	6	6	6	6	6	6
M400 [kg]	0,18	0,3	0,18	0,3	0,18	0,3
S19 [kg]	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
S20 [kg]	4,74	4,62	4,74	4,62	4,74	4,62
Ciment [kg]	2	2	1,7832	1,7832	1,6088	1,6088
Eau [kg]	1	1	1,0699	1,0699	1,1262	1,1262

Tableau 5 : Masses pour les deux compositions

### 3.1 Malaxage du mortier et test de consistance sur mortier frais

Le malaxage est réalisé suivant la norme « Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: Détermination des résistances mécaniques (32). » D'abord, tous les matériaux utilisés ont été pesés à  $\pm 0,1 g$  près à l'aide d'une balance. Ensuite, pour le malaxage du mortier un protocole précis a dû être respecté. Les étapes à suivre sont les suivantes :

- Humidifier les parois du malaxeur
- Introduire tout le sable et mélanger pendant 30 s
  - Ajouter la moitié de l'eau et mélanger pendant 120 s
- Laisser au repos pendant 120 s
- Ajouter le ciment et mélanger pendant 30 s
- Ajouter l'autre moitié de l'eau et mélanger pendant 90 s



Photo 2 : Malaxeur pour 4l de mortier

Puis, la table à secousse a été utilisée afin de déterminer la classe de consistance du mortier frais selon la norme « NBN B 14-207 (33). » Pour ce faire, les étapes suivantes ont été suivies :

- Humidifier le plateau plan en verre ainsi que le moule métallique en forme de tronc de cône
- Remplir le moule à moitié du mortier frais et compacter par 10 piquages à l'aide d'une tige métallique
- Remplir le moule jusqu'en haut et compacter par 10 piquages supplémentaires

- Enlever le surplus de mortier et retirer verticalement le moule
- Effectuer 15 secousses en  $\pm 15$  s
- Mesurer l'étalement ou le « slump » du mortier

Enfin, l'étalement du mortier frais, obtenu à partir de la moyenne de deux diamètres perpendiculaires, détermine la classe de consistance. Les étalements et leur classe de consistance correspondante sont donnés dans le tableau ci-dessous.

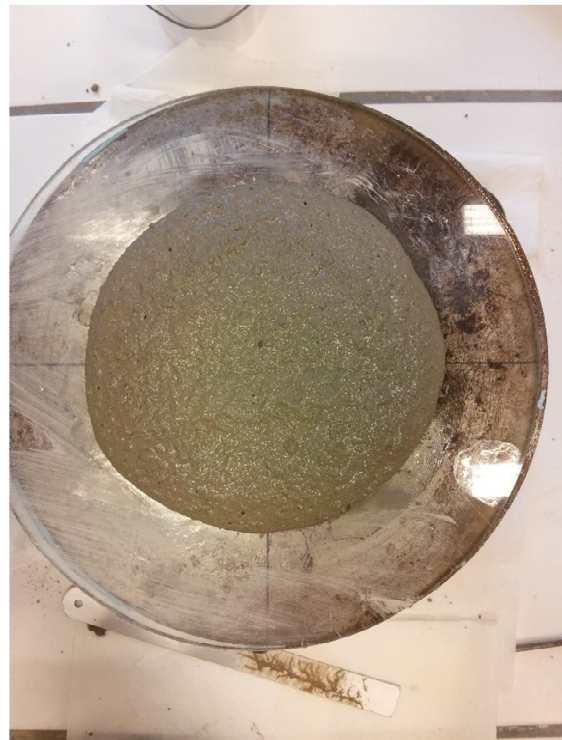
<b>E/C</b>	<b>0,5</b>		<b>0,6</b>		<b>0,7</b>	
<b>Composition</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Étalement [cm]</b>	13,5	14	18,75	/	21,75	21
<b>Classe</b>						

Tableau 6 : Étalements et classe de consistance pour les trois rapports  $E/C$

En comparant les étalements obtenus pour les deux compositions, des valeurs presque identiques peuvent être observées et la composition 1, notamment celle contenant 3 % de fines, a été retenue pour la fabrication des mortiers testés dans de ce travail.



$E/C = 0,5$



$E/C = 0,7$

Photo 3 : Étalements

## 4 Réalisation des mortiers

Une fois que les proportions en masse des différents types de sable sont connues, le nombre de  $kg$  de chacun des constituants par  $m^3$  de béton pour chaque rapport  $E/C$  a pu être déterminé et est repris dans le Tableau 7.

E/C	0,5	0,6	0,7
<b>M400 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	45	45	45
<b>S19 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	270	270	270
<b>S20 [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1185	1185	1185
<b>Ciment [kg/m<sup>3</sup>]</b>	500	445,8	402,21
<b>Eau [kg/m<sup>3</sup>]</b>	250	267,48	281,55

Tableau 7 : Masses des constituants

En tout, 6 gâchées ont été fabriquées, en particulier 2 gâchées pour chaque rapport  $E/C$ . À partir d'une gâchée, il a fallu réaliser trois dalles de  $[40 \times 40 \times 8]$  cm alors qu'à partir de l'autre gâchée, il a fallu réaliser deux dalles de  $[40 \times 40 \times 8]$  cm et deux parallélépipèdes rectangulaires de  $[10 \times 10 \times 40]$  cm. Une réserve de 20 % a été ajoutée afin de pouvoir remplir un moule comportant trois compartiments de  $[4 \times 4 \times 16]$  cm et compenser des éventuelles pertes. Ainsi, les volumes pour les deux gâchées sont obtenus :

$$V_1 = 3 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,08) + 0,2 \cdot 3 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,08) = 0,0461 m^3$$

$$V_2 = 2 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,08) + 2 \cdot (0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,4) + 0,2 \cdot [2 \cdot (0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,08) + 2 \cdot (0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,4)] = 0,0403 m^3$$

Les masses de chacun des constituants et pour chaque rapport  $E/C$  sont données dans le tableau suivant :

E/C	0,5		0,6		0,7	
Gâchée	$V_1$	$V_2$	$V_1$	$V_2$	$V_1$	$V_2$
<b>M400 [kg]</b>	2,07	1,81	2,07	1,81	2,07	1,81
<b>S19 [kg]</b>	12,44	10,89	12,44	10,89	12,44	10,89
<b>S20 [kg]</b>	54,60	47,78	54,60	47,78	54,60	47,78
<b>Ciment [kg]</b>	23,04	20,16	20,54	17,97	18,53	16,22
<b>Eau [kg]</b>	11,52	10,08	12,33	10,78	12,97	11,35

Tableau 8 : Masses finales pour la réalisation des mortiers

Les six gâchées ont toutes été réalisées pendant le premier quadrimestre entre le 29 octobre 2014 et le 18 novembre 2014. La procédure de fabrication est la même que celle décrite précédemment, si ce n'est que la capacité du malaxeur est plus grande. Ensuite, les différentes dalles ont été remplies et placées sur une table vibrante pour procéder au serrage du mortier. Il a fallu veiller à ce que la durée de vibration ne soit pas trop longue afin de limiter le risque de ségrégations des grains dans le fond du moule.

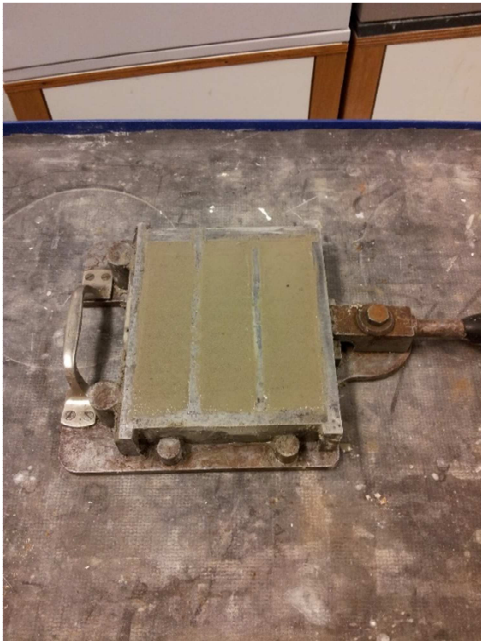


**Photo 4 : Constituants utilisés**



**Photo 5 : Malaxeur**

De plus, le moule, donnant lieu aux trois éprouvettes prismatiques, a aussi été rempli et compacté pendant 2 minutes à l'aide de la table à chocs qui donne 60 chocs dans environ 60 secondes (32).



**Photo 6 : Moule**



**Photo 7 : Table à secousses**

Enfin, après avoir été vibrés, tous les moules ont été placés en chambre humide conditionnée à 20°C et à 90 % d'humidité relative pendant 24 heures. Le lendemain, les dalles et le moule ont été démoulés et ils ont subi une cure de 28 jours en chambre humide avant d'avoir stockées les dalles dans des conditions standards de laboratoire, c'est-à-dire à 23°C ± 2°C et à 55 % + 5% d'humidité relative. Les trois éprouvettes, obtenues à partir du moule, ont servi pour réaliser l'essai de flexion compression sur mortier durci.

#### 4.1 Test sur mortier frais (33)

La consistance des mortiers est déterminée à l'aide de la table à secousses. La procédure de l'essai est la même que celle décrite plus haut et les différents étalements sont donnés dans le tableau 8.

E/C	0,5		0,6		0,7	
Gâchée	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>
Étalement [cm]	14	15	17,5	17,5	19	20
Classe						

Tableau 9 : Étalements mortiers finaux

#### 4.2 Test sur béton durci

L'essai ici utilisé c'est l'essai de flexion-compression. Trois éprouvettes prismatiques ont été testées pour chaque gâchées. L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à de la flexion afin de déterminer la résistance en flexion. Après avoir atteint la rupture par flexion de l'éprouvette, les deux parties obtenues sont soumises à de la compression axiale pour déterminer la résistance en compression. Les résistances moyennes ainsi que les écart-types pour chaque gâchée sont présentées sur les figures suivantes. (toutes les mesures sont reprises en Annexe...)

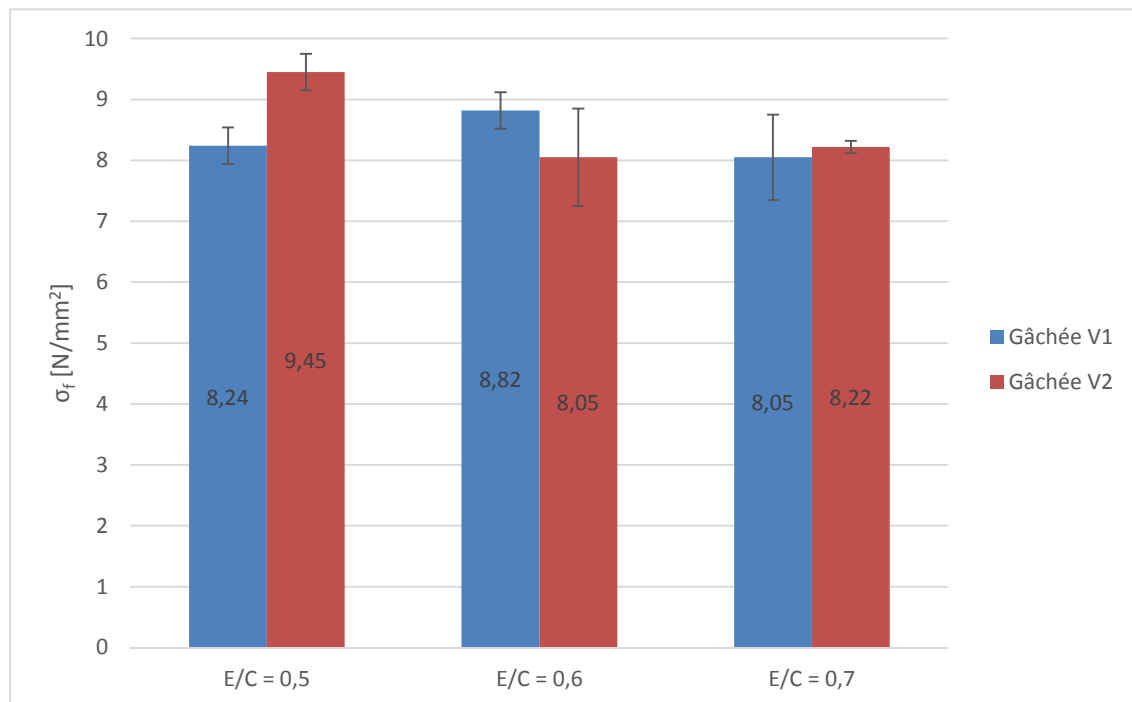
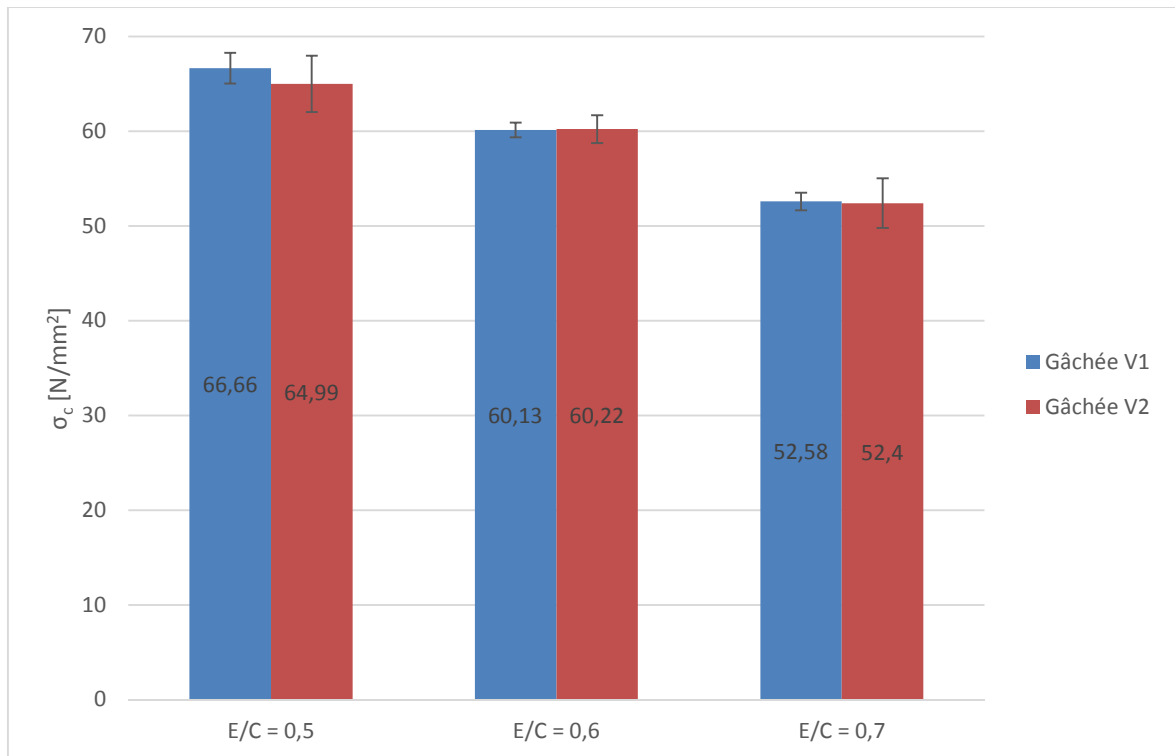


Figure 20 : Résistance à la flexion



**Figure 21 : Résistance à la compression**

En comparant les deux figures, une grande dispersion des résistances en flexion entre les deux gâchées peut être observée pour le même rapport  $E/C$  tandis que les résistances en compression sont pratiquement les mêmes pour les deux gâchées. Parallèlement, la même remarque peut être faite pour les écarts-types. En outre, les résistances en compression suivent une logique claire. En d'autres termes, elles diminuent avec un rapport  $E/C$  augmentant ce qui correspond bien aux bases théoriques. Cette tendance n'est pas vérifiée pour les résistances en flexion.

## 5 Confection des échantillons

Une fois que toutes les dalles ont été fabriquées et stockées pendant un certain temps dans des conditions standards de laboratoire, c'est-à-dire à  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à  $55\% \pm 5\%$  d'humidité relative, la confection des échantillons a pu débuter. En effet, les échantillons sont carottés à partir des dalles en mortier et puis sciés à l'épaisseur souhaitée. Après la confection des échantillons, qui a eu lieu le 12 et 18 décembre 2014, ces derniers ont été de nouveau stockés au laboratoire jusqu'à l'application des hydrofuges début février.



Photo 8 : Confection (carottage et sciage) des échantillons

Comme mentionné plus haut, les dalles ont été réalisées pour trois consommations en hydrofuge, cependant, dans ce travail, pour la plupart des essais seulement une consommation en hydrofuge est utilisée. Dès lors, les échantillons nécessaires pour les essais ont été carottés tout en respectant les schémas de carottages afin de pouvoir réutiliser ces schémas pour le carottage des autres échantillons. Toutefois, pendant le travail des échantillons supplémentaires ont dû être carottés, ce qui fait que les schémas ne sont plus respectés.

Le nombre total, les dimensions ainsi que les gâchées correspondantes des échantillons sont donnés dans le Tableau 10.

	Nombre d'échantillons	Dimension	Gâchée	Dalle
Absorption capillaire	21	Cube [10 × 10 × 10] cm	$V_2$	
Vieillessement artificiel	15	Cylindre Diamètre : 5 cm Épaisseur : 8 cm	$V_1$	1
Diffusion en régime stationnaire	15	Cylindre Diamètre : 8 cm Épaisseur : 2 cm	$V_2$	1
Diffusion en régime transitoire	9	Cylindre Diamètre : 11,3 cm Épaisseur : 5 cm	$V_2$	1
Diffusion accélérée	15	Cylindre Diamètre : 10 cm Épaisseur : 5 cm	$V_1$	1 et 2
Perméabilité à l'eau sous pression	15	Cylindre Diamètre : 10 cm Épaisseur : 8 cm	$V_1$	/

Tableau 10 : Informations sur les échantillons

## 6 Application des hydrofuges

L'application des hydrofuges sur les échantillons a eu lieu pendant la première semaine de février. Ceux-ci ont été appliqués au pinceau sur une surface de chaque échantillon mis à part les échantillons de référence. En effet, en fonction de la consommation en hydrofuge souhaitée, une ou plusieurs couches ont dû être appliquée(s). La consommation en hydrofuge est exprimée en  $g/m^2$ , c'est-à-dire qu'il faut calculer pour chaque surface la quantité d'hydrofuge à appliquer.

D'abord, l'échantillon a été pesé et la balance a été mise à 0. Ensuite, une première couche d'hydrofuge a été appliquée sur la surface de l'échantillon et celui-ci a été repesé. Cette procédure a été répétée jusqu'à avoir la consommation d'hydrofuge souhaitée à  $\pm 10 g/m^2$  près. Au cas où une quantité d'hydrofuge trop élevée a été appliquée, le surplus a été épongé avec du papier afin d'avoir la bonne consommation. À noter que, en fonction de la consistance (liquide ou épaisse) de l'hydrofuge, des coulures plus ou moins importantes sur les côtés des échantillons ont eu lieu. Celles-ci ont également dû être épongées afin d'avoir la consommation souhaitée sur la surface à traiter. Enfin, l'échantillon a été mis de côté pour que l'hydrofuge puisse y pénétrer à l'intérieur et sécher.

Comme déjà mentionnée précédemment, une consommation en hydrofuge principalement de  $300 g/m^2 \pm 10 g/m^2$  pour tous les essais a été testée. Par ailleurs, pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité sur des échantillons non vieillis, les trois consommations en hydrofuge ont été utilisées, notamment  $c_1 = 150 g/m^2 \pm 10 g/m^2$ ,  $c_2 = 300 g/m^2 \pm 10 g/m^2$  ainsi que  $c_3 = 500 g/m^2 \pm 10 g/m^2$ . Par contre, pour les échantillons vieillis, seulement deux consommations en hydrofuge ont été testées, à savoir  $150 g/m^2 \pm 10 g/m^2$  et  $300 g/m^2 \pm 10 g/m^2$ .

	Surface [ $m^2$ ]	$c_1 \pm 10 g/m^2$ [g]	$c_2 \pm 10 g/m^2$ [g]	$c_3 \pm 10 g/m^2$ [g]
<b>Absorption capillaire</b>	0,01	[1,4; 1,6]	[2,9; 3,1]	[4,9; 5,1]
<b>Vieillessement artificiel</b>	0,002	[0,275; 0,314]	[0,569; 0,609]	[-]
<b>Diffusion en régime stationnaire</b>	0,005	[-]	[1,458; 1,558]	[-]
<b>Diffusion en régime transitoire</b>	0,01	[-]	[2,908; 3,109]	[-]
<b>Diffusion accélérée</b>	0,008	[-]	[2,278; 2,435]	[-]
<b>Perméabilité à l'eau sous pression</b>	0,008	[-]	[2,278; 2,435]	[-]

Tableau 11 : Consommations admissibles pour chaque dimension d'échantillon

Les consommations réelles appliquées sur les hydrofuges sont données en Annexe 1.

## **Chapitre IX : Description des essais**

---

### **1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la description des essais réalisés lors de ce travail de fin d'études. En effet, pour chaque expérience, des rappels théoriques, une description de l'essai et des équations à utiliser sont donnés. De plus, la préparation des échantillons et le matériel nécessaire pour les différents essais sont également détaillés.

Le premier essai réalisé consiste à tester l'efficacité des hydrofuges. Pour ce faire, des essais d'absorption capillaire et d'angle de contact sont effectués et ce sur des échantillons non vieillis et des échantillons vieillis, c'est-à-dire des échantillons ayant été soumis à des cycles de vieillissement.

Puis, deux essais de diffusion naturelle sont utilisés. Dans le premier cas, il s'agit d'un essai de diffusion en régime permanent ou stationnaire et le coefficient de diffusion est déterminé à partir d'une teneur en chlorures. Dans le deuxième cas, il s'agit d'un essai de diffusion en régime transitoire et le coefficient de diffusion est déterminé à partir d'un profil de teneur en chlorures.

Cependant, ces deux essais de diffusion naturelle peuvent durer longtemps avant de fournir des résultats, c'est pourquoi un essai de conduction est employé. En effet, cet essai consiste à appliquer un champ électrique afin d'accélérer la pénétration des chlorures et de déterminer ainsi la perméabilité aux chlorures.

### **2 Efficacité des hydrofuges**

#### **2.1 Absorption d'eau par capillarité**

##### **2.1.1 But de l'essai**

L'essai d'absorption capillaire permet de déterminer la perméabilité à l'eau liquide des hydrofuges et ainsi de tester leur efficacité. Cet essai est réalisé selon la norme *NBN EN 1062-3* « Peintures et vernis – Produits de peinture et systèmes de revêtements pour maçonnerie et béton extérieurs – Partie 3 : Détermination de la perméabilité à l'eau liquide » (34).

Préparation des échantillons et application des hydrofuges

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est effectué sur des échantillons non vieillis et des échantillons vieillis.

Les échantillons cubiques non vieillis de dimension  $[10 \times 10 \times 10]$  cm ont été conservés à environ  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à  $55\% \pm 5\%$  d'humidité relative pendant au moins 50 jours, avant l'application des hydrofuges. Les trois consommations en hydrofuges sont testées.

Étant donné qu'ils ont été sciés à partir d'un moule de dimension  $[40 \times 10 \times 10]$  cm, il a fallu veiller sur quelle face l'hydrofuge est appliqué. Ainsi, les hydrofuges ont été appliqués sur une face moulée non sciée, plus particulièrement celles du côté puisque celles-ci ont moins de défauts que les autres faces. En effet, la face inférieure a été soumise à des tassements et sur la face supérieure il y a des cavités qui se sont formées. En plus, les faces sciées sont également à éviter parce qu'elles ne représentent pas la réalité.

Les échantillons cylindrique vieillis d'un diamètre de 5 cm ont été conservés à  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à  $55\% \pm 5\%$  d'humidité relative pendant 14 jours, avant l'application des hydrofuges sur la surface supérieure sciée. Deux consommations en hydrofuges ( $c_1 = 150 \text{ g/m}^2$  et  $c_2 = 300 \text{ g/m}^3$ ) sont testées. Après avoir appliqués les hydrofuges sur les échantillons, ceux-ci ont été envoyés en Suisse chez « Sika » où ils ont été soumis à des cycles de vieillissement. Les détails de ces cycles sont présentés dans l'essai de vieillissement.

Il faut encore noter que les échantillons n'ont pas été mis à l'étuve puisqu'ils sont recouverts d'un hydrofuge. Ceux-ci risqueraient de perdre leur efficacité due à la chaleur. Ainsi, la masse n'est pas la masse sèche, mais étant donné que les échantillons ont tous été confectionnés au même moment (carottage et sciage), le même état au début de l'essai a été supposé.

### 2.1.2 Mode opératoire

D'abord, les échantillons sont pesés à 0,1 g près et une ligne à la hauteur d'immersion souhaitée est faite sur tous les échantillons. Le choix s'est porté sur une profondeur d'immersion de 10 mm sous la surface de l'eau. Ensuite, les éprouvettes sont placées, avec la surface hydrofugée à tester orientée vers le bas sur un porte-éprouvettes métallique qui lui se trouve dans une boîte. Enfin, celle-ci est remplie avec de l'eau désionisée jusqu'à la hauteur souhaitée et l'essai peut commencer.

Les échantillons sont pesés après 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 1h, 2h, 3h, 6h, 24 h et 30 h afin de connaître leur masse et donc de pouvoir déterminer la quantité d'eau absorbée. Pour ce faire, les éprouvettes sont sorties de la boîte et leur surface immergée est essuyée avec un chiffon propre non pelucheux de façon à enlever le surplus d'eau. Après avoir pesé l'échantillon, il est aussitôt remis, avec la surface hydrofugée vers le bas, sur le porte-éprouvette dans la boîte.

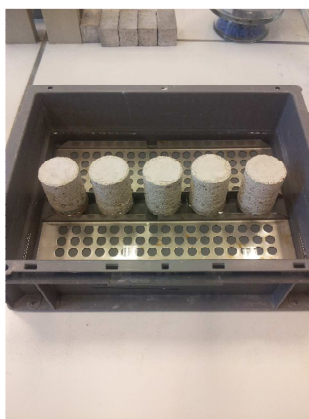


Photo 9 : Dispositif pour l'essai

### 2.1.3 Détermination du coefficient de transmission de l'eau liquide

D'abord, un coefficient d'absorption est déterminé qui est exprimé en fonction de la prise de masse de l'éprouvette par unité de surface :

$$w_t = \frac{M_t - M_0}{A} [kg/m^2]$$

Avec :

- $M_t$  : la masse de l'éprouvette après un temps d'immersion donné [kg]
- $M_0$  : la masse initiale de l'éprouvette [kg]
- $A$  : la section en contact avec l'eau de l'échantillon [ $m^2$ ]

Le coefficient de transmission de l'eau liquide  $w$  est donné par le quotient de l'augmentation de la masse par la surface des éprouvettes et par la racine carrée du temps. En effet, ce coefficient représente la pente de la droite obtenue entre les temps choisis.

$$w = \frac{\Delta w_t}{\Delta \sqrt{t}} [kg/m^2/\sqrt{h}]$$

La courbe d'absorption capillaire peut être distinguée en trois parties. La première partie de la courbe correspond au remplissage des plus gros capillaires et la pente est la plus importante. Le remplissage des capillaires plus fins se traduit par la deuxième partie et la dernière partie est représentée par l'atteinte d'un palier horizontal qui montre que la remontée capillaire a atteint sa valeur maximale (15).

## 2.2 Angle de contact

### 2.2.1 But de l'essai

Le but de cet essai est de mesurer, ou du moins estimer, l'hydrophobicité de l'échantillon testé sur base de l'angle de contact.

### 2.2.2 Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés pour cet essai sont les mêmes que ceux pour l'essai d'absorption d'eau.

### 2.2.3 Mode opératoire

L'angle de contact est mesuré au moyen d'une caméra CCD reliée à un ordinateur. L'échantillon est placé sur un dispositif réglable en hauteur et une goutte d'eau est déposée sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'une seringue monitorée par l'ordinateur. La caméra prend l'image de la goutte d'eau à partir de laquelle l'ordinateur peut mesurer l'angle de contact en numérisant le contour de la goutte. L'angle  $\theta$  mesuré, est l'angle que fait la tangente à la goutte au point de contact du solide, de la goutte et du gaz qui l'entoure, avec la surface du solide (15).

L'angle de contact est mesuré toute suite après la déposition de celle-ci sur la surface. Afin de minimiser les erreurs et donc les hystérésis, au moins 5 mesures par échantillon devront être prises.

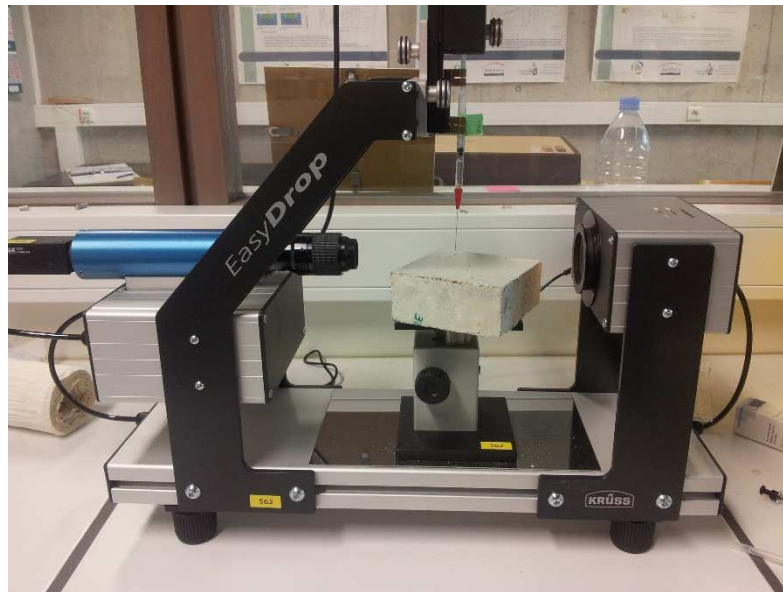


Photo 10 : Appareillage pour mesure l'angle de contact

### 3 Vieillissement artificiel

#### 3.1.1 But de l'essai

Le but de l'essai est de simuler les attaques de l'environnement sur des ouvrages en béton par des cycles de vieillissement afin déterminer la durabilité. L'essai est réalisé selon la norme « *NFT 30 – 049* » (35).

#### 3.1.2 Préparation des échantillons

Il s'agit des échantillons vieillis utilisés pour l'absorption d'eau par capillarité. Ils ont été envoyés mi-décembre en Swiss chez Sika qui a réalisé l'essai et ils ont été renvoyés fin février.

#### 3.1.3 Mode opératoire

Les échantillons sont soumis à des cycles de vieillissement. Un cycle est une phase qui dure 4 h et se compose de 4 ambiances bien définies :

- Exposition à l'eau en pluie artificielle pendant 30 min
- Exposition au froid pendant 1h
- Exposition à la chaleur et à l'humidité pendant 1 h
- Exposition à la chaleur sèche et au rayonnement actinique pendant 80 min

## 4 Diffusion en régime stationnaire

### 4.1 But de l'essai

L'essai de diffusion en régime stationnaire consiste à déterminer un coefficient de diffusion effectif  $D_e$  à l'aide de cellules de diffusion. En effet, ce dernier peut être exprimé en fonction de l'évolution de la concentration en chlorures dans le compartiment initialement dépourvu d'ions chlorés.

### 4.2 Composition des cellules de diffusion

Les cellules de diffusion sont composées d'une tranche de mortier qui est scellée entre deux compartiments contenant deux solutions de concentrations différentes en chlorures. Le compartiment aval contient une solution saturée à la chaux  $Ca(OH)_2$  de concentration  $3\text{ g/l}$  tandis que le compartiment amont contient, en plus de la solution saturée de chaux, une solution aqueuse de chlorure de sodium  $NaCl$  de concentration  $3\text{ M}$ .

Les deux compartiments sont composés de tubes cylindriques en Plexiglas d'un diamètre intérieur d'environ  $5,5\text{ cm} \pm 0,1\text{ cm}$  qui sont fermés à une de leur extrémité par un plat carré en Plexiglas. Leurs longueurs sont forts différentes puisque les tubes ont été découpés à partir d'anciennes cellules. De plus, ces tubes présentent un trou ce qui constitue l'ouverture du compartiment par lequel le remplissage et le prélèvement se font. La tranche de mortier, préalablement saturée en eau de chaux, est collée au moyen de la colle « Araldite » entre les deux tubes en Plexiglas et pour garantir une bonne étanchéité, la partie de l'échantillon dépassant le tube est recouverte d'une résine époxy. Lors du collage, il a fallu veiller à mettre deux tubes d'environ même longueur ensemble afin d'avoir plus au moins le même volume de part et d'autre de la tranche de mortier.



Photo 11 : Cellules de diffusion stationnaire

### 4.3 Préparation des échantillons

Les échantillons cylindriques de 8 cm de diamètre sont obtenus à partir de carottages dans une dalle de dimension [40 × 40 × 8] cm. Une fois tous les échantillons carottés, les faces supérieure et inférieure ont été sciées afin de ne garder qu'une tranche de mortier intermédiaire de 2 cm d'épaisseur. Pour chaque composition, 2 échantillons sont réalisés. Après avoir été stockés pendant au moins 50 jours à 23°C ± 2°C et à 50 % ± 5% d'humidité relative, une consommation en hydrofuge de 300 g/m<sup>2</sup> est appliquée sur une des deux surfaces sciées des échantillons cylindriques.

Par ailleurs, l'essai est également effectué sur des échantillons en béton cellulaire afin de déterminer des résistances exprimées comme vitesse de diffusion des ions chlorés à travers la tranche en béton cellulaire. Pour ce faire, cinq éprouvettes différentes ont été testées, en particulier une référence, deux échantillons immergés complètement pendant 24 h soit dans l'hydrofuge A, soit dans l'hydrofuge B et deux échantillons sur lesquels une consommation de 300 g/m<sup>2</sup> de l'hydrofuge A et de l'hydrofuge B, respectivement, a été appliquée. Les dimensions sont identiques aux dimensions des échantillons de mortiers.

Une fois que les hydrofuges ont été appliqués sur les échantillons, ceux-ci ont été préalablement saturés en eau de chaux afin de garantir que le transport des chlorures se fait uniquement par diffusion et non pas par succion capillaire ou par humidité.

### 4.4 Mode opératoire

Des prélèvements réguliers, soit une fois par semaine, de 10 ml de solution dans le compartiment aval, contenant initialement pas d'ions chlorés, sont effectués. La concentration en chlorures du prélèvement peut être déterminée au moyen d'un titrage potentiométrique (Annexe 4). Dès lors, la quantité de chlorures ayant traversée l'échantillon après un certain temps peut être déterminée.

Après chaque prélèvement, il faut rajouter 10 ml de solution dans la cellule aval afin d'éviter le desséchage de la partie supérieure de la tranche de mortier et d'empêcher que la diffusion ne soit accélérée à cause d'un gradient de concentration trop important. La solution rajoutée doit contenir la même concentration en chlorures que celle prélevée dans la cellule aval.

La quantité totale de chlorures ayant traversée l'éprouvette à un moment donné est la quantité prélevée à ce moment (puisque la solution rajoutée après chaque prélèvement est une solution saturée en eau de chaux contenant en plus la masse en NaCl correspondant à la concentration en ions chlorés prélevée) plus la quantité de chlorures restée dans le compartiment amont.

La quantité de chlorures présents dans un prélèvement à un instant  $i$  est égale au produit de la concentration en chlorures  $C_i$  et du volume de prélèvement  $P_i$ . La quantité de chlorures dans le reste de la cellule à l'instant  $i$  est égale au produit de la concentration  $C_i$  et du volume de la cellule  $V_2$  diminué du prélèvement  $P_i$ . Dès lors, la quantité cumulée de chlorures ayant traversés l'échantillon à l'instant  $i$  vaut (15) :

$$Q_i = C_i \cdot P_i + C_i \cdot (V_{aval} - P_i)$$

#### 4.5 Détermination du coefficient de diffusion effectif

Le coefficient de diffusion effectif peut être calculé à partir du flux ionique ayant atteint le régime permanent. Le flux constant parallèle à la direction de diffusion est donné par la première loi de Fick (15) (36):

$$J = \frac{D_e}{e} \cdot (C_{amont} - C_{aval}) \left[ \frac{kg}{m^2s} \right]$$

Avec :

- $D_e$  : le coefficient de diffusion effectif [ $m^2/s$ ]
- $e$  : l'épaisseur de la tranche de mortier [ $m$ ]
- $C_{aval}$  : la concentration en chlorures dans le compartiment aval [ $kg/m^3$ ]
- $C_{amont}$  : la concentration en chlorures dans le compartiment amont [ $kg/m^3$ ]

Le flux peut aussi s'exprimer de la manière suivante :

$$J = \frac{V_{aval}}{\pi r^2} \frac{dC_{aval}}{dt} \left[ \frac{kg}{m^2s} \right]$$

Avec :

- $V_{aval}$  : le volume du compartiment aval [ $m^3$ ]
- $r$  : le rayon intérieur du tube aval [ $m$ ]

En égalant ces deux relations, il s'ensuit que :

$$\frac{V_{aval}}{A} \frac{dC_{aval}}{dt} = \frac{D_e}{e} \cdot (C_{amont} - C_{aval})$$

En intégrant entre l'instant  $t_0$  et  $t$ , l'équation ci-dessous est obtenue :

$$\ln \left( 1 + \frac{C_{aval}}{C_{amont} - C_{aval}} \right) = \frac{D_e \cdot A}{e \cdot V_{aval}} \cdot (t - t_0)$$

Où :

- $t_0$  : l'instant où apparaissent les premiers chlorures dans compartiment aval
- $t$  : durée de diffusion

Pour  $C_{aval} \ll C_{amont}$ , l'expression précédente devient :

$$C_{aval} = C_{amont} \cdot \frac{D_e \cdot A}{e \cdot V_{aval}} \cdot (t - t_0)$$

Cette relation peut être exprimée graphiquement en représentant la concentration en chlorures dans le compartiment aval en fonction du temps.

Le coefficient de diffusion effectif, pour un flux en régime stationnaire, peut être déterminé au moyen de la première loi de Fick :

$$D_e = \frac{V_{aval} \Delta C_{aval}}{A \Delta t} \cdot \frac{e}{(C_{amont} - C_{aval})} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

Avec :

- $A$  : l'aire de la tranche exposée à la solution [ $m^2$ ]
- $\frac{\Delta C_{aval}}{\Delta t}$  : l'augmentation de la concentration en chlorures dans le compartiment aval au cours du temps [ $\frac{kg}{m^3 s}$ ] (pente de la droite)

## 5 Diffusion en régime transitoire

### 5.1 But

L'essai de diffusion en régime transitoire consiste à déterminer un coefficient de diffusion apparent à partir du profil de concentration en chlorures totaux dans l'échantillon. Cet essai est réalisé selon la norme *NT BUILD 443* « Nordtest method Accelerated chloride penetration » (37).

### 5.2 Préparation des échantillons

Les échantillons cylindriques de 11,3 cm de diamètre sont obtenus à partir de carottages dans une dalle de dimension [40 × 40 × 8] cm. Une fois tous les échantillons carottés, ils ont été sciés en une tranche de 5 cm d'épaisseur. Pour chaque composition 1 échantillon est réalisé, ainsi seulement un échantillon par mesure sera testé. Après avoir été stockés pendant au moins 50 jours à 23°C ± 2°C et à 50 % ± 5% d'humidité relative, une consommation en hydrofuge de 300 g/m<sup>2</sup> est appliquée sur la surface sciée des échantillons.

Les échantillons sont préalablement saturés en eau de chaux afin d'admettre que la diffusion est le seul mécanisme de transport et les faces latérales ainsi que celle non hydrofugée sont recouvertes d'une résine d'époxy pour éviter tout contact avec l'extérieur et « d'assurer une pénétration unidimensionnelle des chlorures (36) (38). »

### 5.3 Mode opératoire

Selon la norme « NT BUILD 443 », les échantillons dont la surface accessible est dirigée vers le bas, sont immergés dans une solution saline de NaCl de concentration 165 g/l ± 1 g et placés sur des portes-éprouvettes métalliques dans un bac pour permettre un flux correct du liquide au niveau de la surface exposée. Ce bac est fermé et la solution est maintenue à température constante à environ 23°C en moyenne qui devra être mesurée au moins une fois par jour. La durée minimale d'exposition des éprouvettes dans la solution est de 35 jours.



Photo 12 : Échantillons après 35 jours dans la solution de  $NaCl$

#### 5.4 Prélèvements

Des prélèvements, sous forme de poudre, parallèlement à la surface exposée sont effectués à différentes profondeurs grâce à une grignoteuse. Celle-ci, par sa rotation et son frottement sur la surface de l'échantillon, produit une poudre de mortier très fine qui est récoltée à l'aide d'une spatule. L'épaisseur des prélèvements est d'environ  $1\text{ mm}$  et l'aire du grignotage est un demi-cercle de  $70\text{ mm}$  de diamètre. Des prélèvements jusqu'à la profondeur de  $6,5\text{ mm}$  par rapport à la surface exposée ont été effectués et pour chaque couche une poudre d'au moins  $1\text{ g}$  a dû être récupérée.



Photo 13 : Grignoteuse

## 5.5 Filtrage et titrage

D'abord, les poudres récoltées, pour les différentes profondeurs de grignotage, sont séchées dans une étuve à 105 °C pendant au moins 12 heures. Ensuite, ces poudres sont pesées à  $(1 \pm 0,1)g$  et elles sont attaquées à l'acide nitrique  $HNO_3$  afin d'extraire les ions totaux (libres et fixés). Puis, la solution est chauffée jusqu'à ébullition avant d'être filtrée (39). Par ailleurs, la concentration en chlorures des filtrats obtenus peut être déterminée au moyen d'un titrage potentiométrique en utilisant la méthode «  $AgNO_3 SOL$  ». Finalement, le profil de concentration peut être représenté graphiquement en reprenant pour chaque profondeur la concentration en chlorures correspondante.



Photo 14 : Mise à ébullition et filtrage

## 5.6 Détermination du coefficient de diffusion apparent

En supposant que le coefficient de diffusion apparent ne dépend pas de la concentration, le transport unidirectionnel des ions chlorures par diffusion en régime transitoire peut être exprimé par la seconde loi de Fick (16) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Cette équation représente la concentration en chlorures en fonction du temps d'exposition et de la distance à la surface exposée.

De nombreuses solutions de l'équation de Fick ont été proposées. Dans notre cas, l'épaisseur de l'échantillon dans laquelle se déroule le phénomène de diffusion est supposée être très importante comparée aux profondeurs de diffusion expérimentales, ainsi un milieu semi infini peut être supposé et la solution analytique de la seconde loi de Fick peut être ajustée à l'aide de l'équation suivante (36) :

$$\frac{C(x; t) - C_1}{C_s - C_i} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_a \cdot t}}\right)$$

Ou bien :

$$C(x; t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right)$$

Avec :

- $C(x; t)$  : la concentration en chlorures à la profondeur  $x$  pour un temps d'exposition  $t$  [ $kg/m^3$ ]
- $C_s$  : la concentration en chlorures à la surface ( $x = 0$ ) [ $kg/m^3$ ]
- $C_i$  : la concentration initiale en chlorures dans l'échantillon [ $kg/m^3$ ]
- $x$  : la profondeur par rapport à la surface exposée [ $kg/m^3$ ]
- $t$  : le temps d'exposition [s]
- $\operatorname{erf}$  : la fonction erreur

La fonction erreur est une fonction mathématique standard définie comme suit :

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-u^2} du$$

Le coefficient de diffusion apparent  $D_a$  peut être déterminé en linéarisant la courbe obtenue par une régression linéaire. En utilisant une approximation de la fonction erreur (40) :  $\operatorname{erfc}(z) \approx \left(1 - \frac{z}{\sqrt{3}}\right)^2$  (valable pour l'intervalle  $0 \leq z \leq \sqrt{3}$ ), l'expression mathématique du profil de concentration en chlorures peut s'écrire comme ci-dessous :

$$C(x; t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \left(1 - \frac{x}{\sqrt{12 \cdot D_a \cdot t}}\right)^2$$

Ou en la réécrivant :

$$\sqrt{C(x; t) - C_i} = -\sqrt{\frac{C_s - C_i}{12 \cdot D_a \cdot t}} \cdot x + \sqrt{C_s - C_i}$$

Le coefficient de diffusion apparent  $D_a$  est obtenu à partir des profils de concentrations en chlorures. Pour ce faire, il faut déterminer graphiquement l'équation linéaire reliant  $\sqrt{C(x; t) - C_i}$  à la profondeur  $x$ . Cette équation est présentée sous la forme suivante (40) :

$$y = a \cdot x + b$$

Où :

- $y = \sqrt{C(x; t) - C_i}$
- $b = \sqrt{C_s - C_i}$  (ordonnée à l'origine)

- $a = -\sqrt{\frac{C_s - C_i}{12 \cdot D_a \cdot t}} = -\frac{b}{\sqrt{12 \cdot D_a \cdot t}}$  (pente de la courbe)

À partir de ces données, la concentration en chlorures à la surface  $C_s$  et le coefficient de diffusion apparent  $D_a$  sont exprimés par les relations ci-dessous :

$$C_s = b^2 + C_i \text{ [%]}$$

$$D_a = \frac{b^2}{12 \cdot t \cdot a^2} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Où :  $x$  en mètre et  $t$  en seconde

Cependant, il faut noter que cette analyse par régression linéaire est basée sur l'hypothèse que le coefficient de diffusion apparent et la concentration de la solution d'exposition sont constants ce qui n'est pas le cas pour les mortiers. Dès lors, il n'y a pas de solution analytique pour la 2<sup>ème</sup> loi de Fick (41) (40).

## 6 Essai de conduction

### 6.1 But

L'essai de conduction a comme but de mesurer un courant électrique total traversant l'échantillon après une certaine durée. Dès lors, une charge totale de pénétration pour les échantillons peut être déterminée afin d'estimer la résistance à la perméabilité aux ions chlorures. L'essai est réalisé selon la norme *ASTM C 1202-97* (42) : « Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration ».

### 6.2 Préparation des échantillons

Les échantillons cylindriques d'un diamètre de 10 cm sont obtenus à partir de carottages dans une dalle de dimension [40 × 40 × 8] cm. Une fois tous les échantillons carottés, ils ont été sciés en une tranche de 5 cm d'épaisseur. Pour chaque composition 1 seul échantillon est réalisé. Après avoir été stockés pendant 55 jours à 23°C ± 2°C et à 50 % ± 5% d'humidité relative, une consommation en hydrofuge de 300 g/m<sup>2</sup> est appliquée sur la surface sciée des échantillons. De plus, les échantillons sont recouverts d'une résine époxy sur la face latérale et saturés en eau.

### 6.3 Mode opératoire

Selon la norme, avant de commencer l'essai, les échantillons sont mis sous vide afin de chasser toutes les bulles d'air éventuellement piégées à l'intérieur et d'assurer la saturation complète des échantillons.

Ensuite, l'échantillon est placé entre deux cellules contenant deux solutions différentes. La cellule amont contient une solution de NaCl 3% (30g/l) et la cellule aval une solution de NaOH 0,3 N (12g/l). L'éprouvette est mise en contact avec ces solutions au moyen de grilles

se trouvant dans les cellules. « Afin d'empêcher toute fuite, un joint en caoutchouc est placé de chaque côté de l'échantillon dans une encoche circulaire prévue à cet effet dans la cellule et un serrage des deux cellules est effectué grâce à 4 vis (11). »

Les cellules sont reliées à un générateur fournissant une tension de 60 V. La borne positive du générateur est reliée à la cellule contenant la solution  $NaOH$  et la borne négative est reliée à celle comportant la solution  $NaCl$ . De plus, un ampèremètre est relié entre ces deux derniers points afin de pouvoir mesurer l'intensité du courant électrique traversant l'échantillon induit par la différence de potentiel.



Photo 15 : Cellule de diffusion accélérée et générateur

Enfin, une fois le montage électrique réalisé, l'essai peut débuter. La tension est maintenue constante durant 6 heures et une mesure toutes les 30 minutes est prise.

Il faut noter que le générateur utilisé n'a pas pu fournir une tension de 60 V. Dès lors, une différence de potentiel de 30 V a été appliquée aux échantillons et les intensités mesurées ont été doublées. Selon une étude de Yang et Cho (43), il existe une corrélation linéaire entre le courant correspondant à la charge passée et le taux de migration des chlorures et ce pour différents composition de béton et mortier.

#### 6.4 Principe de mesure

Les résultats peuvent être illustrés sous deux formes (14):

- soit sous forme de graphique représentant l'intensité du courant en fonction du temps,
- soit en calculant la charge électrique ayant traversé l'échantillon après 6 heures.

La charge électrique peut être déterminée en intégrant la courbe obtenue. Pourtant pour faciliter les calculs une méthode simplifiée peut être utilisée (42) :

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + \dots + 2 \cdot I_{300} + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \text{ [Coulomb]}$$

Avec :

- $I_0$  : l'intensité du courant immédiatement après application de la tension [A]
- $I_t$  : l'intensité du courant  $t$  minutes après application de la tension [A]

Cette formule n'est applicable que si le diamètre de l'échantillon est de 95 mm. Dans le cas contraire, un ajustement doit être fait grâce à la formule (42) :

$$Q_s = Q_x \cdot \left(\frac{3,75}{x}\right)^2$$

Avec :

- $Q_s$  : la charge passant à travers un échantillon de 3,75 in. (95 mm) de diamètre
- $Q_x$  : la charge passant à travers un échantillon de  $x$  in. de diamètre
- $x$  : le diamètre de l'échantillon en in.

Whiting (44) a proposé des classes de perméabilité des bétons aux chlorures en fonction de la charge électrique totale ayant traversé l'échantillon au but de 6 heures.

<b>Charge [Coulomb]</b>	<b>Classe de perméabilité</b>
> 4000	Grande
4000 – 2000	Modérée
2000 – 1000	Petite
1000 – 100	Très petite
< 100	Négligeable

Tableau 12 : Classe de perméabilité pour béton

## 7 Récapitulatif du nombre d'échantillons à tester pour chaque essais

	référence	<i>E/C</i>	hydrofuge	cons.	éch/essai	éch.tot
<b>Absorption capillaire</b>	3	3	2	3	1	21
<b>Vieillessement artificiel</b>	3	3	2	2	1	15
<b>Diffusion en régime stationnaire</b>	3	3	2	1	2	15
<b>Diffusion en régime transitoire</b>	3	3	2	1	1	9
<b>Diffusion accélérée</b>	3	3	2	1	1	9
<b>Diffusion en régime stationnaire sur béton cellulaire</b>	1	/	2	2	1	5

Tableau 13 : Nombre d'échantillons à tester

---

## **Partie C : Observation et analyse des résultats**

---

Dans un premier temps, les résultats obtenus pour les différents essais sont présentés et des observations sont faites. D'abord, les résultats pour les 3 rapports  $E/C$  individuellement sont montrés. Ensuite, des comparaisons entre les différents rapports sont effectuées.

Dans un second temps, une analyse plus détaillée de ces observations est réalisée. D'une part, les constatations pour chaque essai indépendamment sont interprétées. D'autre part, ces résultats obtenus pour les différents types d'essais sont comparés entre eux afin de pouvoir éventuellement en déduire une tendance.

Par ailleurs, deux types de graphiques sont utilisés pour la représentation des résultats. Pour le premier type de graphique il s'agit de courbes normales (abscisse-ordonnée) pour montrer l'évolution au cours du temps, sauf pour l'essai de diffusion en régime transitoire où l'évolution en fonction de la profondeur de pénétration est schématisée. Le deuxième type de graphiques utilisé est l'histogramme en forme de bâtonnets afin de pouvoir mieux visualiser et comparer les résultats entre eux.

Les désignations employées tout au long de ce chapitre sont les suivantes :

- Référence : échantillon sans hydrofuge
- Hydrofuge A : le « bon » hydrofuge (contenant 99 % de matière active)
- Hydrofuge B : le « mauvais » hydrofuge (contenant 40 % de matière active)
- $c_1$  : consommation en hydrofuge de  $150 \text{ g/m}^2$
- $c_2$  : consommation en hydrofuge de  $300 \text{ g/m}^2$
- $c_3$  : consommation en hydrofuge de  $500 \text{ g/m}^2$
- Si aucune consommation n'est indiquée, il s'agit de la consommation  $c_2$

### 1 Absorption d'eau par capillarité

#### 1.1 Échantillons non vieillis

##### 1.1.1 Évolution de l'absorption capillaire $w_t$ au cours du temps

Sur les Figure 22, Figure 23 et Figure 24 l'évolution de l'absorption capillaire pour les trois rapports  $E/C$  et les différents hydrofuges et consommations au cours de 30 heures est représentée. À partir de ces courbes, les coefficients d'absorptivité pour chaque échantillon peuvent être calculés. Pour ce faire, la pente correspondant à chaque courbe est déterminée entre la mesure prise à 5 min et 24 h.

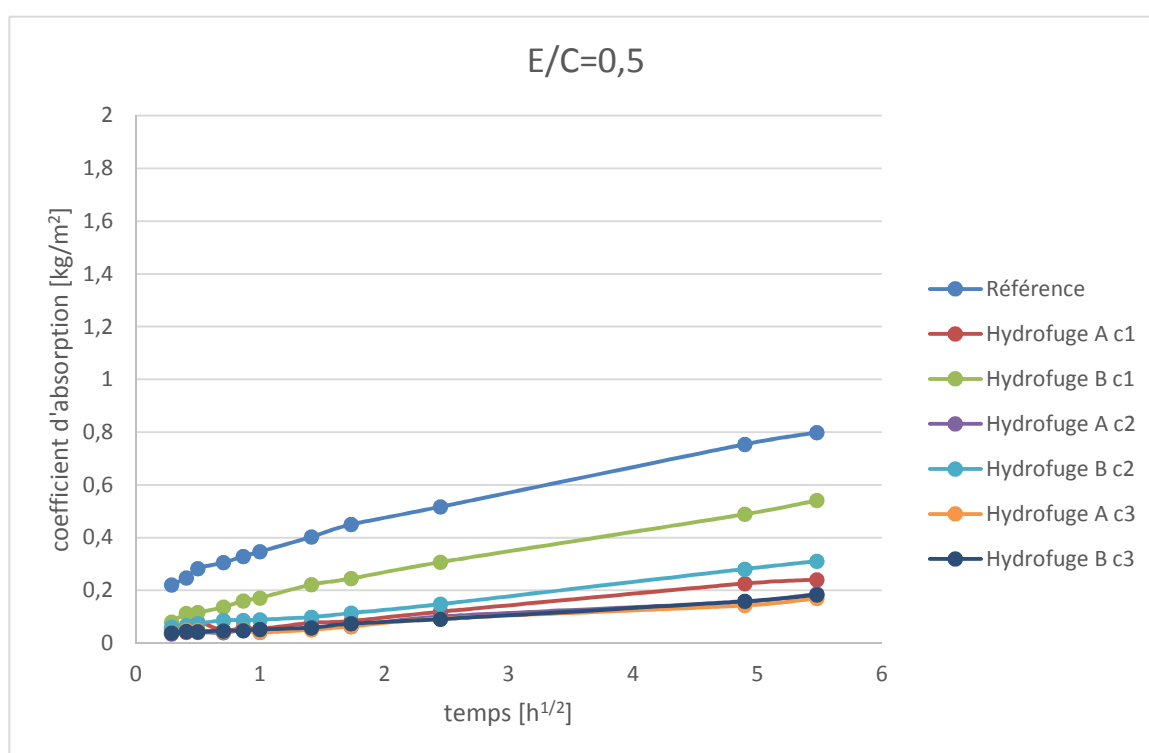


Figure 22 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,5$  non vieilli

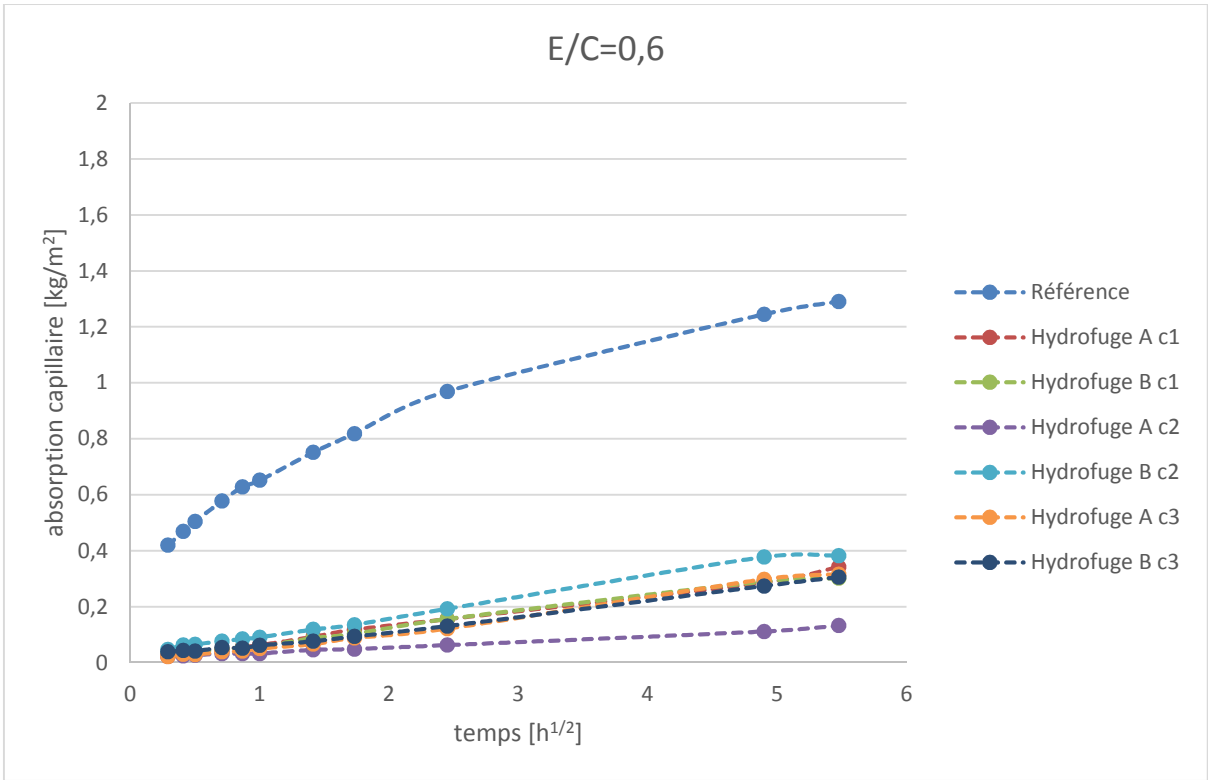


Figure 23 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,6$  non vieilli

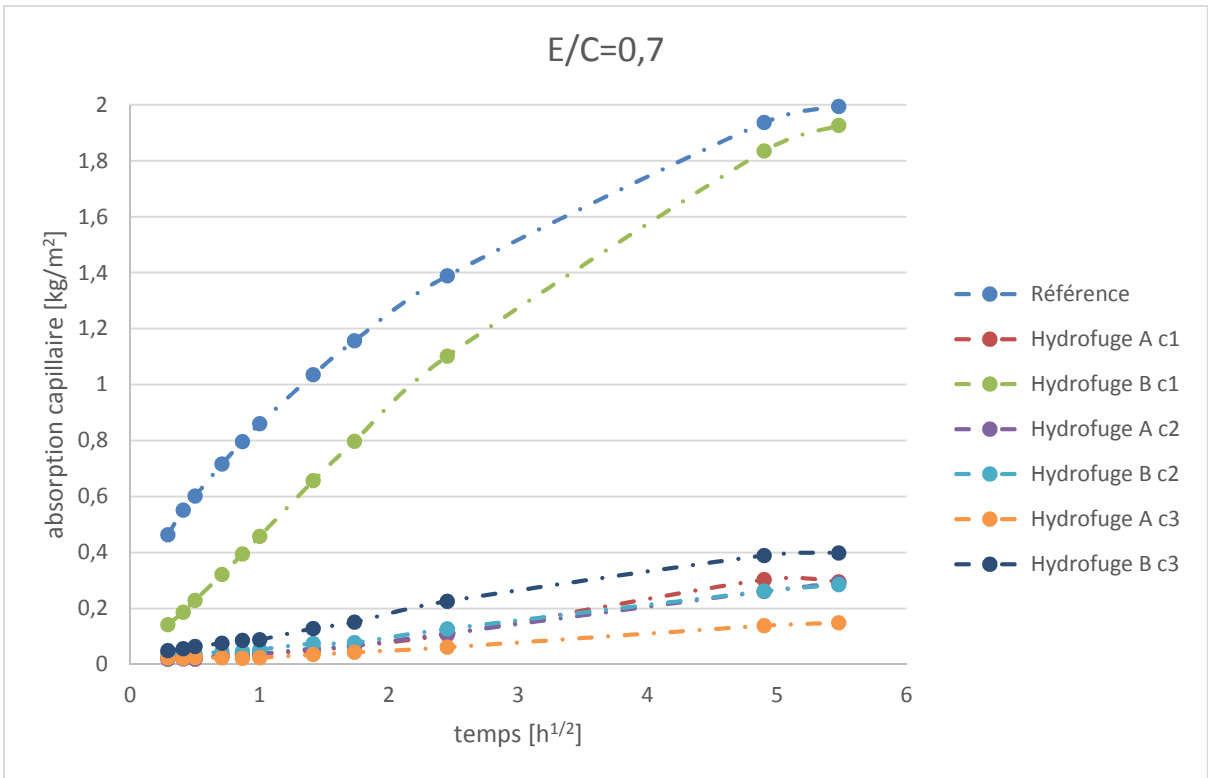


Figure 24 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,7$  non vieilli

Les observations faites sont les suivantes :

- Pour chaque rapport  $E/C$ , dès le premier contact avec l'eau, l'absorption capillaire  $w_t$  est nettement plus importante pour les échantillons de référence que pour ceux avec une certaine consommation en hydrofuge
- Pour les échantillons de référence, l'absorption capillaire augmente avec le rapport  $E/C$  ( $w_t$  plus faible pour  $E/C = 0,5$  que pour  $E/C = 0,7$ )
- Globalement pour chaque rapport  $E/C$ , l'absorption capillaire est moins importante pour l'hydrofuge A que pour l'hydrofuge B, mais il n'y a pas de différence significative
- L'absorption capillaire pour tous les échantillons hydrofugés, peu importe le rapport  $E/C$ , est inférieure à  $0,4 \text{ kg/m}^2$  sauf pour l'« hydrofuge B c<sub>1</sub> » pour les rapports  $E/C = 0,5$  et  $0,7$

### 1.1.2 Coefficients d'absorptivité $w$

Une classification des échantillons en fonction du coefficient d'absorptivité  $w$  en trois catégories est proposée par la norme « EN 1062-3 » :

Classe	$w \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}} \right]$
I (Grande)	$> 0,5$
II (Moyenne)	$0,1 \text{ à } 0,5$
III (Faible)	$< 0,1$

Tableau 14 : Classification de la perméabilité à l'eau liquide

La limite entre les classe II et III est représentée par la ligne horizontale noire sur la Figure 25. Les coefficients d'absorption sont tous compris dans la classe III, excepté pour les trois références et l'« Hydrofuge B c<sub>1</sub>  $E/C = 0,7$  », qui eux se situent dans la classe II.

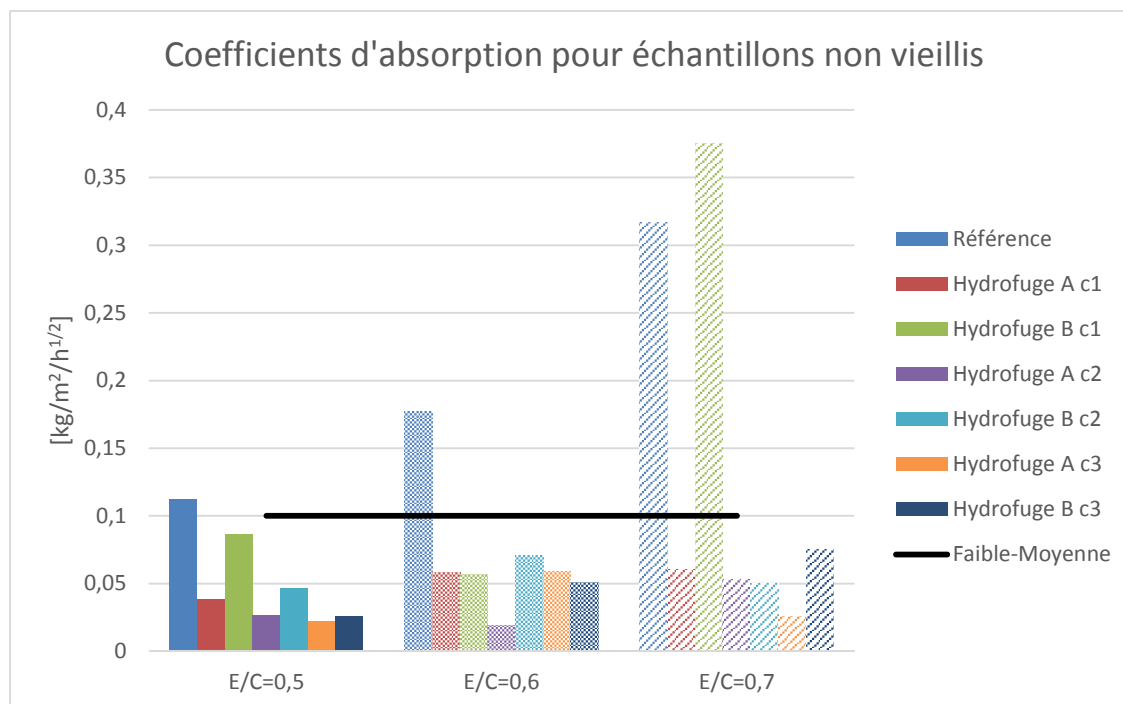


Figure 25 : Coefficients d'absorption pour les échantillons non vieillis

En observant les histogrammes de la Figure 25, une diminution des coefficients d'absorption pour les échantillons hydrofugés peut être constatée pour les trois rapports  $E/C$ , excepté pour l'échantillon «  $E/C = 0,7$  Hydrofuge B c<sub>1</sub> ». De plus, les coefficients d'absorptivité sont globalement plus faible pour le rapport  $E/C = 0,5$ , tandis que la différence entre la référence et les échantillons hydrofugés semble être moins importante en comparant avec les 2 autres rapports  $E/C$ .

## 1.2 Échantillons vieillis

### 1.2.1 Évolution de l'absorption capillaire $w_t$ au cours du temps

L'évolution de l'absorption capillaire pour les trois rapports  $E/C$  et les différents types d'hydrofuges et consommations au cours de 30 heures est représentée sur les Figure 26, Figure 27 et Figure 28.

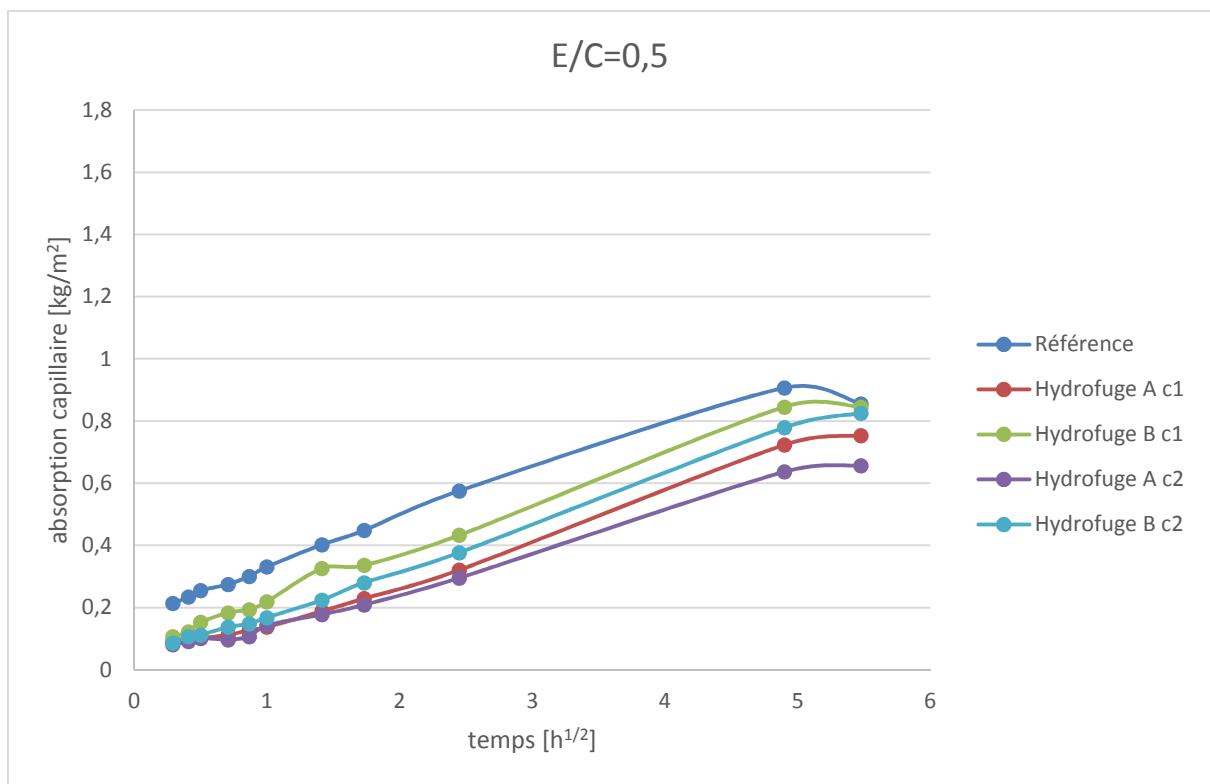


Figure 26 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,5$  vieilli

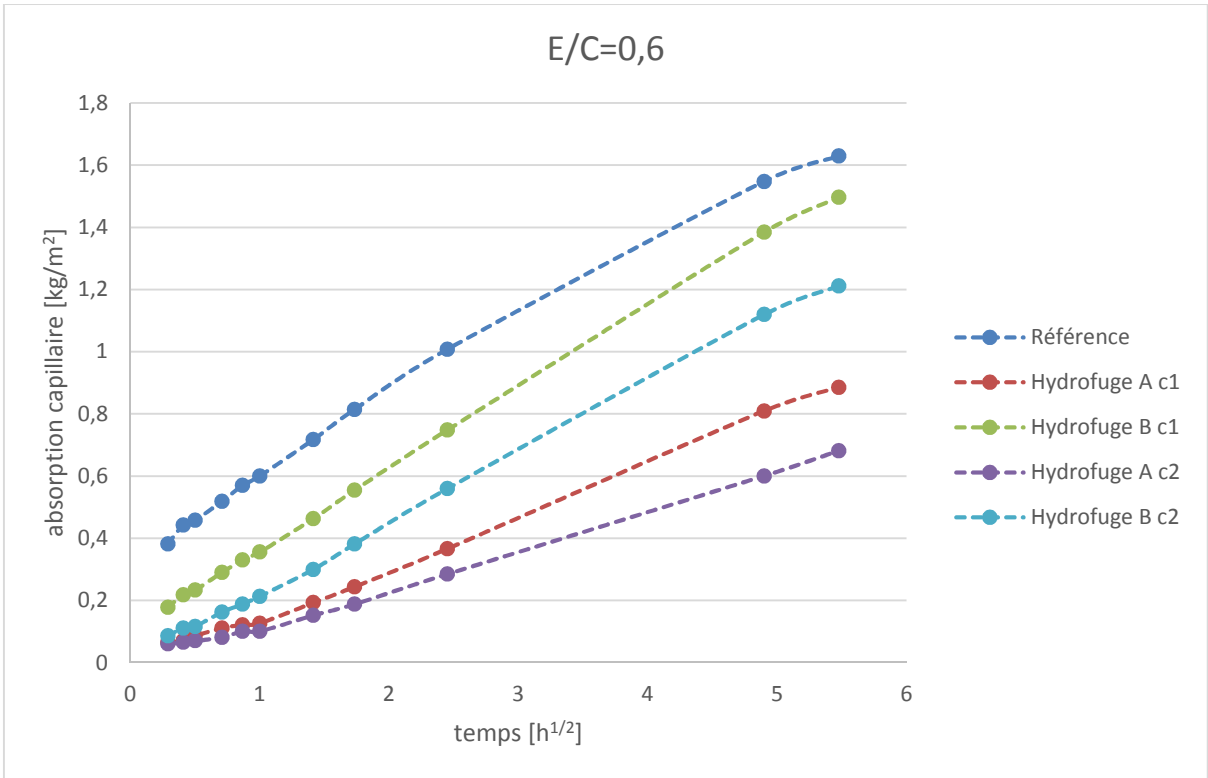


Figure 27 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,6$  vieilli

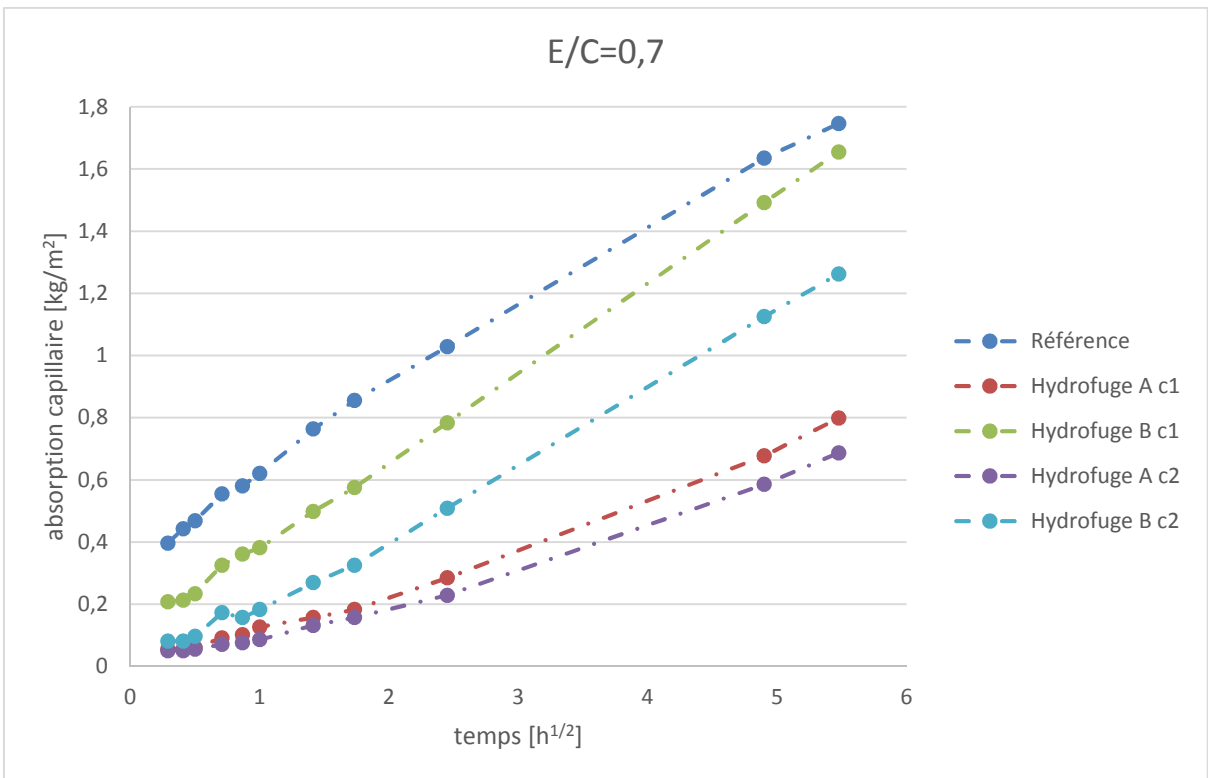


Figure 28 : Évolution de l'absorption d'eau par capillarité pour  $E/C = 0,7$  vieilli

Les effets constatés pour les échantillons vieilliss sont semblables à ceux des échantillons non vieilliss, si ce n'est que :

- La différence de l'absorption capillaire entre les échantillons de référence et hydrofugés est moins significative
- La distinction entre les différents hydrofuges et consommations est beaucoup plus claire. L'absorption capillaire est plus faible pour l'hydrofuge A que pour l'hydrofuge B et également plus faible pour  $c_1$  que pour  $c_2$

### 1.2.2 Coefficients d'absorptivité $w$

Les coefficients d'absorption sont tous passés de la classe I (faible perméabilité) à la classe II (moyenne perméabilité) ce qui se traduit également par des valeurs plus importantes des coefficients d'absorption.

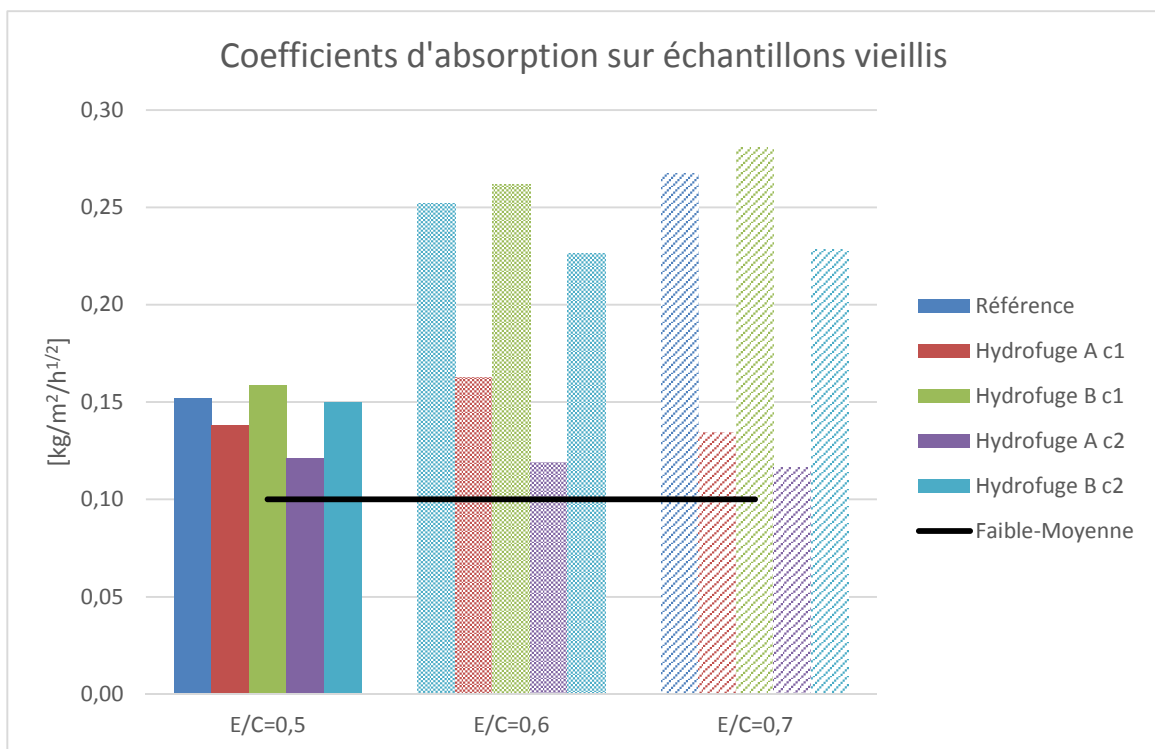


Figure 29 : Coefficients d'absorption pour les échantillons vieilliss

Les observations faites ressemblent à celles faites pour les échantillons non vieilliss. Cependant, la différence entre les coefficients d'absorptivité pour les échantillons « Hydrofuge A » et « Hydrofuge B » est beaucoup plus marquée que pour les échantillons non vieilliss. De plus, la valeur du coefficient de ces derniers augmente avec le rapport  $E/C$ , tandis que pour les échantillons « Hydrofuge A », la valeur reste presque identique.

## 1.3 Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis

### 1.3.1 Comparaison des coefficients d'absorptivité $w$

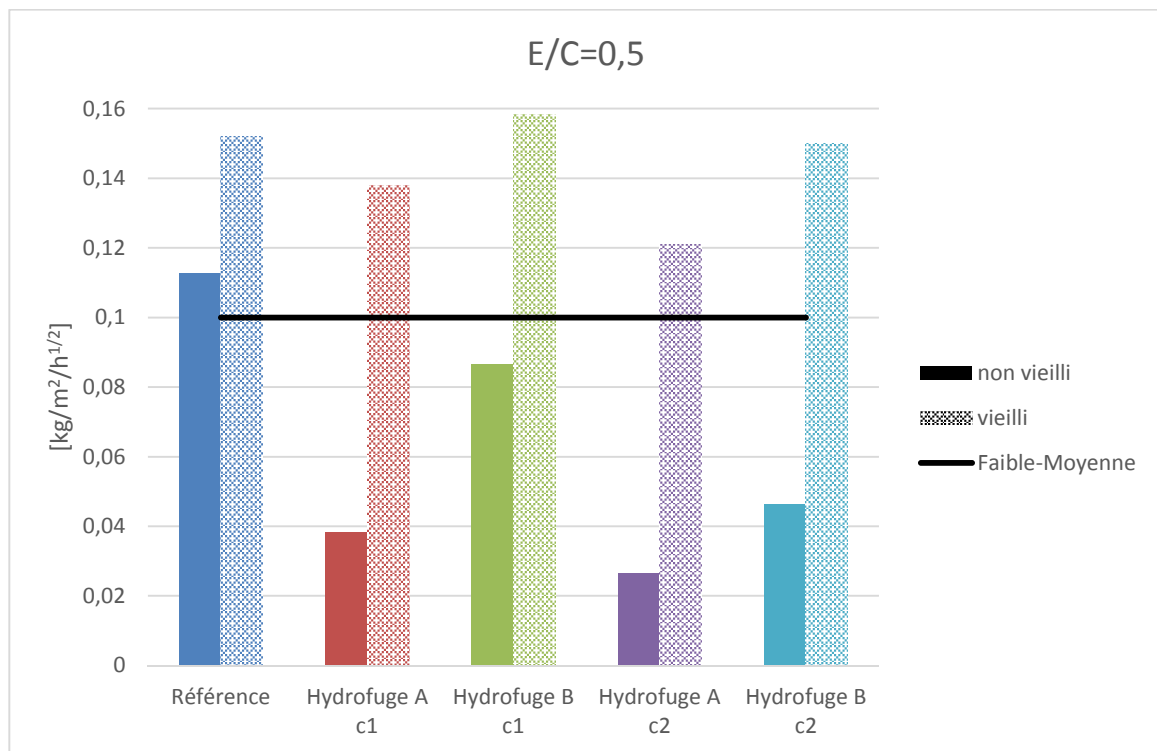


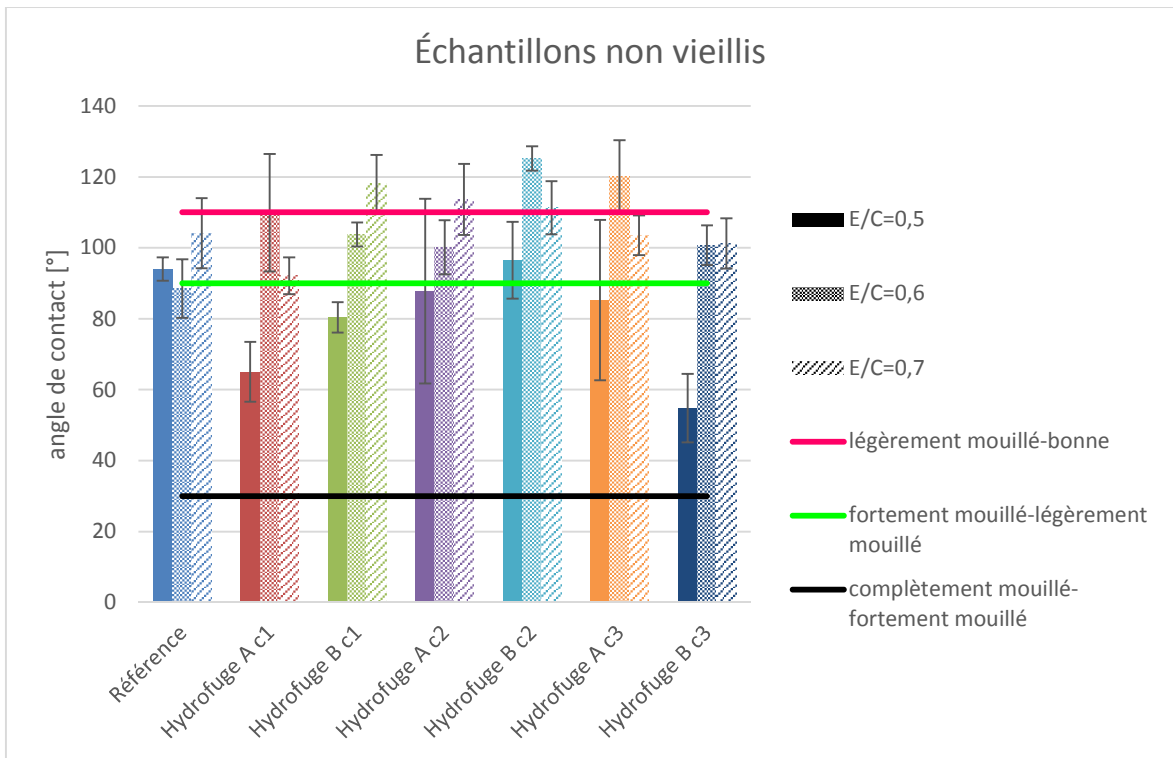
Figure 30 : Comparaison entre  $w_{nonvieilli}$  et  $w_{vieilli}$  pour un  $E/C = 0,5$

La Figure 30 montre que les coefficients d'absorptivité pour les échantillons vieillis sont beaucoup plus importants que pour les échantillons non vieillis et cette constatation peut être faite pour tous les rapports  $E/C$  (autres figures en Annexe 2). Cependant, aucune tendance n'est visible en ce qui concerne les types d'hydrofuges.

## 2 Angles de contact

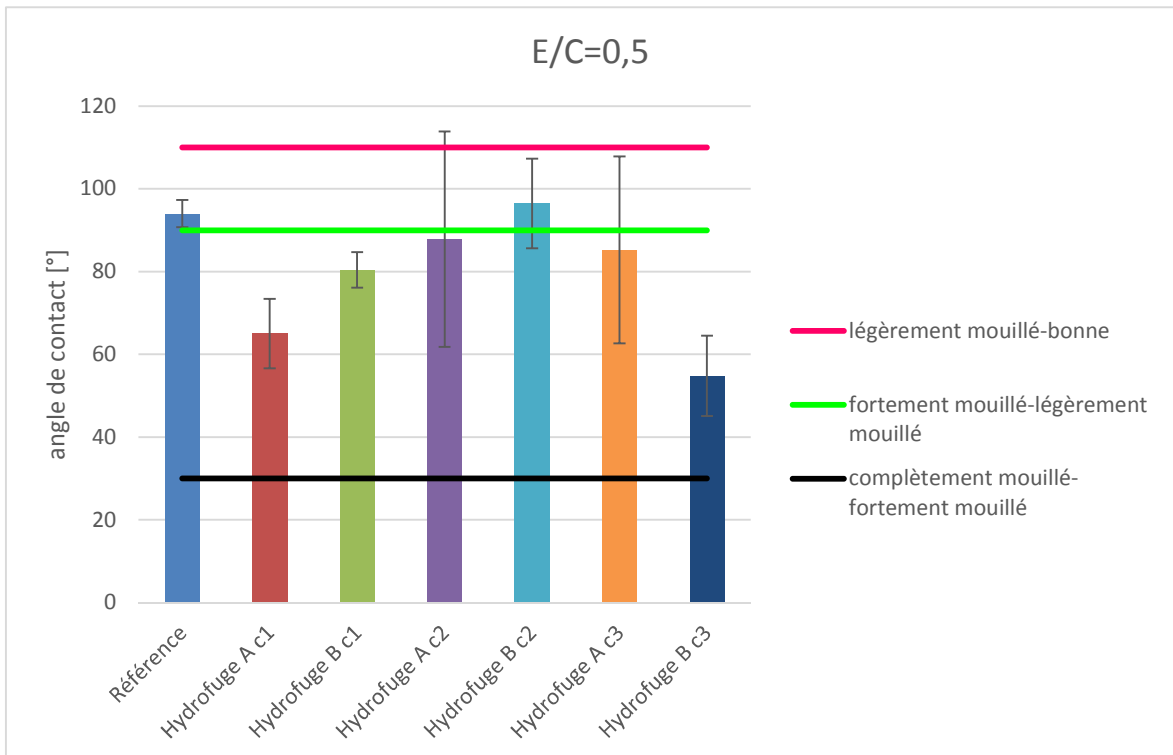
### 2.1 Échantillons non vieillis

Sur la Figure 31, les angles de contacts pour tous les échantillons non vieillis sont représentés. Une grande dispersion peut être constatée. De plus, la valeur de l'angle de contact pour un grand nombre d'échantillons hydrofugés est située en-dessous de la ligne verte représentant un angle de contact de  $90^\circ$  qui selon la littérature désigne une surface hydrophobe.



**Figure 31 : Angles de contact pour échantillons non vieillis**

Afin de pouvoir observer plus en détail, seulement les angles de contact pour le rapport  $E/C = 0,5$  sont repris ci-dessous.



**Figure 32 : Angles de contact pour  $E/C = 0,5$  non vieilli**

En observant la Figure 32, les constatations suivantes peuvent être faites :

- La valeur de l'angle de contact correspondant à la référence est plus élevée que celle attendue selon la littérature ( $30^\circ < \theta < 50^\circ$ ) (valable pour les trois rapports  $E/C$ ) (autres figures en Annexe 3)
- Les angles de contact mesurés pour les échantillons hydrofugés sont plus faibles que celui de référence (uniquement pour le rapport  $E/C = 0,5$ )
- Les valeurs sont très variables selon le type et la consommation en hydrofuge (et ce pour tous les rapports  $E/C$ )
- L'écart-type, autour de la moyenne, pour certains échantillons est très important ce qui indique une grande dispersion des valeurs mesurées de l'angle de contact

Une hypothèse pourquoi les valeurs de l'angle de contact des références sont si élevées peut être que les molécules des hydrofuges ont réagi avec l'eau dans le bac (lors de l'essai d'absorption capillaire) et puisque les échantillons étaient tous dans le même bac, les molécules se sont raccrochées à la surface de l'échantillon non hydrofugé.

Une deuxième hypothèse est tout simplement que la taille des échantillons n'était pas adaptée à l'appareillage pour mesurer les angles de contacts. En effet, il était difficile d'avoir une surface bien plane et droite et la hauteur depuis la goutte tombait n'était pas toujours exactement la même.

## 2.2 Échantillons vieillis

Sur la Figure 31 les angles de contacts pour tous les échantillons vieillis sont représentés. La plupart des angles de contact se situe dans la classe « bonne », c'est-à-dire la surface testée présente une faible mouillabilité.

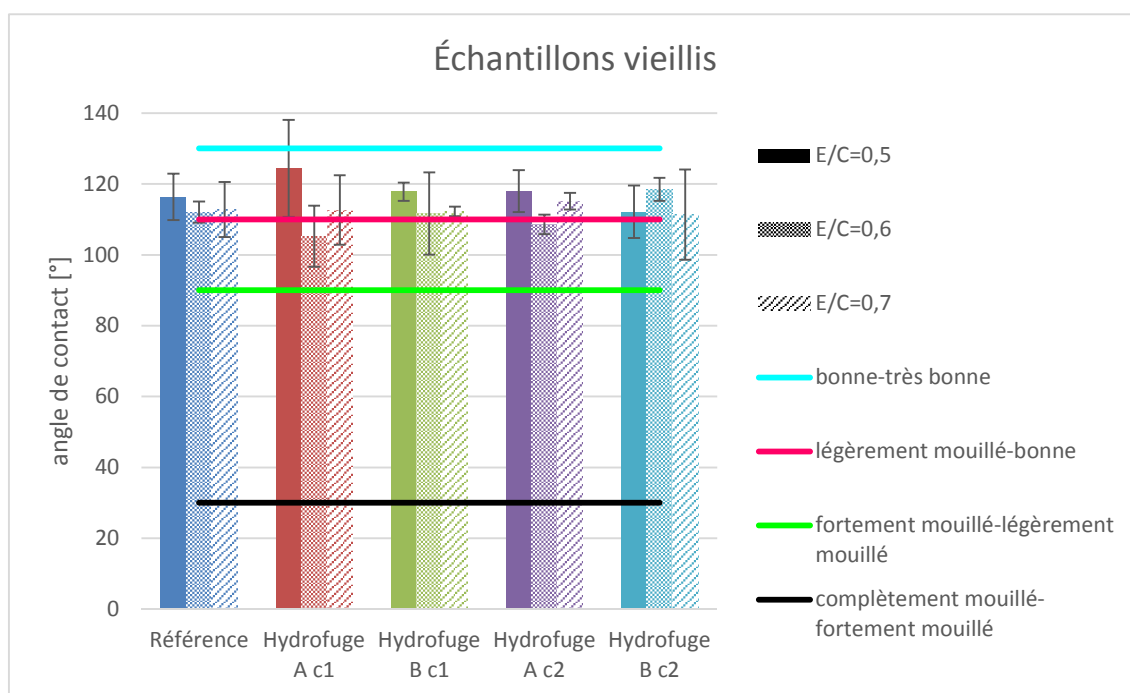


Figure 33 : Angles de contact pour échantillons vieillis

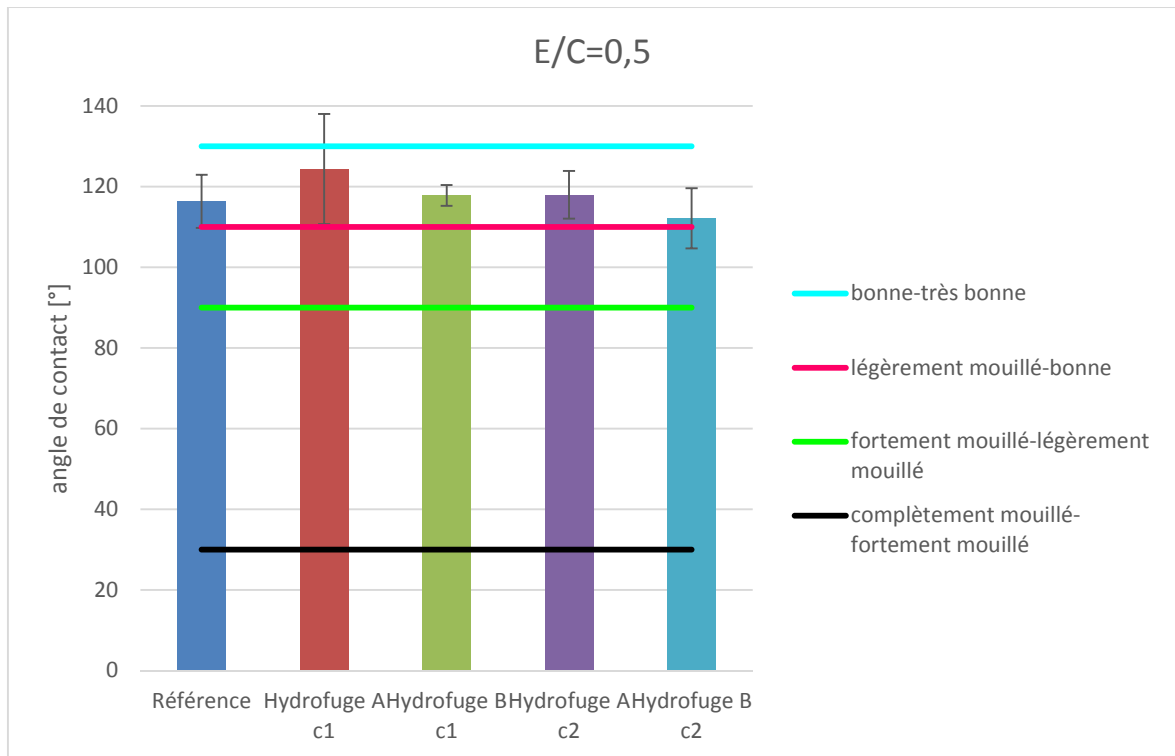


Figure 34 : Angles de contact pour  $E/C = 0,5$  vieilli

Les observations faites pour les échantillons vieillis sont semblables à celles faites pour les échantillons non vieillis. Les angles de contact mesurés pour les références sont « trop » grands. Néanmoins, la Figure 34 illustre que les valeurs sont beaucoup plus rapprochées les unes des autres et également de la référence et ce pour tous les rapports  $E/C$ . En outre, la dispersion, représentée par l'écart-type, est plus faible dans le cas des échantillons vieillis.

### 2.3 Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis

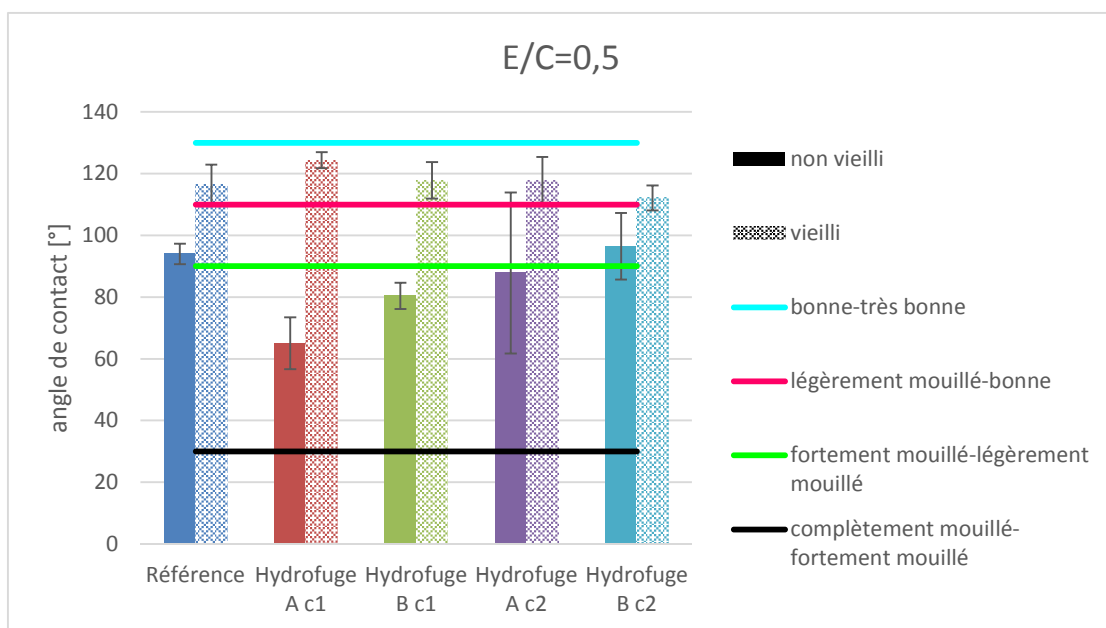


Figure 35 : Comparaison des angles de contact pour  $E/C = 0,5$

En observant la Figure 35, les angles de contact mesurés pour les échantillons vieillis sont nettement supérieurs à ceux des échantillons non vieillis. Cette constatation peut être faite pour les trois rapports  $E/C$ . Cependant, la différence entre les valeurs mesurées pour les rapports  $E/C = 0,6$  et  $0,7$  est moins importante que celle dans le cas du rapport  $E/C = 0,5$  ce qui est dû au fait que les angles de contacts mesurés sur les échantillons non vieillis pour ce rapport  $E/C$  sont déjà plus faibles que ceux mesurés pour les rapports  $E/C = 0,6$  et  $0,7$  (Annexe 3).

Cette différence peut être provoquée d'une part par le fait qu'il ne s'agit pas de la même surface qui a été hydrofugée, d'autre part aux irrégularités des surfaces. En effet, pour les échantillons non vieillis, c'est une surface moulée qui a été hydrofugée, tandis que pour les échantillons vieillis, les hydrofuges ont été appliqués sur une surface sciée. Par ailleurs, comme mentionné au Chapitre V : l'angle de contact change beaucoup en fonction de l'état de la surface, notamment avec la rugosité des surfaces testées qui joue un rôle important. Dès lors, une grande variabilité de l'angle de contact mesuré peut être constatée et ceci d'autant plus que la rugosité de la surface est modérée (Johnson et Dettre).

### 3 Diffusion en régime stationnaire

À cause de quelques problèmes techniques, les premières cellules n'ont été lancées que début avril et les dernière fin avril. C'est pourquoi, afin d'avoir plus de résultats, des cellules avec du béton cellulaire ont été réalisées. En effet, puisque le béton cellulaire est beaucoup plus poreux que les mortiers classiques, le temps d'occurrence, c'est-à-dire le temps que mettent les premiers ions chlores pour traverser l'éprouvette, est diminué significativement. Par ailleurs, pour pouvoir déterminer le coefficient de diffusion effectif correspondant à une cellule, il faut que la pente de la courbe soit constante, donc que le régime stationnaire soit atteint.

#### 3.1 Béton cellulaire

L'essai a comme but de déterminer des résistances exprimées comme vitesse de diffusion des ions chlores à travers la tranche en béton cellulaire. Pour ce faire, cinq éprouvettes différentes ont été testées, en particulier une référence, deux échantillons immergés complètement pendant 24 h soit dans l'hydrofuge A, soit dans l'hydrofuge B (désignés par Hydrofuge A et Hydrofuge B) et deux échantillons sur lesquels une consommations de  $300 \text{ g/m}^2$  de l'hydrofuge A et de l'hydrofuge B, respectivement, a été appliquée.

En effet, à partir de la Figure 36, qui représente les courbes d'évolution de la concentration en ions chlores dans les cellules de diffusions aval en fonctions du temps, les coefficients de diffusion peuvent être calculés. Ensuite, les consommations en hydrofuges nécessaires à ralentir le passage des ions chlores peuvent en être déduites.

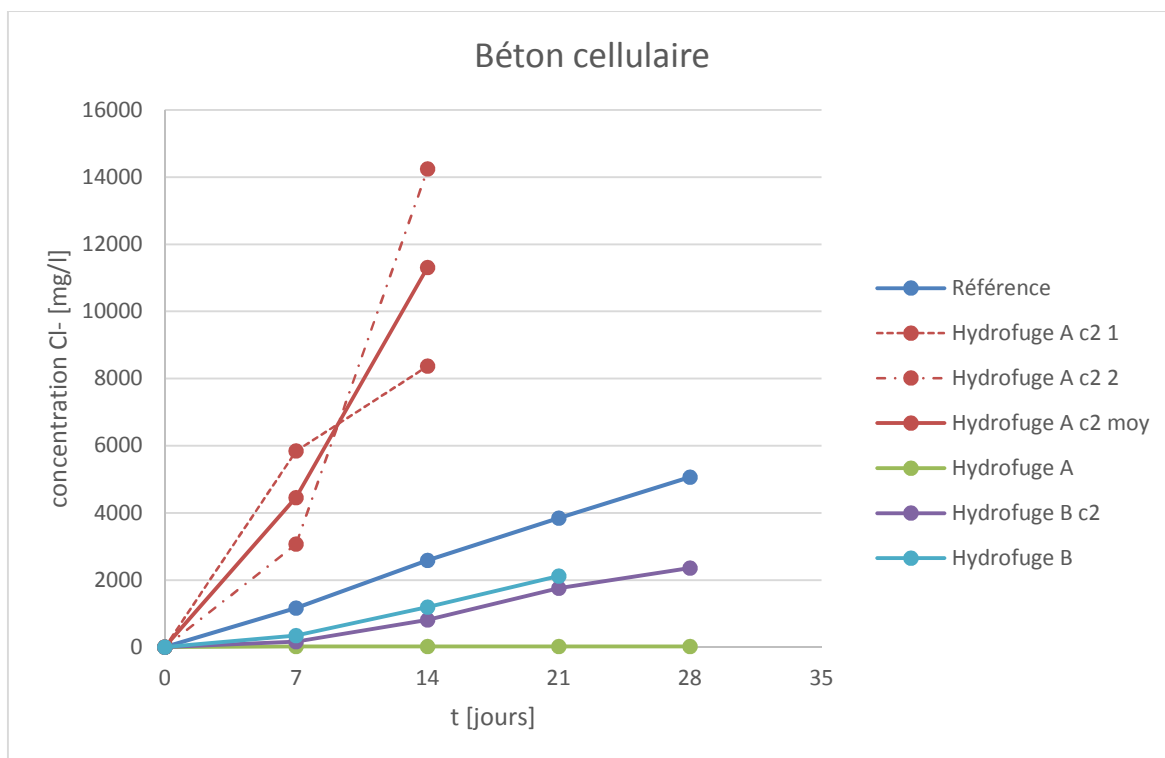


Figure 36 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlores pour béton cellulaire

En observant les courbes, aucun temps d'occurrence n'est remarqué. Ainsi, les premiers ions chlores passent dès la première semaine. En outre, la concentration en ions chlores ayant traversé l'éprouvette est plus faible pour les éprouvettes hydrofugées que pour la référence, excepté pour les échantillons « Hydrofuge A c<sub>2</sub> 1 et 2 ». En effet, étant donné que les premières concentrations prélevées dans la cellule « Hydrofuge A c<sub>2</sub> 1 » sont presque cinq fois plus élevées que celles dans la cellule de référence, une nouvelle cellule « Hydrofuge A c<sub>2</sub> 2 » a été lancée afin de minimiser les erreurs qui auraient pu avoir lieu lors de la réalisation de la cellule et de mieux comprendre le phénomène. Cependant, la nouvelle cellule donne toujours des concentrations en ions chlores plus élevées, voire pire que la première cellule, comparées à la cellule de référence et une moyenne des concentrations des deux cellules est faite appelée « Hydrofuge A c<sub>2</sub> moy ». Par ailleurs, la cellule « Hydrofuge A » semble être la plus efficace tandis que pour les cellules « Hydrofuge B c<sub>2</sub> et Hydrofuge B » seulement une faible différence est observée.

### 3.2 Mortier

Deux séries comprenant à chaque fois 6 échantillons, notamment deux échantillons par rapport  $E/C$  et par type d'hydrofuge, ont été réalisés. Ainsi, deux éprouvettes pour chaque composition sont testées.

Les courbes représentant les quantités en ions chlores passées en fonction du temps pour les deux séries sont illustrées sur les Figure 37 et Figure 38.

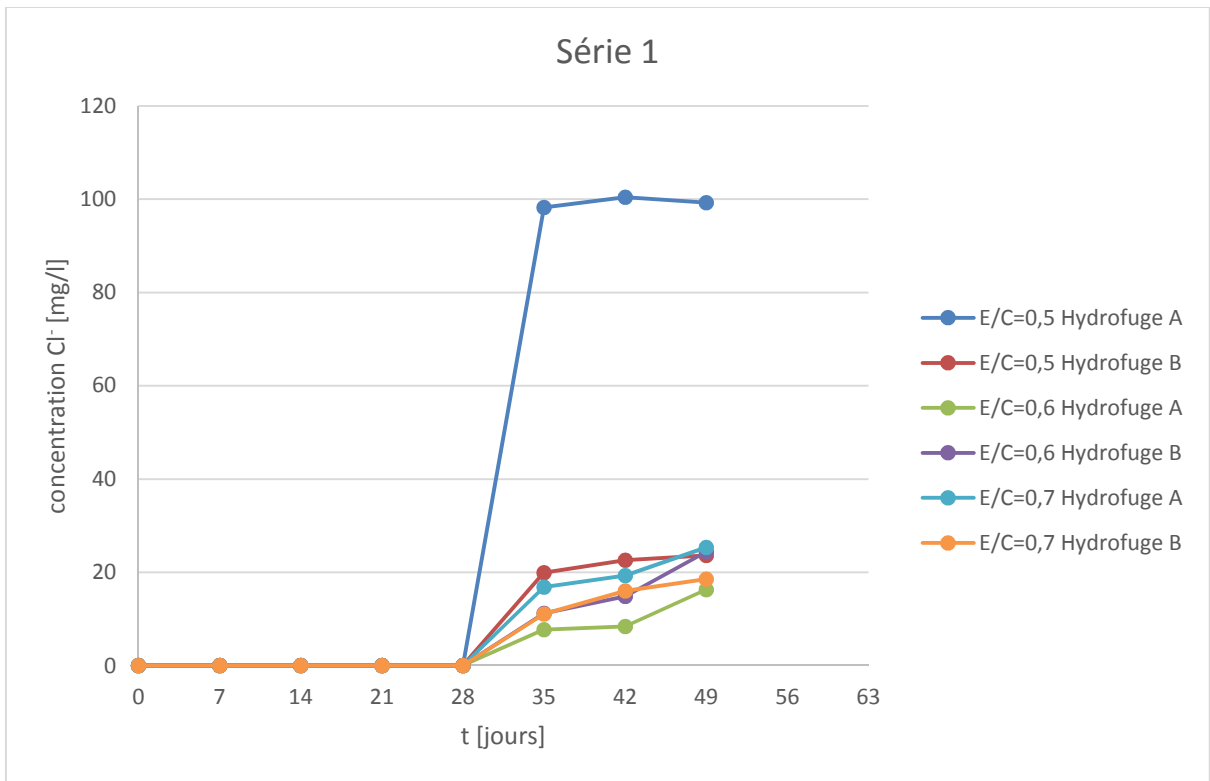


Figure 37 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlores pour Série 1

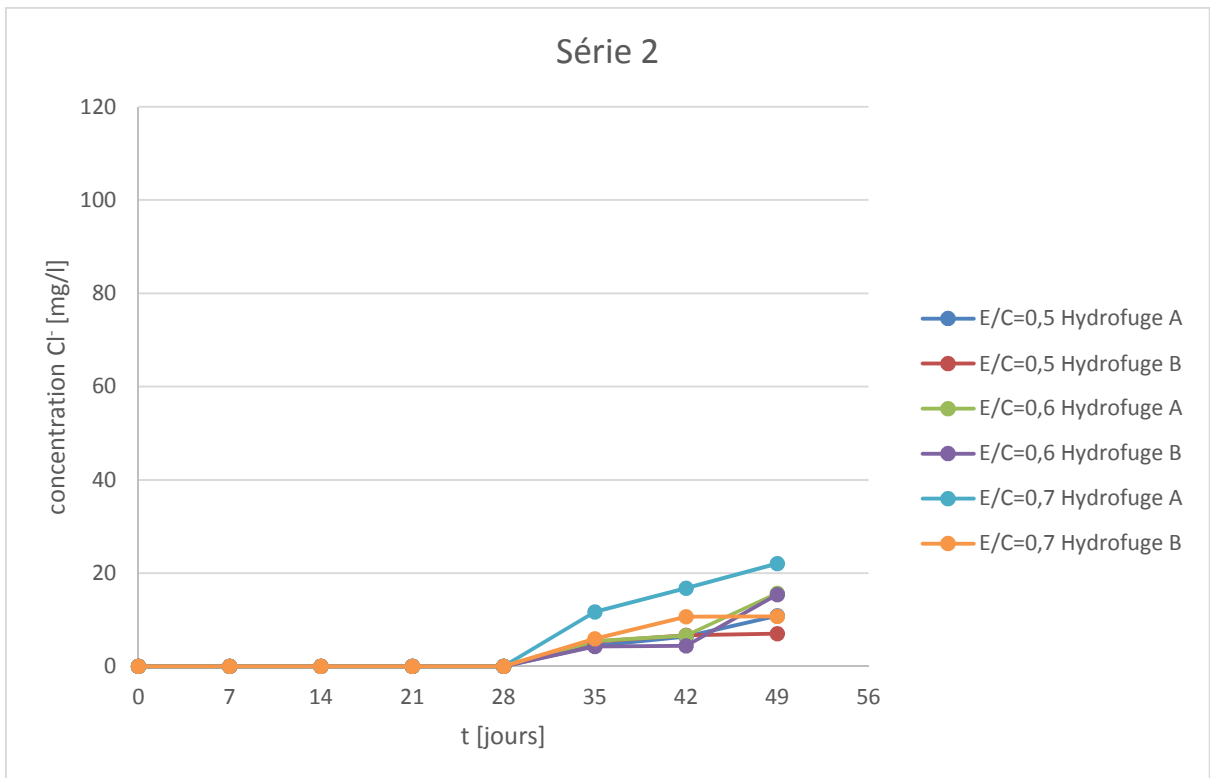


Figure 38 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlores pour Série 2

La première observation qui peut être faite, c'est que la courbe correspondant à l'échantillon « E/C = 0,5 Hydrofuge A » de la série 1 se situe nettement au-dessus des autres courbes. Étant

donné, que la « vraie » raison, pour une concentration si élevée, n'a pas pu être déterminée, quelques hypothèses ont été formulées afin d'essayer d'expliquer d'où cette concentration peut venir :

- Un trou ou une poche d'air à l'intérieur de la tranche de mortier peut augmenter la vitesse de diffusion à travers celui-ci
- Les granulats (sables) utilisés sont peut-être trop grands et l'échantillon ne représente plus la réalité. En effet, la porosité est beaucoup plus variable à la zone de transition interfaciale entre granulat et pâte et la diffusion a tendance de se faire à travers cette zone
- Un mauvais nettoyage des outils utilisés pour remplir les cellules ce qui aurait pu provoquer une contamination en ions chlorés dans le compartiment aval (initialement ne devant pas en contenir)
- Une mauvaise concentration en ions chlorés dans le compartiment amont. Cette raison a pu être écartée en mesurant la concentration

Dès lors, en omettant cette courbe, la moyenne des deux courbes correspondant à la même composition a été prise afin de pouvoir déterminer les coefficients de diffusion effectifs des cellules. Pour ce faire, le régime stationnaire de la concentration doit être atteint, ce qui n'est pas encore le cas (Figure 39). Dès lors, aucun coefficient de diffusion n'a pu être déterminé et l'analyse se base uniquement sur les temps d'occurrence.

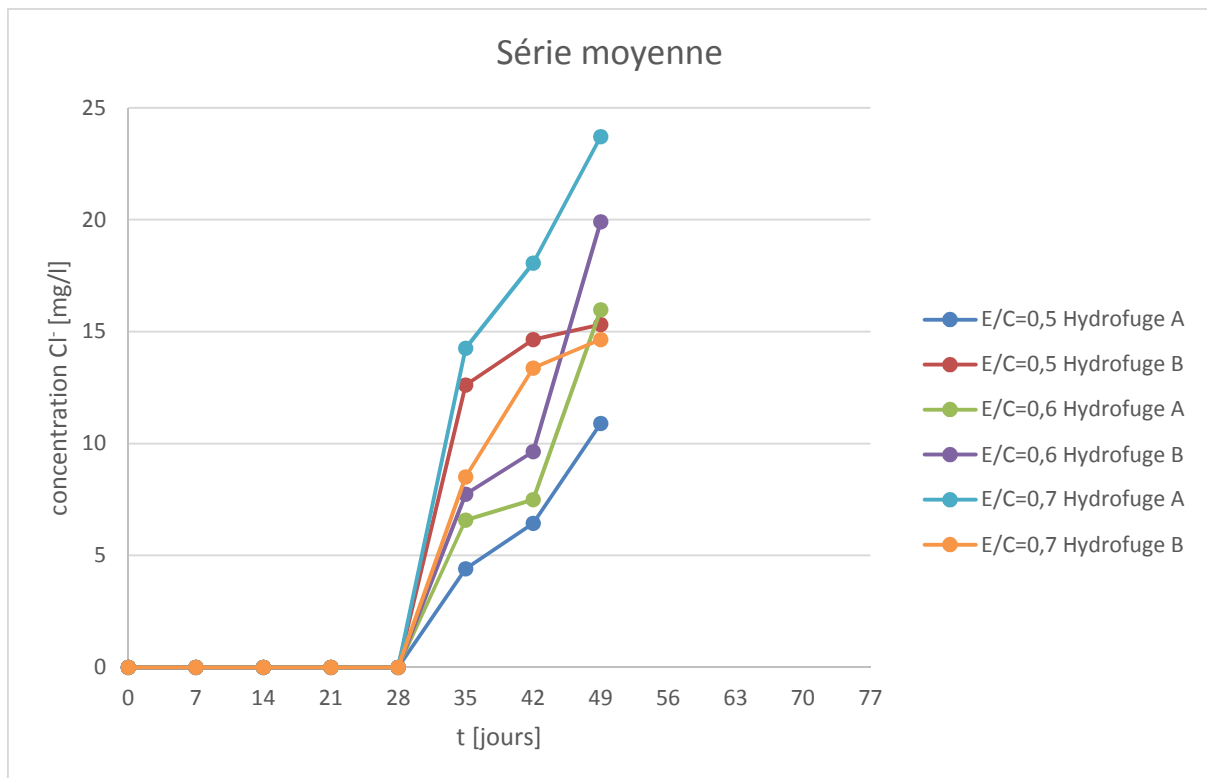


Figure 39 : Courbes d'évolution de la concentration en ions chlorés pour Série moyenne

En observant la Figure 40, une différence entre les temps d'occurrence pour les échantillons de référence et ceux hydrofugés peut être constatée. En effet, le temps de retard est nettement

plus important pour ces derniers. Ainsi, un effet des hydrofuges peut être constaté, notamment sur le retardement de la diffusion des ions chlores à travers l'éprouvette. Il faut encore noter que ces temps d'occurrence sont un multiples de 7 jours puisque les prélèvements ont été effectués toutes les semaines. Ainsi, ces temps observés ne représentent pas les temps réels de retard et ils peuvent être supérieurs à ceux-ci.

Par ailleurs, la quantité en ions chlores passée à travers les échantillons « Hydrofuge A » est inférieure à celle passée à travers les échantillons « Hydrofuge B » pour les rapports  $E/C = 0,6$  et  $0,7$ . Ainsi, l'hydrofuge A semble de nouveau être plus efficace. Pour le rapport  $E/C = 0,7$ , c'est l'inverse.

En comparant les différents rapports  $E/C$ , une tendance peut également être constatée. En effet, les quantités en ions chlores ayant traversée les échantillons de rapport  $E/C = 0,6$  est légèrement supérieure à celle de rapport  $E/C = 0,5$ . C'est le cas pour tous les échantillons (référence et hydrofugés).

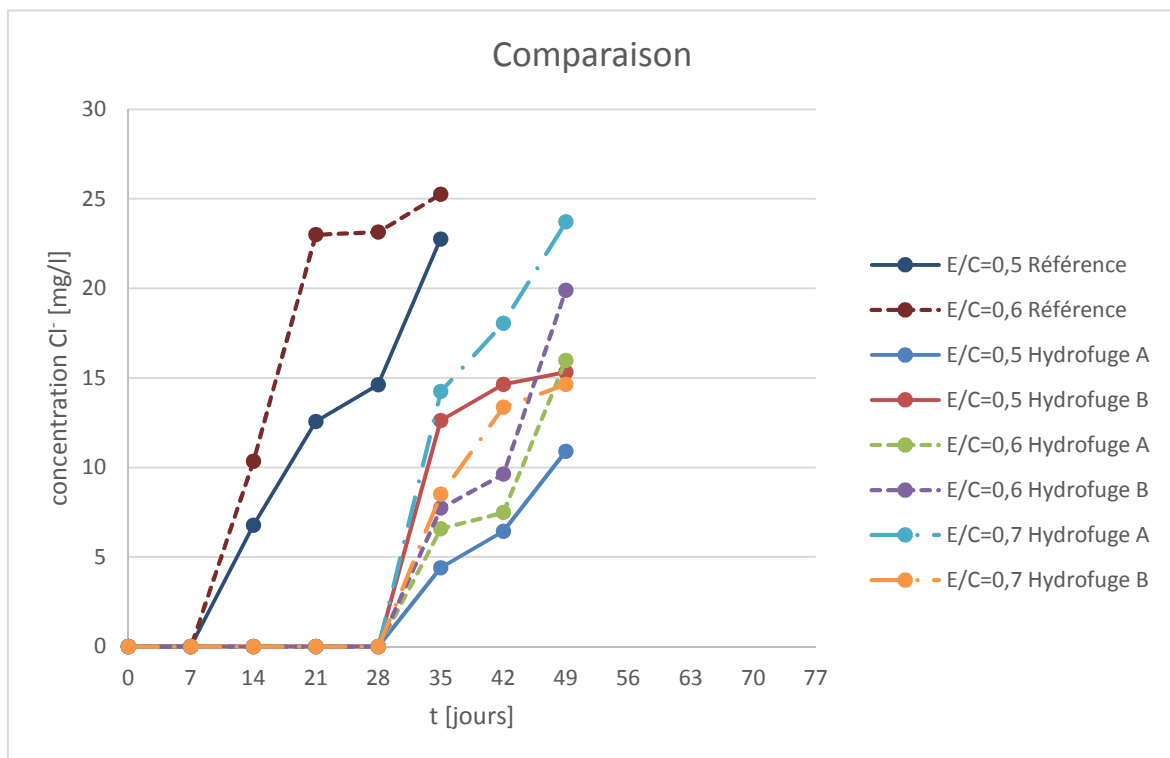


Figure 40 : Comparaison des courbes d'évolution de la concentration en ions chlores

Cet essai a aussi été réalisé sur des échantillons correspondant au rapport  $E/C = 0,7$ . Cependant, la cellule de référence présente une concentration en ions chlores énorme par rapport aux cellules de référence des autres rapports  $E/C$  (annexe...) Étant donné que la ou les cause(s) ne sont pas connue(s), la comparaison entre celle-ci et les cellules comprenant les échantillons hydrofugés est impossible et les résultats obtenus sont négligés pour l'analyse (Annexe 4).

## 4 Diffusion en régime transitoire

### 4.1 Profils de concentration en chlorures

Les profils de concentration en chlorures en fonction de la profondeur de pénétration dans l'échantillon de mortier par rapport à la surface d'exposition sont représentés sur la Figure 41. Le temps d'immersion des échantillons dans la solution de  $NaCl$  est de 35 jours. Il faut noter que les profils correspondent à la concentration en chlorures totaux.

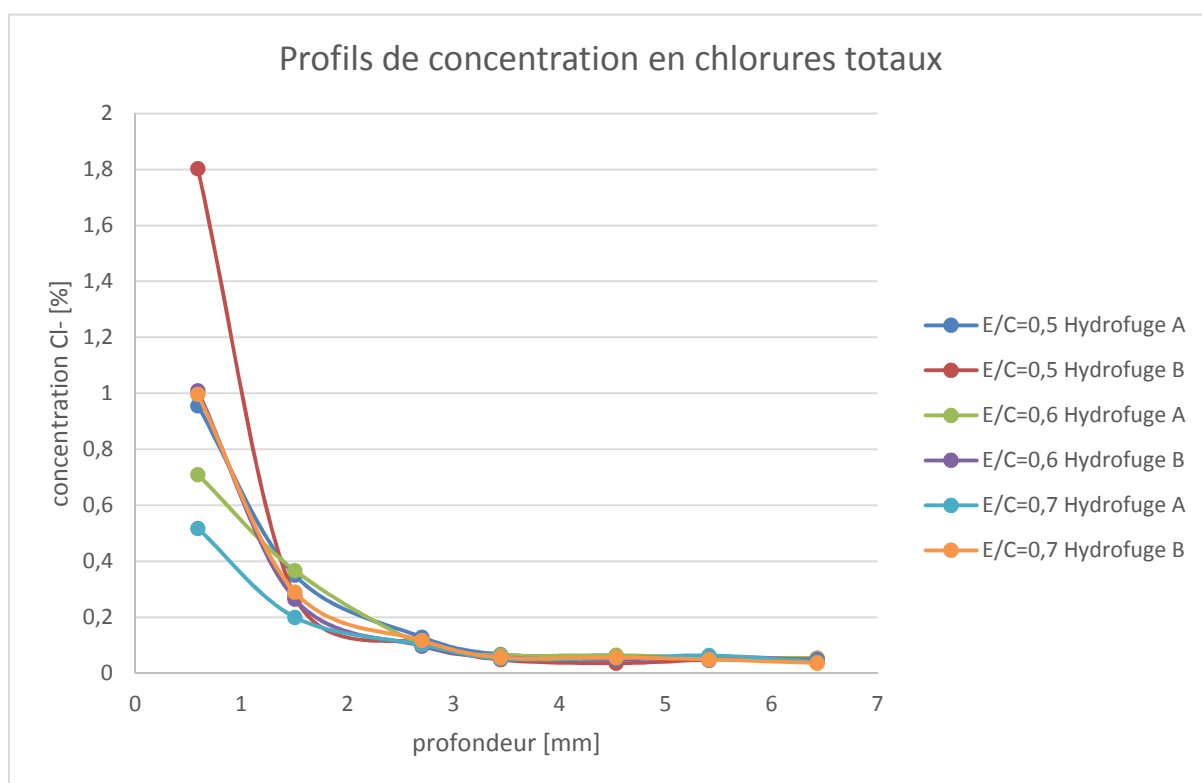
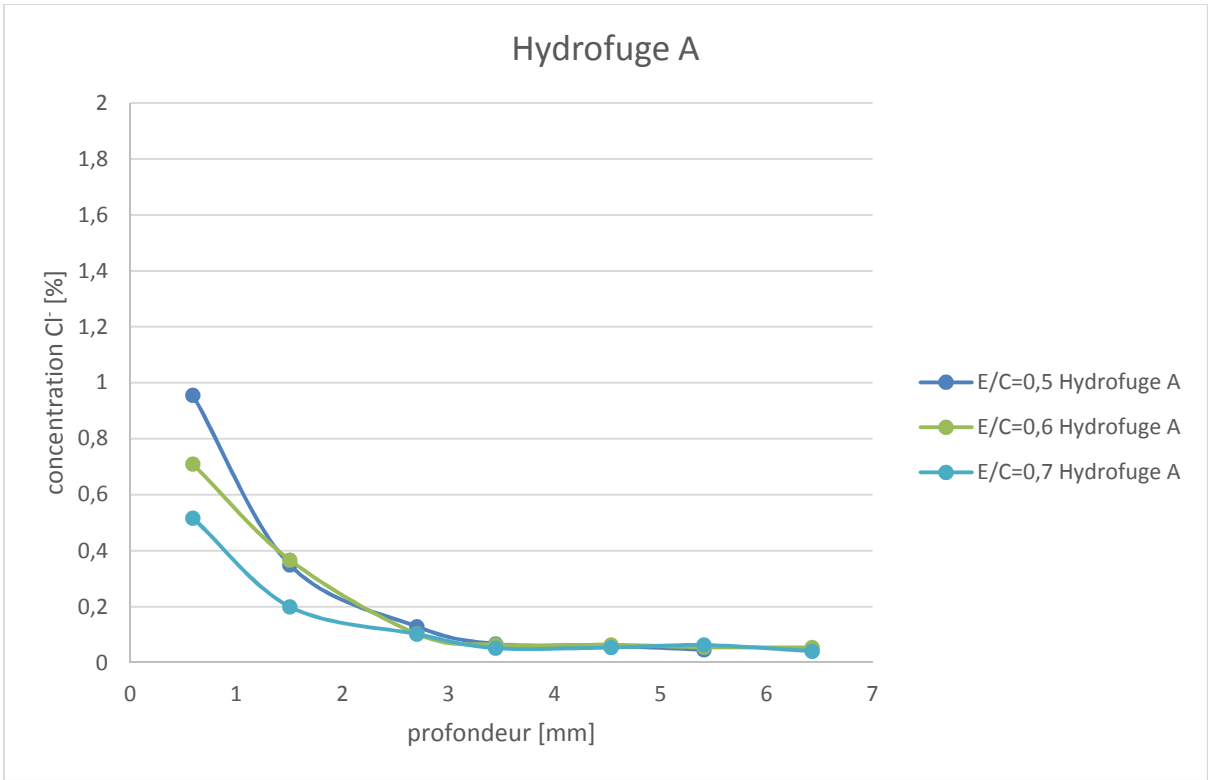


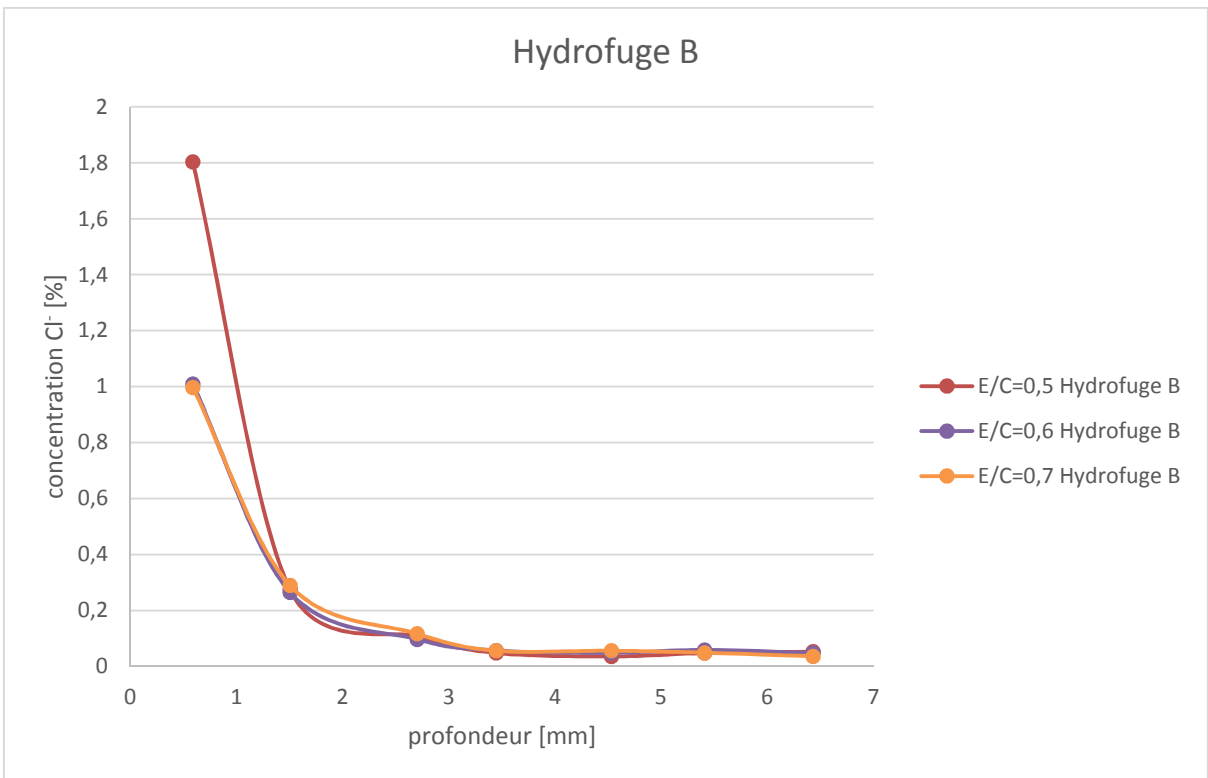
Figure 41 : Profils de concentration en chlorures totaux

Les courbes ont toutes une allure semblable, si ce n'est que jusqu'à une profondeur de 2,7 mm des légères différences entre les courbes sont observables et au-delà les courbes se superposent toutes et atteignent la concentration en ions chlorures initiale dans les mortiers qui sont introduits involontairement avec l'eau de gâchage, le ciment et le sable. À première vue, il n'y a pas d'effets clairement visibles des types d'hydrofuges ou encore des rapports  $E/C$ .

En observant les Figure 42 et Figure 43, une concentration en chlorures plus élevée peut être constatée pour les échantillons « Hydrofuge B » sur les premiers 0,5 mm. Au-delà, aucun effet ne peut être remarqué. En outre, pour les trois rapports, la concentration en ions sur cette profondeur diminue avec un rapport  $E/C$  augmentant et la pente est plus importante pour l'« hydrofuge A ».



**Figure 42 : Profils de concentration en chlorures totaux pour l'hydrofuge A**



**Figure 43 : Profils de concentration en chlorures totaux pour l'hydrofuge B**

## 5 Conduction sous champs électrique

### 5.1 Évolution de l'intensité du courant au cours du temps

La Figure 44 représente les courbes de l'intensité du courant en fonction du temps pour tous les échantillons testés.

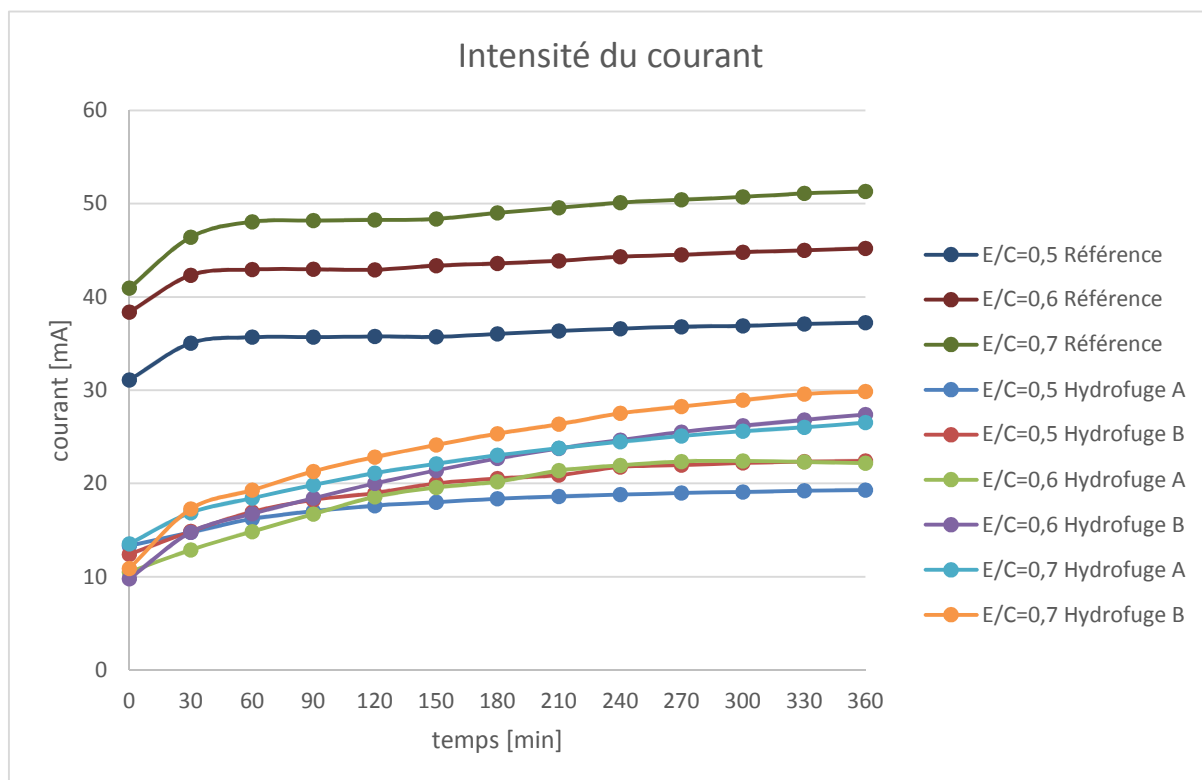


Figure 44 : Intensité du courant pour tous les échantillons testés

Les observations faites sont les suivantes :

- L'intensité du courant mesurée pour les trois références est nettement supérieure à celle pour les échantillons hydrofugés et ce pour n'importe quel rapport  $E/C$
- Les courbes « Référence » augmentent fortement pendant les premières 30 min et tendent à se stabiliser tandis que les courbes « Hydrofuge A et B » augmentent progressivement au cours du temps

## 5.2 Charge électrique totale

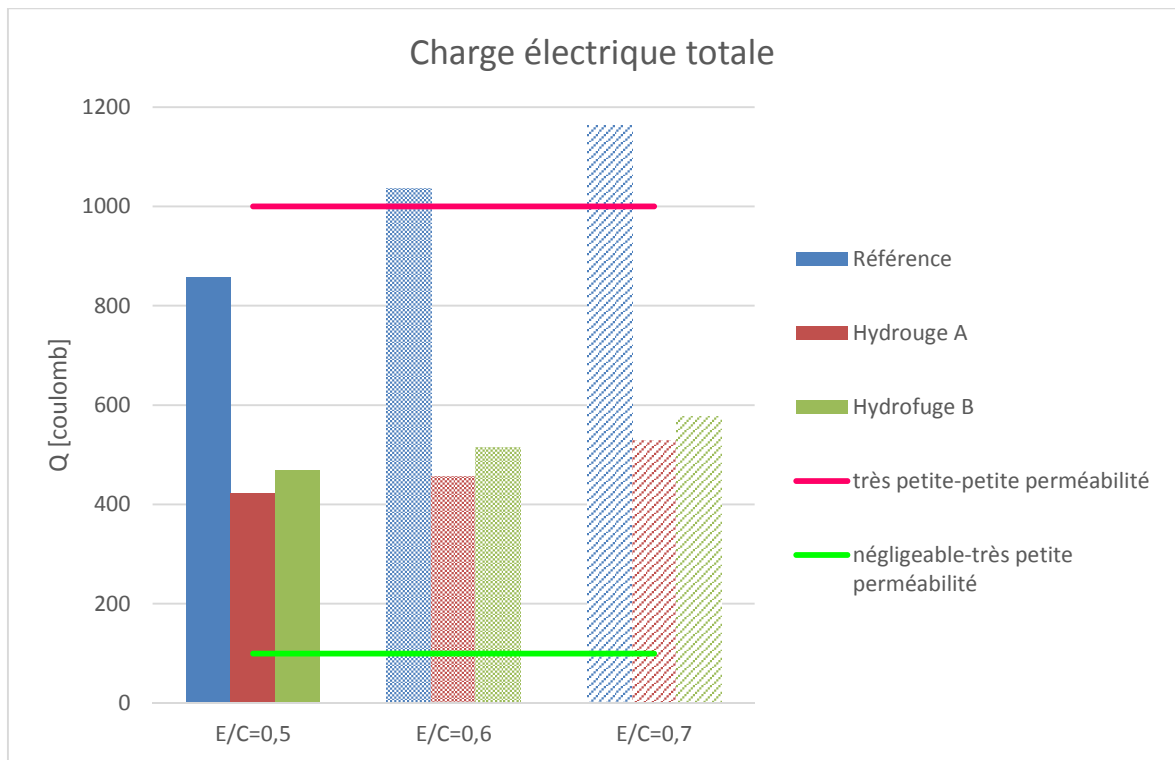


Figure 45 : Charge électrique totale ayant traversées l'échantillon

Tous les échantillons sont situés dans la classe très petit perméabilité, excepté les références  $E/C = 0,6$  et  $0,7$ .

Une réduction importante de la charge électrique pour les échantillons hydrofugés par rapport aux références peut être observée sur la Figure 45 et ce pour les trois rapports  $E/C$ . De même, la charge électrique est plus faible pour l' « Hydrofuge A » que pour l' « Hydrofuge B ». Par ailleurs, la différence de la charge électrique entre la référence et les échantillons hydrofugés augmente avec le rapport  $E/C$ .

## Chapitre XI : Analyse et interprétation des résultats

Dans ce chapitre, une interprétation, des observations faites dans le Chapitre X : pour chaque essai indépendamment est réalisée afin de pouvoir mettre en évidence, d'une part l'influence du type d'hydrofuge au sein de chaque rapport  $E/C$  et d'autre part l'influence des hydrofuges en fonction du rapport  $E/C$ . Pour ce faire, l'efficacité des hydrofuges est exprimée en pourcentage de gain ou de perte par rapport à la référence (échantillon sans hydrofuge) en vue de mieux visualiser les effets des hydrofuges et donc de tenter d'expliquer les différents phénomènes ayant lieu et conduisant à ces résultats.

### 1 Absorption d'eau par capillarité

#### 1.1 Échantillons non vieillis

Le tableau ci-dessous indique la diminution en [%] du coefficient d'absorption des échantillons hydrofugés par rapport aux références.

	Diminution [%]					
	Hydrofuge $A c_1$	Hydrofuge $B c_1$	Hydrofuge $A c_2$	Hydrofuge $B c_2$	Hydrofuge $A c_3$	Hydrofuge $B c_2$
Référence $E/C = 0,5$	65,92	23,18	76,37	58,93	80,14	76,89
Référence $E/C = 0,6$	67,34	67,81	89,25	60,21	66,63	71,14
Référence $E/C = 0,7$	80,92	-18,34	83,32	84,31	91,87	76,18

Tableau 15 : Diminutions pour échantillons non vieillis

Comme déjà observé dans le Chapitre X ;, la diminution en pourcentage du coefficient d'absorption augmente avec le rapport  $E/C$ , c'est-à-dire que les différences entre référence et hydrofuges sont plus importantes pour un rapport  $E/C = 0,7$  que pour un rapport  $E/C = 0,5$ . Ceci peut être dû au fait que l'échantillon de référence correspondant à un rapport  $E/C = 0,5$  est moins poreux que celui correspondant à un rapport  $E/C = 0,7$  et celui-là a donc un coefficient d'absorption plus faible. En effet, comme expliqué dans la partie théorique sur les hydrofuges, ceux-ci peuvent plus facilement pénétrer dans un matériau plus poreux et y tapisser les surfaces des pores. Ainsi, plus les échantillons de mortier sont poreux (rapport  $E/C$  élevé) et plus le coefficient d'absorption des références est important, plus l'application d'un hydrofuge s'avère efficace.

En outre, en observant le Tableau 15, une diminution du coefficient plus importante peut être constatée globalement pour les « Hydrofuge A » que pour les « Hydrofuge B ». En sachant qu'il s'agit du « bon » hydrofuge contenant 99 % de matière active et qu'il pénètre plus profondément dans le mortier (d'après la fiche technique), celui-ci revêt plus de pores et est donc plus efficace contre la pénétration d'eau.

## 1.2 Échantillons vieillis

La diminution en [%] du coefficient d'absorption des échantillons hydrofugés par rapport aux références est reprise dans le tableau suivant.

	Diminution [%]			
	Hydrofuge A $c_1$	Hydrofuge B $c_1$	Hydrofuge A $c_2$	Hydrofuge B $c_2$
Référence $E/C = 0,5$	9,23	-4,25	20,42	1,28
Référence $E/C = 0,6$	35,55	-3,71	52,78	10,17
Référence $E/C = 0,7$	49,66	-4,87	56,56	14,72

Tableau 16 : Diminutions pour échantillons vieillis

En observant le Tableau 16, trois constatations peuvent être faites.

D'abord, pour chaque rapport  $E/C$ , le coefficient d'absorption pour les échantillons vieillis « Hydrofuge B  $c_1$  » est plus grand que celui pour les références (ce qui est représenté par les valeurs négatives dans le tableau). Cette observation peut donner une première indication sur la durabilité de ce type d'hydrofuge. En effet, l'hydrofuge B pénètre moins en profondeur dans les échantillons et il résiste donc moins bien aux attaques de l'extérieur.

Par analogie, la diminution des coefficients d'absorptivité suit une logique claire. Ainsi, pour les trois rapports  $E/C$ , la diminution pour l'hydrofuge A est supérieure à celle pour l'hydrofuge B et pareil pour les consommations, la réduction du coefficient d'absorption pour la consommation  $c_1$  est plus faible que celle pour la consommation  $c_2$ . Ce qui revient à dire que l'hydrofuge A résiste mieux aux cycles de vieillissement et est plus efficace grâce à sa profondeur de pénétration plus importante et son taux de matière active plus élevée. Parallèlement, une consommation en hydrofuge plus élevée est plus efficace puisque plus de pores et capillaires sont revêtis réduisant ainsi la pénétration d'eau.

Enfin, le même effet, comme auparavant pour les échantillons non vieillis, peut être observé entre le rapport  $E/C = 0,5$  et les deux autres rapports. En d'autres termes, la diminution du coefficient d'absorption est plus importante pour un rapport  $E/C$  élevé. Dans ce cas, la porosité des échantillons en mortier joue un rôle encore plus important puisque l'humidité, à laquelle ils ont été soumis, peut beaucoup plus facilement pénétrer dans un matériau plus poreux. Une fois à l'intérieur, l'eau va geler lorsque les éprouvettes sont soumises aux cycles de gel dégel provoquant ainsi des dégradations au niveau du mortier et de l'hydrofuge appliqué. Ainsi, étant donné que les mortiers d'un rapport  $E/C = 0,5$  sont moins poreux que ceux pour un rapport  $E/C = 0,6$  ou  $0,7$ , les cycles de vieillissement entraînent moins de dégâts.

### 1.3 Comparaison entre les échantillons non vieillis et vieillis

L'augmentation en [%] du coefficient d'absorption des échantillons vieillis par rapport aux échantillons non vieillis est reprise dans le Tableau 17.

	Augmentation [%]				
	Référence	Hydrofuge $A c_1$	Hydrofuge $B c_1$	Hydrofuge $A c_2$	Hydrofuge $B c_2$
Référence $E/C = 0,5$	25,81	72,15	45,34	77,97	69,14
Référence $E/C = 0,6$	29,65	64,35	78,16	83,98	68,84
Référence $E/C = 0,7$	-18,41	55,12	-33,62	54,55	78,21

Tableau 17 : Augmentation des coefficients d'absorption

Globalement, une augmentation importante des coefficients d'absorption pour les échantillons vieillis peut être observée, excepté pour l'échantillon de référence et l'échantillon « Hydrofuge  $B c_1$  » d'un rapport  $E/C = 0,7$ . Pour ce dernier, cette diminution peut être expliquée par le fait que pour l'échantillon non vieilli, le coefficient d'absorption est très élevé et que peut-être une consommation de  $150 \text{ g/m}^2$  n'est pas suffisante pour diminuer significativement l'absorption d'eau par capillarité.

L'effet du type d'hydrofuge est présent, mais moins remarquable qu'auparavant. Ceci peut être simplement dû au fait que les échantillons non vieillis ne sont pas les mêmes que les échantillons vieillis. Ainsi, les différences d'un échantillon à l'autre peuvent jouer un rôle important.

En somme, l'essai d'absorption capillaire illustre trois effets des hydrofuges. Le premier effet est observable en fonction du rapport  $E/C$ , notamment plus le rapport  $E/C$  est élevé, plus l'hydrofuge est efficace. Le deuxième effet concerne le type d'hydrofuge, ainsi le « bon » hydrofuge semble être plus efficace à courte durée et s'avère clairement plus efficace à longue durée. Le troisième effet peut être constaté au niveau de l'état des échantillons, c'est-à-dire les deux types d'hydrofuges perdent leur efficacité lorsqu'ils sont soumis à des cycles de vieillissement.

## 2 Diffusion en régime stationnaire

### 2.1 Béton cellulaire

Les valeurs des coefficients de diffusion effectifs sont données dans le tableau ci-dessous :

	Référence	Hydrofuge $A c_2$ moy	Hydrofuge A	Hydrofuge $B c_2$	Hydrofuge B
$D_e [m^2/s]$	$2,07 \cdot 10^{-11}$	$8,77 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-13}$	$9,3 \cdot 10^{-12}$	$8,81 \cdot 10^{-12}$

Tableau 18 : Coefficients de diffusion effectifs

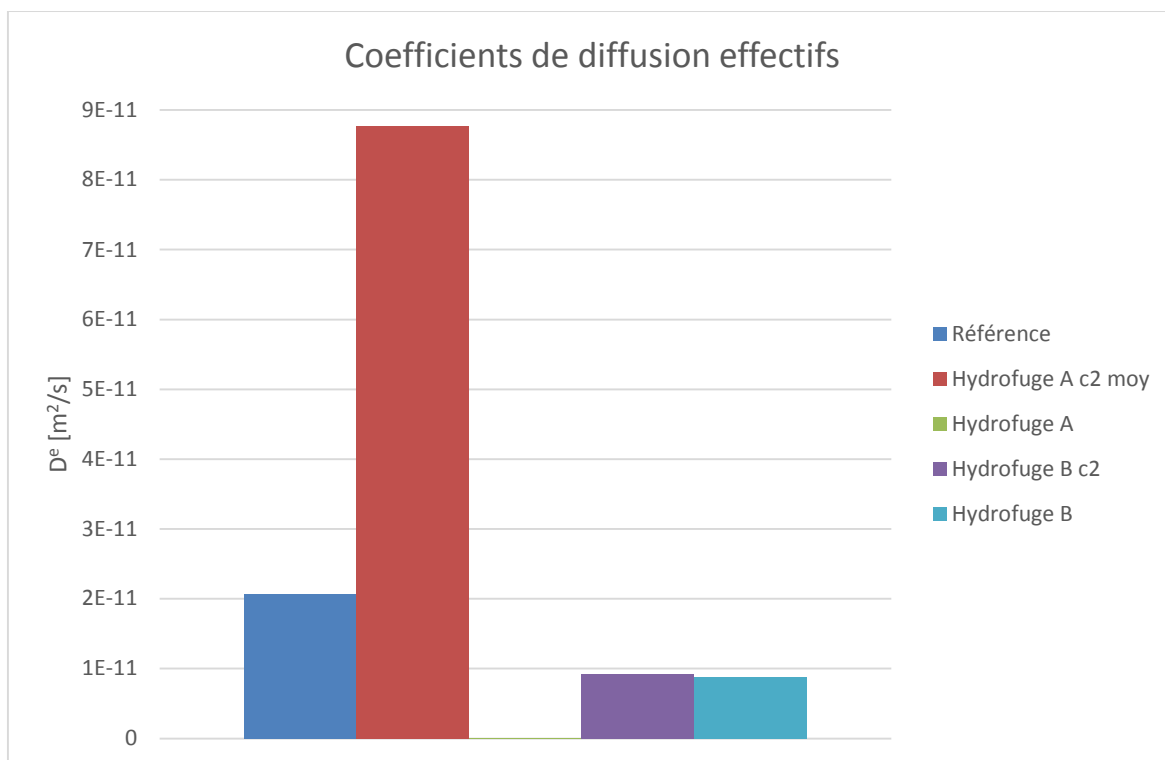


Figure 46 : Coefficients de diffusion effectifs pour béton cellulaire

Le coefficient de diffusion effectif de la cellule « Hydrofuge A » est trop faible par rapport aux autres coefficients pour être représenté sur la figure.

Les coefficients de diffusion effectifs sont en concordance avec les courbes d'évolution de la concentration en ions chlorures. Ainsi, le coefficient pour la cellule « Hydrofuge A c<sub>2</sub> moy » est nettement plus grand que les autres coefficients, tandis que pour les cellules « Hydrofuge B », il est inférieur à la cellule « Référence ». De plus, les valeurs de ces deux coefficients sont presque identiques.

En comparant la valeur obtenue pour la cellule « Hydrofuge A c<sub>2</sub> moy » à celle obtenue pour la cellule « Référence », il est étonnant que celle-ci soit plus grande. En effet, une valeur moindre a été attendue grâce à l'application d'une consommation en hydrofuge. Cependant, puisque l'hydrofuge A est très liquide et volatil, il s'est adhérent aux pores dès le premier contact avec la surface et n'a plus pu pénétrer aussi profondément pour tapisser tous les pores. Par contre, l'hydrofuge B, étant moins liquide, a mieux su revêtir les pores.

En somme, une consommation de 300g/m<sup>2</sup> du type d'hydrofuge A ne semble pas être suffisante pour ralentir la diffusion en ions chlorures et la cellule « Hydrofuge A c<sub>2</sub> moy » peut être considérée comme une cellule de référence. Dès lors, une autre conclusion peut-être tirée, à savoir la porosité du béton cellulaire n'est pas si régulière qu'estimée puisque le coefficient de diffusion est environ 4 fois plus grand d'un échantillon à l'autre.

### 3 Diffusion en régime transitoire

À partir des profils de concentrations, des coefficients de diffusion apparents peuvent être déterminés en utilisant une régression linéaire sur les trois premières profondeurs puisque aucune différence n'est constatée au-delà.

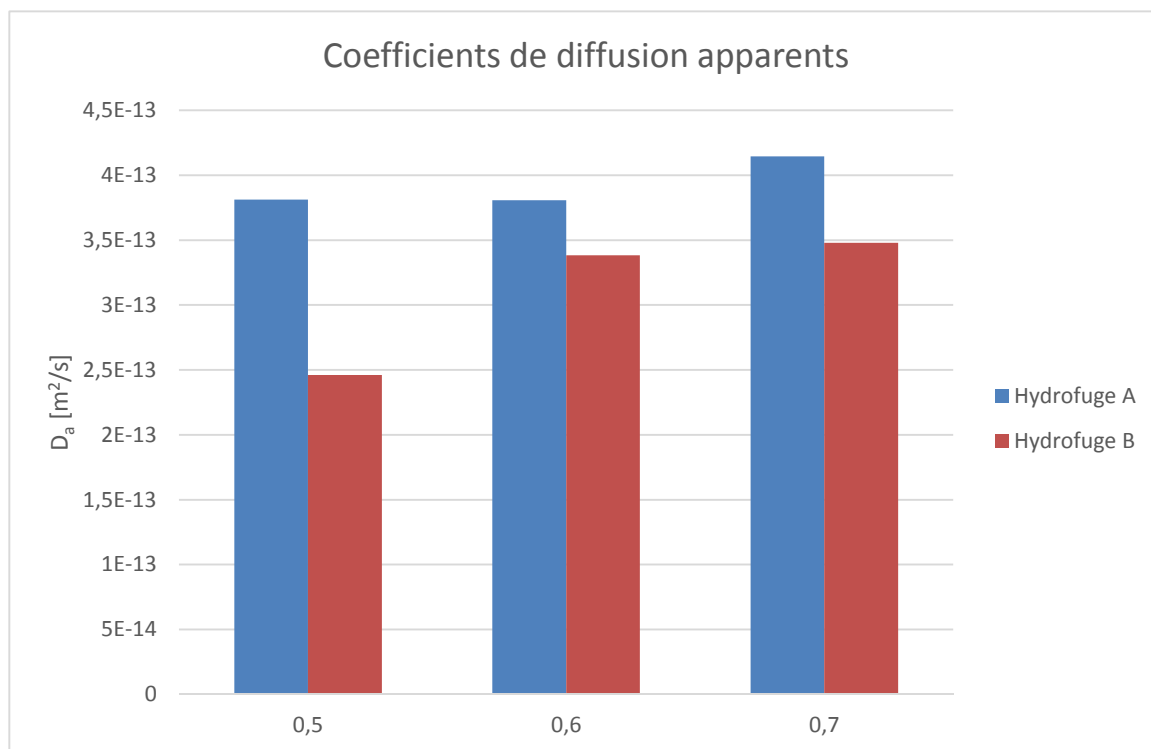


Figure 47 : Coefficients de diffusion apparents

Parallèlement à ce qui vient d'être dit au Chapitre X : les coefficients de diffusion apparents augmentent légèrement en fonction du rapport  $E/C$ . Ce qui laisse entrevoir que d'une part la porosité du matériau, plus précisément la taille des pores, est moins importante pour la diffusion puisqu'elle se déroule lorsque les pores sont saturés et d'autre part que les deux types d'hydrofuges sont au moins voire plus efficaces pour les rapports  $E/C$  plus élevés.

Par contre, au sein d'un rapport  $E/C$ , l'« Hydrofuge B » présente un coefficient moins important comparé à celui de l'« Hydrofuge A » ce qui n'est pas en liaison directe avec les profils de concentration. Ceci peut-être dû au fait qu'une analyse à régression linéaire a été faite qui est basée sur des hypothèses, notamment le coefficient de diffusion apparent  $D_a$  est constant et la concentration de la solution d'exposition  $C_s$  est également constante dans le temps (45).

Dès lors, une analyse plus précise devrait être réalisée par exemple par une régression non linéaire, afin de déterminer des coefficients de diffusion apparents plus proches des profils de concentration obtenus. Néanmoins, le profil de concentration obtenu mathématiquement ne va jamais correspondre à 100 % au profil obtenu en laboratoire puisque la diffusion dépend

de nombreux de facteurs comme expliqué au Chapitre III : (40) et la présence d'un hydrofuge de surface va également avoir des effets sur le mécanisme.

Étant donné que les profils de concentration pour les références sont manquants aucune analyse ne peut être réalisée sur l'efficacité des hydrofuges à l'empêchement ou retardement de la pénétration des ions chlorures. Cependant, en comparant les profils de concentration avec des profils de concentration obtenus dans un autre travail de fin d'études (16), un effet des hydrofuges sur les premières profondeurs peut être constaté. Ainsi, ces courbes sont plus lisses et la concentration en chlorures diminue progressivement avec la profondeur tandis que dans le cas des hydrofuges, la concentration diminue subitement et les courbes présentent une forte pente entre les premières profondeurs.

#### 4 Conduction sous champs électrique

À partir des charges électriques calculées dans le Chapitre X : une classe de perméabilité aux chlorures peut être déterminée. Les classes de perméabilité en fonction de la charge en [coulomb] sont données par Whiting (44) au Chapitre IX :

Il faut noter que ces valeurs sont attribuées aux bétons et que les résultats obtenus sur mortiers ne sont pas réellement comparables à ces valeurs. Toutefois, globalement tous les échantillons sont situés dans la classe de perméabilité « petite », sauf les références des rapports  $E/C = 0,6$  et  $0,7$  qui sont dans la classe « moyenne ».

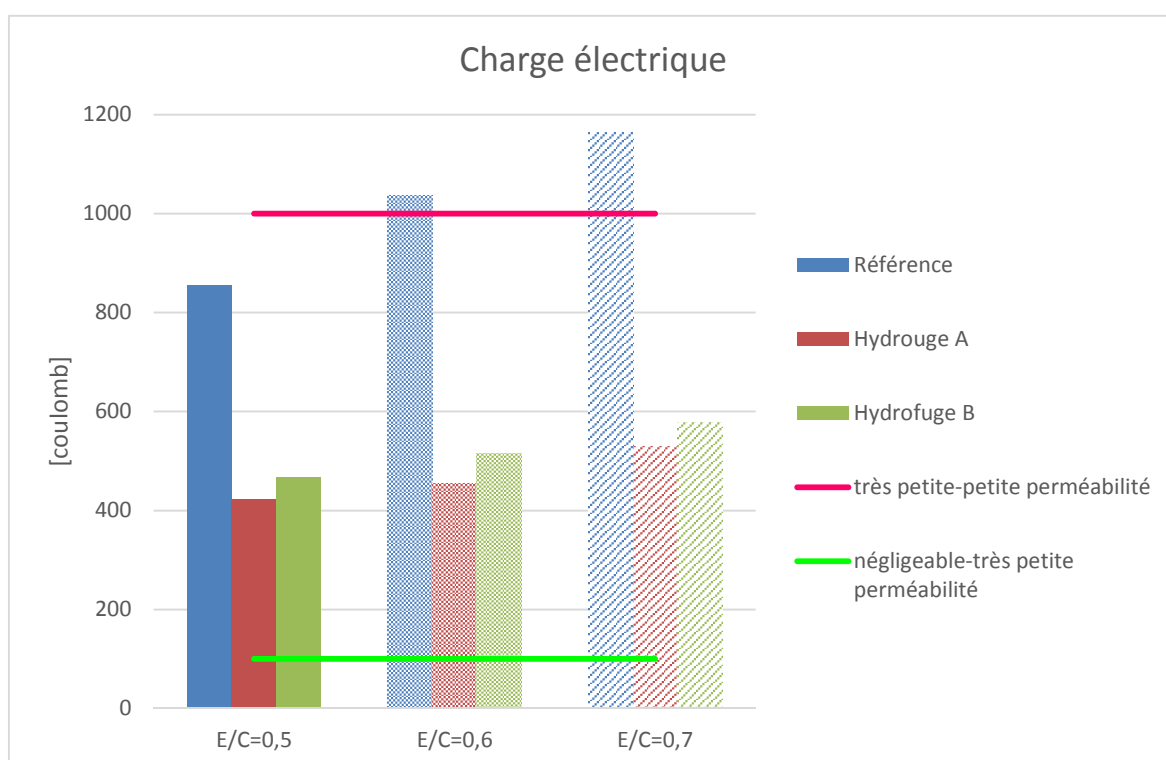


Figure 45 : Charge électrique totale ayant traversées l'échantillon

La diminution en [%] de la charge électrique totale des deux hydrofuges par rapport aux références sont données au Tableau 19 :

	<b>Diminution [%]</b>	
	<b>Hydrofuge A</b>	<b>Hydrofuge B</b>
<b>Référence <math>E/C = 0,5</math></b>	50,68	45,32
<b>Référence <math>E/C = 0,6</math></b>	56,06	50,31
<b>Référence <math>E/C = 0,7</math></b>	54,57	50,34

**Tableau 19 : Diminution de la charge électrique totale**

Comme déjà mentionné dans l'analyse des autres résultats :

- L'hydrofuge A résiste mieux à la migration des ions à travers l'échantillon en mortier ce qui est dû à sa profondeur de pénétration plus grande
- L'effet des hydrofuges est plus remarqué pour les rapports  $E/C$  plus élevés

## **Chapitre XII : Tendances entre les différents résultats**

---

Avant de tirer des conclusions, il est important de noter que pour tous les essais, sauf pour l'essai de diffusion en régime stationnaire, seulement un échantillon par composition a été testé. Ainsi, les résultats obtenus ne sont pas pertinents et ne représentent pas forcément la réalité.

### **1 Absorption capillaire et angle de contact**

Les résultats obtenus pour ces deux essais ne correspondent par l'un à l'autre. En effet, pour l'absorption capillaire, le coefficient est plus faible pour les échantillons vieillis que pour les échantillons non vieillis ce qui paraît logique puisqu'ils ont subis des cycles de vieillissement entraînant l'usure des hydrofuges. Par contre, pour les angles de contacts c'est le contraire qui est surtout dû à la grande déviation de mesures de l'angle de contact (46).

### **2 Diffusion des ions chlores**

Les trois essais ont, pour la grande partie, aboutie aux mêmes résultats qui sont :

- Les deux types d'hydrofuges n'empêchent pas la diffusion/migration des ions chlores, mais la ralentissent
- L'hydrofuge *A* est plus efficace que l'hydrofuge *B*
- L'effet des hydrofuges est moins important pour un rapport  $E/C = 0,5$

N'ayant pas su calculer les coefficients de diffusion effectifs, une comparaison plus poussée n'est pas possible entre ceux-ci et les coefficients de diffusion apparents. Cependant, il faut remarquer que les deux essais ne mesurent pas exactement le même type d'ions chlores (16). En effet, l'essai de diffusion en régime stationnaire considère les ions chlores libres qui passent à travers l'échantillon tandis que l'essai de diffusion en régime transitoire considère la concentration totale en ions chlores (libres et fixés) (16).

Par ailleurs, l'essai de conduction ne permet pas directement de déterminer un coefficient de diffusion, mais donne la résistance à la pénétration des ions chlores dans l'échantillon (41). En effet, la charge électrique contient le mouvement de tous les ions présents et non seulement des ions chlores.

## *Chapitre XIII : Conclusions générales*

---

La protection du patrimoine en béton se montre particulièrement délicate puisque pas toutes les techniques de protection sont applicables. En effet, la restauration du patrimoine demande des règles strictes auxquelles les hydrofuges répondent. Dès lors, cette technique se montre prometteuse pour le futur.

Étant donné que le patrimoine peut représenter tout type d'ouvrages, les infiltrations d'eau et d'agents agressifs de l'environnement doivent être limitées. Dans le cadre de ce travail, deux mécanismes de transport séparément sont étudiés, à savoir l'absorption d'eau par capillarité et la diffusion des ions chlorures. En réalité, plusieurs mécanismes peuvent avoir lieu en même temps ou se succéder ce qui est notamment le cas d'une structure située en zone maritime.

L'absorption d'eau aura lieu dans la partie sèche et à pores vides. Une fois les pores remplis d'eau, les ions chlorures peuvent pénétrer facilement et voyager à l'intérieur du béton. Dès lors, la fonction principale des hydrofuges est l'empêchement, ou au moins la diminution, de l'absorption d'eau afin de limiter un grand nombre de pathologies sur les bétons dus en particulier pas les ions chlorures.

L'objectif de ce travail, est de pouvoir affirmer ou infirmer l'efficacité des hydrofuges par rapport à la pénétration d'eau et surtout d'ions chlorures dans le béton. L'efficacité va être représentée par l'empêchement, ou plus exactement par le retardement et la diminution de la pénétration d'eau et ions chlorures dans les échantillons hydrofugés en mortier par rapport aux échantillons de référence. Pour ce faire, cinq essais ont été réalisés dont les principaux résultats vont être illustrés un par un.

D'abord, un essai d'absorption d'eau sur des échantillons non vieillis et vieillis a été réalisé afin d'estimer l'efficacité et la durabilité des types d'hydrofuges. Les informations principales pouvant en être tirées sont :

- Absorption d'eau plus faible pour tous les échantillons hydrofugés (mis à part un) par rapport aux références
- Plus d'effet des hydrofuges sur des  $E/C$  élevé
- Hydrofuge *A* légèrement plus efficace à court terme (pour échantillons non vieillis), mais nettement plus efficace à long terme que l'hydrofuge *B*. La durabilité est donc meilleure pour l'hydrofuge *A*
- Tendance claire pour les échantillons vieillis entre consommation et hydrofuge
- Perte importante au niveau de l'efficacité des hydrofuges à long terme (comparaison entre échantillons non vieillis et vieillis)

L'application d'un hydrofuge sur une surface semble donc réduire les tensions de surfaces qui sont à la base de l'absorption capillaire.

Par contre, les résultats de l'essai d'angle de contact n'est ni en corrélation avec les résultats pour l'essai d'absorption d'eau, ni avec les valeurs d'angle de contact données dans la littérature. En effet, cet essai donne des valeurs contraires à celles supposées et il est donc judicieux de refaire cet essai sur un autre type d'échantillons.

Ensuite, un essai de diffusion en régime stationnaire, sur les mortiers et du béton cellulaire, a été réalisé afin de déterminer un coefficient de diffusion effectif.

Les résultats sur béton cellulaires ont montré que l'hydrofuge *A* appliqué avec une certaine consommation n'a aucun effet sur la diffusion des ions chlorés et est inefficace pour des matériaux à grande porosité ouverte. Cependant, un échantillon immergé dans celui-ci est le plus efficace. L'hydrofuge *B* a un comportement semblable pour seulement une consommation ou complètement immergé.

Pour les cellules de diffusion avec du béton cellulaire, une piste d'investigation serait de lancer l'essai sur plusieurs différentes consommations afin de vraiment pouvoir déterminer une résistance, en terme de consommation, à partir de laquelle le passage d'ions chlorés est réduit voire empêcher.

Les résultats sur mortier n'ont pas permis de calculer des coefficients de diffusion effectifs puisque le régime stationnaire n'a pas encore été atteint. Cependant, une comparaison des temps d'occurrence au sein d'un rapport  $E/C$ , a permis de conclure que la diffusion est retardée de quelque semaine. De plus, les hydrofuges *A* sont de nouveau un peu plus efficaces.

Les résultats obtenus pour la diffusion en régime transitoire admettent la même conclusion, à savoir l'hydrofuge *A* est un peu meilleur que l'hydrofuge *B*, mais ce seulement sur les premiers  $0,7\text{ mm}$ . Sur le retardement de la pénétration des ions chlorés aucune conclusion ne peut être tirée puisque les échantillons de référence n'ont pas encore été analysés. De plus, il peut être intéressant de jouer sur le temps d'exposition des échantillons dans la solution saline pour voir le comportement à long-terme.

Enfin, l'essai de conduction sous champ électrique permet également de tirer les mêmes informations, notamment l'hydrofuge *A* est plus efficace que l'hydrofuge *B*. De plus, au niveau du courant passé, une valeur plus faible de celui-ci est remarquée dès le lancement de l'essai entre les échantillons hydrofugés et les échantillons de référence.

Finalement, tous les essais aboutissent aux mêmes conclusions, excepté l'essai de l'angle de contact.

- les hydrofuges retardent/diminue la pénétration d'eau et d'ions chlorés dans le béton
- l'hydrofuge *A* est plus efficace, au court-terme et surtout au long terme) que l'hydrofuge *B*

Des analyses statistiques peuvent être employées afin de démontrer qu'il y a une corrélation ou pas entre les différents essais. Dans le cadre de ce travail, cette corrélation a été faite « à l'œil »

Il est important de remarquer que ces conclusions sont faites sur base d'un seul résultat pour un échantillon par essai. Dès lors, les résultats ne sont pas forcément significatifs et il s'avère utile d'analyser plusieurs échantillons par essai afin de pouvoir supprimer les erreurs humaines et les défauts dans le matériau.

---

# Bibliographie

---

1. **Courard, Luc.** Livre. *Maintenance, restauration et protection des constructions.* Université de Liège : s.n.
2. **Vincent Lucquiaud, Luc Courard, Olivier Gérard et Myriam Handy.** *Etude de la durabilité des hydrofuges de surface pour la conservation du patrimoine en béton.* Université de Liège : s.n.
3. **WALLONIE, SERVICE PUBLIC DE.** *CODE WALLON DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE, DE L'URBANISME, DU PATRIMOINE ET DU PATRIMOINE ET.* Livre III Titre I Article 185. 2013.
4. **L. Courard, A. Gillard, A. Darimont, J.M. Bleus and P.Paquet.** *Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone.* Université de Liège
5. **Courard, Luc.** *Spécificités des dégradations dans les bétons du patrimoine.* Université de Liège
6. **V. Lucquiaud, L.Courard, O. Gérard, F. Michel, M. Handy S. Aggoun, A. Cousture.** *Evaluation of the durability of hydrophobic treatments on concrete architectural heritage.* Université de Liège
7. **Prelorenzo, Claude.** *Le patrimoine militaire et la question urbaine. Patrimonialiser les bases de sous-marins et le Mur de l'Atlantique. s.l. : In Situ, 2011.*
8. **Béton, Groupement Belge du.** *Technologie du béton. Chap V: La durabilité des bétons. Bd. Edition 6.*
9. **Gagné, R.** *Durabilité et réparations du béton. chapitre 1.* Université de Sherbrooke : s.n., 2009. Bd. note de cours.
10. **Courard, Luc.** *Maintenance, restauration et protection des constructions. Pathologies Bétons.* Université de Liège
11. **Gérard, O.** *Travail de fin d'études. Durabilité des hydrofuges de surface pour la protection des ouvrages historiques en béton armé. 2012-2013.*
12. **Courard, Luc.** *Choix et optimisation des matériaux de construction. durabilité béton.* Université de Liège note de cours.
13. **Technologie.** *LA CORROSION DES ARMATURES DES BÉTONS ARMÉS ET PRÉCONTRAINS.* 2008.
14. **Michel, J.-F.** *Travail de fin d'études. Etude de la diffusion des chlorures dans les bétons.* 1996-1997.

**15. FSA thèse.**

**16. Rocks, A.-C. Travail de fin d'études.** *Effet des fillers calcaires sur la résistance aux chlorures des mortiers. 2007-2008.*

**17. CEB Comité Euro-international du béton durable.** *concrete structures. Bulletin 182. Lausanne 1989.*

**18. Gagné, R.** *La durabilité du béton chapitre 2.1. Durabilité et protections des béton. Université de Sherbrooke*

**19. Gagné, R.** *Chapitre 2.2 les perméabilités. durabilité et réparations du béton. Université de Sherbrooke*

**20. Crank, J.** *THE MATHEMATICS OF DIFFUSION. Brunel University Uxbridge : CLARENDON PRESS OXFORD, 1975. second edition.*

**21. Rilem. Materials and structures.** *procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface. s.l. : Springer, 2015. Bd. 48.*

**22. Gagné, R.** *CHAPITRE 3 LES RÉPARATIONS DU BÉTON. Durabilité et réparations du béton. Université de Sherbrooke*

**23. Gagné, R.** *HYDROFUGES ET MEMBRANES D'IMPERMÉABILISATION. Durabilité et réparations du béton. Université de Sherbrooke.*

**24. Sika.** *Technologie et Concepts Sika. pour les Imprégnations Hydrophobes.*

**25. Wackers.** *Silicones. PROTECTION DURABLE DES BÂTIMENTS AVEC LES HYDROFUGES SILICONES si LRES® BS.*

**26. CSTC.** *Note d'information technique 224. Hydrofugation de surface. 2002.*

**27. Myriam, Handy.** *Étude de la durabilité des hydrofuges appliqués aux bétons d'ouvrages historiques. 2013.*

**28. HAL.** *Etude de la réactivité de surface par mesure d'angle de contact. influence de la fonctionnalisation et de la structure. Applications aux films d'oxyde de zinc électrodéposés. 2009.*

**29. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Young-Dupr%C3%A9](http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Young-Dupr%C3%A9).**

**30. Abseque, C.** *PhD thesis. Étude de l'efficacité de produits imperméabilisants pour prévenir la dégradation de la face aval des barrages en béton. Université de Laval : s.n., 2001.*

**31. MOREAU, Claire.** *Doctorat. VIEILLISSEMENT NATUREL EN MILIEU URBAIN DE PIERRES CALCAIRES HYDROFUGÉES : EVALUATION DE LA DURABILITE DES TRAITEMENTS ET DE LEUR*

IMPACT SUR LE NETTOYAGE. UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, ECOLE DOCTORALE SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTE 2008.

**32. NBN EN 196-1.** *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: Détermination des résistances.* 2005. 3.

**33. NBN B 14-207.** Essais des mortiers consistance étalement à la table à secousse.

**34. NBN EN 1062-3.** *Peintures et vernis-Produits de peintures et systèmes de revêtements pour maçonnerie et béton extérieurs-Partie 3: Détermination de la perméabilité à l'eau liquide.*

**35. NF T 30-049.** *Peintures et vernis Revêtements à usage extérieur Essai de vieillissement artificiel.* 1985.

**36. Applet. L1-3/4** *Rapport de synthèse sur les mesures de migration des chlorures. Durée de vie des ouvrages: Approche prédictive performantielle et probabiliste.*

**37. Method, Nordtest. NT BUILD 443.** *Concrete, hardened: accelerated chloride penetration.*

**38. Applet.** *Durée de vie des ouvrages: Approche prédictive performantielle et probabiliste. L 1-0 Référentiel de connaissance du groupe de travail N°1.*

**39. LMC-PT-BET Chlorure.** *Teneur en chlorure dans les mortiers et les bétons durcis.*

**40. Poulsen, Ervin.** *Chloride profiles. Analysis and interpretation of observations. Denmark : s.n.*

**41. K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas.** *FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete. Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review. University of Toronto*

**42. C 1202-97.** *Standard Test Methode for Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.*

**43. C.C. Yang, S.W.CHO.** *The relationship between chloride migration rate for concrete and electrical current in steady state using the accelerated chloride migration test.*

**44. Instruments, Germann.** *In-Situ test systems for concrete and reinforced concrete structures.*

**45. Abstract.**

**46. Clercq, Hilde De.** *Les traitements hydrofuges: utopie ou réalité ? 2012.*

**47. Simonnet, C yrille.** *Le béton. histoire d'un matériau. s.l. : Éditions Parenthèses.*

**48. Sika. Sikagard-705 L.** *Imprégnation hydrophobe à base de Silane. 2012.*

49. —. **Sikagard®-740W**. *Imprégnation hydrophobe à base de Silane en phase aqueuse*. 2012.
50. \*\*, **Thai Quang Nguyen\* - Véronique Baroghel-Bouny\* Patrick Dangla**. *Approche multi-échelles pour modéliser la pénétration des ions chlorure dans le béton*.
51. **Luc Courard, Anne Darimont, Marleen Schouterden, Fabrice Ferauche, Xavier Willem, Robert Degeimbre**. **Cement an concrete recherche**. *Durability of motars modified with metakaolin*. Univrsité de Liège : s.n., 2003.
52. **Protech, HYBRI**. *Hydrofuges à base de silicone*.
53. **P.A.M. Basheer, L. Basheer, D.J. Cleland, and A.E. Long**. *Surface treatement for concrete: assesment methods and reported performane*. *Construction and building materials*. 1997.

---

## **Partie D : Annexe**

---

## Annexe 1 Consommation appliquée en hydrofuge sur les échantillons

- Vieillessement artificiel :

$$0,275 < c_1 = 0,295 < 0,314 [g]$$

$$0,569 < c_2 = 0,589 < 0,609 [g]$$

A [m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge	c [g]	$\frac{E}{C} = 0,5$	$\frac{E}{C} = 0,6$	$\frac{E}{C} = 0,7$
0,00196	705 L	c <sub>1</sub>	0,3	0,29	0,32
		c <sub>2</sub>	0,58	0,59	0,59
	740 W	c <sub>1</sub>	0,29	0,3	0,3
		c <sub>2</sub>	0,59	0,59	0,59

- Absorption d'eau par capillarité :

$$1,4 < c_1 = 1,5 < 1,6 [g]$$

$$2,9 < c_2 = 3 < 3,1 [g]$$

$$4,9 < c_3 = 5 < 5,1 [g]$$

A [m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge	c [g]	$\frac{E}{C} = 0,5$	$\frac{E}{C} = 0,6$	$\frac{E}{C} = 0,7$
0,01	705 L	c <sub>1</sub>	1,51	1,51	1,53
		c <sub>2</sub>	3,01	3,02	3,03
		c <sub>3</sub>	5,02	5,05	5,03
	740 W	c <sub>1</sub>	1,51	1,51	1,51
		c <sub>2</sub>	3	3,01	3,01
		c <sub>3</sub>	5,06	5,02	5,06

- Diffusion en régime stationnaire :

$$1,458 < c_2 = 1,508 < 1,558 [g]$$

### Mortier

A [m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge	c [g]	$\frac{E}{C} = 0,5$	$\frac{E}{C} = 0,6$	$\frac{E}{C} = 0,7$
0,00503	705 L	c <sub>2</sub>	0,58	0,59	0,59
	740 W	c <sub>2</sub>	0,59	0,59	0,59

### Béton cellulaire

A [m <sup>2</sup> ]	c [g]	705 L	740 W
0,00503	c <sub>2</sub>	1,56	1,52
	c <sub>complètement immergées</sub>	21,19	17,27

- Diffusion en régime transitoire :

$$2,908 < c_2 = 3,009 < 3,109 [g]$$

A [m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge	c [g]	$\frac{E}{C} = 0,5$	$\frac{E}{C} = 0,6$	$\frac{E}{C} = 0,7$
0,01003	705 L	$c_2$	3,04	3,03	3,02
	740 W	$c_2$	3,02	3,02	3,02

- Conduction sous champs électrique :

$$2,278 < c_2 = 2,356 < 2,435 [g]$$

A [m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge	c [g]	$\frac{E}{C} = 0,5$	$\frac{E}{C} = 0,6$	$\frac{E}{C} = 0,7$
0,00785	705 L	$c_2$	2,39	2,4	2,39
	740 W	$c_2$	2,36	2,36	2,36

## Annexe 2 Essai d'absorption d'eau par capillarité

### Échantillons non vieillis

temps		Référence		E/C=0,5												
[min]	[heure]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3		
				[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	
0	0	0	1947,05	0	2198,91	0	2160,03	0	2210,78	0	2163,29	0	2198,07	0	1890,96	0
5	0,08333333	0,288675135	1949,26	0,221	2199,41	0,05	2160,84	0,081	2211,14	0,036	2163,9	0,061	2198,49	0,042	1891,35	0,039
10	0,16666667	0,40824829	1949,53	0,248	2199,33	0,042	2161,16	0,113	2211,26	0,048	2163,96	0,067	2198,57	0,05	1891,41	0,045
15	0,25	0,5	1949,88	0,283	2199,69	0,078	2161,2	0,117	2211,2	0,042	2164,03	0,074	2198,56	0,049	1891,4	0,044
30	0,5	0,707106781	1950,11	0,306	2199,39	0,048	2161,4	0,137	2211,18	0,04	2164,16	0,087	2198,51	0,044	1891,43	0,047
45	0,75	0,866025404	1950,34	0,329	2199,5	0,059	2161,64	0,161	2211,28	0,05	2164,16	0,087	2198,57	0,05	1891,44	0,048
60	1	1	1950,52	0,347	2199,46	0,055	2161,75	0,172	2211,21	0,043	2164,18	0,089	2198,48	0,041	1891,48	0,052
120	2	1,414213562	1951,08	0,403	2199,68	0,077	2162,25	0,222	2211,37	0,059	2164,28	0,099	2198,58	0,051	1891,55	0,059
180	3	1,732050808	1951,55	0,45	2199,75	0,084	2162,48	0,245	2211,42	0,064	2164,43	0,114	2198,71	0,064	1891,7	0,074
360	6	2,449489743	1952,22	0,517	2200,1	0,119	2163,1	0,307	2211,79	0,101	2164,77	0,148	2199	0,093	1891,87	0,091
1440	24	4,898979486	1954,59	0,754	2201,17	0,226	2164,92	0,489	2212,35	0,157	2166,1	0,281	2199,5	0,143	1892,55	0,159
1800	30	5,477225575	1955,04	0,799	2201,32	0,241	2165,44	0,541	2212,65	0,187	2166,4	0,311	2199,77	0,17	1892,79	0,183
		w[kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )]	0,1126939	0,038403	0,08657247	0,02663295	0,04627803	0,0223762	0,02604714							

E/C=0,6																		
temps			Référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3			
[min]	[heure]		[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]		
0	0	0	1970,76	0	2208,69	0	2214,72	0	2216,35	0	2222,57	0	2230,74	0	2226,86	0		
5	0,08333333	0,288675135	1974,96	0,42	2208,91	0,022	2215,05	0,033	2216,61	0,026	2223,05	0,048	2230,96	0,022	2227,25	0,039		
10	0,16666667	0,40824829	1975,45	0,469	2208,98	0,029	2215,12	0,04	2216,6	0,025	2223,2	0,063	2231,04	0,03	2227,3	0,044		
15	0,25	0,5	1975,81	0,505	2209,04	0,035	2215,1	0,038	2216,62	0,027	2223,23	0,066	2231,03	0,029	2227,28	0,042		
30	0,5	0,707106781	1976,54	0,578	2209,17	0,048	2215,21	0,049	2216,68	0,033	2223,34	0,077	2231,13	0,039	2227,4	0,054		
45	0,75	0,866025404	1977,05	0,629	2209,25	0,056	2215,25	0,053	2216,67	0,032	2223,42	0,085	2231,16	0,042	2227,38	0,052		
60	1	1	1977,28	0,652	2209,32	0,063	2215,3	0,058	2216,68	0,033	2223,48	0,091	2231,25	0,051	2227,48	0,062		
120	2	1,414213562	1978,28	0,752	2209,62	0,093	2215,6	0,088	2216,81	0,046	2223,76	0,119	2231,41	0,067	2227,63	0,077		
180	3	1,732050808	1978,95	0,819	2209,88	0,119	2215,75	0,103	2216,84	0,049	2223,93	0,136	2231,63	0,089	2227,8	0,094		
360	6	2,449489743	1980,46	0,97	2210,25	0,156	2216,28	0,156	2216,98	0,063	2224,5	0,193	2231,96	0,122	2228,17	0,131		
1440	24	4,898979486	1983,21	1,245	2211,55	0,286	2217,62	0,29	2217,47	0,112	2226,35	0,378	2233,72	0,298	2229,6	0,274		
1800	30	5,477225575	1983,67	1,291	2212,12	0,343	2217,74	0,302	2217,68	0,133	2226,4	0,383	2233,9	0,316	2229,92	0,306		
			w[kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )]		0,17739409		0,05793593		0,05711191		0,01907743		0,07059095		0,05920124		0,05118725	

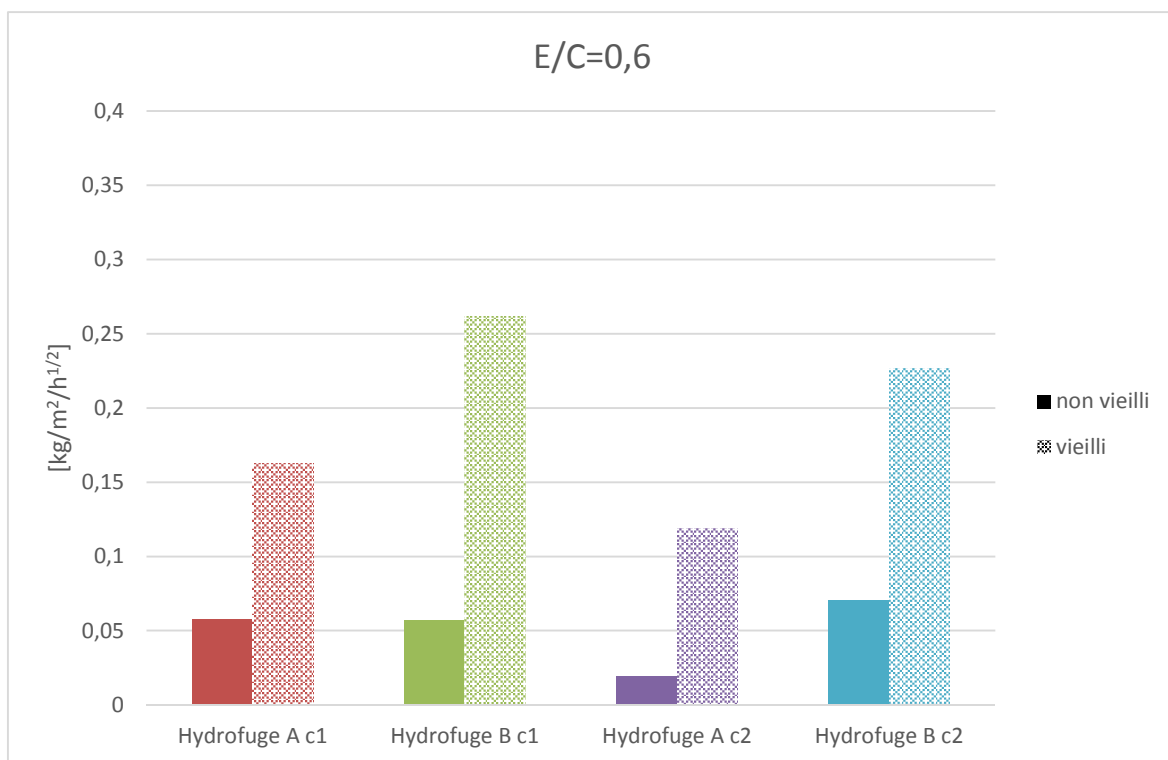
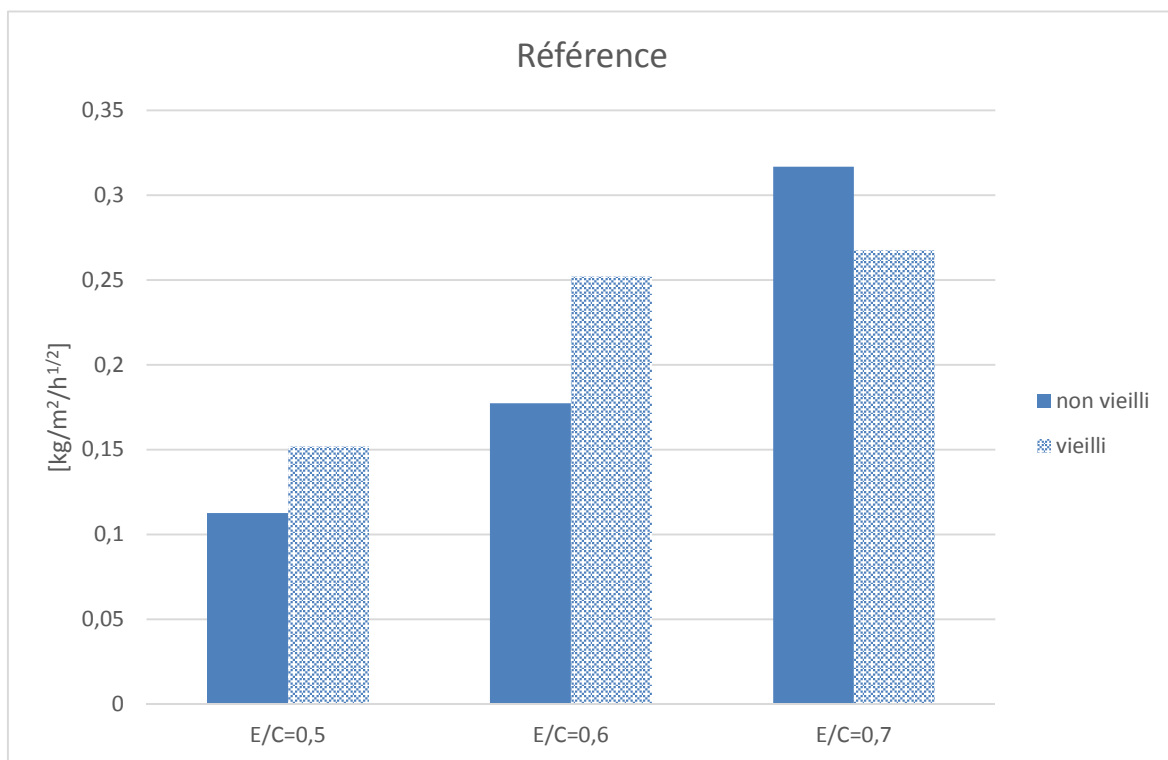
E/C=0,7																		
temps			témoin		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3			
[min]	[heure]		[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]		
0	0	0	2106,18	0	2104,39	0	2088,52	0	2134,06	0	2158,93	0	2150,42	0	2139,32	0		
5	0,08333333	0,288675135	2110,82	0,464	2104,63	0,024	2089,94333	0,14233333	2134,25	0,019	2159,33	0,04	2150,65	0,023	2139,82	0,05		
10	0,16666667	0,40824829	2111,7	0,552	2104,63	0,024	2090,39	0,187	2134,26	0,02	2159,3	0,037	2150,64	0,022	2139,88	0,056		
15	0,25	0,5	2112,2	0,602	2104,61	0,022	2090,81333	0,22933333	2134,25	0,019	2159,29	0,036	2150,66	0,024	2139,96	0,064		
30	0,5	0,707106781	2113,34	0,716	2104,69	0,03	2091,73667	0,32166667	2134,39	0,033	2159,38	0,045	2150,66	0,024	2140,08	0,076		
45	0,75	0,866025404	2114,15	0,797	2104,74	0,035	2092,47	0,395	2134,44	0,038	2159,4	0,047	2150,64	0,022	2140,18	0,086		
60	1	1	2114,79	0,861	2104,77	0,038	2093,10333	0,45833333	2134,44	0,038	2159,46	0,053	2150,67	0,025	2140,21	0,089		
120	2	1,414213562	2116,54	1,036	2104,89	0,05	2095,08667	0,65666667	2134,63	0,057	2159,68	0,075	2150,78	0,036	2140,61	0,129		
180	3	1,732050808	2117,75	1,157	2105,05	0,066	2096,49667	0,79766667	2134,74	0,068	2159,71	0,078	2150,86	0,044	2140,83	0,151		
360	6	2,449489743	2120,07	1,389	2105,46	0,107	2099,54333	1,10233333	2135,17	0,111	2160,2	0,127	2151,04	0,062	2141,58	0,226		
1440	24	4,898979486	2125,55	1,937	2107,42	0,303	2106,87	1,835	2136,67	0,261	2161,55	0,262	2151,81	0,139	2143,21	0,389		
1800	30	5,477225575	2126,12	1,994	2107,35	0,296	2107,78667	1,92666667	2136,97	0,291	2161,78	0,285	2151,91	0,149	2143,31	0,399		
			w[kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )]		0,31671497		0,06043438		0,37481381		0,05281865		0,04969525		0,02574737		0,07542584	

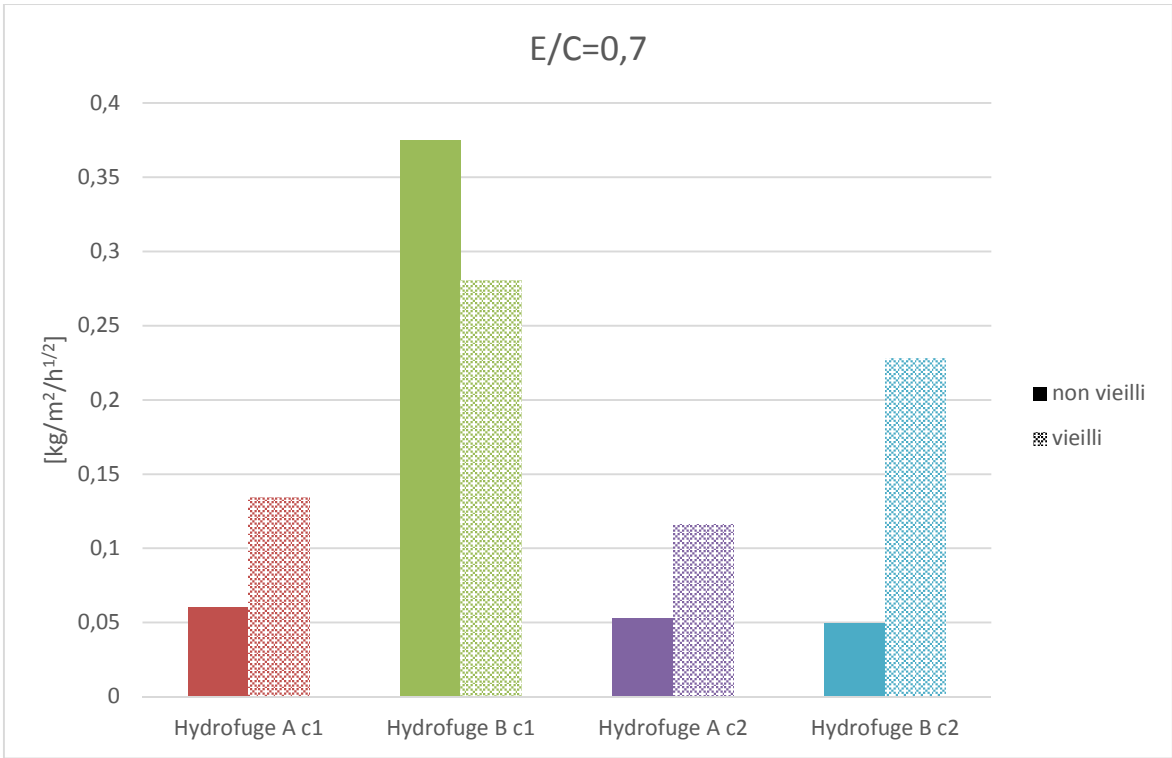




E/C=0,7												
temps			témoin		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2	
[min]	[heure]		[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]	[g]	Cat [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	0	293,29	0	283,97	0	293,77	0	294,92	0	294,01	0
5	0,08333333	0,28867513	294,07	0,39725074	284,08	0,05602254	294,18	0,20881129	295,02	0,05092958	294,17	0,08148733
10	0,16666667	0,40824829	294,16	0,44308736	284,08	0,05602254	294,19	0,21390424	295,02	0,05092958	294,17	0,08148733
15	0,25	0,5	294,21	0,46855215	284,09	0,06111155	294,23	0,23427608	295,03	0,05602254	294,2	0,09676621
30	0,5	0,70710678	294,38	0,55513244	284,15	0,09167325	294,41	0,32594932	295,06	0,07130141	294,35	0,17316058
45	0,75	0,8660254	294,43	0,58059723	284,17	0,10185916	294,48	0,36160003	295,07	0,07639437	294,32	0,1578817
60	1	1	294,51	0,6213409	284,22	0,12732395	294,52	0,38197186	295,09	0,08658029	294,37	0,18334649
120	2	1,41421356	294,79	0,76394373	284,28	0,1578817	294,75	0,4991099	295,18	0,13241691	294,54	0,26992678
180	3	1,73205081	294,97	0,85561697	284,33	0,18334649	294,9	0,57550427	295,23	0,1578817	294,65	0,32594932
360	6	2,44948974	295,31	1,02877755	284,53	0,28520566	295,31	0,78431556	295,37	0,22918312	295,01	0,50929582
1440	24	4,89897949	296,5	1,63483958	285,3	0,67736344	296,7	1,49223675	296,07	0,58569019	296,22	1,12554376
1800	30	5,47722558	296,72	1,74688466	285,54	0,79959443	297,02	1,65521141	296,27	0,68754935	296,49	1,26305363
			3,21		1,33		2,93		1,15		2,21	
			3,43		1,57		3,25		1,35		2,48	
		w[kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )]	0,26747681		0,13465779		0,28051527		0,11620465		0,2280925	

## Comparaison coefficients d'absorption sur échantillons non vieillis et vieillis





## Annexe 3 Angles de contact

### Échantillons non vieillis

E/C=0,5 non vieilli													
Référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
90,1	90,1	66,4	66,4	84,2	84,2	65,3	65,3	79,5	79,5	67,9	67,9	55,1	55,1
90,9	90,9	53	53	83,9	83,9	97,3	97,3	102,1	102,1	126,4	126,4	60,4	60,4
97,8	97,8	63,3	63,3	83,1	83,1	83	83	97,5	97,5	81,2	81,2	62,9	62,9
97,9	97,9	79,2	79,2	73,5	73,5	60,6	60,6	111,9	111,9	88,5	88,5	36,1	36,1
93,4	93,4	63,3	63,3	77,2	77,2	132,9	132,9	91,4	91,4	62,2	62,2	59,5	59,5
3,31143473	94,02	8,40680677	65,04	4,28551047	80,38	26,0514414	87,82	10,8122893	96,48	22,5947428	85,24	9,68338784	54,8
E/C=0,6 non vieilli													
Référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
103,4	103,4	111,7	111,7	107,4	107,4	89,7	89,7	129,4	129,4	132,4	132,4	105,3	105,3
89,3	89,3	118,8	118,8	105,7	105,7	101,3	101,3	119,9	119,9	115,6	115,6	108,4	108,4
79,3	79,3	121,8	121,8	97,6	97,6	94,9	94,9	122,8	122,8	132,3	132,3	100,4	100,4
88,1	88,1	119,8	119,8	103,3	103,3	102,5	102,5	127,4	127,4	109,9	109,9	93	93
82,7	82,7	77,5	77,5	104,9	104,9	112,4	112,4	126,7	126,7	111,2	111,2	96,5	96,5
8,25920093	88,56	16,563985	109,92	3,36059519	103,78	7,66383716	100,16	3,42263057	125,24	10,0346201	120,28	5,61191589	100,72
E/C=0,7 non vieilli													
Référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2		Hydrofuge A c3		Hydrofuge B c3	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
114,9	114,9	89,8	89,8	127,7	127,7	102,6	102,6	120,3	120,3	101	101	111,3	111,3
104,7	104,7	96	96	125,8	125,8	115,5	115,5	112,1	112,1	103,4	103,4	94,1	94,1
89,7	89,7	92,4	92,4	119,3	119,3	102,1	102,1	116,2	116,2	102,5	102,5	95,3	95,3
114,6	114,6	83,7	83,7	109,7	109,7	120,1	120,1	109,9	109,9	97	97	108,1	108,1
96,8	96,8	98,8	98,8	108,1	108,1	127,9	127,9	98,1	98,1	113,8	113,8	97,3	97,3
9,87817797	104,14	5,21597546	92,14	8,04298452	118,12	10,0358557	113,64	7,5079691	111,32	5,57838686	103,54	7,0717466	101,22

E/C=0,5 vieilli											
Référence		référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
117,6	117,6	85,7	85,7	125,9	125,9	115,5	115,5	118,1	118,1	119,7	119,7
121	121	86,3	86,3	123,6	123,6	112,2	112,2	106,2	106,2	110,6	110,6
122,2	122,2	64,9	64,9	124,5	124,5	119,2	119,2	122,7	122,7	112,7	112,7
117,1	117,1	53,8	53,8	127,8	127,8	128,6	128,6	114,7	114,7	108,8	108,8
103,8	103,8	58,4	58,4	120,1	120,1	113,6	113,6	128,2	128,2	108,9	108,9
6,56463251	116,34	13,6749991	69,82	2,56702162	124,38	5,8802721	117,82	7,43327653	117,98	4,03712769	112,14

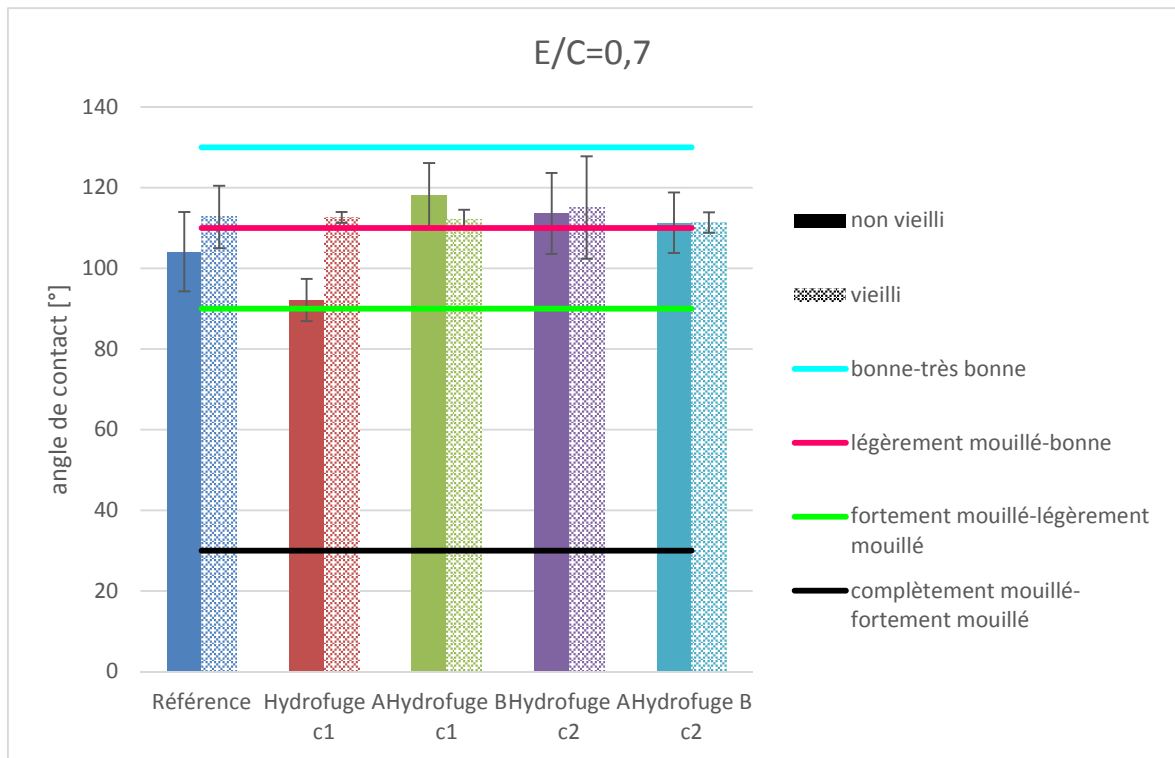
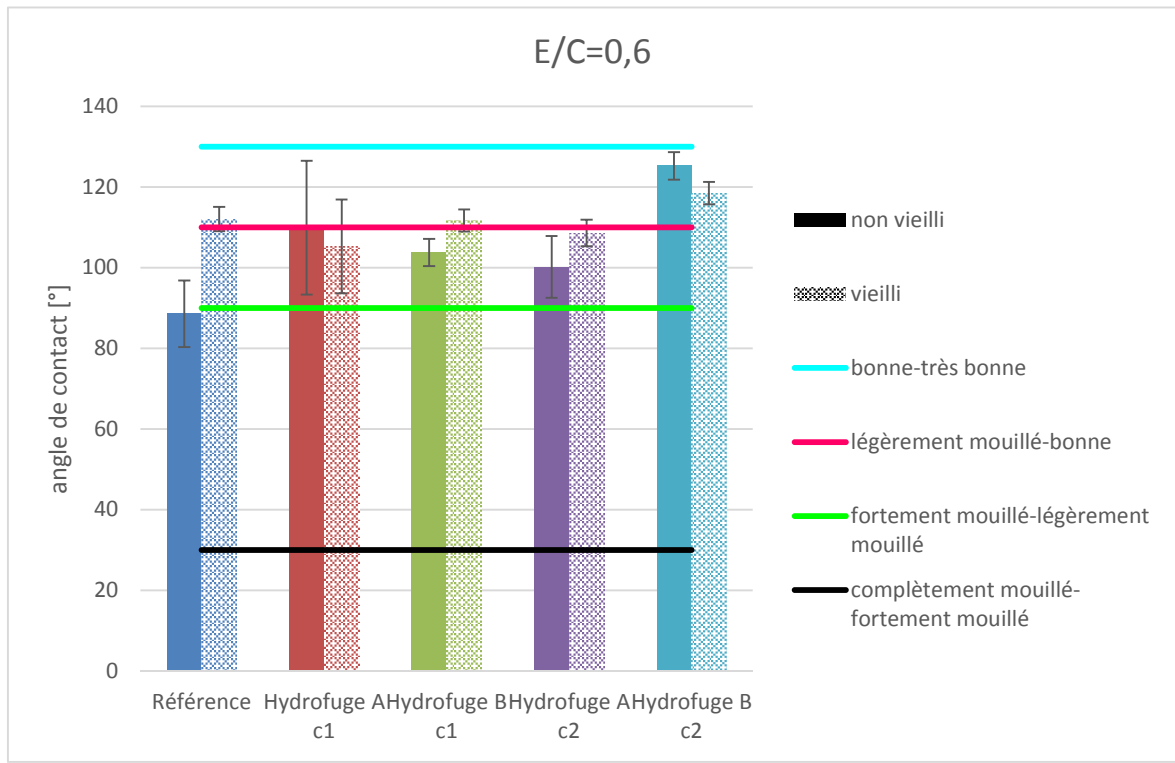
  

E/C=0,6 vieilli											
référence		référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
115,6	115,6	72,2	72,2	82,3	82,3	106,5	106,5	112,1	112,1	121,2	121,2
113,1	113,1	57,9	57,9	111,6	111,6	111,7	111,7	109,9	109,9	119,4	119,4
111	111	57	57	107,6	107,6	112,7	112,7	107,7	107,7	116,6	116,6
106,8	106,8	65,2	65,2	113,2	113,2	113,1	113,1	110,6	110,6	114,1	114,1
113,8	113,8	46,5	46,5	111,6	111,6	114,4	114,4	102,7	102,7	121,2	121,2
3,0143656	112,06	8,61686718	59,76	11,6281727	105,26	2,73086067	111,68	3,27291919	108,6	2,76983754	118,5

E/C=0,7 vieilli											
référence		référence		Hydrofuge A c1		Hydrofuge B c1		Hydrofuge A c2		Hydrofuge B c2	
Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
101,5	101,5	50	50	112,3	112,3	108,3	108,3	118,4	118,4	107,4	107,4
118,4	118,4	61,7	61,7	111,3	111,3	114,6	114,6	90,1	90,1	111,3	111,3
124	124	54	54	112,9	112,9	114,6	114,6	125,1	125,1	115,1	115,1
109,9	109,9	70,5	70,5	115,1	115,1	111,5	111,5	122,2	122,2	112,7	112,7
110	110	76,2	76,2	111,5	111,5	112,2	112,2	119,8	119,8	110,3	110,3
7,75541101	112,76	9,80640607	62,48	1,36586969	112,62	2,3328952	112,24	12,7152507	115,12	2,55311574	111,36

## Comparaison des angles de contacts pour échantillons non vieillis et vieillis



## Annexe 4 Diffusion en régime stationnaire

Il est important à noter que, au début de ce travail de fin d'études, la décision a été prise d'utiliser de nouvelles cellules. Cependant, à cause d'une rupture de stock, les anciennes cellules ont dû être récupérées ce qui a fortement reculé le lancement de cet essai. En effet, celles-ci ont dû être découpées et certaines ont même dû être recollées, c'est pourquoi les premières cellules n'ont été lancées que début avril et les dernière fin avril.

### Composition d'une cellule de diffusion stationnaire

- Matériels utilisés

Tube Plexiglas « *Plastiques OBRA* »

Diamètre intérieur :  $\pm 55 \text{ mm}$

Longueur : variable puisque cellules découpées d'anciennes cellules

Colle Plexiglas-Plexiglas

Colle Plexiglas-Échantillon

Araldite :

Durcisseur : *HY 850* (CIBA-GEIGY)

Araldite : *PY 340* (CIBA-GEIGY)

- Assemblage
  1. Collage d'un tube en Plexiglas sur une plaque carrée également en Plexiglas
  2. (Le cas échant, découpage d'anciennes cellules, à la scie diamantée pour béton)
  3. Collage d'un des deux compartiments sur la tranche de mortier
  4. Collage de l'autre compartiment sur l'autre face de l'échantillon. Veiller à ce que les trous soient orientés du même côté
  5. Recouvrir la partie, de la tranche de mortier, dépassant le tube de résine époxy
  6. Resaturer l'échantillon en  $\text{Ca(OH)}_2$  en remplissant seulement un compartiment pendant au moins 1jour
  7. Remplir les deux compartiments amont et aval avec la solution saturée en  $\text{Ca(OH)}_2$  et la solution en  $\text{NaCl}$  respectivement

### Titration potentiométrique

D'abord, un prélèvement de  $10 \text{ ml}$  de solution  $\text{Ca(OH)}_2$  dans la cellule aval (contenant les éventuels ions chlore) est effectué et est versé dans un berlin de  $250 \text{ ml}$  dans lequel il est porté à  $100 \text{ ml}$  en ajoutant de l'eau distillée. De plus, cette solution doit être acidifiée (pH compris entre 2,7 et 2,8) au moyen de 5 à 6 gouttes d'une solution d'acide nitrique  $\text{NO}_3$  (1 + 2). La diminution du pH est contrôlée à l'aide d'une électrode (16).

Ensuite, le titrage avec du nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  de concentration  $0,01 \text{ N}$  peut débuter. Pour ce faire, une électrode d'argent est plongée dans la solution mesurant le voltage qui augmente en fonction de la quantité  $\text{AgNO}_3$  ajoutée, ce qui est représenté graphiquement par une courbe.

Si le prélèvement contient des chlorures, une réaction entre les ions  $Ag^+$  et  $Cl^-$  se produit formant du chlorure d'argent  $AgCl$  (précipité blanchâtre). Cette réaction se traduit par un saut de potentiel sur la courbe jusqu'à atteindre le point d'équivalence.

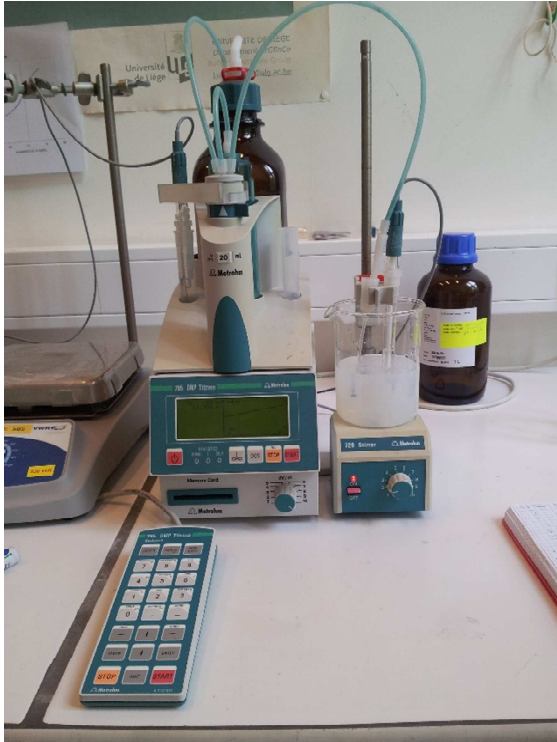


Photo 16 : Titracteur automatique

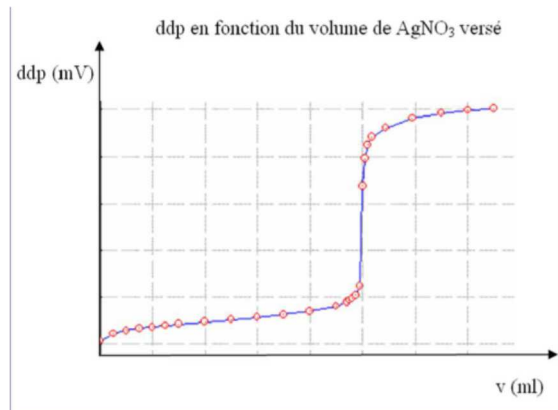


Figure 48 : Courbe de titrage potentiométrique (10)

Enfin, la concentration en chlorures dans le prélèvement peut être déterminée à l'aide du point d'équivalence. En effet, à ce point la quantité de  $Ag^+$  est égale à la concentration en  $Cl^-$ . Dès lors, en sachant que la concentration en  $AgNO_3$  vaut  $0,01 N$  et que la masse d'une mole de chlore vaut  $35,5$  gen s'obtient par l'équation suivante (16):

$$[Cl^-] = \frac{x \cdot 0,355}{10} \cdot 1000 [mg/l]$$

Où  $x$  est la quantité de  $AgNO_3$  ajoutée à l'équivalence

## Béton cellulaire

t [jours]	Prélèvement [mg/l]						
	Référence	Hydrofuge A c2 1	Hydrofuge A c2 2	Hydrofuge A c2 moy	Hydrofuge A	Hydrofuge B c2	Hydrofuge B
0	0	0	0	0	0	0	0
7	1171,71	5847,05	3071,6	4459,325	18,99	168,52	348,22
14	2591,15	8376,95	14242,4	11309,675	19,1	810,47	1194,75
21	3847,85				24,71	1758,31	2121,65
28	5062,65				27,94	2362,15	

## Mortier

- Cellules de référence

t [jours]	Prélèvement [mg/l]		
	E/C=0,5	E/C=0,6	E/C=0,7
0	0	0	0
7	0	0	0
14	6,78	10,345	1211
21	12,57	23	1215,35
28	14,63	23,15	1209,4967
35	22,76	25,26	1193

- Série 1

t [jours]	Prélèvement [mg/l]					
	E/C=0,5		E/C=0,6		E/C=0,7	
	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B
0						
7	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0

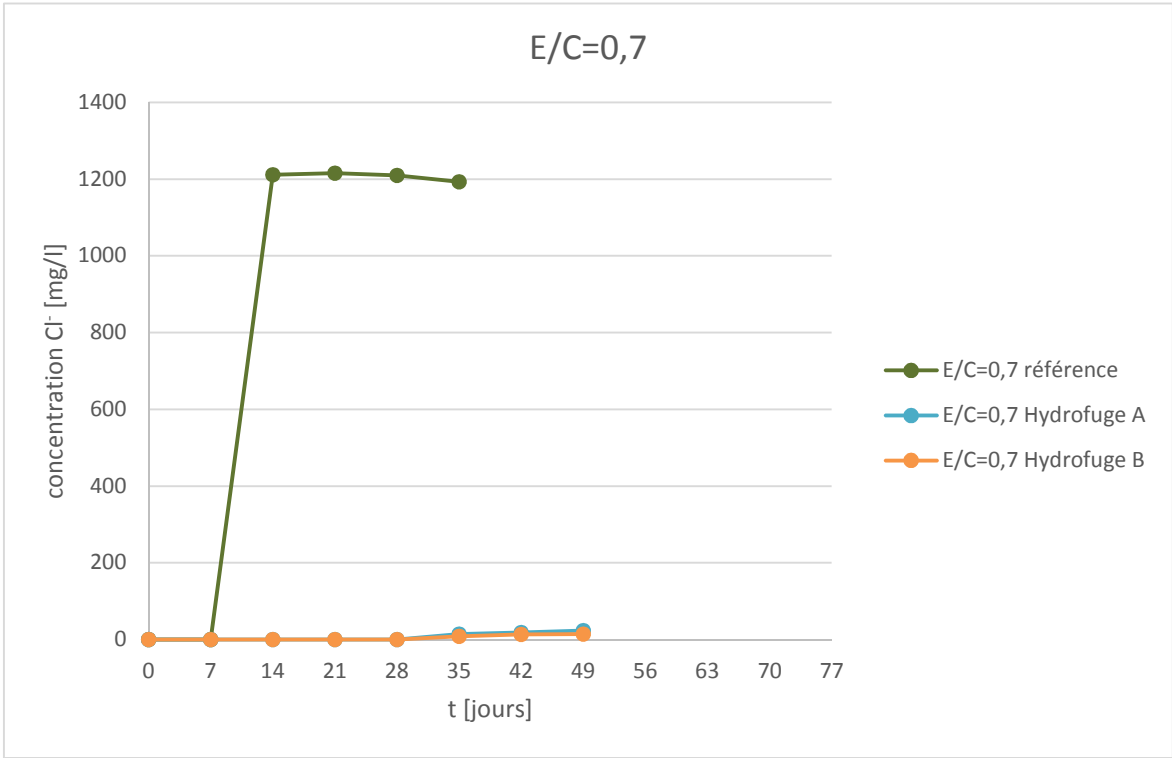
35	98,23	19,95	7,7	11,22	16,83	11,08
42	100,46	22,61	8,38	14,87	19,35	16,05
49	99,26	23,62	16,295	24,39	23,35	18,57

- Série 2

t [jours]	Prélèvement [mg/l]					
	E/C=0,5		E/C=0,6		E/C=0,7	
	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B
0						
7	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
35	4,4	5,29	5,47	4,26	11,68	5,93
42	6,43	6,67	6,6	4,4	16,76	10,69
49	10,9	7,03	15,66	15,41	22,08	10,72

- Série moyenne

t [jours]	Prélèvement [mg/l]					
	E/C=0,5		E/C=0,6		E/C=0,7	
	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B
0						
7	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
35	4,4	12,62	6,585	7,74	14,255	8,505
42	6,43	14,64	7,49	9,635	18,055	13,37
49	10,9	15,32	19,9775	19,9	23,715	14,645



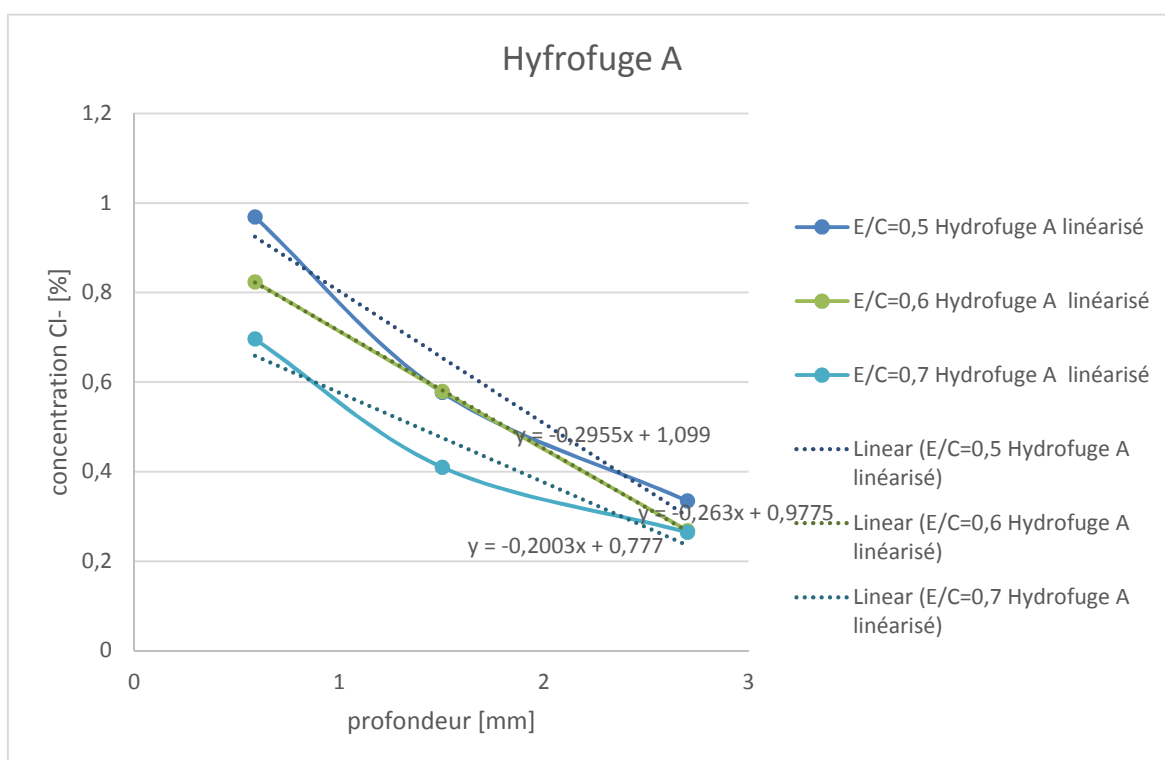
## Annexe 5 Diffusion en régime transitoire

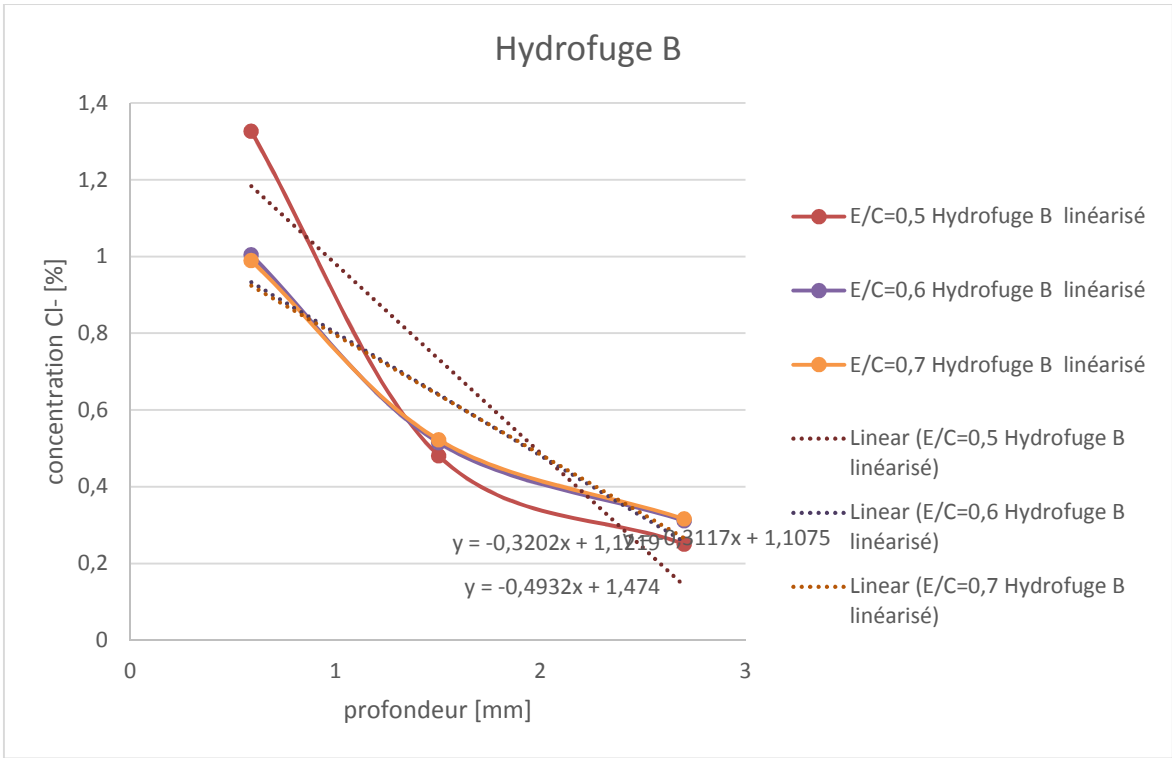
### Prélèvements

E/C=0,5 Hydrofuge A		E/C=0,5 Hydrofuge B		E/C=0,6 Hydrofuge A		E/C=0,6 Hydrofuge B		E/C=0,7 Hydrofuge A		E/C=0,7 Hydrofuge B	
x [mm]	C [%]	x [mm]	C [%]	x [mm]	C [%]	x [mm]	C [%]	x [mm]	C [%]	x [mm]	C [%]
0,43811111	0,956	0,49588889	1,803	0,65588889	0,71	0,54588889	1,009	0,90366667	0,517	0,49477778	0,997
1,38033333	0,35	1,55588889	0,275	1,27811111	0,367	1,58033333	0,265	1,88033333	0,2	1,34588889	0,29
2,52922222	0,129	2,61922222	0,107	2,72366667	0,103	2,72588889	0,097	2,78477778	0,102	2,82144444	0,117
3,57144444	0,067	3,51477778	0,048	3,48588889	0,064	3,03811111	0,057	3,58811111	0,052	3,47033333	0,056
4,43922222	0,059	4,57366667	0,036	4,52144444	0,064	4,56588889	0,049	4,61144444	0,054	4,48255556	0,056
5,28588889	0,046	5,53033333	0,048	5,40255556	0,055	5,34922222	0,059	5,49366667	0,063	5,387	0,049
		6,49033333	0,053	6,45922222	0,054	6,31922222	0,048	6,46922222	0,041	6,40811111	0,036
Ci	0,017	Ci	0,044	Ci	0,031	Ci	0	Ci	0,032	Ci	0,017

### Régression linéaire

Profils de concentration en chlorures totaux linéarisés





## Annexe 6 Conduction sous champs électrique

3,937007874	Courant [mA]								
	E/C=0,5		E/C=0,6		E/C=0,7		Référence		
t [min]	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B	Hydrofuge A	Hydrofuge B	E/C=0,5	E/C=0,6	E/C=0,7
0	13,32	12,4	10,5	9,78	13,54	10,9	31,1	38,36	40,94
30	14,76	14,86	12,88	14,76	16,86	17,26	35,04	42,32	46,4
60	16,2	16,94	14,84	16,74	18,42	19,28	35,68	42,94	48,06
90	17,02	18,24	16,72	18,42	19,84	21,3	35,68	42,96	48,18
120	17,62	18,96	18,56	20	21,1	22,84	35,76	42,92	48,24
150	18	20	19,58	21,4	22,12	24,12	35,72	43,36	48,36
180	18,36	20,52	20,2	22,68	23,02	25,34	36,04	43,58	49
210	18,6	20,9	21,38	23,76	23,78	26,36	36,34	43,88	49,56
240	18,8	21,76	21,94	24,66	24,48	27,52	36,6	44,3	50,1
270	18,98	21,96	22,36	25,52	25,08	28,26	36,8	44,52	50,42
300	19,1	22,2	22,4	26,2	25,6	28,92	36,9	44,8	50,72
330	19,22	22,36	22,32	26,82	26,02	29,58	37,1	44,98	51,1
360	19,3	22,42	22,18	27,4	26,52	29,86	37,24	45,2	51,3
Qx [coulomb]	383,346	424,998	413,136	467,19	479,43	524,088	777,294	940,212	1055,268
Qs [coulomb]	422,5333251	468,4431769	455,3685907	514,9482299	528,4394569	577,6625953	856,752434	1036,32463	1163,14217