

Durabilité des hydrofuges de surface pour la protection des ouvrages historiques en béton armé

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des Constructions par Gérard Olivier

Promoteur : Luc Courard

Jury : Jean-Marc Franssen
Pierre Paquet
Jean-Marie Bleus
Emmanuel Cailleux

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Année Académique 2012-2013

Remerciements

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide de nombreuses personnes lors de sa réalisation. Ainsi, cette section montre ma reconnaissance envers ces aides externes.

Je tiens donc à remercier personnellement :

- M. le Professeur Luc Courard, promoteur de ce travail, pour sa présence, son suivi, son aide dans la recherche bibliographique et pour ses réponses aux questions qui pouvaient être nombreuses par moment ;
- Toute l'équipe du laboratoire de matériaux de construction de l'ULg (LMC) et plus particulièrement M. Frédéric Michel, M. Amaury Daras et Mme Fabienne Libioulle pour leur disponibilité, pour leurs aides et conseils lors des nombreuses manipulations et pour leur patience sur la propreté, parfois relative, du plan de travail qui m'était réservé ;
- Le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction), représenté par M. Emmanuel Cailleux, pour la mise à disposition de matériaux et pour avoir fourni une base de travail à ce TFE, et représenté également par Mme Laure Deviaene pour son aide quant à la recherche bibliographique au sein de la bibliothèque du CSTC ;
- À l'Université de Cergy-Pontoise et plus particulièrement à Mme Annelise Couture et à Mlle Myriam Handy pour leur aide lors de la réalisation de ce travail dans le cadre d'un partenariat entre nos deux universités ;
- Les membres de mon jury pour leur présence en cas de besoin ;
- Le service de mesures électriques du département d'EEI-Montefiore en la personne de M. Philippe Vanderbemden pour le prêt, et la réparation, de matériel électrique pour la réalisation d'essais ;
- L'AEES (dont je suis président) pour m'avoir offert un challenge en remplissant mon emploi du temps tout au long de cette année mais également pour une aide logistique qui pouvait s'avérer nécessaire ;
- Mlle Morgane Lambrichts pour m'avoir accompagné, grâce à un réseau social connu, lors des nombreuses nuits de travail, pour les apéritifs "relaxation" tout au long de cette période et pour la correction de ce travail ;
- Mlle Veronika Simikova pour sa patience, sa compréhension, son aide et son soutien durant l'entièreté de ce projet ;
- Mon frère, M. Pascal Gérard, pour le prêt de son ordinateur après la mort non programmée du mien due à une attaque aqueuse (il n'était sûrement pas protégé par hydrofugation ...) ;
- Et finalement, mes parents, M. Alain Gérard et Mme Annie Everbecq, ainsi que Mme Marie-Paule Henquet pour avoir effectué une relecture et une correction complète de ce TFE mais également pour leur soutien et leur patience lors de cette épreuve.

Je remercie également toutes les personnes qui m'auraient soutenu et aidé d'une manière ou d'une autre et que j'aurais pu oublier de citer.

Merci à toutes et à tous !

Énoncé

Le but de ce travail de fin d'études est d'entreprendre une étude expérimentale concernant la durabilité d'hydrofuges de surface sur des ouvrages d'art en béton armé.

Avant toutes démarches, une recherche bibliographique est entreprise à propos des connaissances actuelles sur la rénovation du patrimoine, sur les différents processus de dégradations concernant le béton armé et sur les protections existantes dont, principalement, les hydrofuges. Pour approfondir la compréhension du sujet, un supplément de recherche est effectué sur les performances des différents hydrofuges existants et sur les recommandations d'emploi connues à ce jour.

Ensuite, une présentation de la méthodologie employée pour cette étude est détaillée. Au sein de celle-ci, une explication est nécessaire pour introduire les différents vieillissements auxquels les hydrofuges ont été confrontés et les différents essais permettant de caractériser l'efficacité de ces produits. L'optique de la gestion de la recherche expérimentale a pris également une place importante dans ce travail. En effet, en plus d'un nombre important d'échantillons, une collaboration avec le CSTC et avec l'université de Cergy-Pontoise a permis à ce travail de s'ouvrir à une dimension plus universelle.

Le corps du travail concentre les résultats des différents essais. Ceux-ci permettent d'obtenir un jugement sur l'efficacité de trois produits différents grâce à une série d'essais initiaux n'ayant subi aucun vieillissement. Pour répondre au but de cette étude, une analyse sur les résultats d'échantillons vieillis est réalisée et permet de tirer un certain nombre de conclusions. Celles-ci portent premièrement sur les influences des vieillissements sur une potentielle dégradation globale des produits de traitement pour ensuite détailler cette étude pour chacun des trois produits individuellement. Deuxièmement, une brève comparaison de ces trois hydrofuges sera également réalisée en permanence durant les analyses.

Signatures :



Olivier GÉRARD

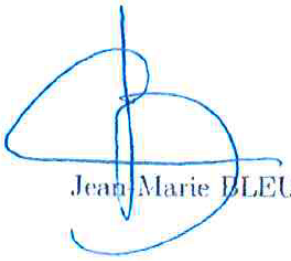
Luc COURARD



Jean-Marc FRANSSEN



Pierre PAQUET



Jean-Marie BLEUS



Emmanuel CAILLEUX

Résumé

Gérard Olivier
Année Académique 2012-2013
Mémoire réalisé dans le cadre de la $2^{ème}$ Master Ingénieur Civil des Constructions

---

Durabilité des hydrofuges de surface pour la protection des ouvrages historiques en béton armé

L'objectif de cette recherche est de réaliser une étude expérimentale sur la durabilité et l'efficacité du traitement de surface pour la protection du béton armé.

Pour bien entreprendre les essais et les caractérisations, une recherche bibliographique proposera l'état de l'art concernant ce sujet à l'heure actuelle. Cette première étape fournira également une présentation de la notion de patrimoine et de la problématique de sa protection.

Les trois hydrofuges séléctionnés sont un silane en phase aqueuse, un siloxane en phase solvant et un silicate de soude. Cinq vieillissements ont été entrepris sur ces traitements et huit essais ont permis la caractrérisation de la durabilité et de l'efficacité de ces divers produits.

Vieillissements	Essais
Chocs Thermiques	Pérméabilité à la vapeur d'eau
Carbonatation	Pérméabilité aux chlorures
Gel-Dégel	Capillarité
Cycles d'humidification	Colorimétrie
Exposition aux UV	Pénétration de l'hydrofuge
	Profondeur de carbonatation
	Imagerie par MEB

Ainsi, après l'ensemble du processus de l'expérimentation, les observations ont permis de définir le siloxane en phase solvant comme le produit proposant les meilleures durabilité et efficacité. Le deuxième produit est le silane qui propose globalement des résultats très légèrement inférieurs. Le dernier traitement est le silicate de soude qui est totalement déconseillé au vu des réactions négatives lors des vieillissements et des essais.

Abstract

Gérard Olivier
Academic year 2012-2013
Master Thesis executed during the second year of Master in Civil Engineering

---

Durability of waterproof surface treatments for the protection of historical reinforced concrete structures

---

The purpose of this research is the execution of an experimental study on the durability and the efficiency of some waterproof treatments used for the protection of reinforced concrete.

Before starting trials, a current knowledge on this subject is given. In fact, the degradation and protection of concrete are explained. A detailed description concerning the working and performances of coating and waterproof agents is exposed. Moreover, a brief overview of the building heritage is given.

The choice within a range of repellent products is performed in order to get results that will be compared. Silane diluted in water, siloxane diluted in solvent and sodium silicate were used for this research. Five ageing and eight tests have been executed in order to enable the characterisation of the durability and the performance of these products.

Ageing	Tests
Thermal shocks	Water vapour permeability
Carbonatation	Chloride ion penetration
Freeze-thaw cycling	Capillarity
Wet-dry cycling	Colorimetry
UV exposition	Waterproof agent penetration
	Carbonatation penetration
	MEB

After having carried out trials, observed the results and compared them, classification of the products according to their efficiency could be established. The siloxane in solvent phase has been evaluated as the one with the best durability and performance. The silane has shown almost the same properties as the siloxane. Finally, the silicate has provided the worst results and a rapid degradation in the presence of water. With this ascertainment, using this product is not recommended.

Table des matières

Remerciements **1**

Résumé **3**

Abstract **4**

Table des matières **5**

Liste des figures **7**

Liste des tableaux **9**

1 Introduction **10**

2 Définition du sujet **11**
2.1 Historique du sujet 11
2.2 Ouvrages historiques en béton 11
2.3 Protection du patrimoine 12

3 Etat de la connaissance **15**
3.1 Processus des dégradations du béton armé 15
3.1.1 Corrosion des armatures en acier 15
3.1.2 Dégradation du béton 16
3.1.3 Pénétration d'eau dans le béton 17
3.1.4 Dégradation combinée (Béton-armatures) 21
3.2 Réparations ou protections possibles 24
3.2.1 Réparations 24
3.2.2 Protections 25
3.3 Les hydrofuges 27
3.3.1 Historique 27
3.3.2 Effet des hydrofuges 28
3.3.3 Types d'hydrofuges 30
3.3.4 Familles et exemples d'hydrofuges 31
3.3.5 Durabilité 36

4 Méthodologie du travail **38**
4.1 Choix des hydrofuges 38
4.2 Choix des vieillissements et des essais 39
4.2.1 Vieillissements 39
4.2.2 Essais 39
4.3 Fabrication des échantillons 41
4.3.1 Tests sur béton frais 42
4.3.2 Tests sur béton durci 42
4.4 Classement des échantillons 43
4.5 Organisation de l'étude 44
4.5.1 Calendrier 44
4.5.2 Application des hydrofuges 45

4.5.3 Explication des différents vieillissements 45
4.5.4 Explication des différents essais 49
4.6 Remarques 55

5 Résultats **56**
5.1 Déroulement des vieillissements 56
5.2 Résultats des essais initiaux 58
5.2.1 Profondeur de pénétration de l'agent hydrofuge 58
5.2.2 Perméabilité à la vapeur d'eau 59
5.2.3 Perméabilité aux chlorures 61
5.2.4 Capillarité 63
5.2.5 Observation au MEB 65
5.3 Résultats des essais finaux 67
5.3.1 Profondeur de pénétration de l'agent hydrofuge 67
5.3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau 68
5.3.3 Perméabilité aux chlorures 69
5.3.4 Capillarité 71
5.3.5 Observation au MEB 72
5.3.6 Profondeur de carbonatation 76
5.3.7 Test de colorimétrie (Lab) 77
5.4 Analyse par hydrofuges 81
5.4.1 Perméabilité à la vapeur d'eau 81
5.4.2 Perméabilité aux chlorures 82
5.4.3 Capillarité 83

6 Conclusion **85**

Bibliographie **87**

Annexes **91**
Classement des échantillons utilisés 91
Fiche Technique "Antipluviol S" 91
Fiche Technique "Masterseal 303" 95
Variation de masse durant les cycles d'humidification 98
Résultats de l'essai de vapeur d'eau 99
Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures 101
Résultats de l'essai de capillarité 102
Mesures lors du test LAB 105

Liste des figures

1 Relation entre la vitesse de corrosion et l'humidité relative 22
2 Diagramme des diverses catégories de produits de protection existants . 26
3 Action des traitements de surface 27
4 Effet d'un produit hydrofuge sur la capillarité et Effet perlant 29
5 Angles de contact à la surface d'un revêtement 29
6 Schématisation des réactions des hydrofuges de la familles des silicones 32
7 Schématisation des réactions du silane (hydrolyse et condensation) . . . 34
8 Modèle CIE LAB 40
9 Recouvrement par de l'époxy des échantillons pour le gel-dégel 46
10 Installation des dalles lors des chocs thermiques 47
11 Coupelle pour l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau 50
12 Recouvrement des échantillons 50
13 allure théorique de l'augmentation de courant lors de l'essai de diffusion aux chlorures 51
14 Schématisation du montage pour la mesure de la diffusion des chlorures 51
15 Métallisation des échantillons 54
16 Métallisation des échantillons 55
17 Variation de masse durant les cycles d'humidification 56
18 Réaction du silicate lors des cycles d'humidification 57
19 Dégradation des échantillons traités au silicate lors du gel-dégel 57
20 Disparition du silicate lors de l'exposition aux UV 58
21 Poids des échantillons durant l'entièreté de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau 59
22 Intensité du courant à travers les échantillons durant l'entièreté de l'essai de diffusion des chlorures 62
23 Variation de masse lors des essais initiaux de perméabilité à l'eau liquide 64
24 Présence de Si à la surface des échantillons initiaux 65
25 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon initial de référence 66
26 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon . . 67
27 Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau . 69
28 Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures . . . 70
29 Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité à l'eau liquide . . . 72
30 Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli 72
31 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli 73
32 Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli 74
33 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli 74
34 Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli 75
35 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli 75
36 Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli 76
37 Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli 76
38 Photo de la profondeur de carbonatation 77
39 Luminance (L*) en fonction de la teinte (h*) 79
40 Résultats de l'essai L*a*b* 80
41 Résultats de l'essai L*a*b* pour le Silicate 80
42 Résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau 81

43 Résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau pour le Silicate . 82
44 Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures 82
45 Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures pour le Silicate 83
46 Résultats de l'essai de capillarité 84
47 Résultats de l'essai de capillarité pour le Silicate 84
48 Variation de masse lors des essais finaux de Perméabilité à l'eau liquide 103
49 Variation de masse lors des essais finaux de Perméabilité à l'eau liquide 103
50 Variation de masse lors des essais finaux de Perméabilité à l'eau liquide 104

Liste des tableaux

1 Relations entre les vieillissements et les essais lors de cette recherche . . 40
2 Dates des différentes étapes de fabrication 41
3 Caractéristiques concernant le béton frais 42
4 Caractéristiques concernant le béton durci 43
5 Dates des cycles Gel-Dégel 46
6 Échelle de perméabilité en fonction de la charge 52
7 Pénétration de l'hydrofuge au sein des échantillons initiaux 59
8 Différence de pression lors de l'essai en fonction de l'HR interne 60
9 Classification de la transmission à la vapeur d'eau 61
10 Caractéristiques relatives à la vapeur d'eau des différentes éprouvettes initiales 61
11 Charges et classification suite aux essais initiaux de perméabilité aux chlorures 63
12 Classification de la "perméabilité à l'eau liquide" 63
13 Perméabilité à l'eau liquide pour les échantillons initiaux 64
14 Pénétration de l'hydrofuge au sein des échantillons vieillis 67
15 Caractéristiques relatives à la vapeur d'eau des différentes éprouvettes vieillies 68
16 Charges et classification suite aux essais finaux de perméabilité aux chlorures 70
17 Perméabilité à l'eau liquide pour les échantillons vieillis 71
18 Profondeur de carbonatation 77
19 Comparaison des mesures LAB 79
20 Classement des échantillons utilisés lors de cette recherche 91
21 Représentations des échantillons dans les graphiques 91
22 Variation de masse [kg] durant les cycles d'humidification 98
23 Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau [grammes] - Partie 1 99
24 Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau [grammes] - Partie 2 100
25 Mesures des courants traversant les échantillons lors de l'essai de perméabilité aux chlorures [mA] 101
26 Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de Perméabilité à l'eau liquide [grammes] 102
27 Mesures LAB 105

1 Introduction

Au cours des siècles, de nombreuses constructions ont été réalisées. Celles-ci, pour la plupart, ont été dégradées, transformées voire démolies. Or, ces différents ouvrages exposent ouvertement l'histoire sociale, technologique et économique des diverses époques passées.

La disparition de ces différents ouvrages peut être une perte pour une population plus ou moins large. Imaginez-vous la perte de bâtiment d'un centre historique d'une ville européenne ?

La question sur la sauvegarde d'un tel patrimoine a dû attendre le 19ème siècle pour véritablement prendre de l'ampleur. Une réelle modification de la pensée a évolué vers une conservation de ce type d'ouvrage. Actuellement, ce genre de raisonnement s'applique à un large panel de structures dont celles réalisées en béton armé.

Ajoutant à ces diverses réflexions le point de vue économique, procéder à une protection durable et efficace s'avère beaucoup plus intéressant que réaliser une rénovation en profondeur qui se révèle souvent coûteuse.

Ainsi, avec l'aide de la chimie et de procédés industriels, de nombreux produits offrant une augmentation de la durabilité des divers matériaux de construction ont été créés. Les plus récents de ces traitements sont communément appelés "hydrofuges".

Au sein de ce travail, trois de ces nombreux produits sont étudiés sur leur propre durabilité à diverses attaques couramment rencontrées dans l'environnement quotidien. Cette analyse offrira une vision élargie dans les études qui existent sur ce type de traitement.

Pour réaliser cette recherche et la différencier de celles existantes, un panel de vieillissements et de nombreux essais permet de caractériser la durabilité et l'efficacité des différents hydrofuges sélectionnés. Ainsi, la capillarité et les perméabilités à la vapeur d'eau et aux chlorures pourront principalement être déterminées.

De nombreuses autres mesures sont réalisées pour permettre une explication plus ciblée et plus approfondies des résultats. En effet, la vision de ce TFE est d'offrir des premières conclusions qui peuvent servir de bases de recherches sur les dégradations possibles de ces divers traitements.

Pour renforcer cette vision de globalité recherchée lors de ce travail, le choix des hydrofuges s'est effectué sur base des deux grandes influences existantes sur ce type de traitement. Ainsi, dans l'ensemble des produits, seuls le silane, le siloxane et le silicate de soude sont testés. En effet, les deux premiers sont, actuellement, les meilleurs traitements, tandis que le troisième l'était auparavant. La deuxième influence est la méthode de dissolution de ces agents actifs qui peut être réalisée soit en phase aqueuse ou soit en phase solvant.

Finalement, ce TFE veut offrir des résultats prouvant l'intérêt de tels traitements dans la restauration. Ainsi, de nombreuses améliorations pourront voir le jour et ainsi proposer de nouveaux produits améliorés tout en restant économique et écologique. Possédant très peu de règles sur le sujet de la rénovation du patrimoine, cette perspective faciliterait la protection plus généralisée d'ouvrage historique par les architectes et les professionnels.

2 Définition du sujet

2.1 Historique du sujet

Aux origines de ce travail, l'étude se concentrait sur la durabilité des bétons soumis à des projections d'eau salée venant des voies routières en fonction de la présence d'hydrofuge. Ainsi, les ouvrages les plus concernés étaient principalement les socles de statues, les abords de monuments et les ornementations proches des routes.

Ayant eu la possibilité de nous lier à une recherche du CSTC et à une université française (Cergy-Pontoise), un élargissement du sujet a pu avoir lieu. En effet, l'ajout de vieillissements supplémentaires a permis une étude plus approfondie. Ainsi, de nombreux résultats supplémentaires sur l'influence et la durabilité des hydrofuges ont pu être obtenus.

Comme précisé, une recherche du CSTC se rapproche fortement de ce travail. Celle-ci étudie la capacité des mêmes hydrofuges de surface à diminuer la carbonatation du béton et la corrosion des armatures au sein de celui-ci. Au moment de l'écriture de ces lignes, vu que la carbonatation n'avait pas encore atteint les armatures, aucun résultat ne peut être retiré des différents essais effectués . Néanmoins, une brève description de cette recherche apparaitra dans le chapitre sur la méthodologie utilisée pour rappeler le lien entre celle-ci et ce travail.

Finalement, après de nombreuses mises au point et en fonction de l'avancée des travaux en laboratoire, cinq vieillissements pour trois hydrofuges de surface ont été étudiés. De plus, pour obtenir les résultats, sept essais ont été utilisés avant et après vieillissement des échantillons. Bien entendu, la caractérisation des hydrofuges grâce à l'ensemble des essais n'est pas pertinent pour tous les vieillissements. Un choix a été entrepris sur les relations qui lient ces deux parties de l'expérimentation.

2.2 Ouvrages historiques en béton

Le terme "ouvrage historique" peut avoir plusieurs significations. En France, mentionné sous le terme de "monument historique" l'article L.621.-1 du code du patrimoine en donne la définition suivante :

> "Les immeubles dont la conservation présente, au point de vue de l'histoire ou de l'art, un intérêt public sont classés comme monuments historiques en totalité ou en partie [...]." [3]

Au niveau de la Belgique, Ce terme peut être rattaché à un "Bien Classé" du "Patrimoine" tel que défini 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 relient, suffisamment cohérent pour faire l'objet d'une délimitation topographique et remarquable par son homogénéité ou par son intégration dans le paysage ;" [2]

Pour simplifier le domaine de recherche dans le cadre de ce travail, un "ouvrage historique" est considéré comme une structure âgée (de quelques années à plusieurs centaines d'années) et ne pouvant, pour diverses raisons, être modifiée, altérée ou détruite. Toutes sortes de réalisations de l'Homme peuvent ainsi se retrouver dans cette définition et peuvent être concernées par la suite de ce travail.

Si nous nous limitions à cette définition, le champ de recherche serait beaucoup trop vaste pour un travail de ce type. En effet, les ouvrages d'art peuvent être constitués de multitudes de matériaux différents allant de la pierre au bois en passant par le béton (armé ou non) et chacun de ceux-ci possède son propre mode de dégradation ou d'altération. Ainsi, pour continuer à définir le domaine de recherche de ce travail et pour se lier à des recherches déjà en cours au CSTC, je me concentre uniquement sur les ouvrages en béton armé. Malgré tout, de nombreuses références sont utilisées lors de mes recherches même si elles parlent principalement d'ouvrages en d'autres matériaux plus courants à l'époque. Cette particularité est permise en ce qui concerne les traitements pouvant être similaires quelle que soit la technique de construction utilisée.

2.3 Protection du patrimoine [19][21][23][37][40]

A partir du $18^{ème}$ siècle, l'apparition du concept de patrimoine immobilier s'effectue après une évolution de la pensée globale. Cette évolution pousse également l'émergence des notions d'esthétique et de l'histoire de l'art. Ainsi, avec les démolitions et dégradations subies lors des diverses révolutions, un mouvement de défense du patrimoine se répand dans la pensée populaire.

Même si, au début du $19^{ème}$ siècle, seuls les châteaux, les vestiges de l'antiquité ou les ouvrages religieux étaient considérés comme monuments historiques, la révolution industrielle va marquer un changement en élargissant le concept de patrimoine.

Par exemple, cinq ans seulement après sa création, la Belgique, comme la France, trois ans auparavant, crée une commission de conservation des bâtiments. L'Angleterre fait de même quelques années plus tard. En France, la commission des monuments historiques exprime en 1832 : "Consolider, nettoyer, conserver, éviter d'ajouter pour préserver l'authenticité".

La première guerre mondiale a augmenté les catégories d'édifices considérés au sein du patrimoine. De plus, l'accélération des activités humaines oblige de considérer des bâtiments de 20 30 ans comme anciens.

Un autre facteur promouvant ce patrimoine est l'augmentation du temps de vie de certains bâtiments face à une crise énergétique grandissante. Ainsi, la rénovation de bâtiments permet d'utiliser des ouvrages existant ce qui s'avère plus économique que la construction de nouvelles structures. De plus, permettre la réhabilitation d'un bâtiment à moindre coût permet une réalisation plus rapide de ces travaux et l'économie continue

de fonctionner. En effet, la rénovation d'un bâtiment peut avoir de réelles retombées économiques qui sont rarement étudiées.

Une partie du tourisme est attirée par la beauté d'un patrimoine entretenu. Le plaidoyer rédigé sur demande de la Fondation Roi Baudouin [21] offre une vision plus économique du problème.

Ainsi, le patrimoine bâti est beaucoup plus large que les bâtiments classés et protégés. Celui-ci peut contenir les biens immobiliers avec, par exemple, un intérêt historique, artistique, scientifique ou local.

G. Croci [19] propose un récapitulatif de l'entièreté des ouvrages pouvant entrer dans le patrimoine actuellement. Ainsi, débutant des premières constructions humaines, la restauration prend maintenant en compte, dans un premier temps, l'architecture romane, les ouvrages des périodes byzantine et romaine. Mais, il est important, dans ce domaine, de garder un esprit ouvert et de considérer des ouvrages étrangers tels que l'architecture asiatique, islamique ou autres. Ensuite, les ouvrages de la renaissance et du baroque laissent place aux constructions récentes (19 et 20 ème siècle) pour arriver aux bâtiments modernes comme les buildings.

Cette importance du patrimoine bâti va forcer l'humanité à concevoir une rénovation de ce type de structure pour augmenter leur durabilité. Dés le 19è*me* siècle, la problématique de la possession par un bâtiment de toute une histoire oblige les spécialistes de l'époque à effectuer une étude en profondeur avant rénovation.

Plus tard, le squelette et la partie visuelle du bâtiment sont séparés [1]. De nos jours, de nombreuses rénovations ne conservent que la partie externe pour reconstruire entièrement la structure interne.

Après la deuxième guerre mondiale, de nombreux ouvrages devant être rénovés, une avancée supplémentaire a été effectuée. "Privilégier l'artistique avant le pratique" est devenu une règle de plus en plus logique pour finalement considérer les rénovations au cas par cas.

A partir de cela, deux méthodes de rénovation existent. La première consiste au respect total de la structure, tandis que la deuxième s'oriente vers une intervention plus importante pour augmenter la valeur du bâtiment. Cette deuxième option peut aller jusqu'au retrait ou l'ajout de détails architecturaux.

En 1931, la "Charte d'Athènes" fut signée. Elle comporte sept grandes résolutions protégeant le patrimoine. Ces résolutions obligent, par exemple, le gardiennage des ouvrages historiques, la protection de l'entourage direct de ces ouvrages, la permission d'utilisation de matériaux et techniques modernes pour la rénovation et la création de législations (européennes et internationales) sur cette problématique.

La grande conclusion de cette charte est de ne mettre de coté aucune période historique (comme l'énonce G. Croci) en promouvant un entretien régulier face à une rénovation totale.

L'évolution de la pensée progresse pour arriver à la "Charte de Venise" en 1964 qui est le document de référence sur le patrimoine. Cette charte n'a aucun pouvoir légal mais est respectée par un grand nombre de professionnels. Néanmoins, le concept majeur auquel fait appel cette charte est obscur. En effet, la charte lie le patrimoine

1. à tord selon certains spécialiste

à l'"authenticité" d'un bâtiment. Or, ce terme a des significations fort différentes selon les pays ou les régions.

Par la suite, d'autres chartes sont également rédigées comme la "Déclaration d'Amsterdam" en 1975, les "Recommandations de Nairobi-Varsovie" en 1976, la "Déclaration de Dresde" en 1982 et la "Charte de Florence" en 1982.

Finalement, malgré des chartes et règles de bonnes pratiques, la rénovation et la protection du patrimoine restent une activité fort vague. Celles-ci ne sont qu'une petite partie de toute une vision moderne du passé. De par la variabilité des pensées au sein de l'art, cette vision ne peut être universelle et aucune loi, avec détails et au niveau international, ne peut être introduite sans aller contre des principes présents dans une région du monde. Ainsi, même si des lois nationales existent, la restauration du patrimoine se base principalement sur des questions et des orientations générales que l'architecte peut prendre en compte.

3 Etat de la connaissance

Ce chapitre présente les connaissances qui sont à notre disposition sur les dégradations, restaurations et protections du béton et plus particulièrement sur les hydrofuges.

Avant d'explorer plus précisément chaque chapitre, certains mots peuvent être définis :

- "Durabilité" : "Espace de temps durant lequel un bien est apte à satisfaire un besoin auquel il correspond."[1] Perkins [41] ajoute qu'une certaine quantité de réparation et de maintenance peut être réalisée durant cette période ("design life"). Pour être encore plus précis, Apers [5] précise que la durabilité prend également en compte la possibilité d'évolutions d'utilisation des structures et d'une diminution maximale de l'impact sur l'environnement.

- "Design Life" : Durée pendant laquelle la structure doit être durable selon les concepteurs.[41]

- "Service Life" : Durée **réelle** pendant laquelle la structure reste durable.[41]

- "Maintenance" : "Ensemble des opérations permettant de maintenir ou de rétablir un matériel, un appareil, un véhicule, etc., dans un état donné, ou de lui restituer des caractéristiques de fonctionnement spécifiées."[1] L'application de traitements de surface fait partie intégrante de la maintenance.

3.1 Processus des dégradations du béton armé

Dans toutes les dégradations présentes au sein du béton armé, il est important de remarquer que certaines sont une combinaison entre la corrosion des armatures et la détérioration du béton. Ainsi, avant l'analyse des différentes dégradations mutuelles, le premier chapitre effectuera un rappel sur la simple corrosion des barres en acier, tandis que le deuxième sera consacré aux dégradations subies uniquement par le béton.

La majorité des dégradations seront citées dans ce chapitre, mais seules celles concernant cette étude seront légèrement approfondies.

3.1.1 Corrosion des armatures en acier [5][8][18][36]

La corrosion des armatures, résultant de nombreuses réactions électrochimiques complexes, consiste en l'apparition d'oxyde de fer hydraté ($Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$), appelé plus couramment "rouille", sur la surface des armatures en acier. Cette apparition se fait en fragilisant les barres à cause des diverses réactions présentes pour la création de cet oxyde de fer.

Réaction cathodique sur les armatures :

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

Réaction anodique sur les armatures :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

Ensuite, des réactions avec les produits créés à la cathode se produisent pour finalement former la rouille à proprement parler.

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2e^-$$
$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$$
$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot 3H_2O = rouille$$

La corrosion de l'acier ne peut avoir lieu dans un environnement fort basique (pH supérieur à 12,5). Cette haute alcalinité rend l'acier **passif**, ce qui consiste en la création d'une couche de protection à la surface des barres. Cet environnement est souvent présent au sein de béton ou de mortier n'ayant subi aucun vieillissement naturel (béton jeune).[41]

La couche de protection est composée d'oxyde de fer en quantité très importante. Cet amas qui protège l'acier est obtenu grâce à une présence massive de groupements hydroxyles au sein du béton fort basique. Ainsi, une précipitation importante a lieu et une couche fixe d'oxyde, qui empêche la création de nouveau ions ferriques, peut être créée.

Ainsi, la corrosion n'est possible que si la couche de protection du béton est attaquée. De nombreux paramètres peuvent influencer cette perte de passivité de l'armature en acier. Il est commun de considérer cette étape comme la phase d'initiation du processus de corrosion. Celle-ci est donc suivie par la deuxième étape (phase de propagation) qui est le temps pour que la corrosion devienne incontrôlable.

Finalement, pour que la corrosion puisse débuter, une présence d'eau et d'oxygène est nécessaire.

3.1.2 Dégradation du béton

Les origines des dégradations relatives uniquement au béton proviennent principalement de trois causes différentes. La première consiste en une attaque purement physique du béton, la deuxième concerne les attaques chimiques que peut subir le béton et la troisième est une réaction particulière relative aux granulats siliceux utilisés dans le béton (réaction alkali-silicate). [41]

- Attaques physiques

Ces attaques sont dues à différentes causes telles que les impacts, l'abrasion, la cavitation, etc... D'autres causes plus proches du but de ce travail sont également la base de ce type de détérioration. Ainsi, le gel-dégel de l'eau contenue dans le béton ou des chocs thermiques sur la surface du béton peuvent faire éclater celui-ci.

L'éclatement du béton à cause du gel/dégel dépend fortement de la température et de la taille des pores (cf graph). Cette attaque déploie de nombreuses forces au sein du béton telle qu'une augmentation de la pression interne par emprisonnement et compression de l'eau contenue à l'intérieur du front de glace. La formation de glace peut également attirer l'humidité ambiante et l'eau dans les pores de gel et ainsi assécher le béton. Ceci aura pour conséquence d'augmenter la concentration de certains composés et de créer des pressions importantes lors des transfert d'ions.[5]

Si l'usage de sel de déverglaçage est présent lors du gel, d'autres caractéristiques peuvent également être présentes. Ainsi, premièrement, la couche superficielle peut descendre sa température pour fournir la chaleur nécessaire à la fonte de la glace ou de la neige. Ainsi, cette couche subira un choc thermique pouvant conduire à une fissuration. Mais, deuxièmement, si les chlorures, en concentration suffisante, entrent par capillarité au sein du béton, une couche liquide peut se retrouver enfermée entre deux couches gelées (en surface et en profondeur). Ne pouvant gonfler, si celle-ci vient à geler à son tour, la couche superficielle se verra poussée par cette augmentation de volume. Cette dégradation porte le nom d'"écaillage".[5]

Finalement, l'éclatement du béton peut également avoir comme origine le gonflement des aciers inclus dans le béton suite à la corrosion des armatures. Néanmoins, ce type de dégradation n'est relatif qu'aux bétons armés et sera précisé dans le chapitre 3.1.4.

- Attaques chimiques

Les attaques chimiques sont influencées par de nombreux paramètres tels que l'agent chimique mis en jeu, le type de ciment et le pH, la porosité et la perméabilité du béton.[41] Bien entendu, il existe une vaste étendue de produits chimiques pouvant réaliser ce genre d'attaques. Ainsi, outre les acides et les sulfates, d'autres substances concernant plus précisément ce travail sont classifiées dans cette caractéristique.

Les traitements de surface peuvent diminuer l'influence de telles attaques pour les substances précédentes mais également pour les chlorures et l'eau de mer. Seuls ces deux dernières substances seront étudiées par la suite même si les chlorures ne provoquent de véritables attaques chimiques que lors d'une concentration très importante de ce composant. Ce dernier cas de figure peut être rare pour un béton de qualité mais étudiant des ouvrages anciens, pour lesquels il n'existait pas encore de règles, cette option ne doit pas être écartée.

- Réaction alkali-silicate [5]

Cette dégradation n'est réalisable qu'en présence de silices réactives [2]. En effet, une réaction entre les produits alcalins du béton et la silice se produit en présence d'eau. Cette réaction crée des produits expansifs qui peuvent provoquer une fissuration et donc promouvoir d'autres dégradations.

3.1.3 Pénétration d'eau dans le béton

Ces analyses préliminaires nous montrent que de nombreuses causes de dégradations sont possibles. Malgré tout, ce travail étudiant les traitements de surface, la totalité des dégradations qui m'intéressent sont obtenues grâce à une interaction entre l'environnement et le béton via des mécanismes de transport. De plus, les mécanismes intéressants dans le cadre de mon étude sont ceux relatifs au transport de l'eau.

Ainsi, le premier point rappellera très brièvement les différents moyens de transport au sein du béton. Le deuxième parlera de la perméabilité et de la porosité du béton qui sont deux des principales caractéristiques relatives à l'entrée d'eau. Tandis que les autres remarques sont des particularités auxquelles une attention doit être portée.

2. Ces silices réactives peuvent se trouver dans certain granulat.

- Mécanismes de transport [5]

1. Un des mécanismes les plus importants est la diffusion. Plusieurs types de ce transport peuvent exister tels que la diffusion de vapeur d'eau, la diffusion de gaz et la diffusion d'ions.

Pour le premier mécanisme, l'initiation du transport est due à une différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur du béton. De plus, l'arrêt de cette diffusion ne se produit pas lorsque l'air (interne et externe au béton) a les mêmes caractéristiques (humidité relative et température). Il existe le phénomène d'"adsorption moléculaire" qui est une attirance des molécules d'eau par la paroi des pores. Lorsque la couche de molécules a assez grossis pour rentrer en contact avec la couche opposée, un lien d'eau entre les deux couches de molécules adsorbées apparait dans la zone étroite du pore.

Outre cette adsorption moléculaire, une condensation capillaire peut avoir lieu au sein de pores très fins (diamètre de $\pm 10^{-8} m$). Cette condensation se déroule lorsque le béton et sa surface présentent une température inférieure à celle de l'environnement.

Ainsi, des molécules d'eau se trouveront toujours au sein du béton, même sans contact direct avec de l'eau liquide. La teneur en eau obtenue via ce type de transport est appelée "teneur en eau hygroscopique".

Il est important de noter que ce type de transport s'effectue très lentement et en trois étapes. La première est le transport uniquement par vapeur d'eau jusqu'à ce que l'adsorption moléculaire entre en jeu. Ensuite, de faibles déplacements en phase aqueuse peuvent avoir lieu au sein des liens d'eau créés. Néanmoins, un transport par vapeur d'eau doit toujours être présent entre les "ilots" ou une condensation et une évaporation ont lieu de chaque coté du lien. Finalement, lorsque le pore est saturé, une déplacement uniquement aqueux peut avoir lieu.

La deuxième diffusion mentionnée est un déplacement des gaz des hautes concentrations (de ce gaz) vers les basses concentrations. Ainsi, dans un environnement riche en CO^2, le béton subira une arrivée de ce gaz en son sein. Il est à noter que le déplacement des gaz est beaucoup plus rapide par l'air que par l'eau. Comme nous le verrons, ce transport est donc primordial dans l'étude des dégradations à cause de son apport d'oxygène et de dioxyde de carbone au sein du béton

La dernière diffusion dont il est fait référence dans ce travail débute, comme celle d'avant, par une différence de concentration. Ainsi, des ions tels que le chlore et le sulfate peuvent s'insérer au sein du béton.

2. Un deuxième mécanisme est l'entrée d'eau par ascension capillaire au sein des pores du béton. Ce processus se réalise par simple rencontre entre le béton et une surface d'eau. Un ménisque remonte le long des pores grâce à une "aspiration" inversement proportionnelle au diamètre du pore. Ce principe de transport est très important vu qu'une entrée d'eau très importante est possible. Ainsi, lors d'une pluie ou d'éclaboussures d'eau, celle-ci rentre immédiatement par capillarité au sein du béton. Malheureusement, elle est, souvent, accompagnée d'ions provoquant des dégradations. Des résultats d'études montrent qu'au sein d'un béton humecté et puis séché, la zone à humidité variable arrive jusqu'à 15 à 20 mm à l'intérieur du béton.

La capacité du béton à absorber de l'eau par capillarité peut être déterminée grâce à un "coefficient d'absorption capillaire" qui vaut habituellement environ $0,018 kg/m^2 s^{0,5}$.

3. Finalement, outre la capillarité, l'eau peut s'infiltrer au sein du béton par simple pression hydrostatique.

- Porosité du béton [5]

Suite au chapitre précédent, il semble évident que la grande majorité des mécanismes de transport de l'eau (ou d'autres éléments) au sein du béton soit influencée par la structure des pores.

Différents types de pores existent en fonction de leurs tailles. Ainsi, les plus petits espaces qui existent sont entre les plaquettes de ciment hydratées et ceux-ci contiennent de l'eau liée chimiquement.

Les premiers pores intervenant dans les mécanismes de transport sont les pores de gel contenant l'"eau de gel" [3] . Ces espaces sont situés entre les fibres (qui sont constituées de nombreuses plaquettes). La taille habituelle pour de tels pores est d'environ 1 à 10 nm (10^{-9}à$10^{-8}m$).

Lorsque ces fibres sont moins nombreuses, les espaces créés sont plus important et permettent un meilleur déplacement de l'eau. Ces réseaux sont composés de "pores capillaires" et contiennent de l'"eau capillaire". Le diamètre habituel de ceux-ci est de 100 à 10.000 nm (10^{-7}à$10^{-5}m$). C'est ce dernier type qui joue un rôle primordial dans la durabilité et la perméabilité des bétons.

Bien entendu, d'autres types de pores existent tels que les pores créés par le retrait chimique du béton car, le ciment gardant un même volume, l'eau contenue en son sein diminue de volume et des espaces qui aspirent ensuite l'air ou l'eau venant de l'extérieur sont ainsi créés. Les pores de granulats, l'air occlus (après vibration) ou entraîné (avec entraineur d'air) sont d'autres types de pores pouvant être présents dans le béton.

- Perméabilité du béton [5]

La perméabilité est la caractéristique qui détermine l'aisance avec laquelle l'eau peut pénétrer et se mouvoir au sein d'un réseau de pores. Les caractéristiques de ces derniers sont donc les principaux facteurs pouvant influencer la perméabilité. Ainsi, le diamètre, la longueur, la tortuosité, la forme et les frottements contre les parois de ces pores influencent la perméabilité d'un béton. Celle-ci peut également varier en fonction d'autres facteurs tels-que l'humidité et l'air présents dans les pores, le mécanisme de transport et le type de matière transportée. Ainsi, il ne peut exister une relation claire entre la porosité (ouverte) et la perméabilité.

La perméabilité du béton peut être, par simplification, déterminée par la perméabilité du réseau capillaire. En effet, le gel de ciment a une perméabilité fortement inférieure au béton durci. La perméabilité du réseau capillaire est influencée par la continuité des pores. Ainsi, en fonction du rapport eau/ciment, la continuité passe d'une discontinuité totale en dessous de $e/c = 0,4$ à une continuité au dessus de $e/c = 0,7$.

- fissuration du béton [5]

Une des entrées d'eau les plus aisée au sein du béton est en passant par les fissures naturelles présentes dans le béton.

3. La notion de gel utilisée ici fait référence au gel de ciment (C-S-H) lors de l'hydratation de ce dernier et non au gel de l'eau

L'entièreté des bétons comporte des micro-fissures provenant du retrait, du fluage, du gel ou d'autres actions avec un effet relativement faible. Ainsi, ces fissurations apparaissent principalement près des granulats et ne pose pas de problème vu la discontinuité de celles-ci. De plus, des fissures étroites dues aux différentes actions physiques et restant admissibles, selon les états limites de service de la construction, ne facilitent pas fortement l'entrée d'eau et d'ions au sein du béton. Finalement, une fissure de 0,4 mm peut se boucher d'elle-même.

Donc, les problèmes proviennent principalement des macro-fissures causées par diverses causes dont celles mentionnées précédemment (micro-fissures) avec un impact plus élevé et donc une action plus importante. Ainsi de telles fissures peuvent apparaitre à cause d'actions physiques excessives (Flexion, traction, torsion, ...), d'un retrait ou d'un fluage important, de cycles gel-dégel, d'une réaction chimique expansive ou d'une combinaison de ces différents cas.

Une diminution des risques peut être apportée pour chacune des actions proposées, mais seul l'attaque chimique et les cycles gel-dégel seront approfondis dans le chapitre suivant 3.1.4. De plus, les autres actions sont soit dues à une négligence de chargement soit dues aux caractéristiques intrinsèques du béton.

- Recouvrement des armatures

Le recouvrement du béton (enrobage) est défini comme "la distance entre la surface la plus extérieure de l'armature $[\cdots]$ et la surface de béton la plus proche" [5].

Un enrobage minimum doit toujours être assuré pour une bonne qualité du béton. Si une faible couche de béton recouvre le béton, l'eau et l'oxygène auront beaucoup plus de facilité à atteindre l'acier. Ainsi, une perte de la passivité de l'acier et une corrosion plus rapide auront potentiellement lieu. De plus, ce recouvrement assure le pH nécessaire pour obtenir cette couche de passivité.

Ce recouvrement est basé sur la qualité du béton voulue et sur les conditions d'exposition et d'environnement. De plus, un recouvrement minimum doit être fixé pour assurer un bon compactage du béton en considérant la taille des granulats. [41] Ainsi, des formules ont été réalisées et différencient l'enrobage minimal de l'enrobage nominal qui possède la même valeur que le premier majorée d'une tolérance (Δc_{dev}) [5] :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

Cette tolérance est nécessaire pour prendre en compte toutes les imperfections apparaissant durant la mise en place.

- Remarque

Il est important de remarquer que, même si notre étude pourra prouver que les traitements de surface peuvent améliorer la résistance à certaines dégradations, la rigueur dans la fabrication et la mise en place du béton doit être la plus importante possible. Si les différentes caractéristiques des bétons, décrites ci-dessus, ne sont pas bonnes dès la base, elles ne pourront pas être totalement réparées par un traitement de surface. Ainsi, même si ce travail n'étudie pas cet aspect, je ne peux que pousser à effectuer un béton présentant les meilleurs caractéristiques possibles (pores étroits, recouvrement acceptable et fissuration négligeable).

3.1.4 Dégradation combinée (Béton-armatures)

- Carbonatation

La première possibilité pour annuler la passivité des armatures [4] et débuter une corrosion de celles-ci est la carbonatation du béton. Cette dégradation engendre un éclatement du béton à cause du gonflement des armatures contenues au sein du béton.

- Phase d'initiation

Ce mécanisme consiste en une réaction entre le dioxyde de carbone et les substances alcalines du ciment et plus particulièrement la portlandite (hydroxyde de calcium : $CaOH_2$) pour former du carbonate de calcium ($CaCO_3$)[41] [5] :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$$

Le résultat de cette réaction est une forte diminution du pH du béton. Celui-ci passe de ± 13 à ± 9,5. [41] Cette diminution est nécessaire pour que la réaction de carbonatation puisse se réaliser. En effet, celle-ci ne se développe qu'en milieu aqueux et il est nécessaire que le dioxyde de carbone se dissolve dans l'eau. Par cette présence d'eau, le $CaCO_3$ se dissout également et la réaction se réalise. Néanmoins, pour que celle-ci persiste, un apport de CO_2 doit être permanent. Ainsi, cette réaction se développe uniquement au front d'humidification (interface eau-air) vu que la diffusion du CO_2 est largement plus rapide par l'air. De nombreuses particularités peuvent découler de cette explication [5] :

1. Un autre front, appelé "front de carbonatation", peut être défini comme la zone où cette réaction a lieu.
2. En fonction de l'avancée du front de carbonatation, le CO_2 doit effectuer un plus long chemin pour entretenir la réaction et, donc, la vitesse de carbonatation n'est pas constante et tend à diminuer.
3. La carbonatation en immersion ou sur un béton exposé à la pluie présentera une vitesse de carbonatation faible, voire nulle. En effet, ne pouvant assurer de diffusion par l'air, le CO_2 atteindra le front de carbonatation avec un temps nécessairement plus long.
4. La carbonatation se développe le plus rapidement dans une zone humide et protégée de toutes arrivées d'eau liquide.

- Phase de propagation [5][36]

Cette phase débute lorsque le front de carbonatation atteint l'armature en acier et que la passivité de celle-ci est rompue à cause de la baisse du pH. Alors, comme expliqué au chapitre 3.1.1, la corrosion de l'armature peut s'effectuer avec la présence nécessaire d'eau et d'oxygène.

La principale question est de déterminer la présence de corrosion et, dans l'affirmative, de connaitre la vitesse de corrosion de l'armature. Il est prouvé que celle-ci dépend fortement de l'humidité relative de l'environnement extérieur. La figure 1 permet d'avoir une idée sur la relation entre l'humidité relative et la vitesse de corrosion. Ainsi, cinq cas peuvent être définis :

4. Notion expliquée au chapitre 3.1.1

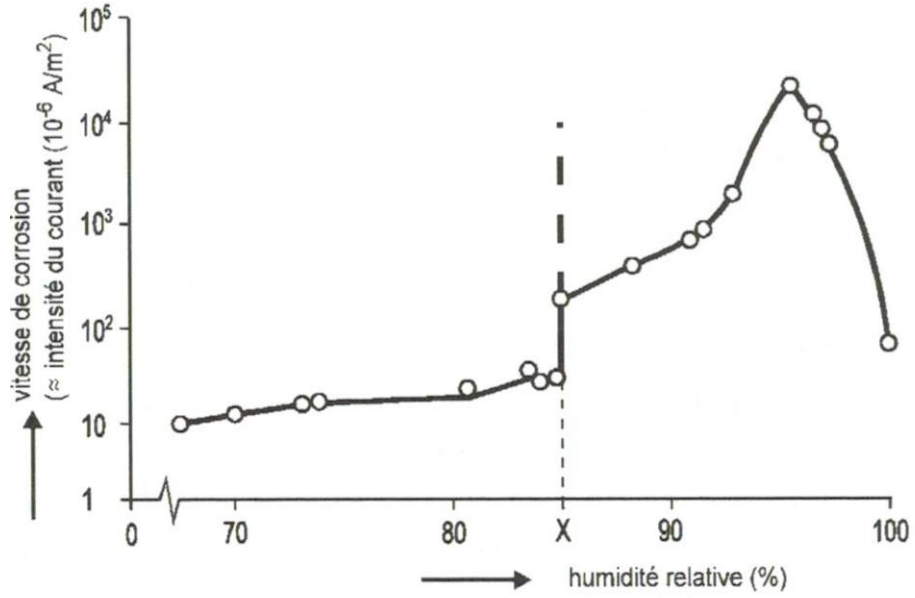


FIGURE 1 – Relation entre la vitesse de corrosion et l'humidité relative [5]

1. En présence d'une très forte humidité (100% HR) la corrosion ne peut se développer car l'oxygène ne peut arriver rapidement jusqu'aux armatures (diffusion en phase aqueuse).
2. En environnement intérieur, avec une humidité relative peu élevée (40 - 50 % HR), la corrosion ne peut pas se développer par manque d'eau vu que sa teneur n'est pas assez importante pour ce type de réaction.
3. En environnement extérieur ($\pm 90 - 95\% HR$) avec les armatures dans la zone carbonatée et dans celle de variation d'humidité (15-20 mm), la corrosion aura très certainement lieu. Dans ce cas-ci, la position et l'orientation du béton peuvent également jouer un rôle. En effet, la possibilité d'eau liquide sur la surface du béton peut changer la pénétration d'oxygène ou d'eau au sein de béton. Sur la même idée, une orientation sud provoquera un assèchement plus important qu'une orientation nord.
4. Dans un même environnement et avec les armatures en zone carbonatée mais hors de la zone de variation d'humidité, la corrosion ne se produit que si l'oxygène et l'eau sont en assez grandes quantités. Des études prouvent que très souvent, dans ce cas-ci, une détérioration est très rare.
5. Le dernier cas est celui où les barres d'armature se trouvent hors de la zone carbonatée et où toute corrosion est impossible.

Attaques par les chlorures

La présence de chlorure au sein du béton peut avoir deux origines bien distinctes. La première consiste en la pénétration de chlorure à partir de l'environnement extérieur tels que brouillard salin ou sel de déverglaçage. La deuxième possibilité est l'ajout de chlorure lors du mélange du béton ou par la présence de ceux-ci au sein de granulat ou de l'eau utilisée lors du malaxage.[41] Bien entendu, cette dernière origine ne concerne

pas notre travail vu que la cause de la dégradation est inhérente au béton. Malgré tout, pour information, il est maintenant interdit de procéder à un ajout d'un constituant possédant des chlorures. Ainsi des tableaux reprenant la teneur maximale en fonction du béton existent dans la littérature.[5]

Dans le cas où les chlorures arrivent à partir de l'environnement, ceux-ci pénètrent dans le béton grâce aux divers mécanisme expliqués précédemment. Les deux principaux sont la diffusion d'ions (si le béton est saturé) ou l'absorption capillaire si le béton n'est pas saturé.[33] C'est ce dernier mode qui permet le transport des chlorures le plus rapide au sein du béton. L'augmentation de la concentration de chlorures dans le béton s'opère principalement lors des cycles d'humidification dans la zone à variation d'humidité. Lors de la diminution de cette humidité, l'eau s'évapore alors que les chlorures se déposent au sein du béton. Ainsi, lors de chaque cycle, la concentration en chlorure augmente dans la zone de variation d'humidité (15-20 min). Plus en profondeur, l'augmentation de la teneur en chlorure ne peut se produire que par diffusion, processus beaucoup moins rapide avec une vitesse proportionnelle à la racine carrée du temps. [5] Ainsi, le transport des ions est un mélange de différents mécanismes qui assurent une avancée des chlorures au sein du béton pour la plupart des environnements.

L'importance de l'attaque est liée à la teneur en ions Cl^- et non en chlorures. Une progression de ces ions chlore au sein du béton se réalise pour la plupart des conditions d'exposition. En effet, le transport de ces ions se produit grâce à un mélange de différents mécanismes (diffusion et capillarité) qui permettent une variabilité importante.[33] Néanmoins, ces ions arrivent prioritairement par des éclaboussures d'eau salée sur les routes lors du déverglaçage et à proximité d'un environnement marin. Des gouttelettes d'eau de mer peuvent être transportées sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres.[5][36]

- Processus [5][8][33][36]

Dés que les chlorures sont dissouts dans l'eau présente dans les pores, ils se divisent en ions positifs et négatifs :

$$NaCl = Na^+ + Cl^-$$

Ce dernier composant (Cl^-) détruit la passivité des barres d'armature d'une manière différente à la carbonatation. En effet, après avoir atteint la concentration nécessaire, l'ion chlore joue le catalyseur de la réaction en réagissant avec les cations de fer pour former du chlorure de fer. Ensuite, ce dernier produit se dissout facilement dans l'eau pour former de l'hydroxyde de fer qui réagit lui même avec l'oxygène pour former de la rouille comme nous l'avons vu au chapitre 3.1.1.

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl^2$$
$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl$$

Durant ces diverses réactions, le chlore n'est pas consommé et la concentration augmente toujours de la même façon. En effet, le transport d'ions ayant toujours lieu, le HCl produit se dissocie en ions d'hydrogène et de chlore :

$$HCl = H^+ + Cl^-$$

Ainsi, dés que la réaction est en place, celle-ci ne s'arrêtera que si un manque d'oxygène ou d'eau se fait sentir (si l'humidité relative est inférieure à 60% ou supérieure à 95%). Cette attaque est, à ce titre, une des plus dangereuse pour le béton armé. La dangerosité de cette attaque est également augmentée par la faible étendue de l'anode qui reste confinée très localement en "creusant" l'armature. Ainsi, contrairement à la carbonatation où la dégradation est visible globalement, seules quelques traces peuvent être visibles pour les attaques aux chlorures.[5][33]

Les dégradations finales sont soit une rupture brutale des armatures au sein du béton, par une diminution de la section de celles-ci à l'anode, soit un éclatement du béton à cause du gonflement des armatures comme pour la carbonatation. La première dégradation peut avoir des conséquences très importantes et très dommageables sur les ouvrages.[5][36]

3.2 Réparations ou protections possibles

De nombreuses solutions pour réparer et protéger le béton existent. Pour ne pas trop s'écarter du sujet de ce travail, seule une brève explication des techniques existantes sera effectuée dans ce chapitre. De surcroît, pour encore mieux cloisonner ce travail, seules les solutions concernant les dégradations causées par la corrosion des armatures (éclatement, baisse du pH, fissurations,...) ou par le gel/dégel (écaillage et fissurations) seront explicitées.

Dans tous les cas, il est important de pratiquer un diagnostic clair et précis de la pathologie du béton. De nombreuses particularités sont présentes pour chacune des dégradations. Je n'entrerai pas dans les détails et m'en tiendrai aux grandes généralités.

Avant toutes réparations, il est important de prévoir une préparation du béton optimale pour assurer une réparation et une protection maximales. La principale influence pour une bonne intervention est l'adhérence entre le béton et la réparation. Ainsi la performance et la durabilité de cette adhésion doit être assurée. [18]

Une autre préparation qui peut s'avérer nécessaire est le retrait d'une partie du béton. L'étendue de ce retrait est déterminée en fonction de la dégradation étudiée et cette précision sera explicitée pour chacun des points suivants. Concernant les méthodes d'extraction du béton altéré, celles-ci vont de la démolition au sablage. La facilité d'exécution dépends de la méthode choisie et de la zone a traiter.

3.2.1 Réparations [18][27]

- Fissures

La première étape lors de la réparation d'une fissure est de déterminer l'activité de celle-ci. En effet, la technique de réparation varie en fonction de ce paramètre. D'autres influences rentrent également en jeu comme le type de fissure ou de structure, l'objectif de l'intervention (protection, étanchéité, ...) et le type d'environnement.

La ligne de conduite générale pour l'entièreté des solutions contre les fissures est l'empêchement d'un écartement supplémentaire et le recouvrement de la fissure (partiellement ou entièrement). Les différentes méthodes vont d'un simple agrafage de la

fissure (grâce à des agrafes ou des plats métalliques) à l'injection de résine ou de coulis. D'autres méthodes importantes consistent au calfeutrement de la fissure ou à la protection locale ou générale de la fissure (voire de l'ouvrage).

Au sein de ces différents types de réparations, certains peuvent reprendre des efforts (traction/compression) et faire vivre la fissure alors que d'autres rendront la réparation totalement monolithique.

Les solutions ne traitant pas l'entièreté de la fissure ne réalisent pas une nouvelle étanchéité au béton et la pénétration de l'eau et de l'oxygène peut acquérir un accès privilégié.

Avant ces réparations, un retrait du béton autour de la fissure peut être envisagé pour certaines options. Cette mise en œuvre permettra un meilleur accès en profondeur (si la fissure traitée est étroite) et une meilleure accroche du traitement.

- Épaufrures, écaillage ou désagrégation

Ce type de dégradation fait appel le plus souvent à un ragréage de la zone altérée. Cette technique consiste à recréer la surface en béton et lui rendre l'aspect voulu initialement. [1][18]

Cette étape peut s'appliquer par diverses techniques de réparation des surfaces. Ainsi, des applications par béton projeté jusqu'à la création d'un coffrage, avec le coulage du béton derrière celui-ci, toutes particularités des zones à traiter peuvent être prises en compte.

Avant d'effectuer un ragréage, un retrait de béton peut être effectué si la dégradation est trop importante ou si des conséquences de celle-ci doivent être prises en compte. La principale raison d'un retrait est la présence d'armatures. En effet, recouvrir l'armature d'un mortier basique dans un béton neutre crée une pile et accélère la corrosion de l'armature. De plus, comme l'armature a été en présence d'une couche de protection plus mince (voire inexistante), recréer cette couche ou remplacer un morceau d'armature peut s'avérer nécessaire.[18]

- Corrosion des armatures

Comme précisé précédemment, un remplacement de l'armature peut être effectué. Mais d'autres solutions sont également possibles comme recréer la passivation autour de l'armature ou l'inversion du sens du courant au sein de l'armature (rendant partout l'armature cathodique).

Concernant le remplacement du béton entourant l'armature, plusieurs règles existent dans la littérature en fonction principalement de l'étendue de la corrosion superficielle et du front de carbonatation.

3.2.2 Protections

La figure 2 illustre l'entièreté des protections de surface réalisables. Celles-ci seront explicitées dans le chapitre sur les hydrofuges. Les protections consistant à placer un revêtement en géotextile ne sont pas explicitées au sein de ce travail.

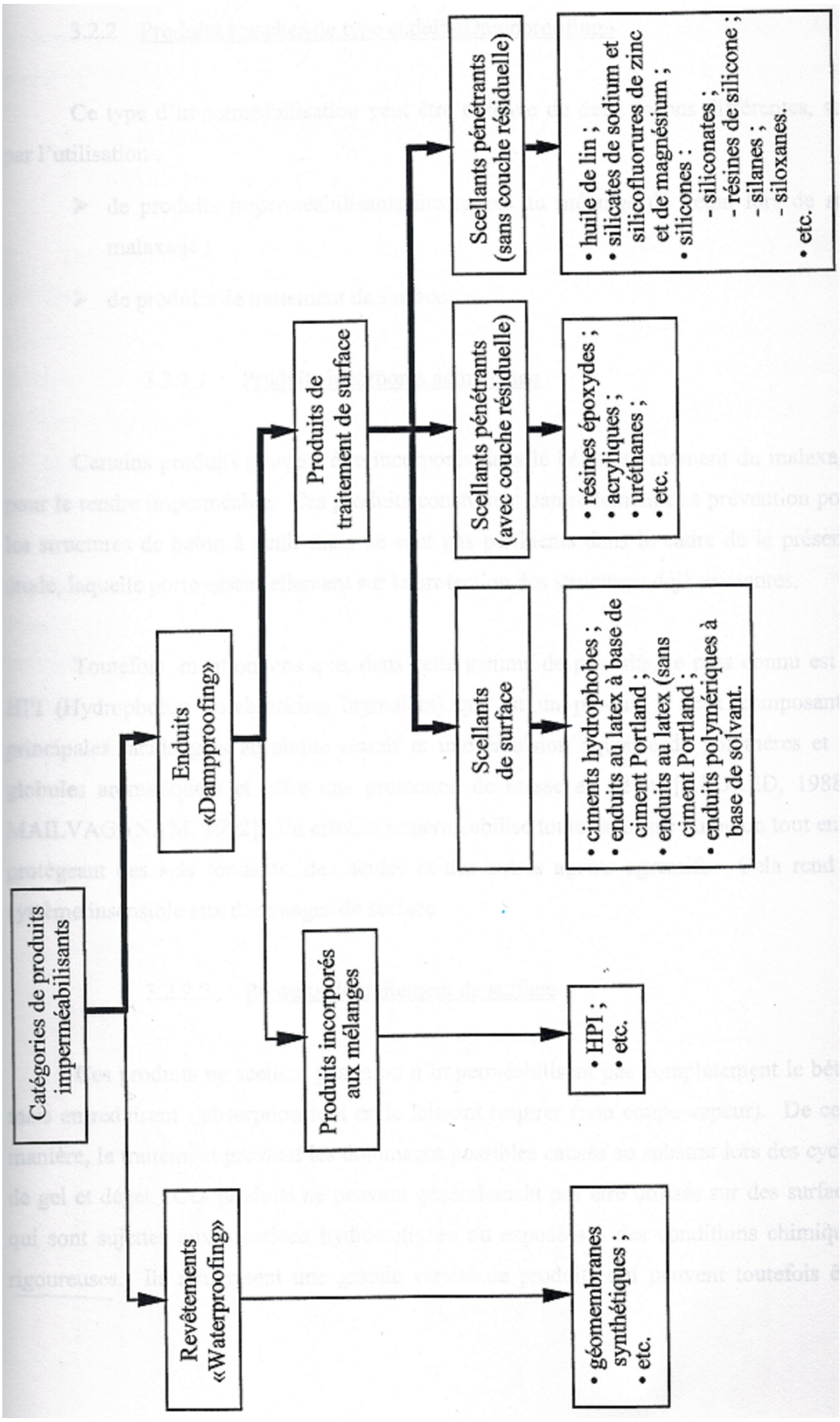


FIGURE 2 – Diagramme des diverses catégories de produits de protection existants [4]

3.3 Les hydrofuges

Un hydrofuge est un produit incolore possédant la capacité de protéger une surface poreuse. Celui-ci n'altère pas l'aspect de la surface même après vieillissement (UV, ...) et laisse la possibilité au béton de respirer (diffusion de vapeur d'eau libre). Ainsi, un hydrofuge empêche uniquement les liquides de pénétrer.[12][18][20][48]

Cette méthode de protection doit présenter également d'autres caractéristiques comme la possession d'une bonne résistance à la plupart des attaques qui existent et la capacité de pénétration ou de bonne adhérence au sein du béton.[4]

De tels produits sont à différencier des enduits et des peintures car, comme représenté à la figure 3, ils ne recouvrent pas les pores mais sont absorbés par le substrat et tapissent les parois des pores du béton. De plus, ceux-ci ne jouent aucun rôle mécanique au sein de l'ouvrage.[12][18][20][48]

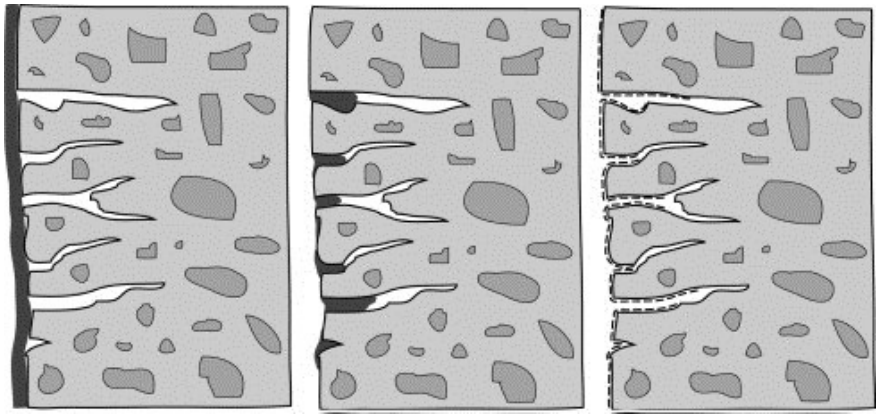


FIGURE 3 – Action des traitements de surface
De gauche à droite : Enduits, bouche-pores et couvrant la surface interne [33]

Un hydrofuge est habituellement constitué au minimum de ±5% de matières actives dissoutes soit dans un solvant, soit dans un liquide organique ou soit dans de l'eau.[48]

L'usage d'un bon hydrofuge peut fortement (doubler voire plus)augmenter [5]la durée de vie de service d'un bâtiment

3.3.1 Historique [48]

Observant que l'eau est le principal moteur de la dégradation du béton en corrodant les armatures, la volonté d'empêcher cet élément de s'introduire dans le béton s'est vite fait sentir.

Depuis plusieurs siècles, des produits pouvant empêcher cette entrée d'eau sont recherchés et utilisés pour la protection des ouvrages réalisés en matériaux durables (pierres, briques, ...).

Ainsi, depuis l'Antiquité, de nombreux produits se sont succédés sur le marché pour essayer d'atteindre ce but. Au début, l'usage se limitait à des produits naturels (huile, résines, ...) avec des performances totalement méconnues. Ensuite, les surfaces

5. Medeiros, M.H.F. [32] assure que la durée de vie peut augmenter d'un multiple 7,8.

d'immeuble étaient tout simplement recouvertes d'une couche (enduits, peintures,...) devant être souvent renouvelée.

Avec l'industrialisation de la chimie (vers le XIX^{e} siècle), de nouveaux produits apparaissent dans la littérature de l'époque. A partir des années 50, des recherches prônent l'utilisation de peintures à l'huile. Tandis que d'autres spécialistes conseillent l'usage de dérivés d'esters, de polymères, de cires et de polymères synthétiques (début des hydrofuges modernes).

Les années suivantes, la performance très mitigée des différentes méthodes rend les utilisateurs septiques. Ces mauvais résultats sont la cause d'inexpérience dans ce domaine et l'inadéquation de ces produit à un usage industriel. Après ces observations, les scientifiques se sont penchés sur ces différents produits pour déterminer les attitudes à avoir afin d'assurer une durabilité plus importante. En même temps, d'autres solutions de protection apparaissent comme les "coatings" tels-que les résines époxydes.

Enfin, vers les années 70 apparaissent les silanes et siloxanes qui sont, actuellement, les produits les plus utilisés.

3.3.2 Effet des hydrofuges [20]

L'effet des hydrofuges est, comme déjà précisé, de rendre la surface d'un revêtement hydrophobe sans entraver le passage de vapeur d'eau. Pour ce faire, un hydrofuge ne peut pas boucher les pores mais doit pénétrer à l'intérieur et rendre l'entièreté de la surface, sur une certaine profondeur, répulsive à l'eau liquide.

Ainsi, la seule façon que les hydrofuges ont pour effectuer cette demande est de jouer sur les caractéristiques d'attraction de la surface en béton. La plus importante pour ce que nous étudions est "les tensions superficielles". En effet, toute surface présentant une tension superficielle supérieure à celle de l'eau, attirera celle-ci et lui permettra de pénétrer par capillarité. Or, le béton, sans protection, possède une tension superficielle de 80 mN/m contre 73 mN/m pour l'eau.

La couche permettant cet effet hydrophobe ne mesure que quelques nanomètres et ne détériore donc pas l'aspect de surface.

L'hydrofuge permet donc de réduire la tension superficielle a une valeur proche de 20 mN/m. Ainsi, les gouttes d'eau atteignant la surface seront attirées par les autres gouttes d'eau qui présentent une tension superficielle presque semblable. Grâce à cela, le comportement capillaire se trouve modifié et le comportement en surface voit apparaitre l'"effet perlan".

En ce qui concerne le comportement capillaire, lorsque l'hydrofuge n'est pas mis en place, le réseau capillaire attire et aspire de l'eau en son sein. La pose d'un traitement hydrophobe diminuant la tension superficielle en surface et dans les pores permet d'inverser totalement le comportement. En effet, l'eau se trouve repoussée hors du réseau capillaire. Une répulsion apparait grâce à l'impossibilité pour l'eau de pénétrer dans le réseau. Ce nouveau comportement capillaire peut être expliqué par l'effet perlant qui est détaillé au paragraphe suivant.

La deuxième caractéristique, l'"effet perlant", consiste à avoir un angle de contact important pour minimiser la zone touchée par l'eau. L'angle de contact est celui mesuré entre le substrat et l'extérieur de la goutte d'eau au niveau du contact. En observant la

figure 5, il est clair que plus l'angle est élevé, plus la goutte est repoussée de la surface, plus la tension superficielle du béton est faible et plus le frottement entre la goutte et la surface est faible également. On commence à parler d'un angle de contact acceptable à partir de 90° mais il est intéressant d'atteindre plus de 130°.[52]

L'effet perlant et l'effet sur le réseau capillaire sont représentés sur la figure 4. Une précision sur les angles de contact est apportée par la figure 5

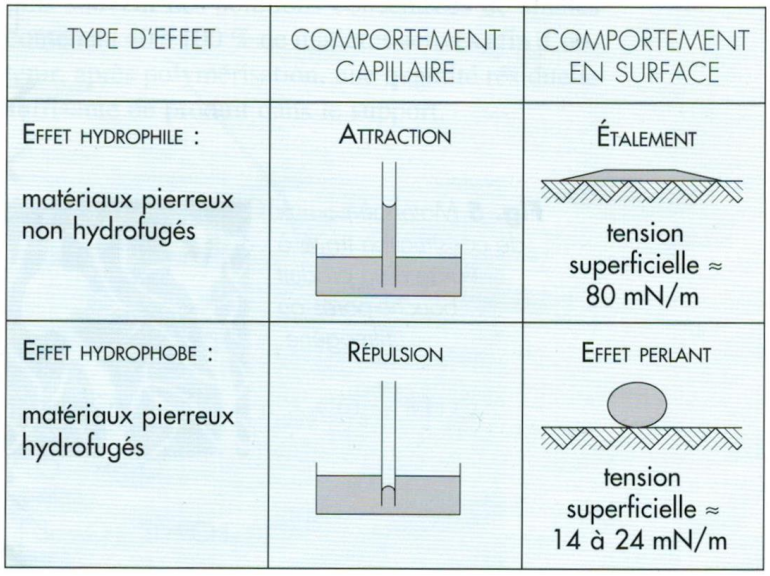


FIGURE 4 – Effet d'un produit hydrofuge sur la capillarité et Effet perlant [20]

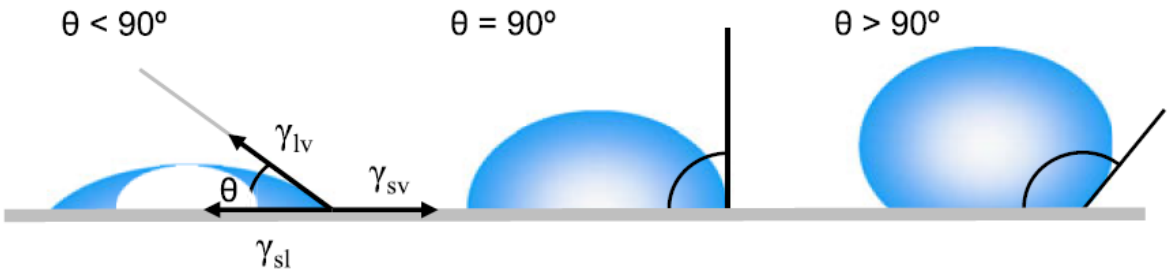


FIGURE 5 – Angles de contact à la surface d'un revêtement [52]

Les symboles présents sur la figure 5 servent à définir l'équilibre mécanique de la goutte d'eau sur un revêtement qui est énoncé par la formule (1). [52][17]

$$\gamma_{lv} cos\theta_y = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \tag{1}$$

où

γ_{sv} est l'énergie de surface à l'interface solide/vapeur ;

γ_{sl} est l'énergie de surface à l'interface solide/liquide ;

γ_{lv} est l'énergie de surface à l'interface liquide/vapeur ;

θ_y est l'angle de vapeur.

3.3.3 Types d'hydrofuges

- Hydrofuges de masse

Ce type d'hydrofuge ne peut être utilisé que lors de la préparation du béton vu qu'il consiste en l'incorporation d'adjuvants dans celui-ci afin de rendre sa surface imperméable une fois durcie.

Ce genre de produit n'est pas utile dans mon travail et ne sera plus étudié par la suite. Seuls les hydrofuges pouvant être appliqués sur des ouvrages existants seront considérés. Ainsi, les deux chapitres qui suivent définissent mieux ce type de traitement.

Pour au moins citer un hydrofuge de masse, des produits composés d'acide gras acyclique et d'une émulsion aqueuse, composée de polymère et de globules aromatiques. Il protège l'entièreté du béton en l'imperméabilisant et en empêchant la dégradation par les sels, acides et autres. [4]

- Hydrofuges superficiels [4]

Ce type d'hydrofuge, appelé également "enduit", ne pénètre pas le béton lors de sa pose sur celui-ci. Selon un TFE de 2009 [8], se référant à des recherches de Gagné R [28], ces enduits forment une couche supplémentaire sur le béton en adhérant parfaitement bien à sa surface, grâce à des liens physiques. Ces types d'enduits ont, généralement, un bon pouvoir d'imperméabilisation et résiste bien aux UV.

Les caractéristiques de ces produits sont totalement indépendantes du béton devant être protégé. Ces produits peuvent présenter une bonne efficacité pour autant qu'une importante adhérence existe.

- Hydrofuges pénétrants [4]

Ce type d'hydrofuge pénètre le béton et réagit avec celui-ci en profondeur. Ce produit ne bouche jamais les fissures mais recouvre plutôt les parois internes qui deviennent hydrophobes. Bien entendu, si une fissure est très large ou si celle-ci est toujours active, l'utilisation d'hydrofuge n'aura pas une efficacité maximale, voire nulle.

Au niveau de la performance, de nombreuses influences peuvent exister comme [4] :

- L'arrêt ou la diminution de la pénétration d'eau et des substances agressives tout en laissant respirer le béton
- L'importance de la pénétration du béton. Celle-ci varie habituellement de 1 à 3 mm et dépend de nombreux facteurs tels que la dose de produit utilisé, le type de béton, les conditions climatiques lors de la mise en place, la préparation de la surface avant imprégnation et la technique de la mise en place.
- La résistance chimique des produits face aux chlorures et alcalis.

Deux groupes au sein de ce type d'hydrofuge peuvent être mis en évidence. Des produits pénétrants peuvent laisser une couche résiduelle en surface, alors que la majorité des hydrofuges pénétrant n'en laisse aucune.

Les produits laissant une couche résiduelle [6] utilisent celle-ci pour assurer l'arrêt de l'eau et des agents agressifs. Néanmoins, ce type de fonctionnement quitte légèrement la définition même d'un hydrofuge. En effet, l'apparition d'une couche crée une barrière à la vapeur d'eau et provoque une différence d'aspect à la surface.

6. Cette couche fait moins de 0,25 mm d'épaisseur

Le deuxième groupe de produits, ne laissant pas de couche superficielle, est le plus fréquemment utilisé. Ces hydrofuges sont composés d'agents actifs en solution dans l'eau ou du solvant. Les grandes particularités de ce type d'hydrofuge sont le faible coût de ce traitement, la facilité d'application sans préparation de surface et le respect de l'aspect d'origine.

3.3.4 Familles et exemples d'hydrofuges

- Enduits au latex

Produits à base d'écétate de vinyl, d'acrylique et styrène et de résines acryliques. Même si largement utilisés, ces produits résistent peu aux UV et sont sensibles à l'humidité. Ainsi, leur utilisation sera privilégiée en intérieur. [4]

- Ciment ou produits à base de ciment

Distribués en poudre, divers types de ciment peuvent être créés en mélangeant cette poudre avec de l'eau ou un polymère au latex (émulsion de polymère et d'eau). [4]

- Enduits polymériques

Produits à base de résines diluées dans des solvants organiques. La couche active se dépose par simple évaporation du solvant.[4]

- Résines époxy [4]

Ces résines sont obtenues grâce au mélange de deux composants (résines époxy et un durcisseur). Une fois le mélange réalisé et le produit mis en place, celui-ci durcit en quelques heures pour devenir fortement rigide et résistant (aux attaques tant physiques que chimiques).

Mais outre ses bonnes caractéristiques, la production à grande échelle semble compliquée vu la nécessité d'un mélange de deux composants très peu de temps avant la mise en place. De plus, comme précisé plus haut, ce produit annule totalement la perméabilité à la vapeur et forme un film luisant (voire coloré) sur la surface. Finalement, la résine époxy présente un coefficient de dilatation différent du béton.

- Silicones

La famille des silicones organiques est certainement la plus étudiée et la plus utilisée actuellement. Plusieurs sous-familles de produits existent en fonction de la taille des molécules de l'agent actif. En effet, les silicones sont des polymères composés par une répétition d'un ou plusieurs monomères. Les éléments présents au sein de ces monomères ont, comme pour le silicate, de l'oxygène et du silicium. La différence avec les hydrofuges inorganiques vient de la présence dans les polymères de groupes organiques tels que des hydrocarbures

La principale caractéristique de ce type d'hydrofuge est l'absence totale de film à la surface et de liens physiques avec le béton. Celui-ci pénètre au sein des pores, sans les boucher, et réagit chimiquement avec le béton. Cette pénétration est influencée par le poids moléculaire et le type de solvant utilisé. Plus la taille moléculaire est faible, plus l'agent actif peut pénétrer en profondeur.

Pour que les produits agisse, deux réactions chimiques doivent avoir lieu : La première est l'"hydrolyse" qui consiste à faire réagir les molécules de silicones avec l'humidité pour former des groupes silanoles. Ceux-ci réagissent eux même avec les groupes

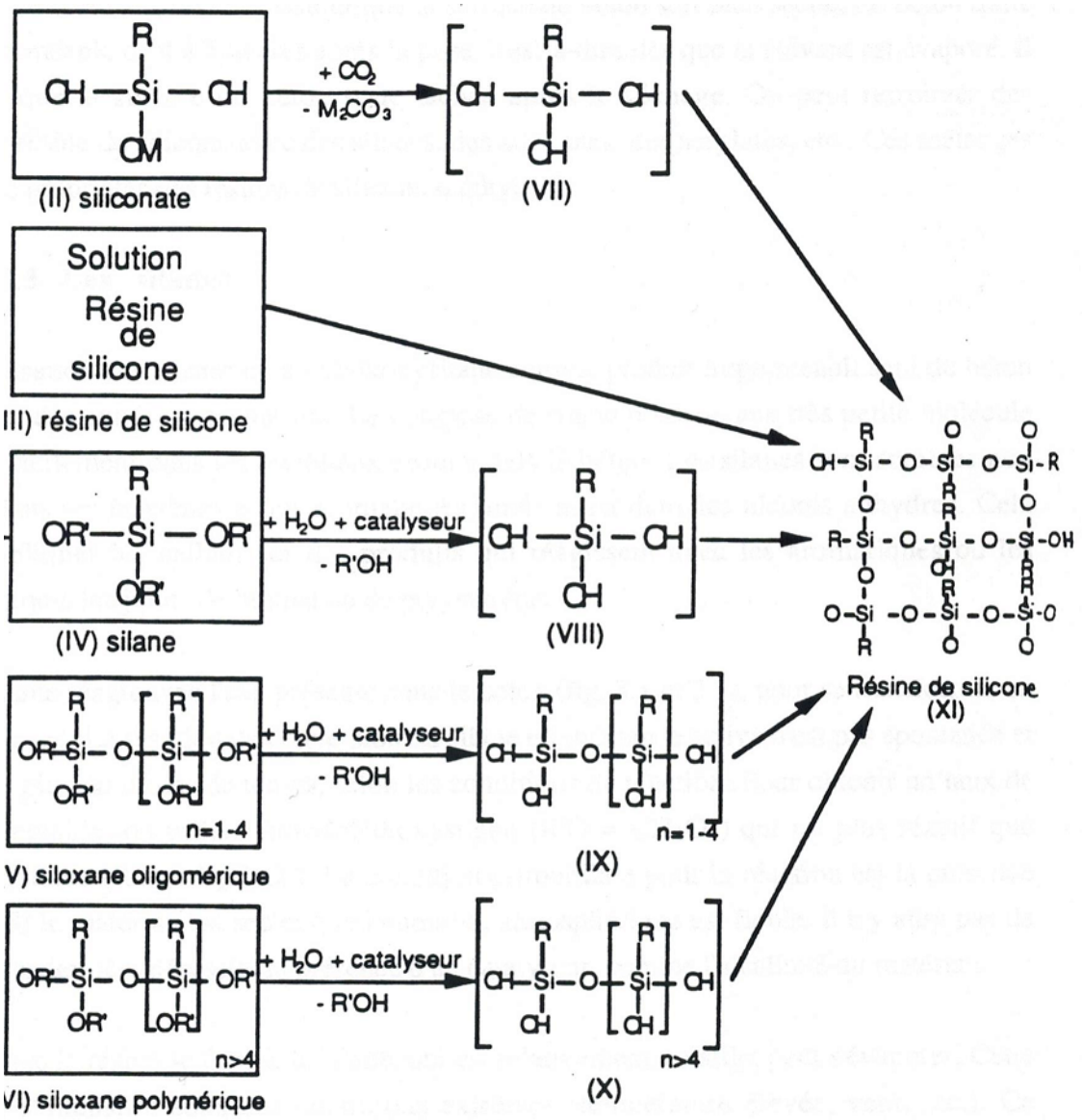
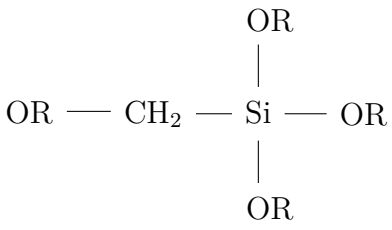


FIGURE 6 – Schématisation des réactions des hydrofuges de la familles des silicones [29]

hydroxyles (OH) béton lors de la deuxième réaction, appelée "condensation". Ces deux réactions pour l'ensemble des produits silicones sont illustrées à la figure 6. Mais pour une meilleure compréhension, l'ensemble du processus est schématisé pour le silane sur la figure 7.

Silicones monomères (ou silanes) [4] [20] [29]

Une molécule de silane est schématisé ci-dessous :



Molécule de silane avant hydrolyse) [35]

Ce produit est assez récent et est utilisé de manière industrielle depuis les années septante. La particularité de ce composé est de posséder de très petites molécules [7] qui lui permettent de pénétrer plus facilement au sein du substrat poreux.

Comme précisé précédemment, le silane se condense en réagissant avec l'eau pour former la couche de protection, la résine de silicone. La vitesse de condensation peut varier selon de nombreux paramètres, à savoir le type de silane utilisé [8] et les conditions d'humidité. En effet, cette réaction a obligatoirement besoin d'humidité et d'un catalyseur, qui fournit l'alcalinité, pour pouvoir se réaliser.

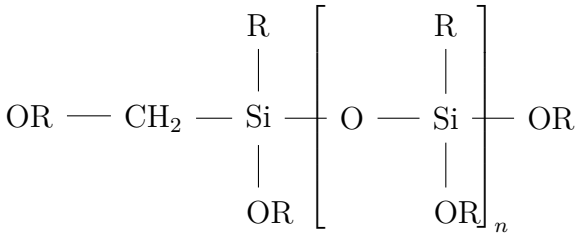
Lors de la formation de cette résine, une évaporation de silane peut se produire vu la volatilité de ce composant. La vitesse de condensation est augmentée dans le cas où l'évaporation est importante à cause de paramètres environnementaux comme le vent et la température. Ainsi, lors de mauvaises conditions, la disparition du silane par évaporation se réalise pendant une plus longue durée vu le ralentissement de la réaction. Pour contrer cela, la seule solution est d'utiliser des solutions à haute concentration en silane (20 à 40 %) qui compensent la perte.

Ainsi, outre les avantages tels que son grand pouvoir de pénétration, le silane est très dépendant des conditions climatiques lors de la mise en place. De plus, en cas de pluie sur des surfaces fraichement imprégnées, un lessivage n'est pas impossible.

Des combinaisons avec d'autres produits fournissent des produits de très bonne qualité.

Silicones oligomères (ou Siloxanes) [4] [20] [29] [47]

Une molécule de siloxane est schématisé ci-dessous :



Molécule de Siloxanes avant hydrolyse [35]

7. la tailles des molécules est de l'ordre de 10 à 15 Angstroms.

8. Par exemple, l'alkyléthoxysilane ($R'O = C_2H_5O^-$) est moins réactif que l'alkylméthoxysilane ($R'O = CH_3O^-$).

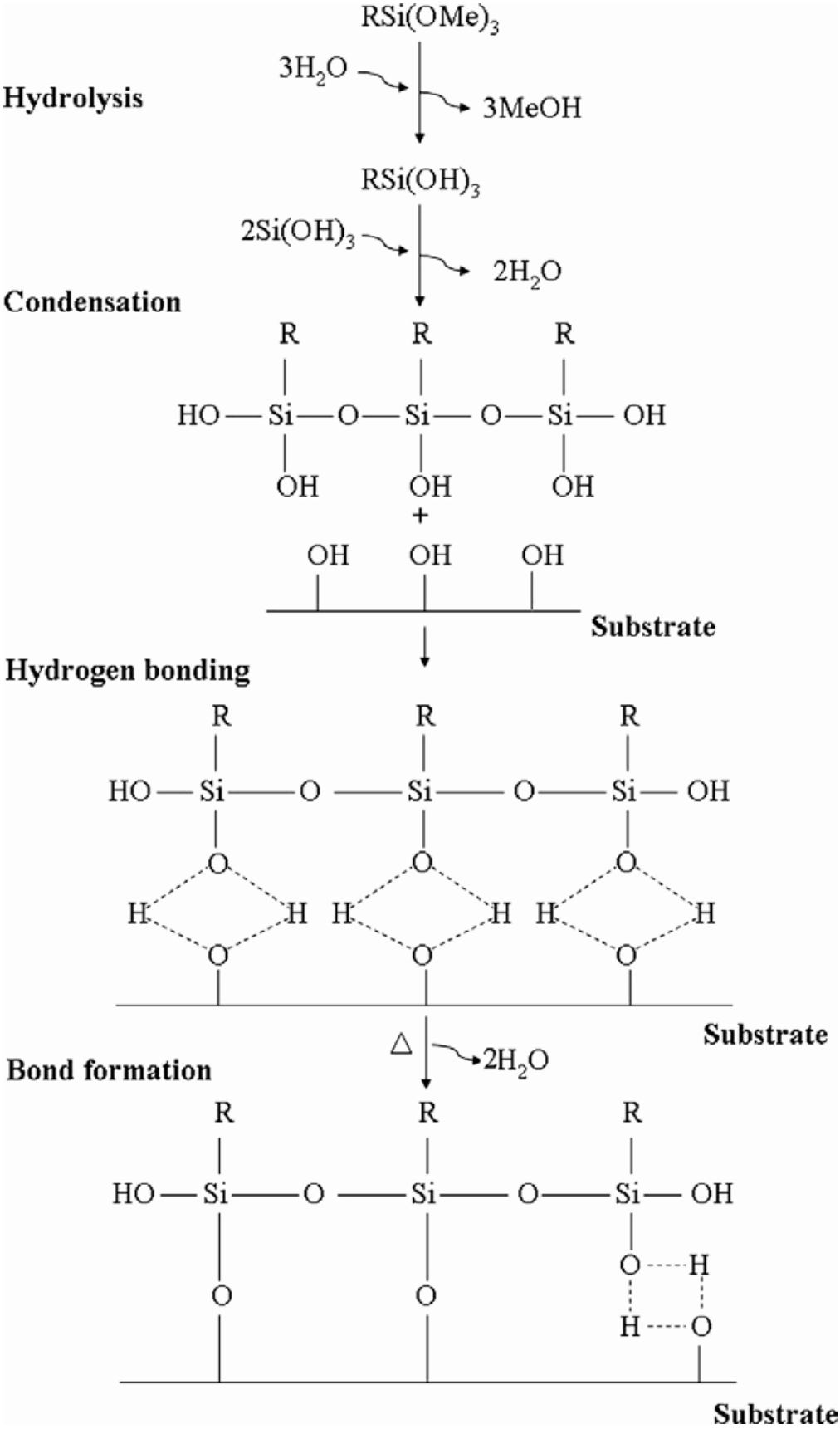


FIGURE 7 – Schématisation des réactions du silane (hydrolyse et condensation) [50]

Ce produit est obtenu en modifiant la composition du silane. On sait que l'ajout d'une faible quantité d'eau à un alkylalkoxysilane dissocie les groupes alkoly (R'O') et crée le siloxane qui possède des courtes chaînes et donc une structure moléculaire plus lourde.

Ce produit possède les avantages du silane tout en empêchant une évaporation aisée lors de la polymérisation. Ainsi, un gain d'agents réactifs est réalisé lors de la mise en solution vu que seulement 8 à 9% sont nécessaires (contre 20 à 40% pour le silane). Comme le silane, le siloxane a besoin d'humidité et d'un catalyseur pour pouvoir réagir. La principale différence est la possession d'un catalyseur par le siloxane, ce qui le rend totalement indépendant du substrat concernant cette problématique.

Un siloxane présentant de longues chaînes est également possible. Ceux-ci son appelés "siloxane polymérique" et agissent de manière similaire au siloxane précédent tout en ayant un poids moléculaire encore plus élevé.

Siliconates [29]

Produits fortement alcalins dilués dans l'eau et/ou l'alcool. Après son hydrolyse, il réagit avec le CO_2 pour créer une substance active qui protégera le béton.

Si ce produit est mis en place avec excès, une substance blanche se dépose. Cette substance provient de la création de carbonate de potassium lors de la polymérisation.[20] Pour éviter ce problème esthétique, l'usage de cet hydrofuge est de moins en moins fréquent pour être remplacer par les résines de silicone.

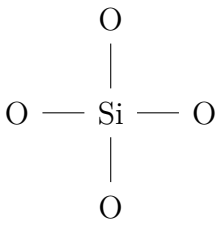
Résines de silicones [4] [29]

L'utilisation de ces résines s'effectue sous forme de solution contenant 5% de matières actives, obtenue après dissolution de celle-ci dans du solvant organique. La pénétration de cet hydrofuge dépend du solvant utilisé mais ne présente que peu de difficulté vu la faible taille des molécules.

Il faut compter 4 à 5 heures après la mise en place, sur une surface sèche, pour que l'effet de protection soit active. Cette couche hydrophobe laisse toujours passer la vapeur mais peut modifier l'aspect du substrat en tâchant celui-ci lors du séchage.

- Silicates

Une molécule de silicate est représentée ci-dessous :



Molécule de Silicate

Ce type d'agent est initialement sous forme concentrée. Une dilution doit être entreprise pour permettre une application efficace et assurer une bonne réaction chimique avec la chaux libre du béton.

Cette famille d'hydrofuges est reconnue efficace pour sa résistance aux abrasions pouvant agir sur la surface du béton.[4] Mais, selon R. Gagné, le pouvoir imperméabilisant peut être remis en question.[28]

Certaines références ([28], [30] et [42] [9]) assurent que le silicate de soude peut ne pas pénétrer le béton, car celui-ci réagit rapidement, lors de la mise en contact avec le béton, avec les composés calcium se trouvant à la surface et une couche durcie et souvent brillante se forme. Cette couche entrave le reste de l'application de pénétrer dans le béton. De plus, une efficacité réduite comparée aux hydrofuges silicones est également conclue. La seule solution pour atteindre un même niveau de réduction de la perméabilité est d'effectuer plusieurs passages d'imprégnation ou de le placer sur le béton à peine durci.[30]

- Huile de lin [4]

Hydrofuge d'origine naturelle (appelé également hydrofuge bio-sourcé) qui était un produit couramment utilisé avant l'arrivée de la famille des silicones.

Ce produit est présenté comme efficace et économique. Néanmoins, il ne serait présent que sur une faible durée au vu de sa sensibilité aux alcalis du béton. Ainsi, la durabilité relative à l'écaillage est inférieure à celles des autres hydrofuges. De plus, certaines études ont prouvées que, comparé aux autres hydrofuges, celui-ci était moins efficace au niveau de la perméabilité à l'humidité.

3.3.5 Durabilité

L'ensemble des essais le plus souvent testés dans les ouvrages de référence sont liés à trois des conditions principales d'un hydrofuge, à savoir, l'imperméabilité à l'eau liquide, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'arrêt de tous les agents agressifs extérieurs.

Les nombreuses recherches dont C. Abesque [4] fait référence dans sa thèse concluent que les silanes et les siloxanes (ou un mélange des deux) sont les meilleurs produits sur le marché. Ces différentes recherches concluent également que les caractéristiques du béton sont importantes dans l'efficacité du traitement. Pour augmenter la durabilité, la plupart des auteurs de ces recherches s'accordent à recommander une bonne préparation de surface avant application d'hydrofuge.

Ainsi, les auteurs s'entendent pour assurer la supériorité des silanes et siloxanes face aux autres produits existants et ajoutent que les caractéristiques du béton sont primordiales. Un très bon béton vaut mieux qu'un béton de mauvaise qualité protégé. Par contre, concernant, par exemple, l'écaillage, les recherches obtiennent des résultats allant d'une dégradation fortement accélérée de la surface à une protection efficace.[29][4]

Des recherches récentes [6] confirment la très bonne efficacité du silane et du siloxane sur l'absorption d'eau avec une variabilité diminuée au facteur e/c. Cette même conclusion est annoncée pour la perméabilité aux chlorures. De plus, l'application de traitements de surface retarde l'initiation de la corrosion. Mais, concernant le gel-dégel et l'écaillage, cette recherche souligne le fait qu'une application du traitement sur du béton humide ne fournira pas l'efficacité que celui-ci aurait du avoir sur du béton sec.

M.H.F. Medereiros[33] confirme l'efficacité face à la capillarité mais suggère une faible diminution de la perméabilité aux chlorures après traitement. Cette dernière

9. Cette source provient d'un site internet marchand. Un regard critique doit être présent. Sa présence est justifiée pour assurer une preuve pratique car l'explication rejoint l'ensemble des autres sources ou lectures annexes

affirmation est réfutée par J. de Vries et son équipe [22] qui ont effectué des tests sur sept hydrofuges contenant divers pourcentages de silane non dilué ou dilué soit dans l'eau soit dans un solvant organique. Ces différents essais peuvent être intéressant à analyser pour différencier les efficacités en fonction des concentrations de silane.

Sur un aspect plus visuel, S. Eyssautier-Chuine et son équipe [25] concluent, sur base d'une recherche expérimentale, qu'un hydrofuge dilué dans le l'eau n'a pas empêché la colonisation sur la pierre après six mois. Le cercle des partenaires du patrimoine [48] confirme également l'intérêt du solvant face à l'eau en assurant l'inexistence de couche résiduelle en surface et la meilleure pénétration de l'agent hydrofuge. M.H.F. Medeiros [32] confirme également le non respect de critères par les silane/siloxane dilués dans de l'eau et donc les meilleures performances de la dilution dans des solvants. Cette recherche confirme également la bonne efficacité pour la capillarité, tandis que la pénétration sous pression est beaucoup moins diminuée.

P.A.M Basheer et son équipe [7] effectue, en 1997, un résumé de l'ensemble des études et tests qui ont été réalisés sur les familles d'hydrofuges existants. Malgré un grand nombre d'analyses, leurs conclusions restent l'existence d'une faible connaissance de la durabilité réelle et à long terme de certains produits modernes.

En conclusion, les silanes et siloxanes sont, sans conteste, les meilleurs hydrofuges présents sur le marché actuellement. L'utilisation de ceux-ci dilués dans du solvant est préférée par rapport à une dilution dans de l'eau qui propose un produit moins pénétrant et plus visqueux. Au niveau de la durabilité à des vieillissements, celle-ci est confirmée à l'unanimité pour une barrière contre l'eau entrant par capillarité (parois inclinée et eaux de pluie). Par contre, en ce qui concerne l'intrusion des chlorures et la pénétration d'eau sous pression, les résultats sont plus mitigés. Finalement, concernant l'écaillage, cette dégradation dépendant de nombreux facteurs, les recherches n'arrivent pas à tomber en accord.

4 Méthodologie du travail

Avant de procéder à la réalisation des échantillons, aux vieillissements et aux essais nécessaires, une réflexion à leur propos doit être effectuée. Comme précisé lors du chapitre 2.1, un choix a été entrepris sur une large gamme de vieillissements, essais et hydrofuges disponibles. Ainsi, les deux premières sections de ce chapitre apportent des précisions et suppléments sur l'avant-projet.

Les sections suivantes apporteront les explications sur les différentes manipulations de laboratoire et sur l'organisation de l'étude.

4.1 Choix des hydrofuges

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.3.3, malgré l'existence de nombreux hydrofuges, seuls les traitements de masse et imprégnations pénétrantes semblent présenter une résistance aux diverses attaques climatiques sur une période de quelques années. Les hydrofuges superficiels sont donc directement mis à l'écart de cette étude, et voulant étudier uniquement la durabilité des bétons d'ouvrages déjà existants, le choix se dirige automatiquement vers des hydrofuges pénétrants.

Partant de ce choix, des contacts ont été réalisés avec des entreprises proposant de tels produits pour finalement obtenir trois hydrofuges différents.

Le premier hydrofuge sélectionné est l'"**Antipluviol S**" produit par la société "**MAPEI**". Celui-ci est un liquide incolore à base de résine siloxanique en phase solvant comme inscrit sur la fiche technique du produit en annexe, page 92.

Le deuxième hydrofuge est l'"**Masterseal 303**" produit par la société "**BASF**". La fiche technique de celui-ci (annexe en page 95) le définit comme un alkyl alkoxy silane n'utilisant aucun solvant. La particularité de ce produit est donc d'être, du moins à première vue, respectueux de l'environnement.

Le troisième hydrofuge est un silicate de soude utilisé au sein des laboratoire de l'ULg dont la fiche technique ne fournit aucune indication quant à son utilisation pour ce type de traitement. Ce produit provient de la société "SILMACO NV" et est un mélange chimique d'oxyde de silicium, d'oxyde de sodium et d'eau. La formule chimique de ce silicate est $Na_2O.xSiO_2 + H_2O(x > 3,2)$.

Lors de la mise en place de ce produit, il présente, comme prédit par la fiche technique, un aspect visqueux et reste visuellement en surface en formant une couche translucide qui recouvre les pores. Cette observation confirme les suppositions proposées par plusieurs références et expliquées, précédemment, dans l'état de l'art (cf chapitre 3.3.4).

Un quatrième hydrofuge, bio-sourcé, aurait dû apparaitre dans ce travail. Malheureusement, n'ayant pas réussi à me procurer ce produit, cet hydrofuge a été abandonné pour cette étude. Néanmoins, une comparaison ne pourrait qu'être constructive pour ce sujet de recherche.

4.2 Choix des vieillissements et des essais

4.2.1 Vieillissements

Ce choix a prioritairement été effectué pour essayer de se rapprocher au maximum des dégradations en conditions climatiques normales comme expliqué au chapitre 3.1. Un certain nombre de vieillissements a donc été fixé directement : Gel-Dégel, Carbonatation, Chocs Thermiques, Cycles humidification, exposition au UV et Brouillage Salin. Ce dernier vieillissement ne semble pas être primordial vu qu'un TFE réalisé à l'ULg en 2009 étudie cette problématique de la dégradation dans un environnement marin (cf [8]), qui on le sait est principalement constitué d'un air humide chargé en sel qui est modélisable en laboratoire par un brouillard salin.

De plus, notons que l'essai de carbonatation est en étroit lien avec les tests effectués au CSTC. Pour rappel, le CSTC analyse l'influence des hydrofuges sur la réduction ou l'arrêt de la corrosion dans un béton carbonaté.

4.2.2 Essais

Les différents essais sélectionnés ont été choisis pour pouvoir vérifier la performance des hydrofuges sur base de différents paramètres. Ainsi, nous avons choisi des essais pouvant se révéler primordiaux pour la viabilité d'un béton au sein d'un ouvrage historique.

Les essais sont :

- Perméabilité à la vapeur d'eau : comme expliqué au chapitre 3.3, les hydrofuges ne doivent agir que sur l'eau liquide. Cet essai vérifie cette caractéristique générale des hydrofuges. Le but de cet essai est donc de créer une différence d'humidités relatives entre lesquelles nous plaçons le béton. Ainsi, les transferts d'humidité à travers celui-ci révèlent la perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon et de son traitement.

- Perméabilité aux chlorures : ce test est primordial pour étudier la durabilité de la protection du béton armé à la corrosion par les chlorures (piqûres).

- Capillarité : le béton traité par hydrofugation doit avoir, théoriquement, une absorption par capillarité inférieure à un béton de référence. Par conséquent, conserver l'efficacité des hydrofuges assure une faible présence d'eau liquide pénétrant le béton par capillarité.

- Test Lab : cet essai est uniquement utilisé pour déterminer le changement de teinte du béton déjà hydrofugé en fonction des vieillissements. Il étudie seulement la durabilité esthétique.

Ce test se base sur le modèle CIE LAB (ou L*a*b*) proposé par la Commission Internationale de l'Éclairage en 1976. Ce système essaie de représenter la vision humaine grâce à un espace tridimensionnel présenté à la figure 8. Cette figure illustre bien le principe de ce modèle qui repose sur des couleurs antagonistes. Ainsi, l'axe des L* variant de 0 (noir) à 100 (blanc) caractérise la luminance. Les deux autres valeurs (a* et b*) sont représentées sur un même plan par deux axes perpendiculaires. a* varie le long de l'axe vert/rouge en étant maximum pour la couleur rouge, tandis que b* varie le long de l'axe bleu/jaune avec le maximum pour la couleur jaune.[25][35]

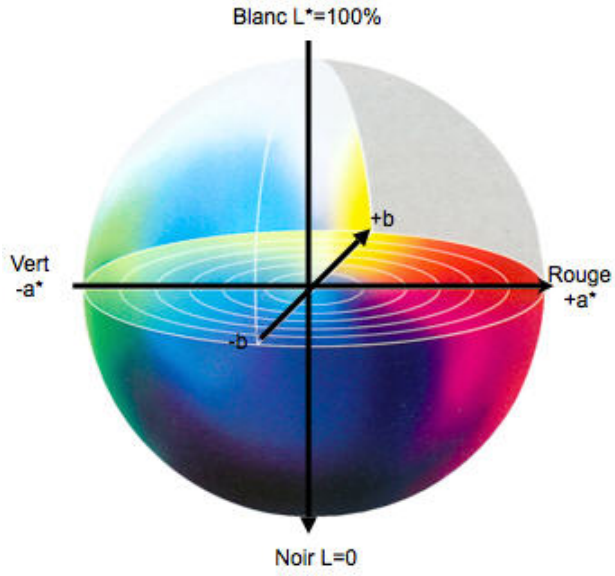


FIGURE 8 – Modèle CIE LAB ©*Colour Confidence / Bridge Europe*

- Pénétration de l'hydrofuge : grâce à un test de la goutte d'eau, les pénétrations des hydrofuges peuvent être mesurées. Cet essai nous permet de déterminer cette caractéristique du traitement qui est une des principales influences participant à la durabilité de celui-ci.

- Profondeur de carbonatation : vu l'utilisation d'un vieillissement par carbonatation, cet essai devait obligatoirement être employé. De plus, celui-ci constitue un résultat préliminaire à l'étude effectuée au CSTC.

Bien entendu, comme il est déjà précisé précédemment, réaliser l'ensemble des essais pour l'entièreté des vieillissements n'est pas pertinent. Ainsi, un choix sur les relations entre essais et vieillissements a été effectué. Ces choix sont représentés dans le tableau 1.

		Vieillissement					
		Aucun	Chocs Therm.	Carbo.	Gel-Dégel	Humid.	UV
Essais	Vapeur d'eau	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	Prof. hydrof.	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	Prof. Carbo.			OUI			
	Capillarité	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	Perméa. chlor.	OUI	OUI				OUI
	L*a*b*		OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	MEB	OUI		OUI	OUI		OUI

TABLE 1 – Relations entre les vieillissements et les essais lors de cette recherche

4.3 Fabrication des échantillons

En tout, pour respecter le cadre initial, sept gâchées ont été réalisées Mais, comme mentionné dans le chapitre précédent, de nombreuses modifications ont été apportées au projet et de nombreux échantillons n'ont donc pas été utilisés. Des essais supplémentaires peuvent être exécutés dans les prochaines années sur des échantillons de béton presque identique.

La composition utilisée lors de ce travail est obtenue à partir de la norme NBN EN 1766 [10].

La première gâchée a été effectuée le 28 novembre 2012 à la station expérimentale du CSTC à Limelette. Celle-ci a été utilisée pour couler cinq dalles pourvues de barres à béton et de "potentiomètre" pour déterminer de manière électrique la corrosion des ses armatures. Trois cubes et trois dalles ont également été coulés pour déterminer la résistance du béton à la compression (sa classe) et l'avancée de la carbonatation.

Après cette gâchée à Limelette, six autres ont été réalisées au laboratoire de l'ULg entre le 27 décembre 2012 et le 24 janvier 2013 avec une composition similaire à celle utilisée au CSTC. Chacune de ces gâchées était composée de 5 dalles (40x40x8cm) et de 3 cubes (15x15x15cm).

L'ensemble des échantillons a subi une cure de 28 jours minimum en chambre humide (90% d'HR) avant d'être séchés dans des conditions standards de laboratoire (20 °C et 60 % d'HR environ). Après ces 28 jours, pour chaque gâchée, les cubes ont été testés tandis que les dalles sont restées en chambre humide jusqu'au séchage commun. Outre cette fabrication et cette cure des dalles de bétons, celles-ci ont été sciées en plus petits carrés pour assurer un nombre suffisant d'échantillons pour la suite de l'étude.

L'ensemble des dates de coulage, démoulage, sciage et mise en séchage est repris sur le tableau 2. La principale explication pour la variabilité de ces dates lors de l'ensemble des étapes est due aux disponibilités limitées que je possédais pour effectuer les manipulations. Ainsi, les coulages ont été fortement séparés à cause des examens du mois de janvier et des fermetures du laboratoire. En ce qui concerne les découpes, la réalisation de celles-ci a dû être étalée en deux jours vu la réalisation de mon stage durant cette période.

Gâchées	Coulage	Test compression	Mise au séchage	Sciage
Gâchée 1	27/12/2012	24/01/2013	22/02/2013	25/02/2013
Gâchée 2	28/12/2012	25/01/2013	22/02/2013	25/02/2013
Gâchée 3	03/01/2013	31/01/2013	22/02/2013	25/02/2013
Gâchée 4	17/01/2013	13/02/2013	22/02/2013	22/02/2013
Gâchée 5	22/01/2013	19/02/2013	22/02/2013	22/02/2013
Gâchée 6	24/01/2013	21/02/2013	22/02/2013	22/02/2013

Table 2 – Dates des différentes étapes de fabrication

4.3.1 Tests sur béton frais

Lors de chaque gâchée, des tests ont été effectués sur le béton frais juste après le malaxage en fonction des normes correspondantes. Ces différents essais permettent de déterminer si les caractéristiques de toutes les gâchées sont plus ou moins identiques.

1. Affaissement au cône d'Abrams

   Cet essai consiste à déterminer la consistance de béton frais.

   Pour effectuer celui-ci, un cône métallique doit être rempli de béton en 3 couches successives. Chacune de ces couches doit être piquée à l'aide d'une barre métallique 25 fois. Ensuite, après le retrait du cône, la mesure de l'affaissement du béton peut être mesurée et enregistrée. Certaines particularités doivent néanmoins être prises en compte, comme l'annulation de l'essai en cas de cisaillement ou d'éboulement lors de l'affaissement. [13]

   Les résultats pour l'ensemble des gâchées sont donnés dans le tableau 3

2. Masse volumique du béton frais

   Pour obtenir la masse volumique du béton frais, l'essai à effectuer consiste uniquement à remplir un récipient de volume et de masse déterminés. Après pesée du récipient plein, le résultat est simplement donné par la formule (2) [14].

$$\frac{\text{Masse}_{\text{totale}} - \text{Masse}_{\text{récipient}}}{\text{Volume}} \tag{2}$$

   Les résultats obtenus peuvent être consultés dans le tableau 3

Gâchées	Affaissement [cm]	Masse Volumique $[\frac{Kg}{m^3}]$
Gâchée 1	185	2333,5
Gâchée 2	190	2367,9
Gâchée 3	180	2277,25
Gâchée 4	140	2387,6
Gâchée 5	140	2363,8
Gâchée 6	150	2342,1

Table 3 – Caractéristiques concernant le béton frais

4.3.2 Tests sur béton durci

1. Masse volumique du béton durci

   La réalisation de cette mesure a été exécutée en essayant de se rapprocher au maximum à la norme EN 12390-3. Néanmoins, pour des questions de rapidité et de simplification, la pesée n'a pas eu lieu dans trois états du béton différents, mais uniquement à la sortie de la chambre humide dans laquelle la cure a été effectuée. Ensuite, la formule (3) a été utilisée pour déterminer les différentes

masses volumiques [15]. Finalement, pour obtenir des résultats plus cohérents, une moyenne entre la masse volumique des trois cubes d'une gâchée a été calculée. Le tableau 4 reprend l'ensemble des résultats

$$D = \frac{m}{V} \tag{3}$$

2. Résistance à la compression

   De manière similaire à l'essai précédent, celui-ci a été effectué sur trois cubes pour chaque gâchée et une moyenne des résultats a été calculée [16]. Ceux-ci sont repris dans le tableau 4

Gâchées	Masse Volumique $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Résistance à la compression $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Gâchée 1	2421	40,2
Gâchée 2	2395,8	39,1
Gâchée 3	2411,5	39,2
Gâchée 4	2423,9	41,1
Gâchée 5	2418,9	39,7
Gâchée 6	2423,9	38,4

TABLE 4 – Caractéristiques concernant le béton durci

-Choix du béton -Gâchée (CSTC et ici) -Test Béton frais -Test béton durci

4.4 Classement des échantillons

Comme précisé précédemment, ce travail se base sur de nombreux essais et vieillissements. Un nombre élevé d'échantillons est donc important pour pouvoir effectuer l'ensemble de l'étude. Devant réaliser cinq vieillissements, le choix a été pris de lier chacun de ceux-ci à une gâchée pour que la faible variation de qualité du béton n'influence pas les résultats entre les hydrofuges testés.

Pour assurer une variabilité minimale des résultats lors de l'augmentation du nombre d'échantillon, chaque dalle a été coupée en 4 mini-dalles (20x20x8 cm) et liée à un hydrofuge particulier. Néanmoins, suite à la réduction du nombre d'essais, de vieillissements et d'hydrofuges, un choix des échantillons a été réalisé en sélectionnant ceux ayant le meilleur aspect visuel tout en gardant le lien fixé précédemment entre les gâchées et les vieillissements.

Finalement, un classement des échantillons utilisés a été réalisé et ainsi, un suivi complet de ceux-ci peut être effectué vu leurs rattachements aux caractéristiques des gâchées énoncées au chapitre 4.3. Ce classement est renseigné dans le tableau 20 en annexe, page 91.

Comme nous l'observons, chaque échantillon possède une référence à trois chiffres. Le premier (entre 1 et 6) se rapporte à la gâchée correspondante et aux caractéristiques

de celle-ci. Le deuxième (entre 1 et 5) se réfère à la dalle de laquelle provient cet échantillon. Tandis que le troisième (entre 1 et 4) représente la mini-dalle en elle-même.

Certaines remarques doivent néanmoins être apportées à ce classement :

- Un échantillon de la gâchée 2 a servi pour un vieillissement relatif à la gâchée 4 par erreur. Cette erreur provenant du fait que les vieillissements "gel-dégel" et "chocs thermiques" sont fort proches étant donné que les chocs thermiques subissent des cycles de gel-dégel également.

- Un échantillon de la gâchée 6 a été supprimé avant la mise en vieillissement (UV) à cause d'une chute de celui-ci et d'une mauvaise réaction de l'hydrofuge lors de la découpe préliminaire.

4.5 Organisation de l'étude

4.5.1 Calendrier

La première étape de l'organisation d'une telle étude est la création d'un planning à respecter le mieux possible pour pouvoir effectuer l'ensemble des tâches nécessaires. Toutefois, les échéances ont dû être modifiées en fonction des aléas intervenus durant les mois de ce travail. Seul le planning final, comme il a réellement été suivi, est présenté ci-après.

Dans le cas d'une étude comme celle-ci, avant de créer un planning, il est important de connaitre les méthodes et les durées nécessaires pour chaque essai et vieillissement. Ainsi, une bonne adéquation des étapes en laboratoire peut avoir lieu. De plus, étant dépendant de l'ouverture des laboratoires de l'ULg et de la présence des techniciens, une bonne prédiction de ce travail ne pouvait être que bénéfique.

Ne pouvant commencer avant la fin de mon stage, la préparation des échantillons a commencé début mars. Celle-ci a consisté à appliquer les hydrofuges sur les échantillons et à recouvrir d'époxy certains d'entre eux pour la réalisation de certains vieillissements qui ont pû être lancé juste après cette préparation.

Cependant, la mauvaise réaction du silicate de soude, lors de la préparation d'un échantillon pour les UV, a induit le retard de cette mise en vieillissement pour pouvoir ré-appliquer une couche de silicate de soude sur l'ensemble des échantillons concernés par cet hydrofuge. Les vieillissements n'ont donc réellement débuté que le 18 mars 2013.

En attendant que ces vieillissements agissent sur les échantillons, j'ai pu procéder à la préparation des quatre mini-dalles pour les essais initiaux. Par simplicité, le choix a finalement été de réaliser les essais sur les bétons non vieillis en même temps que les essais revenant de vieillissements. Ainsi, seuls les hydrofugations, les carottages et les recouvrements par époxy ont été exécutés jusqu'à mi-avril sur ces quatre échantillons non vieillis. Les vieillissements se sont alors terminés et les carottages et préparations avec époxy ont pu avoir également lieu sur ces échantillons.

Les essais ont pu démarrer à partir du 15 avril 2013 et se sont terminés, pour certains, le 16 mai 2013.

4.5.2 Application des hydrofuges

L'application des hydrofuges a été réalisée avec le même mode opératoire pour l'ensemble de ceux-ci et pour toutes les couches. Ainsi, ces traitements ont été appliqués au pinceau même si la pulvérisation avec un pistolet à haute pression est la technique privilégiée par MAPEI. Cette différence de méthode pourra potentiellement apporter des explications sur certains résultats.

Les particularités sur la mise en place des traitements relatifs à chaque essai et chaque vieillissement seront précisées dans les chapitres 4.5.3 et 4.5.4. Néanmoins, en ce qui concerne l'Antipluviol S et le Masterseal 303, il est utile de préciser que les imprégnations d'hydrofuges ont été réalisées en tenant compte des quantités prescrites par les fiches techniques des produits. Pour le silicate de soude, l'hydrofugation n'étant pas son utilisation primaire, la fiche technique correspondante n'a fourni aucun renseignement. Ce traitement a donc été, au début, réalisé par tâtonnement. Après la couche supplémentaire qui a dû être rajoutée, la décision a été prise de considérer l'hydrofugation au silicate de soude terminée lorsque l'ensemble des pores du béton (bulles, ...) serait recouverts et bouchés.

Il est également important de noter que la face des échantillons qui sera étudiée est le "fond de moule". Cette surface est celle qui était en contact avec le bas du moule lors du coulage. Dans un cas réel, elle est la partie qui, sur un bâtiment, devra être en contact avec les éléments naturels. Ce "fond de moule" est habituellement constitué de pâte de ciment avec très peu de granulats. C'est pour cette cette raison que cette face parait plus "homogène" que l'ensemble des autres faces. En effet, les faces sciées présentent l'ensemble des détails du béton (granulats,...) ; la face supérieure est fortement rugueuse à cause de la toile de jute placée lors de la prise du béton ; et les faces latérales sont abimées à cause des défauts du moule.

4.5.3 Explication des différents vieillissements

En premier lieu, il est important d'indiquer que j'ai toujours essayé de me rattacher à la norme en vigueur concernant le vieillissement utilisé. Malheureusement, n'ayant pas forcément le temps ou la possibilité de suivre à la lettre ces normes, les différences et hypothèses acceptées durant les manipulations sont précisées au cas par cas. Remarquons tout de même que ce travail consiste principalement en une comparaison de différents échantillons ayant subis exactement les mêmes vieillissements et que l'écart entre la norme et la manipulation réellement effectuée ne devrait pas poser de problème lors de l'étude des résultats.

- Gel-Dégel

Préparation

Les échantillons ne sont hydrofugés que sur la face "fond de moule". Ensuite, pour obtenir des résultats concernant uniquement l'hydrofuge, le reste de l'échantillon est recouvert de résine époxy appliquée en deux couches. Finalement, pour assurer une imperméabilité totale des surfaces non-traitées, un passage avec du silicone sert à colmater les éventuelles bulles d'air apparues à travers la résine époxy. Cette couverture est illustrée sur la figure 9

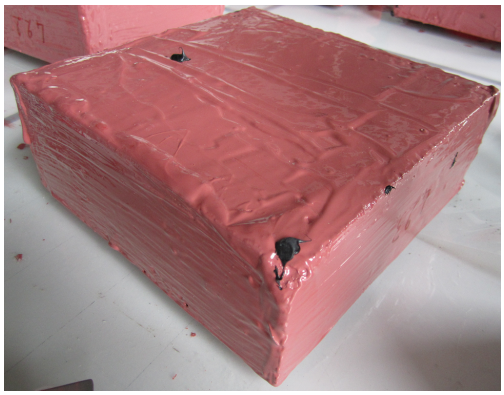



FIGURE 9 – Recouvrement par de l'époxy des échantillons pour le gel-dégel

Mode opératoire

Un cycle Gel-Dégel dure quatre heures et consiste à immerger l'échantillon pendant deux heures dans de l'eau à -15°C et ensuite, à le plonger deux heures dans de l'eau à température ambiante (+- 20°C). Bien entendu, certaines recommandations doivent être prises en compte. Ainsi, l'eau à -15°C doit être salée pour pouvoir rester à l'état liquide et un contrôle de cette salinité doit théoriquement être effectué (ce qui n'a pas été le cas). De plus, ne pouvant assurer des cycles continus (Week-end, nuit, indisponibilité, ...), les échantillons ont été placés, durant ces périodes, dans l'eau à température ambiante. [11]

Dans le cadre de ce travail, 20 cycles ont ainsi été effectués entre le 18 mars 2013 et le 11 avril 2013 avec une cadence représentée sur le tableau 5.

Date	Nbr de cycles		Date	Nbr de cycles
18-mars	2		28-mars	2
19-mars	1		8-avr	2
25-mars	1		9-avr	2
26-mars	2		10-avr	3
27-mars	2		11-avr	3

TABLE 5 – Dates des cycles Gel-Dégel

Particularités

La réalisation des cycles de Gel-Dégel est également effectuée pour le vieillissement par chocs thermiques comme nous le verrons. Les particularités énoncées ci-dessous concernent donc les deux vieillissements.

Comme attendu, les bétons n'ayant pas été traités se dégradent relativement vite ce qui leur est néfaste car, après les 20 jours, ils n'ont pratiquement plus de pâte de ciment en surface.

En ce qui concerne les échantillons traités, considérant certaines petites altérations du béton vers la fin des cycles comme négligeables, seules les dalles traitées au silicate de soude ont subis de fortes altérations. Un des deux échantillons (2-1-2) a commencé à

se dégrader fortement [10] tandis que l'autre se dégradait également, mais plus lentement. La décision de retirer la dalle 2-1-2 a été prise après le $4^{ème}$ cycle.

- Chocs Thermiques

Préparation

Comme précisé lors du chapitre précédent, les chocs thermiques sont appliqués uniquement après que les échantillons aient subis les cycles de Gel-Dégel. Ainsi, la préparation avant cette première étape est la même que pour le vieillissement Gel-Dégel et aucune autre manipulation n'a été effectuée entre les cycles et les chocs thermiques.

Mode opératoire

Les échantillons sont mis sous une source de chaleur (ampoules infra-rouge) pendant 5h45 pour ensuite être aspergés d'eau à température ambiante pendant 15 minutes. l'installation s'exécute comme illustré à la figure 10. L'exécution de tels cycles de manière répétitive provoque des chocs thermiques pouvant altérer le béton.

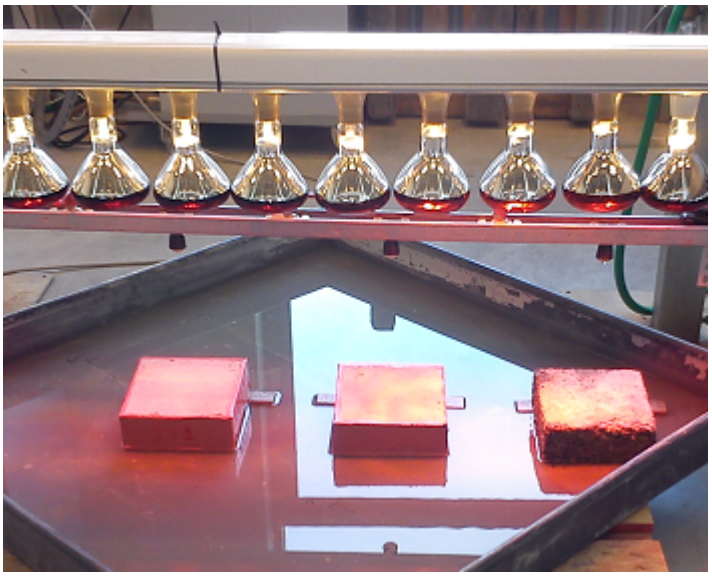


FIGURE 10 – Installation des dalles lors des chocs thermiques

Particularités

Aucun échantillon traité au silicate de soude n'a subi ce vieillissement. Par sécurité, il a été choisi de ne pas risquer de dégrader encore plus la seule dalle restante du Gel-Dégel pour pouvoir au moins effectuer des essais sur celle-ci.

- UV

Préparation

Seule la face de "fond de moule" qui sera exposée aux UV est traitée par les hydrofuges.

L'utilisation de l'appareillage pour effectuer cette manipulation n'accepte pas des dalles de huit centimètres d'épaisseur (une des dalles est tombée durant la mise en place initiale). Grâce à un sciage l'épaisseur a donc été ramenée à trois centimètres.

10. Retrait à 70% de la pâte de ciment sous l'hydrofuge après seulement trois cycles

Mode opératoire

Les échantillons sont placés sur une structure permettant d'exposer la face traitée à des tubes UV. Ce matériel assure des cycles de 4h d'exposition aux UV pour être suivi de 4h de condensation. Nous avons effectué ces cycles durant 700 heures entre le 18 mars 2013 et le 16 avril 2013.

Particularités

Lors de la réduction de l'épaisseur (sciage), un des hydrofuges (silicate de soude) a subi des dégradations ("peau de crocodile") et l'échantillon correspondant a été remplacé.

Le silicate de soude a réagi lors du vieillissement en disparaissant et en se recroquevillant sur lui-même. Aucune conclusion ne peut être portée à ce niveau de l'étude sur l'explication de ce phénomène.

- Cycles d'humidification

Préparation

Pour ce vieillissement, l'ensemble des faces des échantillons doit être hydrofugées de la même façon. Ainsi, la dalle entière peut être placée dans des environnements à humidité relative fixée.

Mode opératoire

La manipulation consiste uniquement à faire subir des cycles entre deux humidités relatives différentes. Le changement entre ces deux environnements est conditionné par la stabilisation de la masse des échantillons concernés. Pour cela, une pesée régulière et précise des dalles permet de tracer les courbes caractéristiques de ce vieillissement. Si de l'eau apparait sur le béton lors de la pesée dans l'environnement à haute HR, il est nécessaire d'éponger avec un torchon humide pour ne pas fausser l'étude.

Pour ce travail, les deux humidités relatives sélectionnées sont 90% et 50%. De plus, ne pouvant se permettre d'attendre la stabilisation totale de la masse et pour pouvoir au moins effectuer deux cycles, les changements entre les deux environnements ont été effectués dés le début du ralentissement dans la variation de masse. Finalement, un cycle durait environ 15/20 jours et l'ensemble du vieillissement a été effectué entre le 18 mars 2013 et le 16 avril 2013.

Particularités

Les échantillons traités au silicate de soude ont réagi lors de la première mise en environnement à 90% d'HR en produisant une substance blanche sur l'ensemble des surfaces. Cette substance est certainement ... (voir source sur les hydrofuge CSTC ou patrimoine). Lors de la suite du cycle (environnement à 60% d'HR), la substance blanche s'est craquelée et pouvait se retirer par simple frottement et dévoilait le béton sans protection. L'intérêt de suivre le vieillissement pour ces échantillons n'a pas paru utile et ceux-ci ont donc été retirés du processus.

- Carbonatation [46]

Préparation

Pour ce vieillissement, l'espace au sein de la chambre étant limitée, une découpe des échantillons doit initialement avoir lieu. Ainsi, une dalle de 20x20x8 cm est découpée en deux parallélépipèdes de 20x8x8 cm, dont un seul servira pour ce travail.

Ensuite, ces petits échantillons sont intégralement imprégnés d'hydrofuge pour pouvoir les placer dans un environnement de carbonatation.

Mode opératoire

Ce vieillissement est effectué en plaçant les échantillons dans une chambre proposant une atmosphère chargée en CO_2. Cette chambre assure une concentration en CO_2 de 50 % et une humidité relative de 60 % en permanence. Pour ce travail, le temps de cure a été fixé à 1 mois entre le 18 mars 2013 et le 18 avril 2013.

Particularités

Aucune réaction visuelle ne s'est produite durant ce vieillissement contrairement à l'ensemble des autres.

4.5.4 Explication des différents essais

Comme précisé au chapitre 4.5.3, j'ai également essayé de raccrocher chaque essai à la norme en vigueur et relative à celui-ci. Les mêmes remarques que celles énoncées précédemment peuvent être citées pour les essais effectués.

En fonction des vieillissements, les échantillons doivent subir un nombre variable de découpes et de carottages de huit centimètres de diamètre.

- Perméabilité à la vapeur d'eau selon la norme ISO 7783 [39]

Préparation

Pour la réalisation de cet essai, une carotte de 3 cm d'épaisseur doit être prélevée dans l'échantillon. Ensuite, étudiant la perméabilité à travers la surface traitée et comme l'illustre la figure 12, deux couches de résine époxy ont été appliquées sur la face latérale de la carotte tandis que les deux faces circulaires sont laissées à nu. Il est important de procéder aux essais uniquement lorsque l'échantillon est sec et propre.

Mode opératoire

Pour réaliser ce montage, une coupelle en verre contenant une solution de KNO_3 est utilisée pour créer la différence d'humidité relative qui atteint la valeur de 93,2%.

L'échantillon est placé sur la coupelle avec sa face traitée dirigée vers la solution. Pour assurer une bonne étanchéité de ce montage, une couronne de cire est consciencieusement appliquée entre l'échantillon et la coupelle. Le montage final est représenté à la figure 11.

Finalement, une pesée quotidienne [11] ou régulière fournit la courbe caractéristique de ce type d'essai qui représente la perte de masse de l'ensemble du montage.

- Perméabilité aux chlorures

Habituellement, ce test est réalisé en appliquant deux coupelles en verres de chaque côté d'un échantillon circulaire d'un largeur de quelques centimètres. Le côté de l'échantillon et le joint avec les coupelles sont réalisés en époxy. Dans une des deux coupelles est placée une solution de NaOH, tandis que dans l'autre se trouve une solution de NaCl. Le but de cet essai est de mesurer les concentrations dans chacune des coupelles et de déterminer le transfert à travers l'échantillon. Ce test demande plus de 90 jours pour être réalisé entièrement. N'ayant pas cette possibilité, nous nous sommes tournés

11. Cette pesée se déroule grâce à une balance précise au microgramme



FIGURE 11 – Coupelle pour l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau

vers un essai accéléré de pénétration des chlorures qui ne demande que six heures par échantillon.

Cet essai accéléré se base prioritairement sur un mémoire de 2008 [44] et une norme ASTM C 1202-97 [26].

Préparation

Cet essai s'effectue sur des carottes de 8 cm de diamètre et de 5 cm d'épaisseur. Comme illustré sur la figure 12, les faces latérales sont enduites de deux couches de résine époxy pour éliminer l'influence de ces faces. Finalement, avant le test, l'entièreté des échantillons est plongée pendant une semaine dans une solution de NaOH pour que ceux-ci soient saturés lors du début de l'essai.



FIGURE 12 – Recouvrement des échantillons
Gauche : Vapeur d'eau ; Centre : Diffusion des chlorures & Droite : Capillarité

Juste avant de lancer la procédure, le montage de l'équipement doit avoir lieu. Ce dernier consiste en deux cellules possédant chacune un réservoir et une grille reliée à des bornes électriques. Placé entre les deux cellules, l'échantillon entre en contact avec les solutions contenues dans les réservoirs grâce aux deux grilles. Ces solutions, sont d'un côté, du NaCL 3%, et de l'autre côté, du NaOH 0,3N. Afin d'éviter les fuites et bien centrer l'échantillon, un joint en mousse est placé de chaque côté de l'échantillon dans une encoche circulaire prévue et un serrage des deux cellules est opéré grâce à 4 vis.

Finalement, le montage électrique, comme représenté à la figure 14, peut avoir lieu. Pour cela, nous avons besoin d'un générateur de 60V, d'un ampèremètre et d'une série de câbles. Un circuit est créé en branchant la borne positive du générateur sur le compartiment de NaOH et la borne négative sur le compartiment de NaCl. L'ampèremètre est placé entre cette dernière borne et la cathode (NaCl) pour pouvoir mesurer le courant transitant au sein du système.

La variation théorique du courant à travers la cellule en fonction du temps est représentée à la figure 13

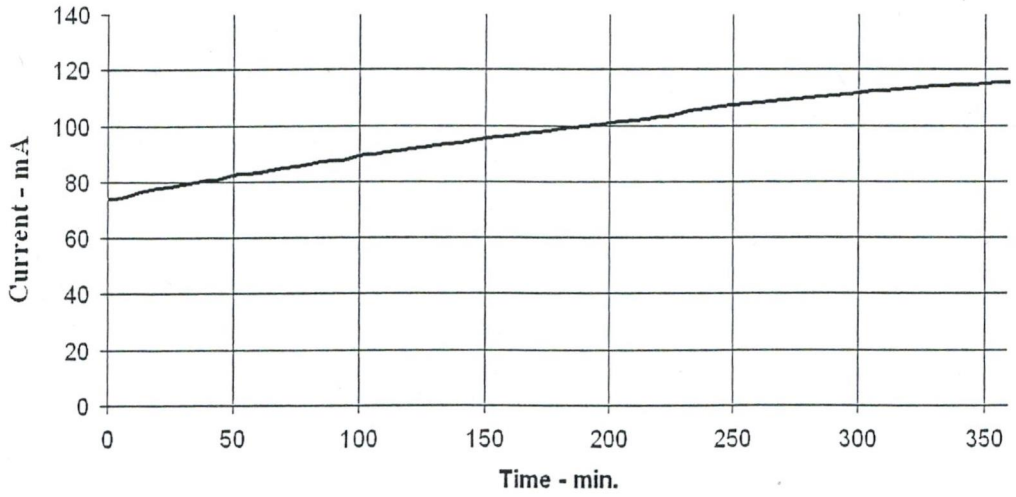


FIGURE 13 – allure théorique de l'augmentation de courant lors de l'essai de diffusion aux chlorures [44]

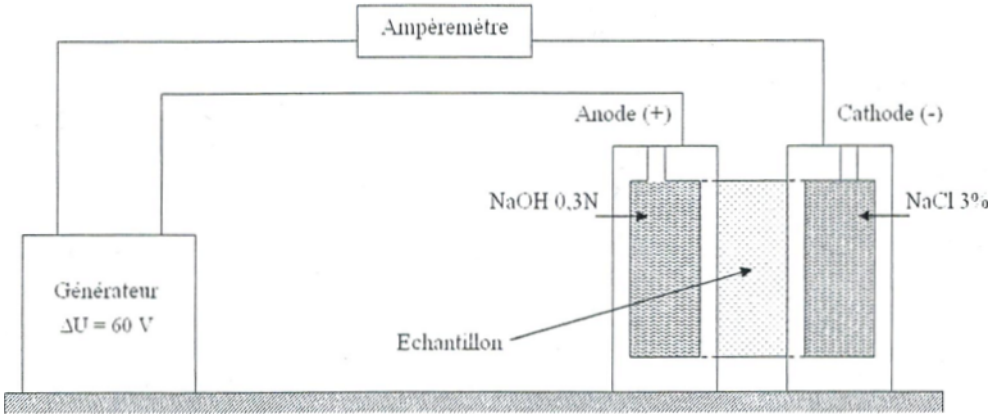


FIGURE 14 – Schématisation du montage pour la mesure de la diffusion des chlorures [44]

Mode opératoire

L'essai, en lui-même, consiste à mesurer l'intensité dans le système engendré par une tension de 60V maintenue constante durant six heures. Le courant apparait grâce aux déplacements des ions CL^- essayant d'atteindre la borne positive remplie de NaOH, jouant le rôle d'électrolyte (réaction d'oxydo-réduction). [44]

- Anode : $4OH^- \rightarrow O_2 + 4e^- + 2H_2O$
- Cathode : $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$

Ce principe suggère que, plus les ions de chlore pourront passer facilement à travers l'échantillon, plus le courant sera important. Ainsi, nous pouvons corréler immédiatement le courant à la perméabilité aux chlorures du béton testé.

Remarques

Cet essai ne pourra donc pas me permettre d'obtenir une valeur précise du coefficient de perméabilité du béton aux chlorures, mais il permettra d'avoir une bonne appréciation qualitative des propriétés de transport des chlorures des échantillons. Ainsi, la détermination de la charge passant au sein du béton permet de situer l'échantillon sur base du tableau 6 réalisé par Whiting en 1981 [49].

Charge Coulomb	Classe de perméabilité
> 4000	Grande
4000 - 2000	Modérée
2000 - 1000	Petite
1000 - 100	Très petite
< 100	Négligeable

TABLE 6 – Échelle de perméabilité en fonction de la charge [26]

Ne possédant pas de générateur 60V, l'essai a dû être réalisé grâce à un générateur de 30V. Une étude de Yang et Cho [51] montre qu'une corrélation linéaire existe entre la tension aux bornes du montage et le taux de migration des chlorures au sein de différents mélanges de mortier et béton. Cette observation permet d'utiliser ce générateur de 30V et de doubler les intensités de courant obtenues.

Selon le TFE de 2008 [44], qui cite des recherches sur cet essai, de nombreux facteurs peuvent influencer les mesures des intensités. Ce travail étant principalement comparatif entre des échantillons subissant les mêmes manipulations, ces différentes influences ne sont pas de première importance au sein de cette recherche. La mention de celles-ci n'est présente que pour les garder en mémoire même si elles pourront, potentiellement, aider lors des analyses.

- Capillarité

Préparation

Cet essai se pratique sur des carottes de 8cm de diamètre pour une hauteur non fixée. Ne voulant tester que la capillarité et comme représenté sur la figure 12, l'ensemble de l'échantillon, excepté la face traitée, est recouvert de résine epoxy. La norme demande également que la surface subisse une cure pour éliminer les substances volatiles ou solubles qui peuvent influencer la capillarité. Cette cure consiste en 3 cycles correspondant à 24h dans une étuve à 50°C et 24h plongée dans de l'eau à température ambiante. Cette cure n'a été appliquée que sur les échantillons non vieillis car il a été décidé de considérer que, pour les autres dalles, les substances problématiques, selon la norme, ont été éliminées par les différents vieillissements

Mode opératoire

Cet essai consiste à placer les échantillons, face traitée vers le bas, dans un bain d'eau. L'enfoncement des échantillon au sein de l'eau doit être d'environ 3mm. Ensuite,

une pesée des échantillons est réalisée à 0, 10, 20, ..., 1h, 1h30, 2h30, 4h30, 6h30, 24h, 48h. Ainsi, nous obtiendrons une courbe représentant l'absorption capillaire du béton à travers la face traitée.

- Test Lab (couleur)

Cet essai concerne l'entièreté des échantillons.

Préparation

Aucune préparation sur le béton n'est nécessaire. La seule opération à effectuer est la création de gabarit en papier pour pouvoir réaliser le test Lab toujours au même endroit sur l'échantillon.

Mode opératoire

Ce test s'effectue grâce à une machine optique fournissant les valeurs L, a et b en plaçant le récepteur contre la surface de béton.

- Profondeur de carbonatation

Cet essai ne concerne que les échantillons ayant subis la carbonatation.

Préparation

Premièrement, il semble nécessaire de noter que, selon les conseils des techniciens du LMC, la mesure de la carbonatation après une découpe à la scie n'est pas recommandée vu une certaine influence observée auparavant.

Ainsi, la seule préparation qu'il faille effectuer est un fendage d'un morceau d'échantillon pour pouvoir mesurer cette caractéristique en évitant l'influence du sciage. En temps normal, le fendage est obtenu en provoquant une flexion sur un échantillon effilé. N'ayant pas ce type d'échantillon, le fendage a été effectué grâce à un marteau et un burin.

Mode opératoire

La réalisation de cet essai consiste à asperger l'échantillon avec du Phénolphtaléine. Cette substance est un indicateur de pH qui devient rose en milieu basique. Comme la carbonatation a comme effet de rendre le béton plus acide, la profondeur de carbonatation peut simplement être mesurée, grâce à une règle, comme la distance entre la surface et la zone rose (milieu non carbonaté).

- Pénétration de l'hydrofuge

Cet essai concerne l'entièreté des échantillons ayant subis un traitement d'imperméabilisation.

Préparation

De manière similaire à la carbonatation, un fendage grâce à un burin est privilégié pour éviter l'influence de la scie lors de la découpe.

Mode opératoire

A l'aide d'une pipette, une goutte d'eau est placée sur le sommet de la face fendue et la profondeur de pénétration d'hydrofuge est égale à la zone où cette goutte n'accroche pas.

Pour information, une variante plus rigoureuse peut être utilisée pour déterminer cette profondeur. Cette autre méthode consiste à asperger l'échantillon de fuchsine

diluée qui a la particularité de changer de couleur en phase aqueuse. Le béton se colorera où le produit pénètre et une mesure exacte pourrait être effectuée.[35]

- Caractérisation par MEB (Microscope à Balayage électronique)

Cet essai ne concerne que les échantillons traités au silicate

Préparation

Pour être au sein du MEB, un parallélépipède de 4x4x1,5cm doit être découpé au sein des échantillons. Pour une réussite rapide de cet essai, ceux-ci doivent être séchés au maximum et mis sous vide à l'avance. Ensuite, les échantillons doivent être placés dans un métalliseur pour déposer sur ceux-ci une fine couche de nickel. Cette étape est nécessaire pour obtenir des résultats au MEB car le béton n'est pas conducteur. Cette métallisation est réalisée sous un vide d'environ 10^{-5} Pa pour que le plasma (déposant la couche de nickel) se développe le mieux possible autour de l'échantillon. N'arrivant pas à obtenir le vide demandé, la métallisation a été effectuée pendant une minute, quatre fois de suite à la place de trois. Cette préparation est illustrée sur la figure 15.



FIGURE 15 – Métallisation des échantillons
Gauche : Métalliseur & Droite : Plasma lors de la métallisation

Mode opératoire

Après avoir appliqué la couche de nickel, l'échantillon est placé (avec trois autres) sur une plaquette qui sera accrochée à l'intérieur du microscope. Une pastille de cuivre sera également placée sur la plaquette pour pouvoir étalonner le microscope avant toutes mesures. Cette étape est illustrée sur la figure 16.

Ces différentes mesures sont obtenues grâce à un logiciel informatique. Divers résultats sont disponibles, allant d'un simple zoom à la détermination totale des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon.

La première possibilité de détermination chimique est le contraste chimique grâce à un détecteur de "rétro-diffusion". L'image obtenue présente des variations de gris qui permettent d'analyser globalement la surface. Par conséquent, les zones plus sombres caractérisent une présence accrue d'éléments chimiques possédant de faibles numéros atomiques. Il est à noter que le noir complet représente un vide et que les zones très claires sont souvent du ciment n'ayant pas réagi.

La deuxième méthode consiste en une analyse chimique élémentaire grâce à une microanalyse par Energie Dispersive de rayons X (EDX). Ce type d'analyse permet soit une analyse semi-quantitative (spectre et images) ou quantitative qui reste ouverte aux



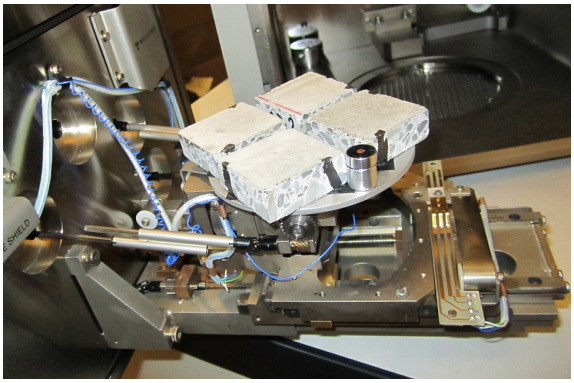


FIGURE 16 – Métallisation des échantillons
Gauche : appareil & Droite : Placement des échantillons

critiques sur les résultats fournis. Le spectre illustre les différents éléments chimiques présents sur la surface, tandis que les images exposent une vision spatiale des zones où sont présents ces différents éléments chimiques sur cette même surface.

4.6 Remarques

Il est important de noter que l'ensemble des détails fournis précédemment n'entrent évidement pas dans les détails vu que ceux-ci apparaissent sur les normes relatives à chaque manipulation. De nombreuses autres références détaillent également les modes opératoires de ces différents essais. Donc, seules les grandes étapes et les particularités sur lesquelles une attention doit être portée ont été énoncées dans ce chapitre.

Une étape importante au sein de chaque manipulation et qui n'est indiquée sur aucune norme est le nettoyage méticuleux de chaque matériel et environnement utilisé. Ceci garantit toujours des résultats exacts et assure la longévité des divers appareils et instruments.

5 Résultats

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus tout au long de l'étude. Tout d'abord, les essais sur les quatre échantillons initiaux n'ayant subis aucun vieillissement seront présentés individuellement. Ensuite, les essais relatifs aux dalles vieillies seront expliqués, tandis qu'une analyse des influences de ces vieillissements sera effectuée de manière globale. Finalement, une brève analyse pour chaque produit étudié individuellement sera exécutée.

Pour la représentation des résultats, trois types de graphiques vont se succéder. Ainsi, les graphiques normaux (ordonnée-abscisse) présenteront des résultats en fonction du temps. Ensuite, des histogrammes par essais permettront une comparaison des résultats en fonction des vieillissements et des traitements. Finalement, à partir du chapitre 5.3.7, des histogrammes par hydrofuges permettront une étude de la durabilité plus poussée.

Pour les deux premiers types de graphiques, la couleur et la représentation des hydrofuges sont toujours les mêmes. Celles-ci sont renseignées sur le tableau 21 en annexe, page 91.

Pour débuter ce chapitre, un bref récapitulatif des problèmes ou constatations effectués lors des vieillissements est réalisé.

5.1 Déroulement des vieillissements

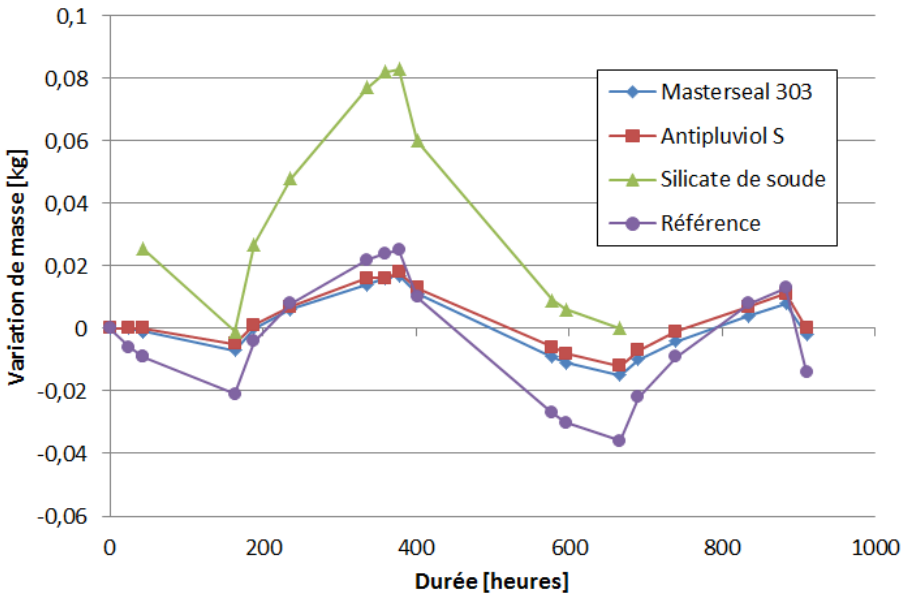


FIGURE 17 – Variation de masse durant les cycles d'humidification

Lors de certains vieillissements, des dégradations se sont développées sur les échantillons traités avec le silicate de soude. Suite à cela, certaines de ces dégradations ont conduit à la suppression de ces échantillons pour la suite de l'étude.

Le premier cas de dégradation a été obtenu lors des cycles d'humidification. Ces cycles sont représenté dans le graphique à la figure 17 [12]. Le silicate présente une prise de masse beaucoup plus importante alors que les autres échantillons réagissent de manière similaire. Cette particularité peut être expliquée par le peu d'influence des hydrofuges sur la perméabilité à la vapeur d'eau.

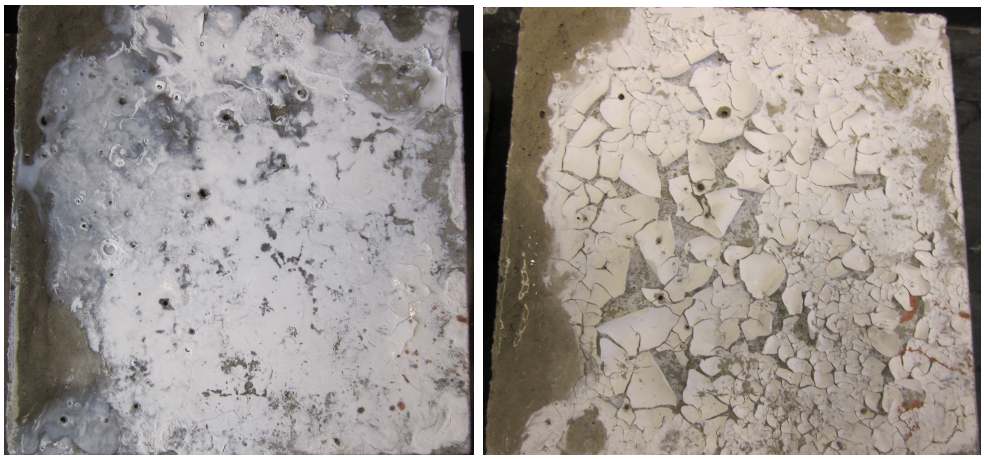


FIGURE 18 – réaction du silicate lors des cycles d'humidification
Gauche : avant la sortie de la chambre humide & Droite : après séchage à 60 % HR

Lors de ce vieillissement, une substance blanchâtre [13] est apparue sur l'ensemble des surfaces traitées par du silicate. Possédant un aspect poisseux lors du retrait de la chambre humide, cette substance a séché et s'est craquelée très rapidement. Ensuite, au moindre contact, la substance se changeait en poussière blanche. Les deux aspects de cette dégradation sont présentés à la figure 18. Cet échantillon a été écarté de l'étude.



FIGURE 19 – Dégradation des échantillons traités au silicate lors du gel-dégel
Gauche : 2-1-2 & Droite : 4-2-1

Le deuxième vieillissement concerné est le choc-thermique lors de la phase de gel-dégel. La surface traitée de l'échantillon recouvert de silicate (2-1-2) s'est désagrégée

12. Les masses des échantillons lors de ce vieillissement sont énoncées dans le tableau 22 en annexe, page 98

13. La composition de cette substance reste inconnue lors de ce travail vu qu'aucune analyse chimique n'a été réalisée sur celle-ci.

plus rapidement que les dalles de référence [14]. Néanmoins, un lien entre le silicate et cette dégradation ne semble pas être pertinent, le deuxième échantillon (4-2-1) ayant relativement mieux réagi à ce cycle. Les surfaces de la dalle détériorée et de la dalle 4-2-1 sont illustrées à la figure 19. Finalement, cet échantillon a donc été écarté de l'étude.

La dernière dégradation de grande ampleur s'est développée lors de l'exposition aux UV. En effet, une disparition de la couche de silicate a été observée en effectuant un rabattement sur elle-même. Cet échantillon a été gardé au sein de l'étude et une analyse MEB de deux zones différentes [15] sera effectuée. Cette dégradation est exposée sur la figure 20.

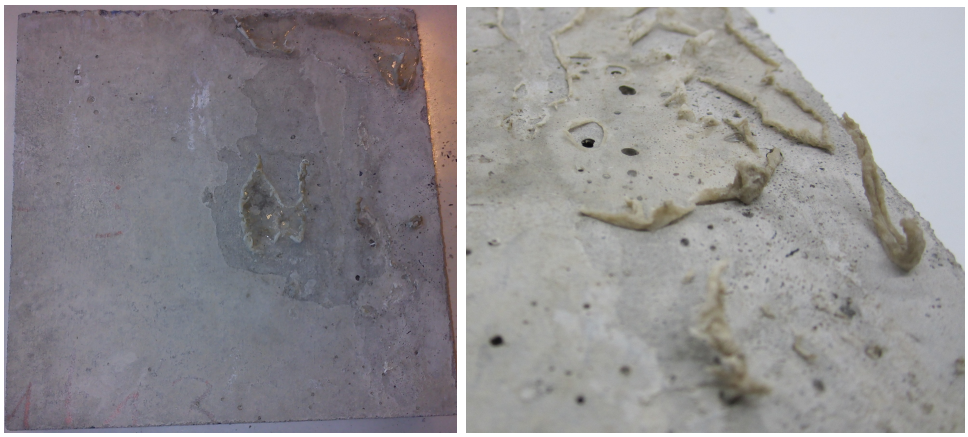


FIGURE 20 – disparition du silicate lors de l'exposition aux UV
Gauche : vue d'ensemble & Droite : zoom sur le rabattement

Au vu de ces différentes dégradations, il semble que le silicate se dégrade de manière visible pour tous les vieillissements où une présence importante d'eau est nécessaire. Une étude supplémentaire sur ce type de produit pourrait fournir des réponses sur la potentielle réaction de ce produit avec l'eau. Toutefois, pour rappel, l'état de la connaissance actuel nous a appris qu'une utilisation d'un tel produit est déconseillée pour diverses raisons [16].

5.2 Résultats des essais initiaux

5.2.1 Profondeur de pénétration de l'agent hydrofuge

Comme prévu par l'imprécision de la technique de mesure utilisée, la profondeur de pénétration n'a pas pu être facilement observable. Les résultats obtenus sur le tableau 7 sont donc approximatifs.

Nous remarquons donc qu'une très faible pénétration n'apparait que pour l'"Antipluviol", tandis que les autres échantillons ne présentent aucune pénétration.

14. Après seulement trois cycles de gel-dégel.
15. Une où est présente un reste de silicate et une deuxième où une disparition visuelle est présente.
16. Pour rappel, le silicate ne pénètre pas le béton et l'efficacité est reconnue inférieure aux autres produits

	Masterseal 303	Antipluviol S	Silicate de Soude
Pénétration	0 mm	jusqu'à 2 mm	0 mm

TABLE 7 – Pénétration de l'hydrofuge au sein des échantillons initiaux

Au niveau du silicate, ce résultat était attendu car, comme vu précédemment, ce produit ne semblait pas posséder une attitude de pénétration lors de la mise en place de cet hydrofuge.

Malgré tout, deux autres explications peuvent potentiellement répondre à cette absence de pénétration. Premièrement, en présence d'essais expérimentaux, l'absence d'influences extérieures ou d'erreurs lors des manipulations et des mesures n'est pas négligeable. Deuxièmement, certaines fiches (en annexe) ou brochures techniques ([20] [48]) conseillent une application à l'aide d'une projection basse pression, voire, dans certain cas, à la brosse. L'application au pinceau peut ne pas répondre à ces exigences et peut expliquer cette absence de pénétration.

5.2.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

Avant de présenter des valeurs numériques obtenues à partir de formules, la figure 21 illustre les pertes de masse des différentes éprouvettes lors de cet essai. Les valeurs qui ont servi à tracer ce graphique et qui seront utilisées dans les formules sont présentes en annexe, page 99 sur le tableau 23.

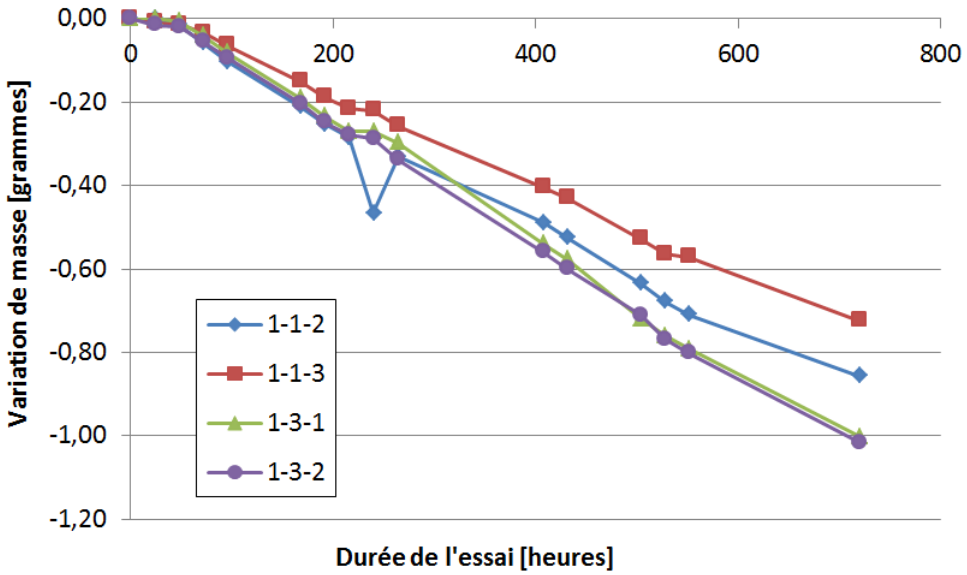


FIGURE 21 – Poids des échantillons durant l'entièreté de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau

La principale information ressortant de ce graphique est la perte de masse fort semblable pour les quatre éprouvettes lors de l'essai. Ceci peut confirmer une des caractéristiques des hydrofuges, qui est de ne pas influencer la perméabilité à la vapeur

d'eau. Cette vérification assure que le béton peut "respirer" mais confirme la possibilité d'eau au sein du béton par ce mode d'accès.

La norme relative à cet essai [39] fourni des formules pour pouvoir, à partir des mesures, déterminer les différentes caractéristiques des échantillons. Ainsi, le taux de transmission de la vapeur d'eau (V) (gramme par $mètre^2$ et par jour) peut être obtenu grâce à la formule (4).

$$V = \frac{240 * \Delta m_i}{A_i} \tag{4}$$

où

$\Delta m_i = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1}$;

m_1 et m_2 sont les masses totales, en milligrammes, aux temps t_1 et t_2 qui correspondent, pour ce travail, respectivement à 24 heures et de 720 heures ;

A_i est la surface, en cm^2, de l'échantillon concerné "i" et qui, pour cet essai et pour l'ensemble des éprouvettes, vaut 50,27 cm^2.

Ensuite, ayant obtenu cette valeur, nous pouvons aisément calculer le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau δ (gramme par mètre par jour et par Pascal) par la formule (5).

$$\delta = \frac{V * d}{\Delta p} \tag{5}$$

où

d est l'épaisseur de l'échantillon, en mètre, qui vaut, pour cet essai, 0,03 m.

Δp est la différence de pression de vapeur d'eau entre les deux cotés de l'échantillon, en Pascal. Cette valeur est déterminée grâce au tableau 8 présent dans la partie 1 de la norme ISO 7783 [38]. Ayant une HR d'environ 93 % à l'intérieur de la coupelle, la valeur de 1210 sera utilisée.

Humidité relative à l'intérieur de la capsule (%)	Différence de pression (Pa)
< 50	1400
50 à 93	1210

TABLE 8 – Différence de pression lors de l'essai en fonction de l'HR interne

Finalement, considérant comme simplification le fait que les échantillons ont été correctement stockés à une température de 23 °C et à une pression atmosphérique normale de 1013 hPa, l'épaisseur équivalente de couche d'air S_d, en mètre, est obtenue par la formule (6).

$$S_d = \frac{21}{V} \tag{6}$$

La norme ISO 7783-2 [39] propose également une classification des échantillons en trois catégories (selon l'EN 1062-1). La détermination du classement d'un échantillon se réalise grâce au tableau 9.

Classes	V ($\frac{g}{jm^2}$)	S_d (m)
I (grande)	> 150	$< 0{,}14$
II (moyenne)	15 à 150	0,14 à 1,4
III (faible)	< 15	$> 1{,}4$

TABLE 9 – Classification de la transmission à la vapeur d'eau

Les résultats obtenus pour les quatre échantillons initiaux sont présentés sur le tableau 10.

Eprouvette	Perte de poids ($\frac{g}{j}$)	V ($\frac{g}{j*m^2}$)	$\delta(\frac{g}{j*m*Pa})$	S_d (m)	Classification
1-3-2	0,0346	6,874	$1,70 * 10^{-4}$	3,055	III (Faible)
1-1-3	0,0246	4,898	$1,21 * 10^{-4}$	4,287	III (Faible)
1-1-2	0,0296	5,879	$1,46 * 10^{-4}$	3,572	III (Faible)
1-3-1	0,0346	6,874	$1,70 * 10^{-4}$	3,055	III (Faible)

TABLE 10 – Caractéristiques relatives à la vapeur d'eau des différentes éprouvettes initiales

La première observation effectuée est le classement identique pour les quatre échantillons. En effet, ceux-ci sont classés comme possédant une perméabilité à la vapeur d'eau faible.

De plus, ces différentes valeurs confirment les analyses obtenues sur base de la figure 21. Effectivement, quelle que soit la caractéristique considérée, la variation entre les quatre échantillons est faible et ne permet pas une distinction pertinente.

5.2.3 Perméabilité aux chlorures

Une représentation des mesures effectuées est illustrée sur la figure 22 tandis que les valeurs brutes, comme pour l'essai précédent, se trouvent sur le tableau 25 en annexe, page 101 . Il est important de noter que, pour prendre en compte l'utilisation du générateur 30V, la multiplication par deux des courants mesurés a déjà été effectuée.

Ce graphique montre la bonne réalisation de l'essai accéléré caractérisant la perméabilité aux chlorures. En effet, la ressemblance avec la courbe théorique de cet essai peut être prouvée en comparant ces quatre courbes avec la figure 13.

De plus, une observation plus poussée montre que l'intensité, à chaque instant, varie en fonction des échantillons. Une différence d'environ 20 mA est présente à la fin de

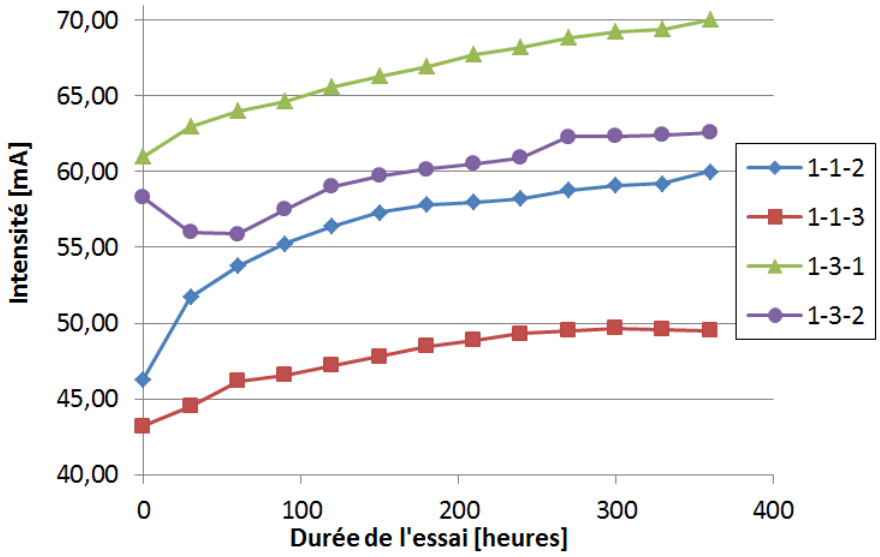


FIGURE 22 – Intensité du courant à travers les échantillons durant l'entièreté de l'essai de diffusion des chlorures

l'essai entre l'échantillon imprégné de silicate et celui traité avec de l'antipluviol tandis que les deux autres échantillons se situent entre-deux.

À partir des mesures, la norme ASTM 1202-97 [26] fournit la formule (7) permettant d'obtenir la charge électrique passant au sein de l'échantillon (Q). Cette formule est basée sur une intégration par la loi des trapèzes.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + ... + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \tag{7}$$

où I_i est l'intensité après i minutes.

Cette formule n'est valable que pour une section de 3,75 in. (95mm). Une rectification doit être opérée grâce à la formule (8).

$$Q_s = Q_x * \left(\frac{3,75}{x}\right)^2 \tag{8}$$

où Q_s est la charge passant au sein d'un échantillon de 95 mm de diamètre ;

Q_x est la charge passant au sein d'un échantillon de x in. de diamètre ;

x est le diamètre en in. des échantillons qui vaut, pour ce travail, 3,158 in. (8 cm).

Les résultats obtenus et la classification sur base du tableau 6 pour cet essai sont consultables sur le tableau 11.

La confirmation de l'analyse effectuée sur base de la figure 22 est directement réalisée en observant que l'échantillon 1-3-1 est classé dans la catégorie supérieure à celle

Eprouvette	Q (Coulomb)	Q corrigé (Coulomb)	Classification
1-1-2	2443,572	3445,818	Modérée
1-1-3	2066,544	2914,150	Modérée
1-3-1	2877,120	4057,189	Grande
1-3-2	2581,488	3640,301	Modérée

TABLE 11 – Charges et classification suite aux essais initiaux de perméabilité aux chlorures

comprenant les trois autres traitements. Malgré tout, ce résultat doit être nuancé en observant plus précisément les valeurs. En effet, la variation entre les différents échantillons est assez faible vu que, excepté pour l'Antipluviol, celle-ci ne s'étale que sur environ 500 coulombs pour une échelle de plus de 4000 coulombs.

Il est également important de préciser qu'une conclusion sur un produit ne peut être effectuée sur base d'un seul essai. Ainsi, pour confirmer les résultats de cet essai et améliorer la rigueur de l'analyse, différents résultats doivent être obtenus à partir de séries d'essais similaires.

5.2.4 Capillarité

La norme EN 1062-3 [9] [17] propose également une classification des échantillons en trois catégories qui est consultable sur le tableau 12. Ce classement est lié par la norme EN 1062-1 au classement de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau.

Classes	w ($\frac{kg}{m^2 * h^{0,5}}$)
I (Grande)	$> 0,5$
II (Moyenne)	0,1 à 0,5
III (Faible)	$< 0,1$

TABLE 12 – Classification de la "perméabilité à l'eau liquide"

Une représentation des courbes caractérisant les variations de masses est illustrée à la figure 22. Ces prises de masse sont tracées en fonction de la racine carrée du temps comme le demande la norme en vigueur.

Pour les échantillons 1-3-1 et 1-3-2, ce graphique présente grossièrement l'allure attendue pour un essai de capillarité. En effet, deux zones peuvent être distinguées. La première consiste en une prise de masse rapide tandis que la deuxième est une zone de croissance constante. La séparation entre ces deux zones n'est atteinte qu'après environ 1h d'essai et est représentée par la droite noire.

17. Les essais effectués comme indiqué au sein de cette norme caractérisent la capillarité du béton qui fait entrer les pressions internes au réseau capillaire en jeu. Néanmoins, les tableaux et formules qui apparaissent dans celle-ci font intervenir le concept de "perméabilité à l'eau liquide". Ainsi, pour respecter la terminologie de la norme, seule celle-ci sera utilisée au sein des résultats en gardant en mémoire que cet essai représente la capillarité des échantillons.

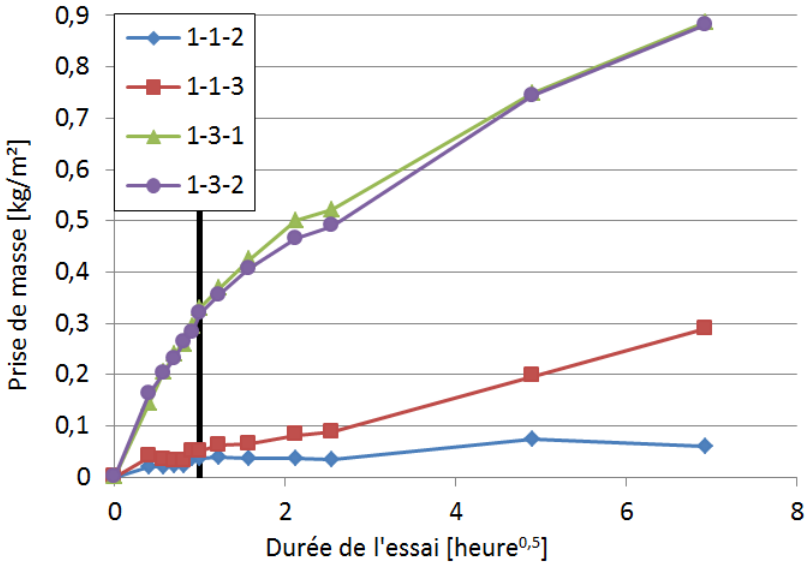


FIGURE 23 – Variation de masse lors des essais initiaux de perméabilité à l'eau liquide

En ce qui concerne les échantillons 1-1-2 et 1-1-3, la séparation entre les deux zones est moins évidente, voire inexistante.

Pour prendre en compte l'existence de cette limite et pour respecter la norme, la détermination de la pente de la courbe [18] s'effectuera à partir de la limite entre les deux zones jusqu'à la fin de l'essai. Malgré l'utilisation de ce coefficient pour une caractérisation ultérieure, une première analyse à partir de cette figure laisse penser que les échantillons traités au Masterseal et à l'Antipluvion permettent une diminution des remontées capillaires.

Échantillons	w ($\frac{kg}{m^2 * h^{0,5}}$	Classification
1-1-2	0,0058	III (Faible)
1-1-3	0,0405	III (Faible)
1-3-1	0,0926	III (Faible)
1-3-2	0,0951	III (Faible)

TABLE 13 – Perméabilité à l'eau liquide pour les échantillons initiaux

Ce tableau confirme les observations effectuées sur la figure 22. L'échantillon traité avec le Masterseal (1-1-2) présente un coefficient plus de dix fois inférieur aux 1-3-1 et 1-3-2. En ce qui concerne le traitement par Antipluviol (1-1-3), le résultat présente une efficacité située entre les deux extrêmes.

En outre, il est important de remarquer que la classification place l'entièreté des échantillons comme faiblement perméable même si les valeurs obtenues pour les échantillons 1-3-1 et le 1-3-2 sont proches de la classe supérieure (II Moyenne).

18. Cette pente représente le coefficient de perméabilité à l'eau liquide

5.2.5 Observation au MEB

Les observations n'ont pu être réalisées sur l'entièreté des échantillons prévus à la base. En effet, comme précisé lors de la méthodologie, la mesure n'est réalisable qu'en présence d'un important vide, qui n'a pu être atteint. Ce problème provient certainement de l'importante présence d'humidité au sein des échantillons empêchant la pompe d'assurer un vide suffisant.

Ainsi, les essais n'ont pu être pratiqués que sur l'échantillon initial de référence et sur ceux traités au silicate de soude.

L'unique analyse qui sera présente dans ce travail est l'analyse chimique élémentaire. En effet, les tests MEB ayant été réalisés sur la surface traitée du béton, aucun contraste n'est visible sur les différentes images vu l'homogénéité de la pâte de ciment qui recouvre l'entièreté de cette surface.

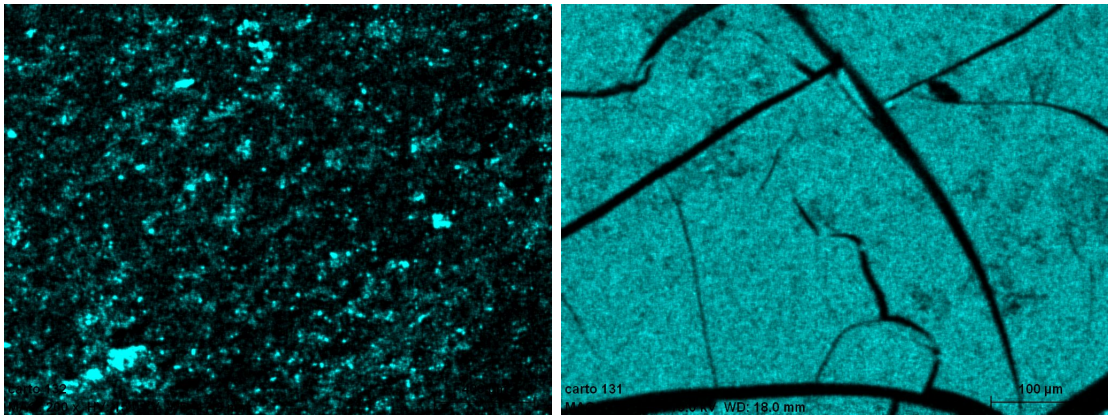


FIGURE 24 – Présence de Si à la surface des échantillons initiaux
Gauche : Référence & Droite : Traités au silicate de soude

La figure 24 illustre la présence de silicium à la surface des échantillons. Plus l'image est turquoise, plus le silicium est présent à la surface considérée.

L'analyse de ces deux images permet de montrer une présence plus importante de silicium sur l'échantillon traité. Considérant que le silicium est un des principaux éléments constituant le silicate de soude (qui recouvre la surface du béton), ce résultat semble logique et nous assure de la présence de silicate sur l'entièreté de la surface.

Il est important de remarquer que des fissures d'environ 10 μm sont présentes sur la surface. L'origine de celles-ci ne peut être déterminée sur base des images, mais les spectres pourront potentiellement apporter des informations supplémentaires. Ces fissurations ne doivent, théoriquement, pas impliquer d'infiltration d'eau. En effet, selon une thèse de MIVELAZ, P. [34] qui se réfère à plusieurs sources, une fissure traversante ne commence à fuir que pour une ouverture de l'ordre de 50 à 100 μm.

Les principaux éléments que le spectre renseigne sont du calcium, de l'oxygène, du carbone et du silicium. Ces différents éléments sont toujours présents au sein du béton. Les différents éléments mineurs sont également fréquemment présents dans le ciment. En d'autres termes, ce spectre est assez classique pour un béton ordinaire.

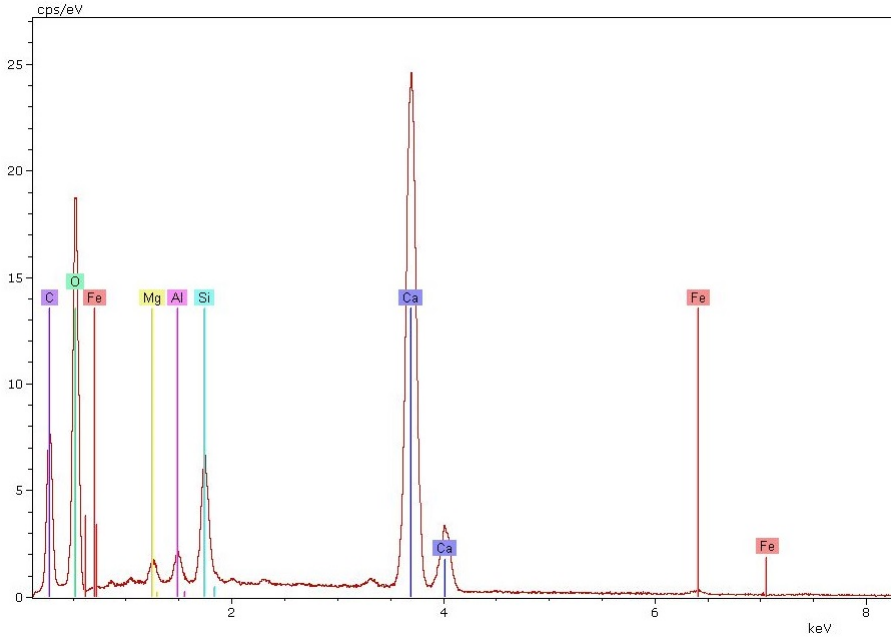


FIGURE 25 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon initial de référence

Cette analyse est vérifiée en rappelant que le ciment utilisé pour ce travail est du Portland CEM I. Celui-ci est composé à 95 % de clinker qui contient principalement de l'oxygène, du calcium, du silicium et du carbone dans des compositions chimiques tel que $CaO.SiO_2(C_3S)$. D'autres éléments comme de l'aluminium, du fer et du magnésium apparaissent en oxyde au sein du clinker mais ne peuvent dépasser une certaine teneur. Pour information, les formules de ces oxydes sont Al_2O_3, Fe_2O_3 et MgO. [31]

Le spectre présent à la figure 26 possède une échelle différente comparé au spectre précédent. Un facteur deux existe entre ces deux spectres concernant les essais initiaux.

Le traitement par silicate de soude modifie le spectre obtenu de manière significative. En effet, trois éléments ont pris de l'importance jusqu'à dépasser le calcium du spectre de référence, alors que d'autres éléments chimiques ont une présence réduite.

Les trois principaux éléments présents sont l'oxygène, le silicium et le sodium. Pour les deux premiers éléments, ceux-ci sont présents initialement sur la surface, mais une augmentation de leur quantité est observée par rapport à l'échantillon de référence. Tandis que le sodium est un élément qui apparait de façon homogène sur l'entièreté de la surface. Ces différentes observations sont expliquées par la couche de silicate de soude qui recouvre le béton. Pour rappel, ce produit ($Na_2O.xSiO_2$) ne contient que les trois éléments mentionnés.

En ce qui concerne les autres éléments (C, Ca, Al et K), leur présence moins importante peut être expliquée par l'effet d'écran de la couche de silicate de soude et prouve une certaine importance de celle-ci. Ainsi, pour revenir sur les fissures, celles-ci doivent être dues à une fissuration propre du silicate et non de la surface du béton.

Finalement, la présence de nickel (Ni) est expliquée par la métallisation de l'échantillon pour permettre le fonctionnement du MEB, comme expliqué lors de la méthodologie.

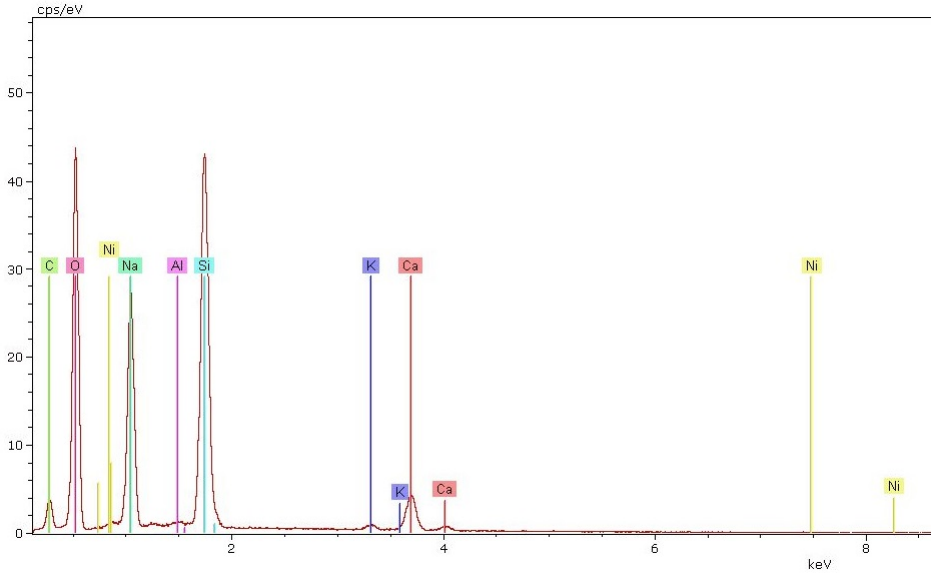


FIGURE 26 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon initial traité au silicate de soude

5.3 Résultats des essais finaux

Lors de l'observation des résultats de ce chapitre, seule une analyse sur l'influence des différents vieillissements en globalité sera effectuée.

Il est important de noter que les graphiques présenteront des histogrammes groupés par vieillissement. Ainsi, au sein d'un même groupe, les variations ne peuvent pas trouver leur origine dans l'échantillonnage vu que, pour rappel, chaque gâchée est liée à un vieillissement.

5.3.1 Profondeur de pénétration de l'agent hydrofuge

Comme pour les échantillons initiaux, la mesure de la profondeur de pénétration de l'agent hydrofuge n'a pas été aisée et laisse place à une grande imprécision. Toutes les valeurs, présentent dans le tableau 14, sont donc considérées comme des approximations.

Les valeurs proches de 0,1 ou 0,25 mm sont principalement citées pour mentionner l'observation d'une très fine épaisseur sur laquelle l'eau n'accrochait pas.

Vieillissement	Masterseal 303	Antipluviol S	Silicate de Soude
Gel-Dégel	1 mm	0,1 mm	0 mm
Chocs Thermiques	0,25 mm	0,1 mm	0 mm
Cycles Humidification	1 à 2 mm	1 à 2 mm (par endroit, 5 mm)	0 mm
Carbonatation	0,5 mm	0,5 mm	0 mm
Exposition aux UV	1 à 3,5 mm	1 à 3 mm	0 mm

TABLE 14 – Pénétration de l'hydrofuge au sein des échantillons vieillis

En observant le tableau, aucune conclusion ne peut être obtenue. Les variations que nous observons sont certainement dues à un "effet d'échantillon". En d'autres termes, ces différences peuvent trouver origine dans une variation naturelle du béton ou dans une mise en place des hydrofuges qui a pu légèrement différer pour l'entièreté des échantillons.

Ainsi, cet essai ne nous permet pas de différencier les vieillissements.

5.3.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

Les graphiques pour les essais finaux présentent les mêmes allures que la figure 21 correspondant aux essais initiaux. L'intérêt de l'ajout de ces graphiques n'est donc pas intéressant.

Avec les mêmes formules présentées précédemment [19] , les caractéristiques sur la perméabilité à la vapeur d'eau sont fournies sur le tableau 15 alors que l'entièreté des valeurs est, comme déjà précisé, en annexe.

Eprouvette	Perte de poids (g/j)	V (g/j/m^2)	δ (g/j/m/Pa)	S_d (m)	Classification
2-3-1	0,0379	7,531	$1,87 * 10^{-4}$	2,788	III (Faible)
2-4-2	0,0427	8,498	$2,11 * 10^{-4}$	2,471	III (Faible)
2-4-4	0,0559	11,112	$2,76 * 10^{-4}$	1,890	III (Faible)
3-5-3-2	0,0279	5,560	$1,38 * 10^{-4}$	3,777	III (Faible)
3-4-4-1	0,0232	4,623	$1,15 * 10^{-4}$	4,542	III (Faible)
3-5-2-2	0,0263	5,229	$1,30 * 10^{-4}$	4,016	III (Faible)
2-3-2	0,0527	10,478	$2,60 * 10^{-4}$	2,004	III (Faible)
4-4-3	0,0375	7,465	$1,85 * 10^{-4}$	2,813	III (Faible)
4-2-1	0,0650	12,941	$3,21 * 10^{-4}$	1,623	III (Faible)
4-1-1	0,0571	11,368	$2,82 * 10^{-4}$	1,847	III (Faible)
5-1-4	0,0342	6,802	$1,69 * 10^{-4}$	3,087	III (Faible)
5-3-2	0,0357	7,096	$1,76 * 10^{-4}$	2,960	III (Faible)
5-1-3	0,0481	9,568	$2,37 * 10^{-4}$	2,195	III (Faible)
6-5-2	0,0191	3,808	$9,44 * 10^{-4}$	5,514	III (Faible)
6-3-1	*0,0009*	*0,180*	$4,46 * 10^{-4}$	*116,669*	*III (Faible)*
6-3-2	0,0425	8,450	$2,10 * 10^{-4}$	2,485	III (Faible)

TABLE 15 – Caractéristiques relatives à la vapeur d'eau des différentes éprouvettes vieillies

La première remarque va vers l'échantillon 6-3-1 dont les résultats ne seront pas considérés vu le décalage de ceux-ci par rapport aux autres données. Les mesures montrent que cet échantillon n'a pas diminué de masse en permanence, mais a subi un cycle de variations de masse qui peut être expliqué par une potentielle condensation à

19. Équations (4), (5) et (6).

l'intérieur du béton. Celle-ci est possible dans le cas où une différence de pression et de température existe au sein de l'échantillon et si la pression de vapeur, à l'intérieur du béton, devient égale à la tension de saturation. [24]

On observe également que le classement de l'ensemble des échantillons est similaire à ce qui avait été obtenu pour les essais initiaux, i.e. que ceux-ci ont tous une faible perméabilité à la vapeur d'eau. Pour effectuer une meilleure analyse, un graphique offrant une meilleure comparaison des résultats pour l'ensemble des vieillissements est illustré à la figure 27.

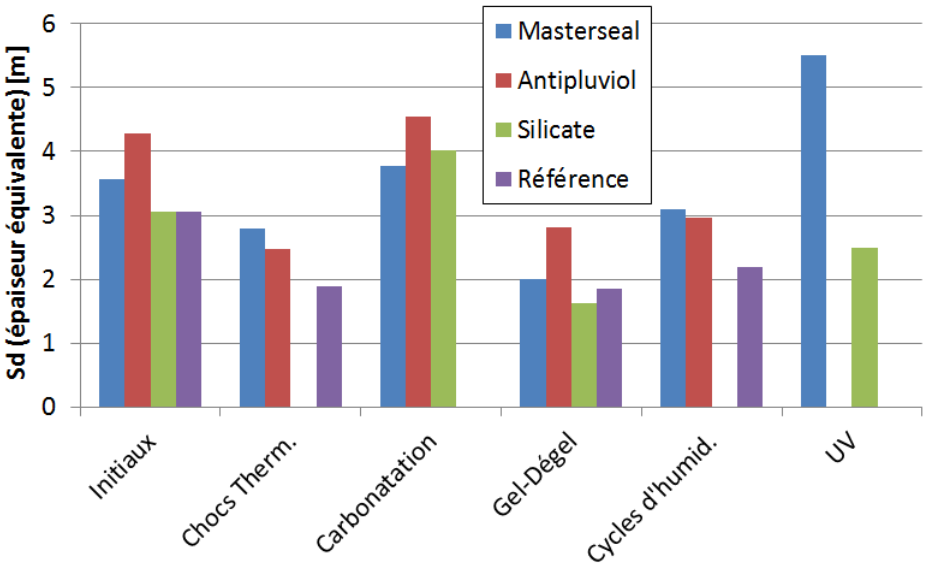


FIGURE 27 – Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau

Aucune grande variation n'est présente au sein de ce graphique. L'action des vieillissements sur cette caractéristique semble donc avoir très peu d'influence. Des études supplémentaires peuvent permettre des analyses plus poussées à ce sujet.

Ce graphique confirme la connaissance que nous avons des hydrofuges et les analyses effectuées dans le chapitre précédent. L'action des hydrofuges sur la perméabilité à la vapeur d'eau est très faible, voire inexistante. La légère variabilité des résultats peut avoir comme origine l'influence de l'échantillonnage.

Sans étude supplémentaire, les deux seules conclusions possibles sont que les vieillissements n'ont pratiquement aucune influence sur la perméabilité à la vapeur d'eau et que cette dernière est constante quel que soit le produit utilisé.

5.3.3 Perméabilité aux chlorures

En utilisant les formules de l'essai accéléré de caractérisation de la perméabilité aux chlorures [20], les résultats sont obtenus et illustrés sur le tableau 16

Comme pour la perméabilité à la vapeur d'eau, l'intérêt d'ajouter des graphiques similaires à la figure 22 n'est pas pertinent.

20. Formules (7) et (8).

Il est, par contre, intéressant de rappeler que cet essai n'a été réalisé que sur les échantillons ayant subit les chocs thermiques et l'exposition aux UV. Les échantillons traités au Silicate et au Masterseal et vieilli grâce aux chocs-thermiques ne fournissent pas de mesures. En effet, le premier a été retiré au début des cycles de gel-dégel tandis que l'essai n'a pu être réalisé pour le deuxième, malgré plusieurs manipulations.

Éprouvette	Q (Coulomb)	Q corrigé (Coulomb)	Classification
2-4-2	2561,940	3612,736	Modérée
2-4-4	2733,156	3854,177	Modérée
6-5-2	4255,200	6000,497	Grande
6-3-1	3481,920	4910,051	Grande
6-3-2	4642,740	6546,989	Grande

TABLE 16 – Charges et classification suite aux essais finaux de perméabilité aux chlorures

En observant le tableau 16, la différenciation des deux vieillissements se distingue directement grâce à la classification de l'essai. Ainsi, la limite des 4000 coulombs est largement dépassée pour les échantillons vieillis par exposition aux UV.

Pour pouvoir effectuer une meilleure comparaison, un graphique est présenté sur la figure 28.

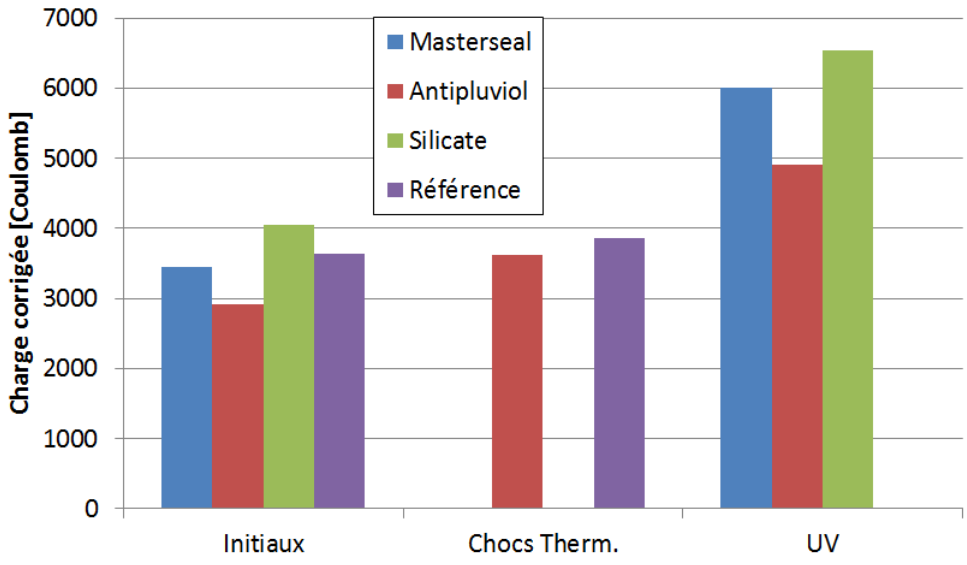


FIGURE 28 – Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures

La conclusion faite à partir du tableau est confirmée par ce graphique. En effet, les valeurs des échantillons initiaux sont semblables aux valeurs obtenues pour les chocs thermiques. Tandis que les résultats relatifs à l'exposition aux UV sont plus importants d'environ 2000 Coulombs.

Nous avons pu remarquer une attaque des UV sur l'efficacité des hydrofuges malgré les commentaires élogieux décrits au sein des différentes fiches techniques.

5.3.4 Capillarité

Les différents graphiques caractérisant la prise de masse lors de cet essai sont illustrés en annexe sur les figures 48, 49 et 50 qui sont situées à la page 103.

Des commentaires similaires à ceux réalisés lors des essais initiaux peuvent être appliqués à ces différents graphiques. Ainsi, la valeur de la pente est considérée à partir de la limite entre les deux zones (1h) jusqu'à la fin de l'essai.

Les différentes valeurs du coefficient de perméabilité à l'eau liquide sont présentées sur le tableau 17.

Eprouvette	w (kg/ m^2 $h^{0,5}$)	Classification
2-3-1	0,1603	II (Moyenne)
2-4-2	0,078	III (Faible)
2-4-4	0,0805	III (Faible)
3-5-3-2	0,0467	III (Faible)
3-4-4-1	0,0115	II (Moyenne)
3-5-2-2	0,2313	II (Moyenne)
2-3-2	0,0267	III (Faible)
4-4-3	0,0143	II (Moyenne)
4-2-1	0,0807	III (Faible)
4-1-1	0,0583	III (Faible)
5-1-4	0,0207	III (Faible)
5-3-2	0,0234	III (Faible)
5-1-3	0,0815	III (Faible)
6-5-2	0,0261	III (Faible)
6-3-1	0,0503	III (Faible)
6-3-2	0,1198	II (Moyenne)

TABLE 17 – Perméabilité à l'eau liquide pour les échantillons vieillis

Par comparaison avec les résultats initiaux, la première constatation est que certaines valeurs sont passées dans la classification supérieure fournissant une perméabilité à l'eau liquide "moyenne" contre une "faible" initialement. Néanmoins, ce passage au niveau supérieur ne semble pas s'effectuer pour un vieillissement en particulier mais de manière aléatoire au sein de l'entièreté des échantillons.

Pour vérifier plus rapidement cette analyse, la figure 29 illustre l'entièreté des résultats en fonction des vieillissements.

En observant ce graphique, plusieurs conclusions peuvent être réalisées.

Premièrement, nous remarquons que la plupart des vieillissements, en globalité, ne dégradent pas fortement l'efficacité des hydrofuges. Seuls les chocs thermiques et la carbonatation agissent, respectivement, sur un et deux des trois hydrofuges.

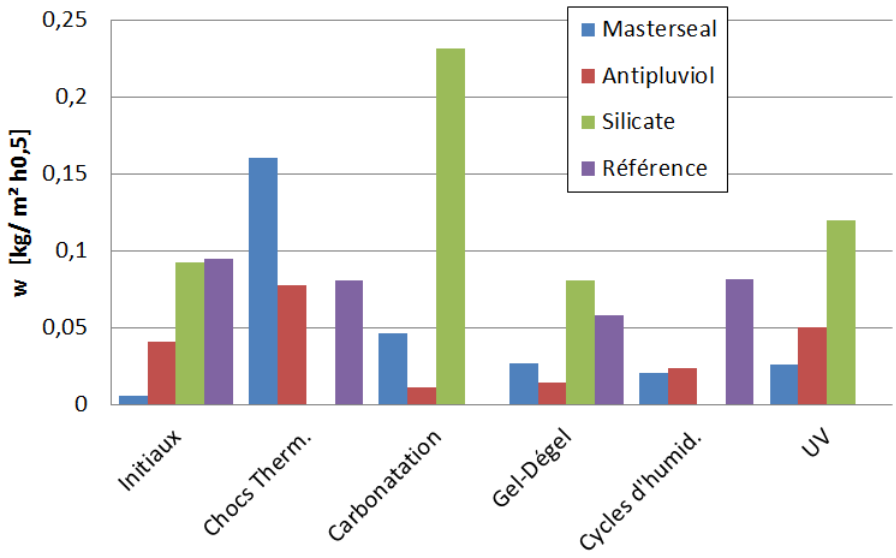


FIGURE 29 – Comparaison des résultats de l'essai de perméabilité à l'eau liquide

Ces deux vieillissements sont donc susceptibles de dégrader des produits d'imperméabilisation qui, théoriquement, diminuent l'ascension capillaire.

Deuxièmement, il apparait, en globalité, que l'efficacité des traitements au Masterseal et à l'Antipluviol est plus performante que celle au silicate de soude.

5.3.5 Observation au MEB

Comme précisé lors des essais initiaux, seuls les échantillons présentant du silicate ont été analysés au microscope. Ainsi, seul trois spectres et trois analyses spatiales du silicium sont présentés par la suite.

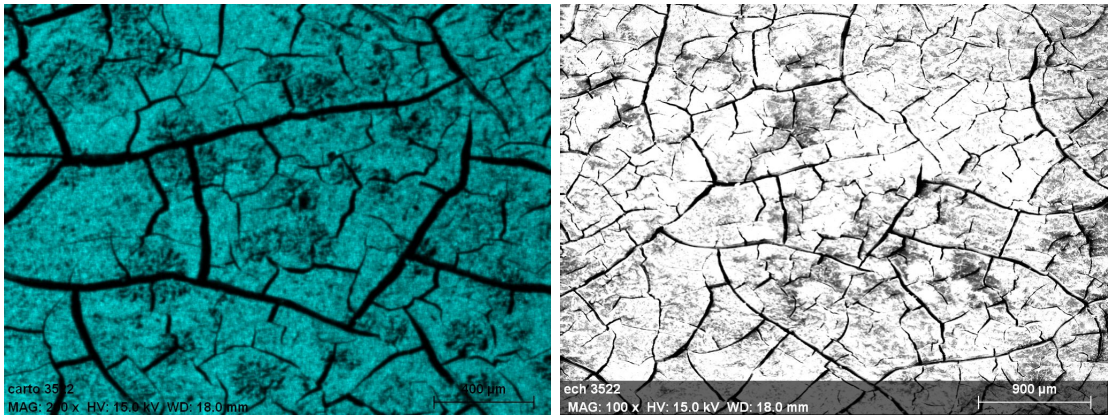


FIGURE 30 – Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli par la carbonatation
Gauche : Référence & Droite : Photographie

Ces deux premières photos, figure 30 relative à la carbonatation, peuvent être analysées de manière similaire à l'échantillon traité et non vieilli. La seule différence notable est une fissuration apparemment plus élevée. Mais cette particularité peut être due à l'effet d'échantillon.

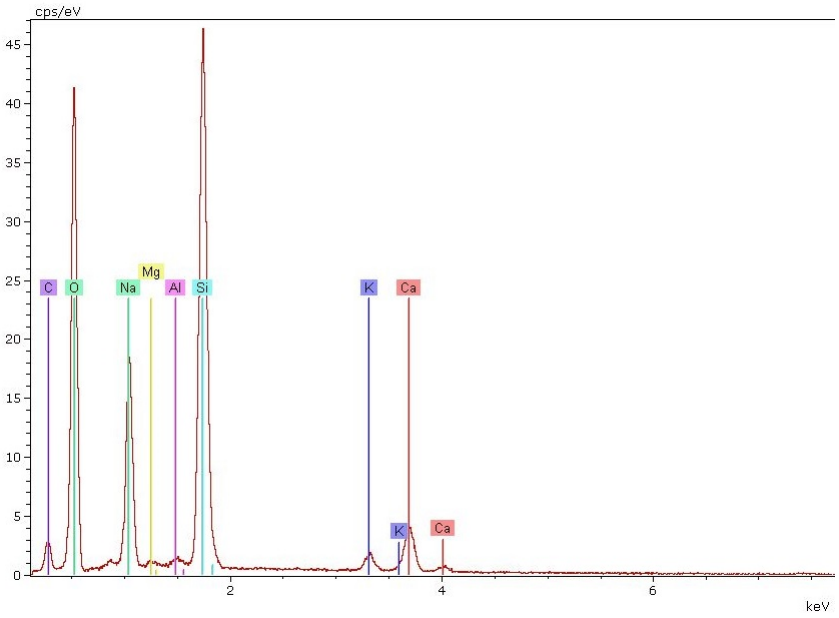


FIGURE 31 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli par la carbonatation

Le spectre présent sur la figure 31 confirme l'analyse précédente. Ainsi, la couche de silicate est toujours totalement présente et joue un rôle d'écran sur la surface du béton. Néanmoins, les fissurations étant plus importantes, il est peut être plus facile aux éléments provenant de l'environnement d'entrer au sein du béton. Cette possible augmentation de la facilité de pénétration se fait légèrement ressentir sur les résultats précédents où ce vieillissement provoquait des augmentations de perméabilités.

Les images relatives aux échantillons ayant subit le gel-dégel sont illustrées à la figure 32. Sur l'image de droite, la structure lisse et fissurée de la couche de silicate de soude a laissé place à une rugosité fort apparente. Celle-ci provient certainement de la dégradation de la surface du béton lors du gel-dégel de manière similaire à la figure 19 (mais avec moins d'importance).

Cette forte dégradation est confirmée par l'image de gauche où la présence de silicate est beaucoup moins importante que pour l'échantillon traité initialement. Ainsi, la surface qui est observable est sûrement le béton (pâte de ciment) sans protection.

La figure 33 représente le spectre obtenu pour l'échantillon ayant subi le gel-dégel. Les éléments (principaux et secondaires) du béton (C, Ca, Al) reprennent une certaine importance alors que le sodium présente une valeur diminuée. Cette observation prouve la disparition (relativement importante) de la couche de silicate.

Par contre, les résultats obtenus précédemment montrent que ce vieillissement ne provoque pas de baisse d'efficacité sur le silicate lors des différents essais. Même si la possibilité d'effet d'échantillonnage est possible, une étude supplémentaire pourrait fournir une explication à ce paradoxe.

Pour le vieillissement aux UV, les photographies d'une première zone sont illustrées à la figure 34. L'image de gauche indique la présence homogène de silicium sur la surface de l'échantillon. Il est donc permis de penser que ce vieillissement n'altère pas le traitement et que la couche est identique à celle observée sur l'échantillon initial.

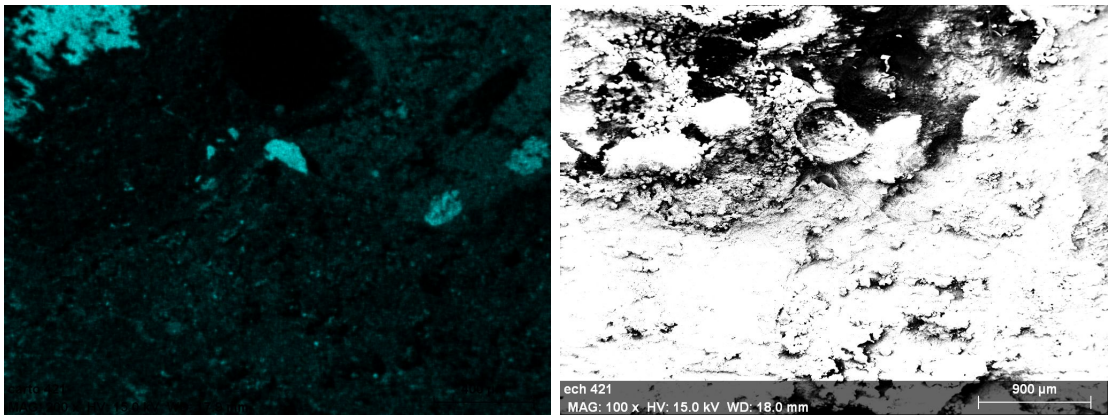


FIGURE 32 – Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli au gel-dégel
Gauche : Référence & Droite : Photographie

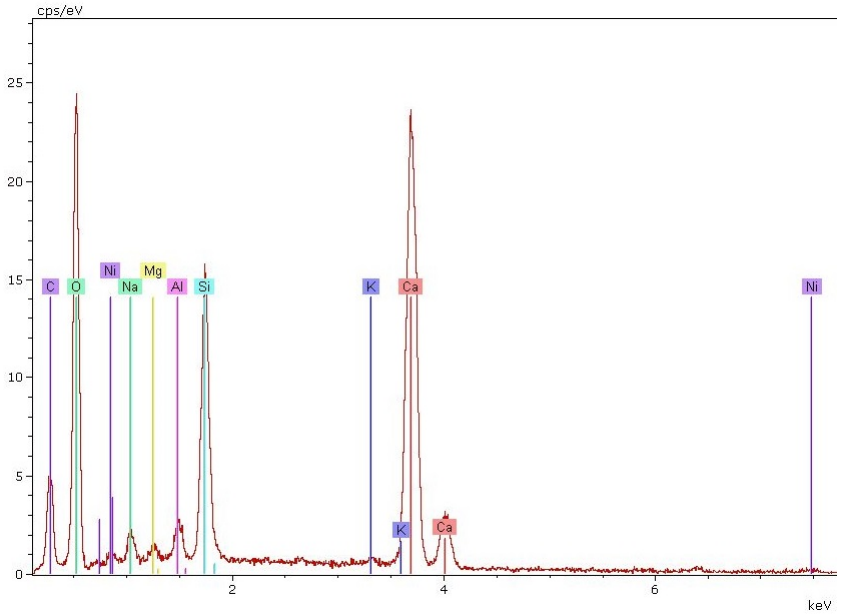


FIGURE 33 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli au gel-dégel

Mais, en observant la photographie de droite, la fissuration de la couche de protection est très importante et un écaillage a également débuté. Au vu des accès aisés au béton, ce type de recouvrement ne peut plus assurer une étanchéité à l'eau. De plus, un décrochement des écailles et une disparition totale de l'hydrofuge peut se produire avec un simple frottement.

Même si le silicate de soude est encore présent de manière homogène sur la surface, celui-ci est dégradé et peut permettre des pénétrations d'eau ou d'autres éléments environnementaux.

Le spectre obtenu est représenté sur la figure 35. Comme attendu et similairement à l'échantillon ayant subi la carbonatation, la présence de la couche de silicate est clairement représentée par ses différents éléments chimiques (O, Si et Na). Les éléments mineurs sont toujours atténués par cet "écran de protection".

L'écaillage et la perte de l'effet d'écran est la seule conclusion possible. En ef-

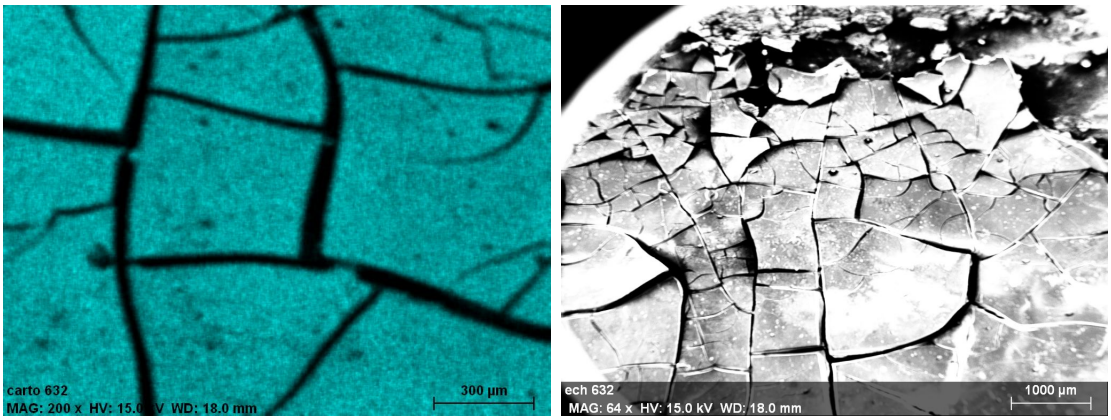


FIGURE 34 – Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli aux UV
Gauche : Référence & Droite : Photographie

fet, malgré les éléments chimiques présents, la photographie et les résultats d'essais prouvent respectivement une perte de cohésion de la couche de silicate et une moins bonne efficacité de cet écran après ce vieillissement.

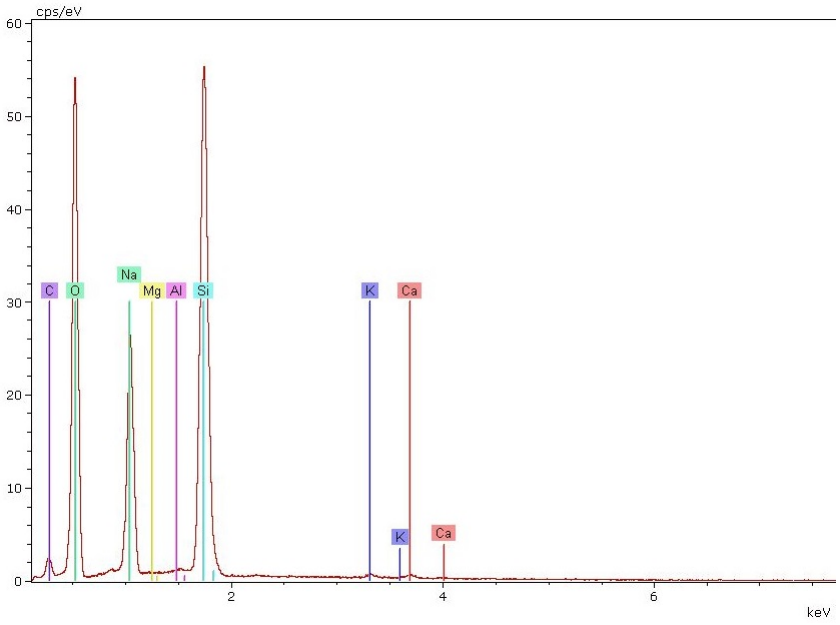


FIGURE 35 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli aux UV

Comme le prouve la figure 20 à la page 58, des zones où l'hydrofuge semble avoir disparu existent sur cet échantillon vieilli aux UV. Une deuxième analyse grâce au MEB-EDX est donc réalisée sur une zone sans "résidus rabattus"

Les deux photographies sont illustrées sur la figure 36. Celle de gauche confirme bien l'impression présente. En effet, le silicium n'est présent que sur des zones très localisées qui sont certainement des restes de la couche initiale. Cette analyse est renforcée par l'observation de l'image de droite où des petits amas de silicate de soude sont présents sur la surface du béton.

Le spectre, illustré à la figure 37, confirme les conclusions des deux photographies.

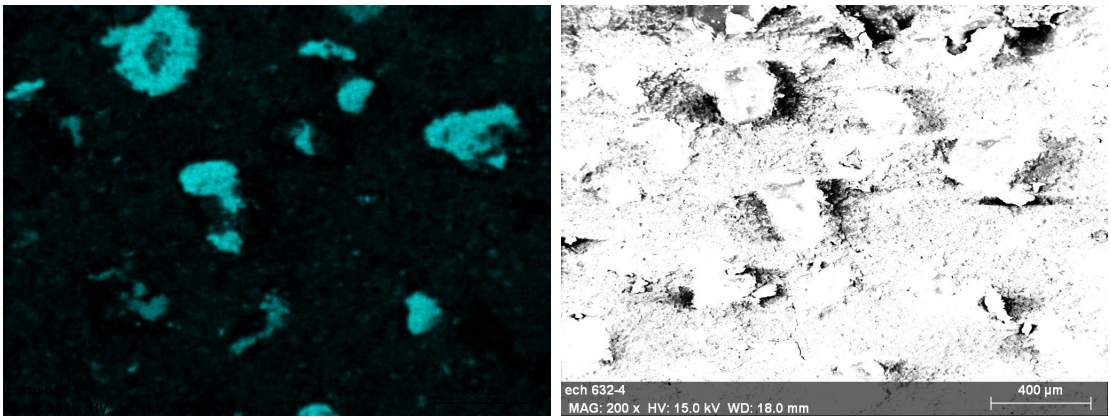


FIGURE 36 – Présence de Si à la surface de l'échantillon vieilli aux UV (2ème zone)
Gauche : Référence & Droite : Photographie

Effectivement, de manière similaire au spectre relatif au gel-dégel, les éléments constitutifs du ciment Portland retrouvent des valeurs importantes comparé au sodium qui devient presque inexistant.

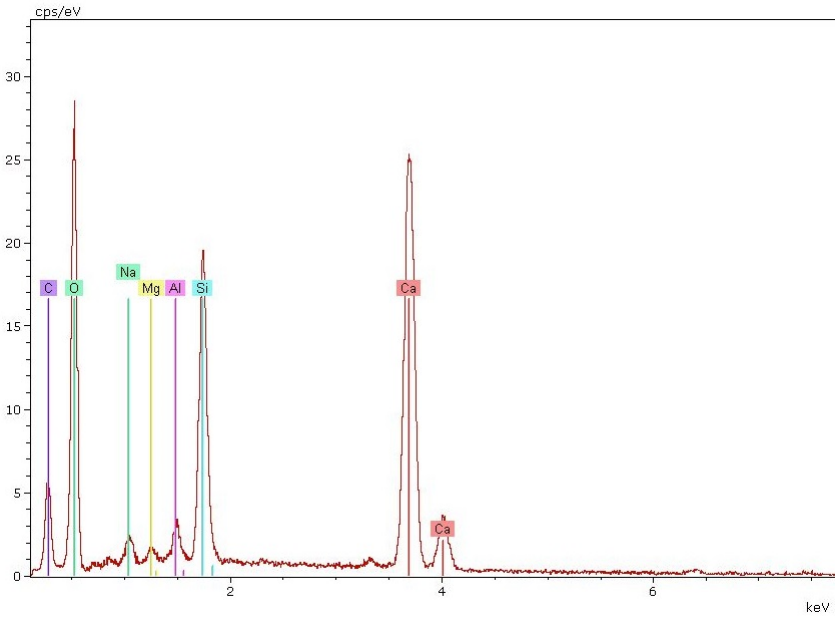


FIGURE 37 – Spectre des éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon vieilli aux UV (deuxième zone)

En conclusion, les différents résultats obtenus grâce au MEB-EDX permettent de caractériser la surface des échantillons sans pouvoir porter une analyse convenable sur l'efficacité des hydrofuges. Ces essais servent à fournir des preuves supplémentaires pour expliquer certains comportements observés lors d'autres essais.

5.3.6 Profondeur de carbonatation

De manière similaire à la détermination de la pénétration de l'agent hydrofuge, la mesure de la profondeur de carbonatation n'est pas évidente et reste approximative. L'aide de la phénolphtaléine (phi-phi) permet néanmoins une facilité supplémentaire.

Les valeurs obtenues sur les trois échantillons ayant subi la carbonatation sont renseignées sur le tableau 18.

Éprouvette	3-5-3-2	3-4-4-1	3-5-2-2
Profondeur de carbonatation	0,6 à 2 mm	5 à 6 mm	aucune carbonatation

TABLE 18 – Profondeur de carbonatation

L'échantillon traité au silicate de soude n'a pas été carbonaté. Cette analyse confirme la conclusion réalisée avec le test initial du MEB et l'impression lors de la mise en place. En effet, le silicate présentait une couche de protection formant un écran empêchant toutes attaques de l'environnement extérieur. Ainsi, en ne considérant que la carbonatation, le silicate présente une efficacité supérieure.

En ce qui concerne les deux autres échantillons, la carbonatation a pu débuter dans les premières épaisseurs du béton.

Des photos des mesures ont été effectuées et sont illustrées sur la figure 38. Celles-ci permettent de montrer la particularité de l'échantillon traité au Masterseal. Nous remarquons que la face "fond de moule" (située à gauche sur la photo) possède une profondeur de carbonatation moins importante qu'une face latérale sciée avant hydrofugation (située sur le bas de la photo). Cette remarque n'est présente qu'à titre d'information vu qu'aucune conclusion ne peut être déterminée à partir de cette particularité sans étude complémentaire.



FIGURE 38 – Photo de la profondeur de carbonatation
De gauche à droite : Masterseal, Antipluviol & Silicate de soude

5.3.7 Test de colorimétrie (Lab) [35]

Ce test n'est pas réalisé ni sur les échantillons initiaux ni sur les échantillons de référence. Pour les premiers, qui ne subissent aucun vieillissement, l'absence de résultats est justifiée par l'impossibilité d'obtenir une variation de colorimétrie, qui est le but de ce test. Pour les deuxièmes échantillons, la pertinence des résultats ne semble pas importante vu que l'étude se penche sur le vieillissement des traitements de surface. De plus, deux des trois échantillons de référence utilisés, ayant subi le gel-dégel, ont eu leurs surfaces largement dégradées.

Outre les simples variations de a*, b* ou L*, diverses formules peuvent nous permettre de comparer autrement la colorimétrie lors de nos vieillissements. La première analyse réalisable est la différence globale de couleur ΔE^* entre l'échantillon avant et après vieillissement qui est calculée grâce à la formule (9).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{9}$$

Une variation d'une unité est considérée comme juste discernable.

Le deuxième système pour comparer les variations de couleur est le système polaire CIE-L* C* h*. C* qui correspond à la saturation et h représente la teinte. Ces deux valeurs peuvent être calculées par les formules (10) et (11).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \tag{10}$$

$$h^* = tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \tag{11}$$

Comme les résultats le montreront, les variations de C* sont très faible lors des divers vieillissements. Nous pourrons négliger cette différence et représenter la luminance (L*) en fonction de la teinte (h*) sur un graphique 2D.

Tout d'abord, les résultats des différentes caractéristiques sont disponibles sur le tableau 19.

En rappelant que les échelles des différentes valeurs vont de 0 à 100, les résultats montrent que, pour certains vieillissements, de grandes variations (10 %) sont possibles. Par contre, aucun vieillissement ne provoque une altération plus que d'autre.

En ce qui concerne les hydrofuges, l'Antipluviol présente des variations de l'ordre de 1 % à 3-4 %. Cette observation pose les bases d'une conclusion sur une efficacité supérieure de ce produit pour cet essai.

Un graphique présentant la luminance en fonction de la teinte dans l'état initial et après vieillissement est illustré à la figure 39. Ce graphique permet une analyse globale sur l'action des vieillissements sur la couleur du béton.

Sur cette figure, les valeurs initiales paraissent plus regroupées que les valeurs obtenues après les vieillissements. De plus, aucune tendance commune ne se dégage de ce graphique. La teinte peut autant diminuer qu'augmenter de valeur et la clarté (luminance) peut autant s'éclaircir que s'assombrir. Néanmoins, la carbonatation présente la plus grande variation comparée aux autres vieillissements.

Les figures 40 et 41 proposent une vision des variations de couleur pour un même hydrofuge.

Échantillons	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*	$C^*_{initial}$	C^*_{final}	$h^*_{initial}$	h^*_{final}
2-3-1	7,80	-0,20	1,00	7,866	5,235	6,213	-1,056	-4,739
2-4-2	2,00	0,00	0,30	2,022	5,124	5,423	1,021	0,198
3-5-3-2	4,50	1,00	0,60	4,649	5,308	6,042	-0,409	0,176
3-4-4-1	0,85	0,10	-0,30	0,907	6,000	5,702	1,402	3,223
3-5-2-2	7,10	-0,50	-3,30	7,845	7,185	3,847	5,778	19,924
2-3-2	7,80	-0,10	0,80	7,842	5,025	5,814	1,542	-0,380
4-4-3	-4,00	0,20	0,60	4,050	4,005	4,617	0,447	-0,552
4-2-1	6,60	-1,40	-1,10	6,836	6,745	5,415	1,971	0,740
5-1-4	10,00	-1,80	1,00	10,210	4,428	5,001	-0,592	-3,678
5-3-2	1,30	0,30	-0,20	1,349	5,504	5,324	-1,022	0,418
6-5-2	7,10	0,30	0,30	7,113	4,909	5,235	1,385	-1,056
6-3-1	0,60	0,10	0,30	0,678	5,209	5,515	-0,055	0,408
6-3-2	2,50	-0,10	-0,80	2,627	6,512	5,707	-0,715	-0,398

TABLE 19 – Comparaison des mesures LAB

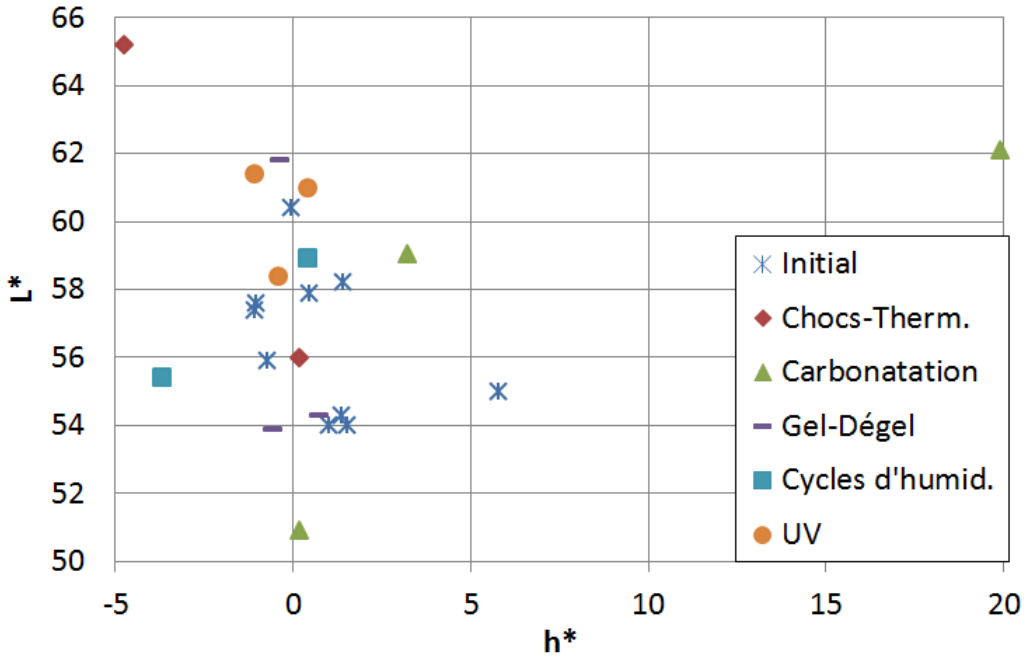


FIGURE 39 – Luminance (L*) en fonction de la teinte (h*)

L'analyse expliquant que l'Antipluviol est plus performant pour la conservation des couleurs est confirmée par ces trois graphiques.

En rappelant qu'une valeur de 1 pour ΔE* est significative, les échantillons traités au Masterseal présentent une variation d'environ 8 pour l'ensemble des vieillissements.

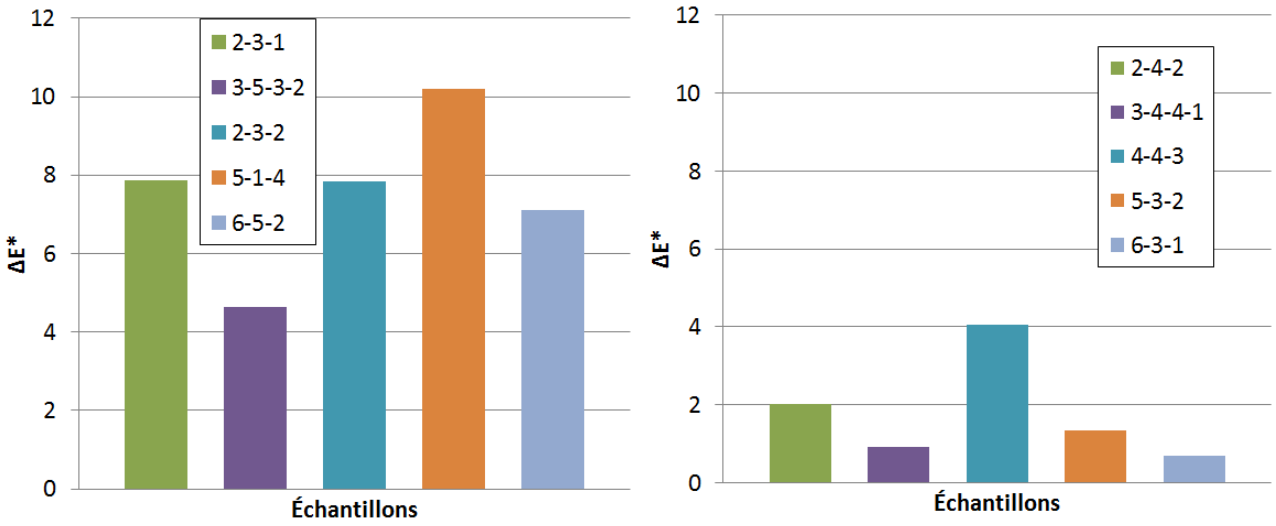


FIGURE 40 – Résultats de l'essai L*a*b*
Gauche : Masterseal & Droite : Antipluviol

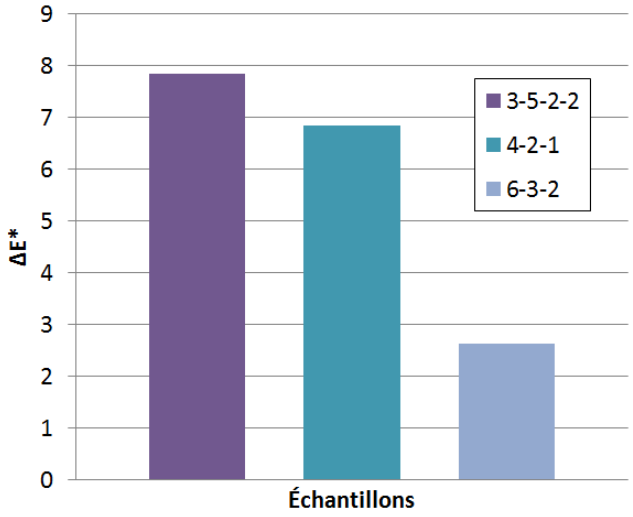


FIGURE 41 – Résultats de l'essai L*a*b* pour le Silicate

Seul la carbonatation et les cycles d'humidification présentent respectivement une plus faible et une plus grande variation de couleur.

En ce qui concerne l'échantillon traité avec l'Antipluviol, les variations de couleur ne dépassent pas la valeur "2" excepté pour le gel-dégel. Deux des vieillissements (Carbonatation et UV) provoquent des changements de couleur sous le seuil significatif.

Pour le traitement au silicate, même si le nombre de vieillissements à comparer est plus faible, les valeurs obtenues sont semblables à celles pour le Masterseal (ΔE^* proche de 8). Seul le cycle d'humidification propose une variation de couleur de l'ordre de 2,5.

En conclusion, l'Antipluviol se révèle mieux adapté pour la durabilité des couleurs. Ceci est sûrement du à la dilution du siloxane de l'Antipluviol dans du solvant contre de l'eau pour le Masterseal. En effet, comme la littérature nous l'a renseigné, l'usage

d'eau peut laisser une pellicule à la surface lors de la polymérisation qui peut, dés lors, se dégrader. L'observation des résultats permet également de supposer que les vieillissements par carbonatation et par cycles d'humidification dégradent moins les couleurs du matériau.

5.4 Analyse par hydrofuges

Pour les trois essais de perméabilité (vapeur d'eau, chlorure et eau liquide (capillarité)), une comparaison pour chaque hydrofuge est réalisée au sein de ce chapitre. Ainsi, l'influence des vieillissements pourra être analysée d'une façon plus détaillée que précédemment.

Au sein des histogrammes, l'ordre des vieillissements est maintenu et une couleur est attribuée à chacun d'eux. De plus, l'échantillon initial sans vieillissement ni hydrofuge est toujours renseigné sur les graphiques par le premier bâtonnet.

5.4.1 Perméabilité à la vapeur d'eau

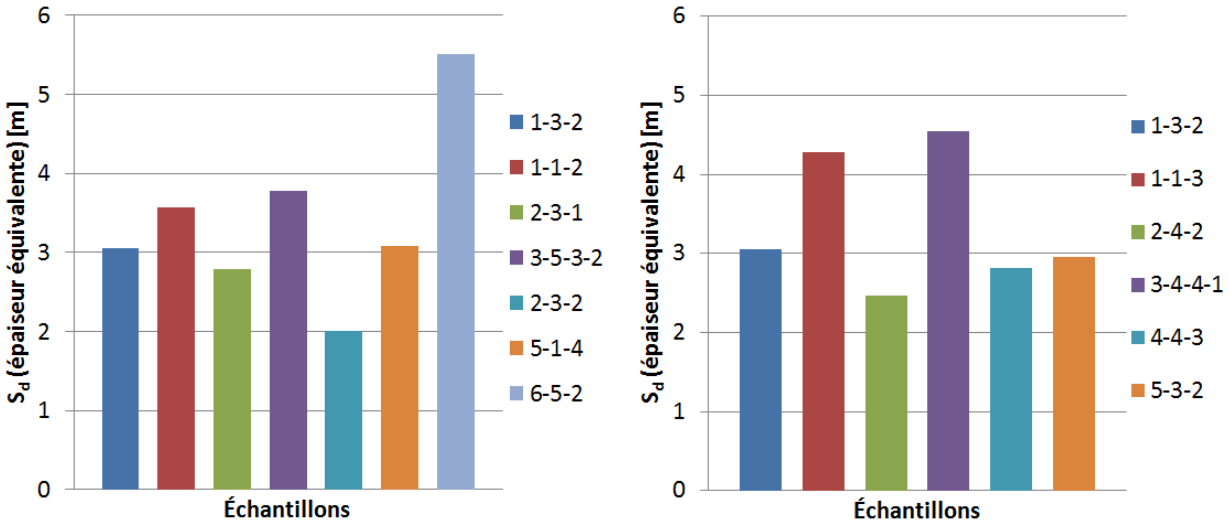


FIGURE 42 – Résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau
Gauche : Masterseal & Droite : Antipluviol

En ce qui concerne le produit Masterseal, l'image de gauche sur la figure 42 montre que celui-ci n'a pratiquement aucune influence sur la perméabilité à la vapeur d'eau. Comme précisé précédemment, ce résultat était attendu vu que les hydrofuges n'agissent théoriquement pas sur cette caractéristique. Même si des valeurs peuvent être plus faibles ou plus élevées, ces variations sont négligeables ou sont dues à des particularités liées aux échantillons.

Pour l'Antipluviol, l'image de droite de la figure 42 fournit exactement la même conclusion que précédemment. Par conséquent, ce produit n'agit pas non plus sur la perméabilité à la vapeur d'eau.

Finalement, pour le traitement par silicate de soude, la figure 43 permet d'effectuer les mêmes conclusions que précédemment.

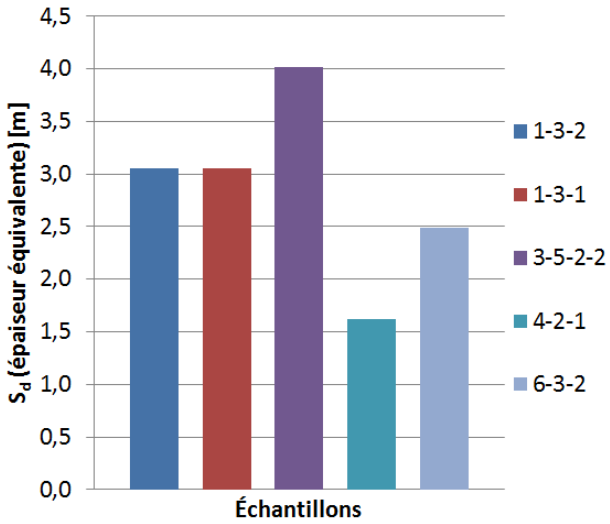


FIGURE 43 – Résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau pour le Silicate

En conclusion, les différents vieillissements altèrent très peu les différents hydrofuges concernant la perméabilité à la vapeur d'eau. Mais cette faible influence est liée à la passivité de ces différents produits concernant cette caractéristique. En effet, comme précisé plusieurs fois, le béton doit pouvoir respirer, même lorsque le traitement est appliqué.

5.4.2 Perméabilité aux chlorures

Sur chacun des graphiques est fixée une droite noire qui représente la limite entre la classe de perméabilité faible (en dessous) et la classe de perméabilité moyenne (au dessus).

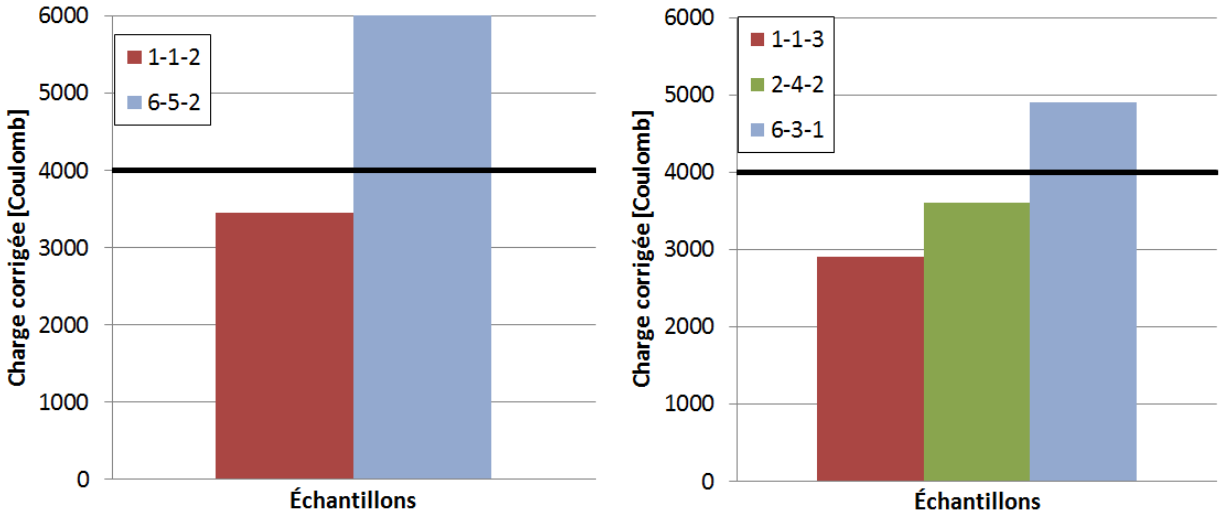


FIGURE 44 – Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures
Gauche : Masterseal & Droite : Antipluviol

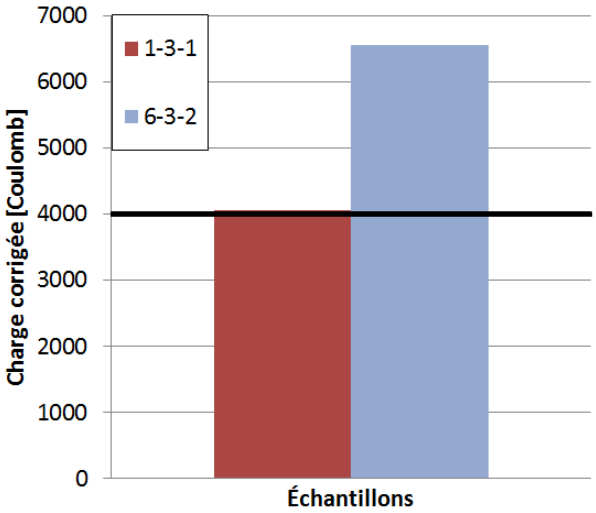


FIGURE 45 – Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures pour le Silicate

Pour les chlorures, l'image de gauche sur la figure 44 montre une variation importante entre l'échantillon traité initial et celui vieilli par les UV. La perméabilité pour ce dernier passe la droite noire et entre dans la classe possédant une perméabilité moyenne. Ainsi, l'efficacité du Masterseal diminue lors de l'exposition aux UV.

Pour l'Antipluviol, les mêmes conclusions peuvent être réalisées avec des valeurs légèrement inférieures. Des résultats pour le vieillissement par chocs-thermiques permettent de placer son influence à mi-chemin de celle effectuée par les UV. Ce vieillissement diminue l'efficacité mais reste acceptable, sans dépasser la limite de la classe de faible perméabilité.

En ce qui concerne le traitement au silicate de soude, la figure 45 fournit les mêmes conclusions que pour les deux autres produits. Néanmoins, les valeurs obtenues avec ce produit sont légèrement supérieures aux deux autres hydrofuges.

En conclusion, le classement entre les différents hydrofuges est, du moins efficace au plus efficace : Silicate, Masterseal et Antipluviol. D'autre part, contrairement à la perméabilité à la vapeur d'eau, les deux vieillissements analysés dégradent les traitements appliqués.

5.4.3 Capillarité

De manière similaire aux graphiques représentant la perméabilité aux chlorures, les graphiques pour la perméabilité à l'eau liquide contiennent une droite noire représentant le changement de classe. Ce changement passe d'une perméabilité faible (en dessous) à modérée (au dessus).

La figure 46 montre que l'efficacité du Masterseal et de l'Antipluviol s'équivalent à quelques faibles variations près. De plus, les chocs thermiques sont le seul vieillissement à dégrader fortement l'efficacité des deux hydrofuges même si le Masterseal présente une valeur double à celle de l'Antipluviol. L'échantillon correspondant au Masterseal passe dans la catégorie de perméabilité à l'eau liquide supérieure.

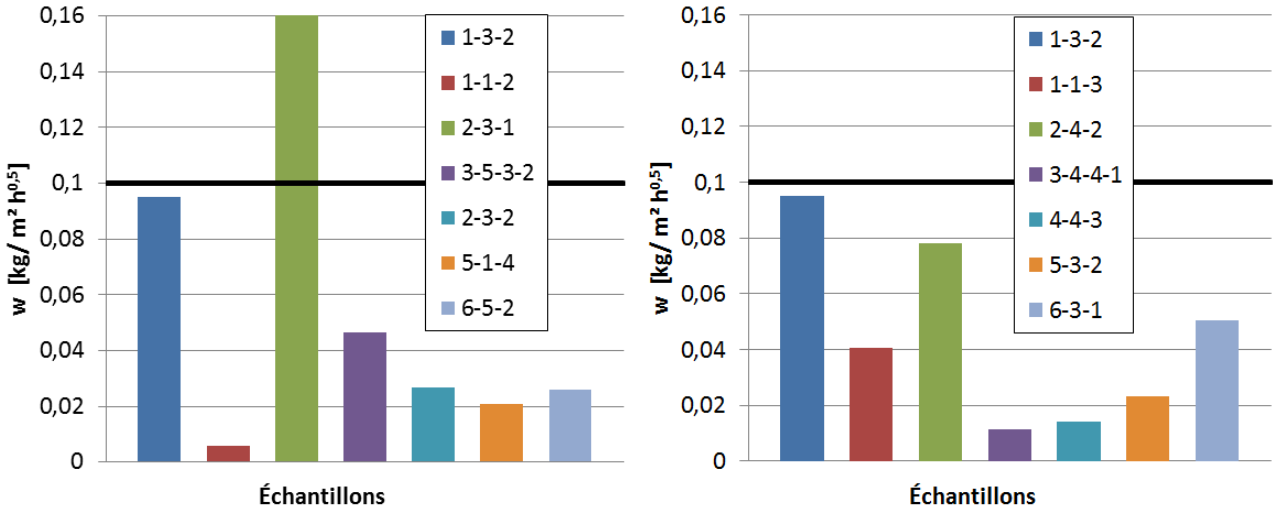


FIGURE 46 – Résultats de l'essai de capillarité
Gauche : Masterseal & Droite : Antipluviol

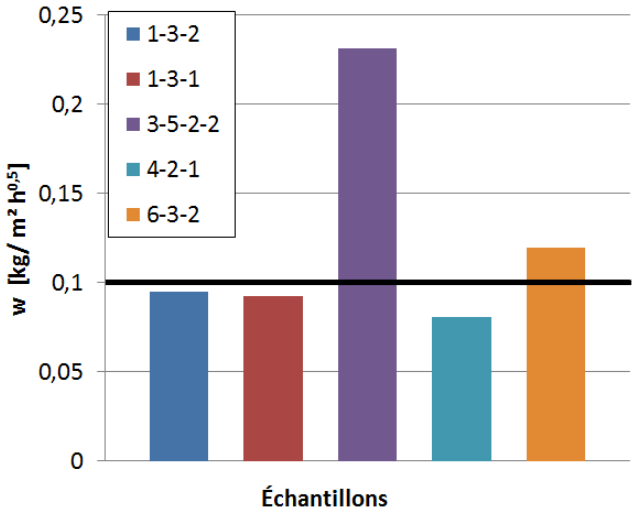


FIGURE 47 – Résultats de l'essai de capillarité pour le Silicate

En ce qui concerne le silicate de soude, la figure 47 montre une efficacité très faible du silicate de soude vu que les valeurs obtenues, après la mise en place, ne diminuent pas. De plus, des dégradations sont possibles en cas de carbonatation et d'exposition aux UV. Cette faible efficacité peut être expliquée par la réaction du silicate avec l'eau. Il apparait, après l'ensemble des vieillissements, que le silicate réagit mal avec l'eau et se désintègre en sa présence.

En conclusion, le silicate n'est pas conseillé pour lutter contre la capillarité tandis que l'Antipluviol et le Masterseal présentent de bonnes réductions d'entrées capillaires. Des études supplémentaires peuvent être exécutées pour déterminer les causes de dégradations des hydrofuges lors d'une attaque au gel-dégel.

6 Conclusion

Le monde de la restauration et de la protection du patrimoine est en constante évolution. Ne possédant aucune règle précise, seul le bon sens et quelques chartes motivent les architectes à considérer le patrimoine de manière respectueuse et durable.

Le développement de techniques modernes facilitant la protection d'ouvrage est une solution pour promouvoir l'intérêt de la préservation du patrimoine bâti. En effet des méthodes de protection simples, potentiellement moins coûteuses et régulièrement appliquées empêchent les longues réparations coûteuses et inesthétiques.

Les éléments d'un ouvrage soumis à l'environnement extérieur sont les premières zones d'une structure à subir des dégradations. À ce titre, une attention toute particulière est effectuée sur les attaques encourues par ces éléments.

Dans le cas du béton armé, il est apparu que l'entièreté des dégradations nécessitaient la présence d'eau et de dioxyde de carbone pour se développer. Ainsi, la commercialisation de nombreux produits imperméabilisants a débuté pour essayer de résoudre ce problème.

Depuis plus d'un siècle, de nombreux produits ont vu le jour pour ensuite disparaitre lors des diverses évolutions. La dernière en date propose des produits à base de silicone pénétrant au sein du béton pour rendre la surface du béton et des pores internes hydrophobes. Grâce à ce procédé, appelé hydrofugation, la respiration du béton est sauvegardée et la durabilité semble assurée.

Pour vérifier ces fondements, ce travail propose une série de vieillissements à exécuter sur les deux hydrofuges les plus utilisés actuellement, le silane et le siloxane. Pour ouvrir un peu plus cette recherche, un silicate de sodium est également testé même si son utilisation est déconseillée par la littérature.

Pour approcher au maximum les dégradations naturelles (écaillage, corrosion, ...), les vieillissements sélectionnés représentent la majorité des causes susceptibles d'engendrer de telles dégradations. Avant et après ceux-ci, une série d'essais permet de caractériser l'efficacité de ces divers produits.

Ayant élaboré toute une méthodologie pour ce travail, de nombreux résultats nous permettent d'effectuer des conclusions sur les différents produits :

1. Les silicates ont montrés une très mauvaise réaction durant quatre des cinq vieillissements entrepris (gel-dégel, chocs-thermiques, UV et cycles d'humidification).
2. Les profondeurs de carbonatation sont très faibles voire nulle pour le silicate.
3. Les résultats initiaux montrent une efficacité globale pour les trois hydrofuges. Comme l'annonce la littérature, les silanes et siloxanes sont de meilleure qualité.
4. Le silicate produit un écran sur la surface qui le rend exemplaire pour arrêter la carbonatation si ce produit n'est pas détérioré par les vieillissements. Le silane en phase aqueuse suit en diminuant la carbonatation face au siloxane en phase solvant.
5. Le seul hydrofuge a pouvoir empêcher un changement de couleur significatif est le siloxane en phase solvant. En effet, les deux autres produits peuvent laisser, lors de l'application, des traces en surfaces qui se modifieront lors des vieillissements.

6. La perméabilité à la vapeur d'eau est très peu influencée par l'application de ces trois hydrofuges. La respiration du béton n'est donc pas entravée.
7. Encore une fois, le siloxane présente une meilleur durabilité face aux deux autres hydrofuges. Malgré tout, une augmentation générale de la perméabilité est observée lors des vieillissements. Ainsi, la durabilité générale des hydrofuges pour cette caractéristique est fort limitée.
8. Le dernier essai, caractérisant la principale entrée d'eau au sein d'un béton, place le silane et le siloxane ensemble en tête de classement. Ces produits proposent une diminution de 60 à 80 % pour l'ensemble des vieillissement sauf les chocs thermiques. En ce qui concerne le silicate, il ne diminue pas la capillarité qui est une des conditions primordiales d'un bon hydrofuge.

Après toutes ces constatations, le siloxane en phase solvant présente les meilleurs résultats par rapport au silane en phase aqueuse. Le silicate, quant à lui, est totalement déconseillé pour ce type d'utilisation.

La différence entre les deux produits retenus peut venir soit des performances des agents actifs, soit de la technique de dilution de ces agents. L'état de la connaissance fournissant des efficacités fort similaires entre ces deux produits, la conclusion est que, comme l'annonce certaines références, la dilution dans le solvant est plus efficace même si moins écologique.

L'usage de tels produits fournit une protection fiable et durable pour le patrimoine bâti. Une ré-application périodique ne peut qu'améliorer le fonctionnement de ce traitement. Une autre possibilité est un traitement combiné de plusieurs produits, comme une application silane/siloxane, qui, selon la littérature, lie les avantages des deux sous-produits mélangés.

De nombreuses recherches supplémentaires sur les causes précises de dégradations des hydrofuges et sur la possibilité de combinaison ne peuvent être que positives pour essayer de créer de nouveaux produits encore plus durables, encore plus écologiques et encore plus performants.

Un ouvrage possède une fonction mais également une histoire que la société se doit de protéger. Sauvegarder un patrimoine bâti, qui se veut fragile à l'échelle des civilisations, est enrichissant tant du point de vue de l'histoire de la technique que de la culture et des coutumes des sociétés.

Bibliographie

[1] *Dictionnaire Larousse en ligne.* www.larousse.fr/dictionnaires.

[2] *Livre III, Titre I, Article 185 du Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et du patrimoine.* Moniteur Belge.

[3] *Article L621-1 du code du patrimoine français*, septembre 2005.

[4] C. Abseque. *Étude de l'éfficacité des produits imperméabilisants pour pr évenir la dégradation de la face aval des barrages en béton.* PhD thesis, Université de Laval, Québec, 2001.

[5] J. Apers. *Technologie du béton*, chapter *V : La durabilité des béton*, pages 195–250. Bruxelles, 4^e edition, 2006.

[6] L. Basheer and D.J. Cleland. *Durability and water absorption properties of surface treated concretes. Materials ans Structures*, 44 :957–967, 2011.

[7] P.A.M. Basheer, L. Basheer, D.J. Cleland, and A.E. Long. *Surface treatment for concrete : assessment methods and reported performance. Construction and building materials*, 11 :413–429, 1997.

[8] K. Carion. *Analyse de l'influence des hydrofuges dans un béton soumis à l'environnement marin.* Master's thesis, Université de Liége, Liége, 2009.

[9] CEN (Comité Européen de Normalisation). *Peintures et vernis - Produits de peintures et systèmes de revêtement pour maçonnerie et béton extérieurs - Partie 3 : Détermination et classification du taux de la permábilité à l'eau liquide*, 1998.

[10] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 1766 Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Méthodes d'essais - Bétons de référence pour essais*, 2000.

[11] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 13687-1 Products ans sustems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of thermal compatibility - Part 1 : Freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion*, 2002.

[12] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 1504-2 Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le b éton*, 2005.

[13] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 12350-2 Essai pour béton frais - Partie 2 : Essais d'affaissement*, 2009.

[14] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 12350-6 Essai pour béton frais - Partie 6 : Masse Volumique*, 2009.

[15] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 12390-3 Essai pour béton durci - Partie 3 : Résistance â la compression*, 2009.

[16] CEN (Comité Européen de Normalisation). *NBN EN 12390-7 Essai pour béton durci - Partie 7 : Masse Volumique du béton durci*, 2009.

[17] L. Courard. *Caractères généraux des matériaux*. Université de Liège. notes de cours.

[18] L. Courard. *Maintenance, entretien et réparation des construction en béton*. Université de Liège, 2008-2009. notes de cours provisoires.

[19] G. Croci. *The conservation and structural restoration of architectural heritage*. Computational mechanics publications, Southampton and Boston, 1998.

[20] CSTC. *Hydrofugation de surface*. Technical Report 224, Centre Scientifique et technique de la Construction, Bruxelles, 2002.

[21] G. de Pierpont. *Mieux restaurer le patrimoine architectural ?* Fondation Roi Baudouin, Bruxelles, 1997.

[22] J. De Vries and R.B. Polder. *Hydrophobic treatment of concrete. Construction and Building Materials*, 11 :259–265, 1997.

[23] J. Earl. *Building conservation philosophy*. Donhead, third edition, 2003.

[24] Energie+. *Architecture et Climat*. Université de Louvain, 2012. réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4 - Département de l'Énergie et du Bâtiment Durable, http ://www.energieplus-lesite.be/index.php, Consulté le 23/05/2013.

[25] S. Eyssautier-Chuine, G. Fronteau, M. Gommeaux, C. Thomachot-Schneider, and G. Michaud. *estimation de l'efficacité et de la durabilité par vieillissement naturel des produits protecteurs de la pierre : le programme HYBRIPROTECH. Matériaux et Techniques*, (99) :547–553, 2011.

[26] American Society for Testing and Materials (ASTM). *C1202-97 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. 1997.

[27] R. Gagné. *Durabilité et réparation du béton*, chapter *3.4, 3.5 & 3.6 - Les réparations du béton*, pages 255–305. Université de Sherbrooke, 2009. notes de cours.

[28] R. Gagné. *Durabilité et réparations du béton*, chapter *3.7 - Hydrofuges et membranes d'imperméabilisation*, pages 306–324. Université de Sherbrooke, 2009. notes de cours.

[29] K. Hazrati. *Efficacité des scellants face au problème d'ecaillage du beton en présence de sels fondants*. Master's thesis, Université de Laval, Quebec, 1993.

[30] D.A. Kagi and K.B. Ren. *Reduction of water absorption in silicate treated concrete by post-treatment with cationic surfactants. Building and environment*, 2 :237–243, 1995.

[31] C. Ladang and C. Xhonneux. *Technologie du béton*, chapter *II.1 : Le ciment*, pages 23–66. Bruxelles, 4^e edition, 2006.

[32] M. Medeiros and P. Helene. *Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. Materials and Structures*, (41) :59–71, 2008.

[33] M. Medeiros and P. Helene. *Surface treatment of reinforced concrete in marine environment : influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption.* (23) :1476–1484, 2009.

[34] P. Mivelaz. *Étanchéité des structures en béton armé : Fuites au travers d'un élément fissuré.* PhD thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1996.

[35] C. Moreau. *Vieillissement naturel en milieu urbain de pierres calcaires hydrofugées : évaluation de la durabilité des traitements et de leur impact sur le nettoyage.* PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2008.

[36] A. Neville. Chloride attack of reinforced concrete : an overview. *Materials ans Structures*, (28) :63–70, 1995.

[37] A. Norman. *L'architecture sans fin : Réstauration, rénovation, ráffectation du patrimoin bâti.* Le centre culturel du brabant wallon - Maison de l'urbanisme, Court-Saint-Etienne, 2000.

[38] ISO (Organisation internationale de normalisation. *Peintures et vernis - Détermination du coefficient de transmission de la vapeur d'eau - Partie 1 : Méthode de la capsule pour feuils libres*, 1996.

[39] ISO (Organisation internationale de normalisation. *Peintures et vernis - Produits de peintures et systèmes de revêtement pour maçonnerie et béton extérieurs - Partie 2 : Détermination et classification du taux de transmission de la vapeur d'eau (permábilité)*, 1999.

[40] C. Périer-d'ieterent. *La restauration en Belgique de 1830 à nos jours - Peinture, sculture, architecture.* Mardaga, Liège, 1991.

[41] P.H. Perkins. *Repair, Protection and Waterproofing of concrete structures.* E & FN Spon, Londres, third edition, 1997.

[42] Protect Crete Australia PTY. *Why Densi-Proof works and sodium silicates (and other look a likes) don't.* http ://www.con-treat.com.au/pdf/sodium_silicates.pdf.

[43] C. Reny. *Pincipes et critères de restauration et d'insertion.* Les publications du Québec, 1991.

[44] A.C. Roks. *Effet des fillers calcaires sur la résistance aux chlorures des mortiers : Étude comparative des essais.* Master's thesis, Univeristé de Liège, 2008.

[45] M. Roth. *Siliconates, silicones resins, silanes, siloxanes. Technology Information Leaflet*, page 6 pages, 1983.

[46] P. Turcry, F. Jacquemot, A. Younsi, A. Aï t Mokhtar, and P. Rougeau. *Rapport de synthèse sur les essais de carbonatation accélérée*, 2010. Projet financé par l'Agence National de la Recherche sous l'égide du Réseau Génie Civil et urbain.

[47] Pollet. V. *Technologie du béton*, chapter *XI : Décofrage, cure et protection du béton*, pages 411–438. Bruxelles, 4^e edition, 2006.

[48] J.M. Vallet. *La protection des pierres : Guide sur les hydrofuges de surface.* Technical Report 3, Cercle des partenaires du patrimoine, Champs-Sur-Marne, 2000.

[49] D. Withing. *Rapid determination of the chloride permeability of concrete. Federal Highway Administration Report*, (FHWA/RD-81/119), Août 1981. NTIS No. PB 82140724.

[50] R.S.C. Woo, H. Zhu, M.M.K. Chow, C.K.Y. Leung, and J-K. Kim. *Barrier performance of silane-clay nanocomposite coating on concrete structure. Composites science and technology*, 68, 2008.

[51] C.C Yang and S.W. Cho. *The relationship between chloride migration rate for concrete and electrical current in steady state using the accelerated chloride migration test. Materials and Structures*, 37(7) :456–463, Août 2004.

[52] Y. Yuan and T. Randall Lee. *Contact angle and wetting properties. Surface Science Techniques*, 51 :3–34, 2013. Springer Series in Surface Sciences.

Annexes

Classement et représentation des échantillons utilisés

Gâchée	Vieillissement	Échantillon	Hydrofuge
Gâchée 1	Aucun	1-1-2	Masterseal 303
		1-1-3	Antipluviol S
		1-3-1	Silicate de soude
		1-3-2	Aucun
Gâchée 2	Chocs Thermiques	2-3-1	Masterseal 303
		2-4-2	Antipluviol S
		2-1-2	Silicate de soude
		2-4-4	Aucun
Gâchée 3	Carbonatation	3-5-3	Masterseal 303
		3-4-4	Antipluviol S
		3-5-2	Silicate de soude
Gâchée 2		2-3-2	Masterseal 303
Gâchée 4	Gel-Dégel	4-4-3	Antipluviol S
		4-2-1	Silicate de soude
		4-1-1	Aucun
Gâchée 5	Cycles d'humidification	5-1-4	Masterseal 303
		5-3-2	Antipluviol S
		5-1-1	Silicate de soude
		5-1-3	Aucun
Gâchée 6	Exposition aux UV	6-5-2	Masterseal 303
		6-3-1	Antipluviol S
		6-3-2	Silicate de soude
		6-1-4	Échantillon supprimé

Table 20 – Classement des échantillons utilisés lors de cette recherche

		Représentation Noir & Blanc	
Hydrofuge	Couleur	Graphique (x-y)	Histogramme (jusqu'au chap. 5.3.7)
Masterseal	Bleu	Losange	$1^{ère}$ barre
Antipluviol S	Rouge	Carré	$2^{ème}$ barre
Silicate de soude	Vert	Triangle	$3^{ème}$ barre
Référence	Mauve	Rond	$4^{ème}$ barre

Table 21 – Représentations des échantillons dans les graphiques

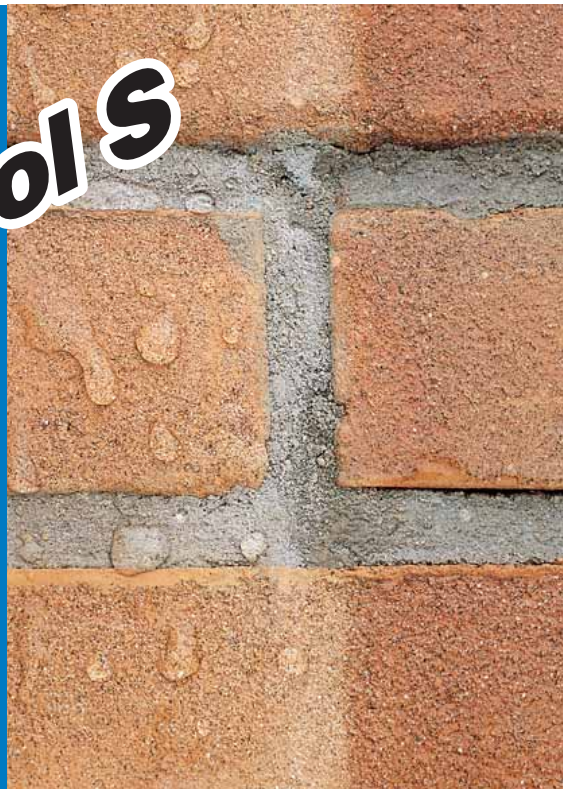
Fiche Technique "Antipluviol S"

MAPEI

Antipluviol S

Drop Effect

Hydrofuge incolore à base de résines siloxaniques



DOMAINE D'APPLICATION
Protection incolore des façades en béton, enduits de ciment, béton cellulaire, briques de parement pierres naturelles et reconstituées, carreaux non émaillés contre la pluie et les agressions atmosphériques.

Quelques exemples d'application
- Protection des façades contre les pluies battantes.
- Traitement préventif contre la carbonatation du béton apparent.
- Protection hydrofuge et incolore des édifices historiques sans altérer l'aspect de surface.
- Traitement hydrofuge des façades (béton, briquettes de parement etc).

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
Antipluviol S est un liquide incolore à base de résines siloxaniques en phase solvant, pouvant imprégner tous les matériaux minéraux et poreux utilisés dans le bâtiment.

Antipluviol S pénètre en profondeur et forme un revêtement hydrofuge qui "repousse l'eau", assurant ainsi une protection efficace contre les agents atmospheriques transportés par les eaux de pluie.

Antipluviol S ne modifie pas l'aspect des surfaces traitées et permet de conserver une bonne perméabilité à la vapeur d'eau.

Antipluviol S résiste parfaitement aux ultra-violets et aux alcalis.

INDICATIONS IMPORTANTES
Antipluviol S est déconseillé pour les applications suivantes:

– les sols;

– les caves;

– les bassins et piscines;

– les fosses d'ascenseur ou toute construction soumise à la pression de l'eau;

– les surfaces en plâtre;

– les enduits synthétiques ou décorés à l'aide des peintures synthétiques.

Préalablement à l'application de **Antipluviol S** sur pierres naturelles, enduits teintés et autres supports poreux, il convient d'effectuer un essai afin de vérifier qu'il n'existe ni variation de teinte ni risque de tachage.

MODE D'EMPLOI
Préparation des supports
Les surfaces à traiter doivent être parfaitement nettoyées.

Eliminer toutes substances pouvant empêcher la pénétration du produit (poussière, huile décoffrage, efflorescences, salissures diverses etc.).

Antipluviol S



Application d'Antipluviol S

DONNEES TECHNIQUES (valeurs types)	
DONNEES D'IDENTIFICATION DU PRODUIT	
Aspect:	liquide
Couleur:	transparent
Masse volumique (g/cm³):	0,83
Stockage:	24 mois en emballage d'origine dans un local tempéré
Extrait sec (%):	7,5
Viscosité Brookfield (mPa•s):	11 (arbre 1 - vitesse 100)
Classe de danger selon CE 1999/45:	nocif, facilement inflammable, dangereux pour l'environnement. Avant utilisation consulter le paragraphe "Instructions de sécurité pour la préparation et la mise en oeuvre" et les informations reportées sur l'emballage et sur la Fiche de Donnés de Sécurité
Classification douanière:	3823 90 95
DONNEES D'APPLICATION	
Temps de séchage superficiel:	1 h
Délai d'attente entre passes:	2 h
Température d'application:	de +5°C à +30°C

Les choix du système de nettoyage dans le cas de supports anciens, dépend du type de saleté. En règle générale, un lavage à l'eau chaude ou à la vapeur s'avère efficace.

Dans tous les cas, il est conseillé d'effectuer un brossage soigneux et un dépoussiérage à l'air comprimé.

Après nettoyage, attendre le séchage complet du support avant d'appliquer **Antipluviol S**.



Traitement de brique de parement

Préparation du produit

Antipluviol S est prêt à l'emploi et doit être utilisé sans dilution ni ajout.

Application du produit

L'efficacité du produit dépend de la profondeur de pénétration dans le support.

Ce paramètre est naturellement fonction de la porosité du matériau à traiter et de la quantité de produit appliqué.

Appliquer **Antipluviol S** à saturation, à la brosse, au rouleau ou au pulvérisateur, en deux ou trois passes successives si nécessaire, espacées d'environ 2 heures.

N.B.: Antipluviol S ne peut être peint. Cette opération doit être effectuée préalablement et avec des peintures inorganiques (ex. silicates).
Dans tous les cas, un essai préalable doit être réalisé.

Nettoyage

Les outils devront être nettoyés à l'aide de solvants (essence, etc.).

CONSOMMATION

La consommation varie en fonction du pouvoir absorbant du support.

Consommations théoriques données à titre indicatif:

béton:	0,15-0,30 kg/m² par passe
enduit ciment:	0,25-0,60 kg/m² par passe
briques de parement:	0,30-1,00 kg/m² par passe
pierre naturelle:	0,10-0,30 kg/m² par passe

CONDITIONNEMENT
Antipluviol S est livré en bidons de 5 et 10 kg.

STOCKAGE
Antipluviol S se conserve en emballage d'origine dans un local tempéré, éloigné de toute source de chaleur (flammes, étincelles...).

PRECAUTIONS D'EMPLOI
Antipluviol S contient des solvants inflammables, nocifs et dangereux pour l'environnement aquatique.
L'utilisation de gants, de lunettes de protection et de masque est impérative.
Observer toutes les précautions relatives à l'utilisation des produits inflammables (ne pas fumer, ne pas approcher de flammes, de source de chaleur etc.).
Dans le cas d'application en intérieur, prévoir une bonne aération des locaux.
Les vêtements de travail imprégnés du produit devront être immédiatement changés.
Déchets à traitement spécial.
Eliminer comme déchets dangereux.
Consulter la Fiche de Données de Sécurité avant utilisation.

PRODUIT DESTINE A UN USAGE PROFESSIONNEL.

AVERTISSEMENT
Les informations et prescriptions de ce document résultent de notre expérience. Les données techniques correspondent à des valeurs d'essais en laboratoire. Vérifier avant utilisation si le produit est bien adapté à l'emploi prévu dans le cadre des normes en vigueur. Ce produit est garanti conformément à ses spécifications, toute modification ultérieure ne saurait nous être opposée.

Les indications données dans cette fiche technique ont une portée internationale. En conséquence, il y a lieu de vérifier avant chaque application que les travaux prévus rentrent dans le cadre des règles et des normes en vigueur, dans le pays concerné.

Toutes les références relatives à ce produit sont disponibles sur demande et sur le site www.mapei.be, www.mapei.ch, www.mapei.fr ou www.mapei.com

Fiche Technique "Masterseal 303"

BASF
The Chemical Company

CE
0749

BASF Belgium Coordination Center Comm. V. - Business Belux - Construction Chemicals
Nijverheidsweg 89, B-3945 Ham

11

0749 - CPD
BC2-562-0013-0005-001

EN 1504-2

Water based, alkyl alkoxy silane, hydrophobic treatment

Penetration depth	Class I
Water absorption and alkali resistance	Pass
Drying time	Class I
Freeze/Thaw resistance	Pass

Masterseal® 303

Hydrofuge sans solvants pour la protection des surfaces en béton (horizontales et verticales).



Description
MASTERSEAL 303 est un hydrofuge alkyl alkoxy silane. Il pénètre dans le substrat pour se lier chimiquement à lui.

Conditionnement et stockage
Le MASTERSEAL 303 est livré en bidon plastique de 20 litres et containers de 1.000 litres. Le produit doit être stocké à couvert, à l'abri du gel, sur palette en ne superposant pas plus de 2 bidons.
Durée de conservation: 12 mois.
La température de stockage ne doit pas dépasser 35°C.

Domaines d'application
MASTERSEAL 303 est un hydrofuge d'imprégnation destiné à la protection des surfaces horizontales ou verticales de béton, exposées aux agressions climatiques ou aux ions chlorures. Il peut être utilisé sur des structures anciennes ou nouvelles, telles que bâtiments, superstructures de ponts, autoroutes, barrières de béton, parkings, stades, aéro-réfrigérants et de nombreuses autres structures architecturales.

Avantages
Durable
En pénétrant profondément dans le subjectile, MASTERSEAL 303 lui procure une protection hydrophobe durable, qui prévient les dégradations du béton causées par l'eau, les sels (ion chlorure), la pollution atmosphérique et les cycles gel/dégel.

Esthétique
Améliore l'esthétique des surfaces traitées en réduisant les efflorescences, la prolifération des cryptogames et l'encrassement
Ne modifie pas l'aspect initial de la surface traitée.

Respecte l'environnement
MASTERSEAL 303 réduit de façon très significative les émissions de composants organiques volatils dans l'atmosphère en comparaison de celles émises habituellement par les hydrofuges solvantés.
De plus, MASTERSEAL 303 procure un confort d'utilisation à l'applicateur en minimisant les risques d'accidents respiratoires associés aux solvants organiques.

Facile à mettre en œuvre
Prêt à l'usage. Pas de dilution sur chantier donc une qualité constante.
Une seule application, sans primaire.
Le masquage des vitres des fenêtres n'est pas nécessaire avant la projection.
Peut être appliqué sur subjectiles humides.
Matériels de projection lavable facilement à l'aide d'eau savonneuse.

Economique
Pratiquement aucune évaporation de produit durant la projection. Une plus grande quantité de silane actif peut donc atteindre son but, minimisant les pertes et optimisant le rendement.

Couleur
Liquide de couleur laiteuse à l'application devenant incolore après séchage.

The Chemical Company

Tests et certifications
Des rapports d'études d'organismes indépendants attestent que le MASTERSEAL 303 assure une protection performante et durable.

CTL (USA) : Protection supérieure – absorption d'eau (NCHRP 244, Series II-Cube Test).
TRL (UK) : Protection supérieure contre les ions de chlorure.
CTL (USA) : Résistance aux cycles gel/dégel excellente (ASTM C 672).
CTL (USA) : Résultats supérieurs après vieillissement accéléré (NCHRP 244, Series IV-Southern Climate).
Rapport TNO (NL) : Approuvé par 'Rijkswaterstaat' pour l'utilisation sur ponts, viaducs et autres systèmes en béton à base de ciment Portland et de ciments laitiers.
SINTEF (N) : Diffusion chlorures.

Consommation
3 à 10 m²/litre sur béton.
La consommation varie en fonction de la porosité et de la finition de surface du béton.

Mode d'emploi
Essayer le produit sur une petite surface avant de procéder à l'application générale, afin de s'assurer des résultats et des rendements souhaités.

Préparation de la surface
Les surfaces de béton neuf doivent être propres, exemptes de sable, de poussière, de saleté, d'huile, de graisse, de films chimiques, de revêtements ou d'autres contaminants susceptibles de gêner la pénétration du produit. Un nettoyage sous pression, un sablage ou un grenaillage peut être nécessaires pour obtenir l'état de surface souhaité. Les travaux de calfeutrement et de jointoiement doivent être effectués avant l'application d MASTERSEAL 303, en tenant compte des temps de cure indiqués par les instructions des fabricants.

Mélange
MASTERSEAL 303 est prêt à l'emploi, mélanger légèrement.

Application
Les températures de la surface à traiter, du produit et de l'air ambiant pendant l'application, doivent être comprises entre 5°C et 35°C. Ne pas appliquer le MASTERSEAL 303 lorsque la température risque de descendre au-dessous de 5°C, dans les 12 heures ou si la pluie risque de tomber dans les 4 heures suivant l'application.

Les surfaces à traiter être légèrement humides mais une surface sèche est recommandée pour obtenir la pénétration maximale, gage de meilleurs résultats.
Pour des surfaces verticales, appliquer de bas en haut le MASTERSEAL 303 en s'assurant d'une répartition uniforme du produit. Appliquer jusqu'à saturation, à une distance maxima de 20 cm. L'usage d'un système à basse pression mais sans pulvérisation, est recommandé.
Pour les surfaces horizontales, verser le MASTERSEAL 303 et répartir uniformément au balai.

Cure
Il est recommandé de ne pas remettre en service les surfaces traitées en MASTERSEAL 303 avant un délai minimum de 4 heures, afin de permettre une pénétration optimale.
MASTERSEAL 303 peut rendre temporairement glissantes les surfaces traitées et ce, pendant plusieurs heures après l'application.
Des bandes de marquage peuvent être peintes lorsque MASTERSEAL 303 est complètement sec.

Nettoyage et projections
L'équipement et les surfaces aspergées accidentellement peuvent être immédiatement nettoyés à l'aide d'eau savonneuse pour éviter d'éventuelles taches. MASTERSEAL 303 risque de laisser en séchant, des résidus visibles sur des matériaux non poreux tels que le verre, le métal et les surfaces peintes.

La pellicule de produit polymérisée peut être éliminée par grattage à l'aide d'une lame métallique. Les végétaux doivent être protégés contre les projections accidentelles.

Précautions d'emploi
Le MASTERSEAL 303 n'est pas toxique. Il est toutefois recommandé de porter des gants et des lunettes de protection. Des éclaboussures accidentelles de produit sur la peau ou les yeux doivent être immédiatement lavées à l'eau claire. En cas d'irritation prolongée, consulter un médecin.
Pour des renseignements complémentaires, consulter la fiche de sécurité.

Caractéristiques techniques

Composants actifs	20% en poids
Densité	1,010 kg/litre
Point éclair (ASTM D 3278.82)	> 93°C
Moyenne de profondeur de pénétration	2 – 3,2 mm, mais varie avec la qualité du béton
Transmission de vapeur d'eau (Oklahoma Dot St OHD-L-35)	102%
Absorption d'eau	5,3 à 8,3% du non traitée
Résistance à la pénétration des ions chlorures	< 0,01% (poids ciment) à 2 mm de profondeur
Diffusion des chlorides	93% de réduction comparé au non traité

BASF Belgium Coordination Center Comm. V. –
Business Belux – Construction Chemicals
Industrieterrein 'Ravenshout' 3711
Nijverheidsweg 89, B-3945 Ham
Tel. +32 11 34 04 34. Fax +32 11 40 13 92
basf-cc-be@basf.com - www.basf-cc.be
B.T.W./T.V.A. BE 0862.390.376
RPR/RPM Antwerpen

Contact pour les Pays-Bas
Tel. +31 162 42 51 90. Fax +31 162 42 74 52
basf-cc-be@basf.com - www.basf-cc.nl

Cette information est basée sur notre meilleure connaissance du produit. L'acheteur/applicateur effectuera, en fonction du support et du chantier d'une part, de la mise en œuvre et conditions de travail d'autre part, sur lesquels BASF Construction Chemicals n'a aucune influence, sous sa responsabilité un essai d'adéquation du produit et ce avant de commencer la réalisation. Des conseils écrits et oraux, conforme à nos conditions générales de vente sont sans engagement de notre part. La dernière édition des fiches techniques annule et remplace les précédentes.

Variation de masse durant les cycles d'humidification

Durée [heures]	0	24,5	43,5	43,5	163,5	188,25	235,5	336	360	378
Masterseal 303	0	0	-0,001	-0,001	-0,007	0	0,006	0,014	0,016	0,017
Antipluviol S	0	0	0	0	-0,005	0,001	0,007	0,016	0,016	0,018
Silicate de soude				0,0254	-0,001	0,027	0,048	0,077	0,082	0,083
Référence	0	-0,006	-0,009	-0,009	-0,021	-0,004	0,008	0,022	0,024	0,025

Durée [heures]	402	578	595,5	666,5	690,25	739,75	835	883,5	910
Masterseal 303	0,011	-0,009	-0,011	-0,015	-0,01	-0,004	0,004	0,008	-0,002
Antipluviol S	0,013	-0,006	-0,008	-0,012	-0,007	-0,001	0,007	0,011	0
Silicate de soude	0,06	0,009	0,006						
Référence	0,01	-0,027	-0,03	-0,036	-0,022	-0,009	0,008	0,013	-0,014

TABLE 22 – Variation de masse [kg] durant les cycles d'humidification

Résultats de l'essai de vapeur d'eau

Éch.	0 heure	24 heures	48 heures	72 heures	96 heures	168 heures	192 heures	216 heures
1-1-2	556,815	556,815	556,799	556,756	556,711	556,603	556,562	556,530
1-1-3	568,320	568,310	568,306	568,286	568,256	568,169	568,132	568,104
1-3-1	571,745	571,745	571,738	571,704	571,663	571,554	571,51	571,475
1-3-2	575,239	575,224	575,2195	575,183	575,144	575,035	574,99	574,960

Éch.	240 heure	264 heures	408 heures	432 heures	504 heures	528 heures	552 heures	720 heures
1-1-2	556,348	556,484	556,326	556,289	556,18	556,137	556,105	555,958
1-1-3	568,1	568,063	567,915	567,89	567,791	567,756	567,748	567,596
1-3-1	571,474	571,447	571,205	571,167	571,025	570,985	570,952	570,743
1-3-2	574,951	574,901	574,679	574,639	574,528	574,47	574,437	574,222

TABLE 23 – Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau [grammes] - Partie 1

Éch.	0 heure	24 heures	48 heures	72 heures	96 heures	168 heures	192 heures	216 heures	240 heures	264 heures
2-3-1	537,915	537,848	537,824	537,778	537,541	537,503	537,334	537,287	537,259	537,053
2-4-2	533,013	532,982	532,948	532,89	532,59	532,543	532,398	532,334	532,295	532,085
2-4-4	540,631	540,617	540,612	540,536	540,188	540,12	539,913	539,832	539,774	539,444
3-5-3-2	530,776		530,793	530,76	530,603	530,572	530,447	530,404	530,385	530,234
3-4-4-1	538,456	538,48	538,467	538,481	538,36	538,337	538,209	538,163	538,146	537,992
3-5-2-2	551,706	551,832	551,853	551,804	551,662	551,625	551,507	551,49	551,443	551,28
2-3-2	536,357	536,311	536,23	536,187	535,845	535,794	535,587	535,522	535,487	535,205
4-4-3	562,704	562,689	562,646	562,638	562,404	562,368	562,209	562,159	562,13	561,901
4-2-1	552,556	552,536	552,465	552,41	551,944	551,89	551,659	551,583	551,523	551,17
4-1-1	535,348	535,324	535,262	535,211	534,85	534,796	534,591	534,511	534,466	534,124
5-1-4	535,489	535,474	535,459	535,416	535,207	535,159	535,013	534,961	534,932	534,756
5-3-2	539,997	539,995	539,995	539,955	539,739	539,694	539,543	539,493	539,457	539,246
5-1-3	530,207	530,19	530,175	530,118	529,812	529,751	529,576	529,5	529,454	529,18
6-5-2	558,312	558,308	558,303	558,319	558,237	558,2	558,105	558,067	558,059	557,906
6-3-1	559,666	559,697	559,746	559,763	559,8	559,793	559,793	559,734	559,745	559,678
6-3-2	542,151	542,13	542,143	542,094	541,837	541,173	541,604	541,546	541,499	541,238

Table 24 – Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau [grammes] - Partie 2

Résultats de l'essai de perméabilité aux chlorures

	Échantillons								
	1-1-2	1-1-3	1-3-1	1-3-2	2-4-2	2-4-4	6-5-2	6-3-1	6-3-2
0 min	46,30	43,20	61,00	58,30	61,00	57,20	91,00	74,00	84,00
30 min	51,75	44,50	63,00	56,00	58,60	57,00	73,30	73,00	85,80
60 min	53,80	46,20	64,00	55,88	57,30	59,90	81,80	75,00	95,60
90 min	55,24	46,54	64,60	57,50	58,00	60,90	88,30	78,80	99,00
120 min	56,40	47,20	65,60	59,00	58,30	62,16	94,30	81,40	102,80
150 min	57,30	47,80	66,30	59,70	58,30	63,25	98,70	83,60	106,60
180 min	57,80	48,50	66,90	60,15	59,30	63,80	102,30	84,70	109,10
210 min	58,00	48,90	67,70	60,50	59,50	64,40	104,20	86,20	113,80
240 min	58,23	49,30	68,20	60,90	59,70	65,20	107,50	82,40	117,30
270 min	58,80	49,50	68,80	62,30	60,00	66,00	108,20	82,00	116,60
300 min	59,10	49,65	69,20	62,32	60,40	66,80	110,00	81,80	118,80
330 min	59,20	49,60	69,40	62,41	60,70	67,20	111,30	81,30	121,00
360 min	60,00	49,50	70,00	62,54	62,10	68,00	113,20	80,00	122,50

TABLE 25 – Mesures des courants traversant les échantillons lors de l'essai de perméabilité aux chlorures [mA]

Résultats de l'essai de capillarité

Éch.	Surf. $[m^2]$	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	1h	1h30	2h30	4h30	6h30	24h	48h
1-1-2	0,005	0	0,020	0,020	0,022	0,022	0,036	0,036	0,038	0,036	0,036	0,034	0,074	0,060
1-1-3	0,005	0	0,040	0,034	0,032	0,032	0,050	0,050	0,062	0,064	0,082	0,088	0,197	0,288
1-3-1	0,005	0	0,143	0,205	0,239	0,259	0,294	0,328	0,368	0,424	0,499	0,521	0,748	0,887
1-3-2	0,005	0	0,163	0,203	0,231	0,263	0,283	0,318	0,354	0,406	0,466	0,489	0,744	0,881
2-3-1	0,005	0	0,060	0,107	0,127	0,157	0,189	0,221	0,269	0,326	0,456	0,489	0,899	1,166
2-4-2	0,005	0	0,050	0,076	0,070	0,078	0,090	0,115	0,141	0,165	0,227	0,227	0,460	0,567
2-4-4	0,005	0	0,219	0,255	0,283	0,296	0,300	0,320	0,322	0,388	0,420	0,440	0,660	0,786
3-5-3-2	0,0034	0	-0,006	-0,022	-0,008	0,004	0,004	0,004	0,000	0,034	0,056	0,060	0,177	0,279
3-4-4-1	0,0040	0	0,000	-0,004	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,022	0,076	0,080	0,084
3-5-2-2	0,0046	0	0,066	0,088	0,123	0,129	0,036	0,036	0,032	0,149	0,306	0,442	0,959	1,373
2-3-2	0,005	0	0,044	0,038	0,054	0,054	0,068	0,080	0,050	0,074	0,084	0,084	0,193	0,203
4-4-3	0,005	0	0,028	0,034	0,044	0,054	0,060	0,060	0,038	0,056	0,050	0,050	0,105	0,127
4-2-1	0,005	0	0,219	0,235	0,251	0,265	0,290	0,338	0,314	0,378	0,398	0,418	0,655	0,786
4-1-1	0,005	0	0,191	0,199	0,201	0,235	0,249	0,267	0,243	0,316	0,380	0,380	0,519	0,601
5-1-4	0,005	0	0,030	0,040	0,038	0,040	0,038	0,064	0,060	0,062	0,062	0,062	0,143	0,171
5-3-2	0,005	0	-0,008	-0,006	-0,004	-0,002	0,008	0,004	0,010	0,014	0,014	0,014	0,101	0,133
5-1-3	0,005	0	0,119	0,131	0,159	0,171	0,175	0,221	0,251	0,318	0,346	0,360	0,605	0,700
6-5-2	0,005	0	0,038	0,032	0,046	0,046	0,054	0,072	0,082	0,082	0,086	0,082	0,165	0,225
6-3-1	0,005	0	0,032	0,034	0,032	0,048	0,054	0,064	0,094	0,094	0,135	0,135	0,257	0,374
6-3-2	0,005	0	0,167	0,189	0,217	0,239	0,267	0,304	0,352	0,438	0,513	0,555	0,859	1,021

TABLE 26 – Mesures des masses des échantillons lors de l'essai de Perméabilité à l'eau liquide [grammes]

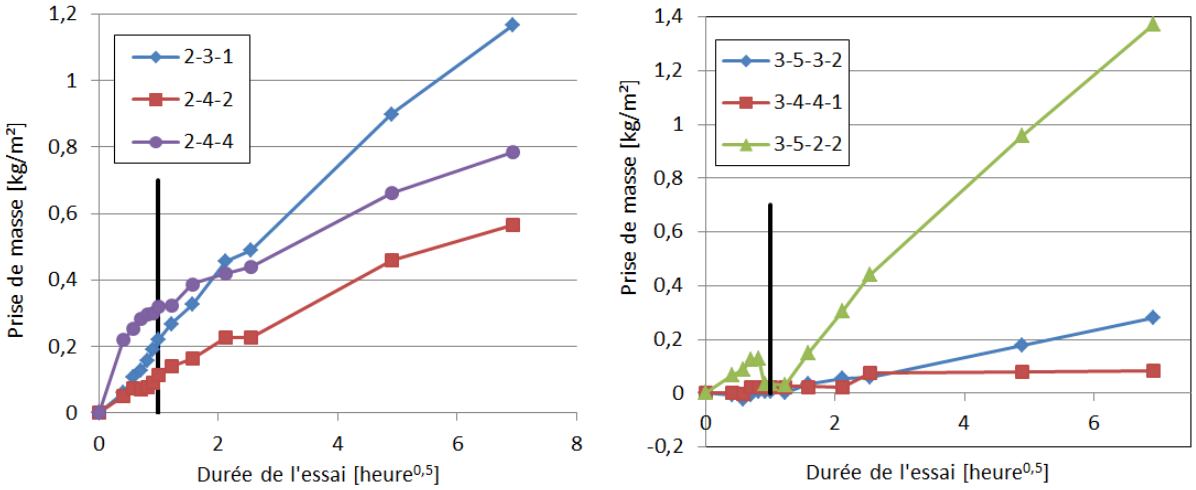


FIGURE 48 – Variation de masse lors des essais finaux de perméabilité à l'eau liquide
Gauche : Chocs-Thermiques & Droite : Carbonatation

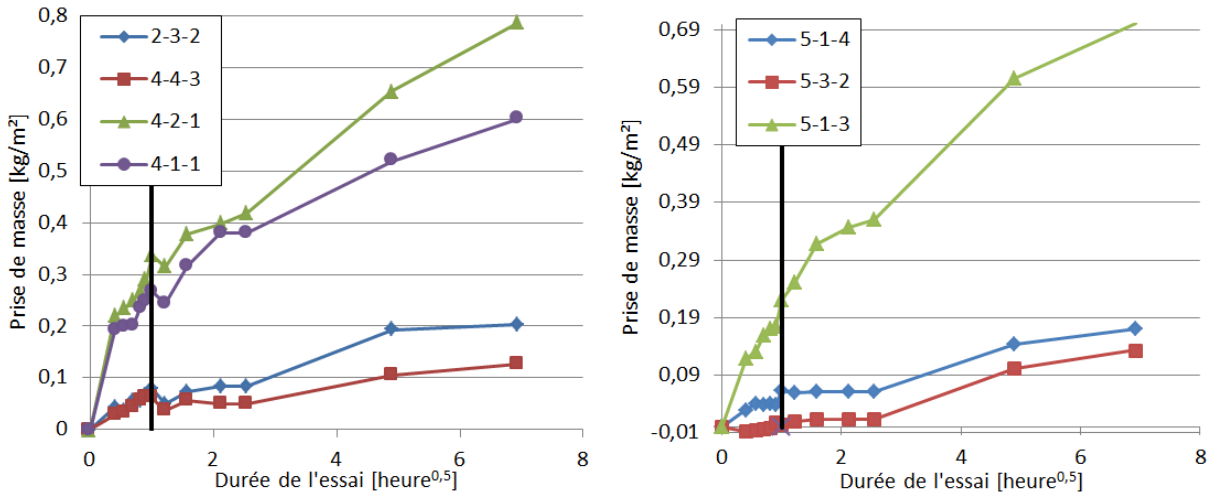


FIGURE 49 – Variation de masse lors des essais finaux de perméabilité à l'eau liquide
Gauche : Gel-Dégel & Droite : Cycles d'humidification

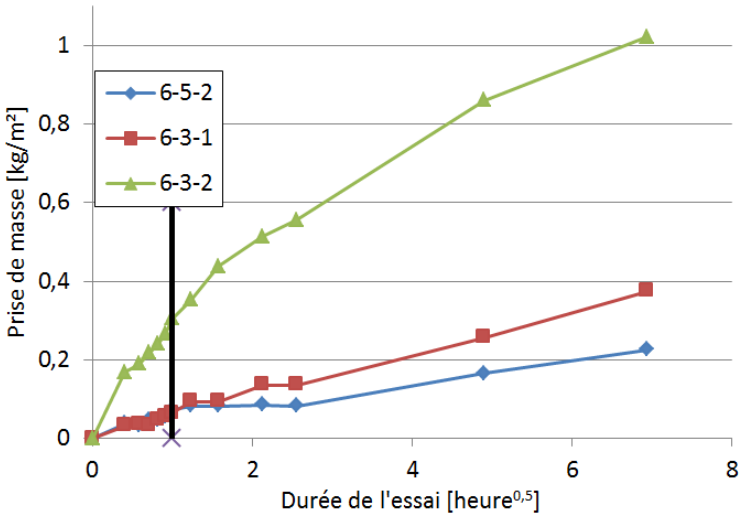


FIGURE 50 – Variation de masse lors des essais finaux de perméabilité à l'eau liquide / UV

Mesures lors du test LAB

	Initiales			finales		
Échantillons	L* initial	a*	b*	L*	a*	b*
2-3-1	57,40	0,60	5,20	65,20	0,40	6,20
2-4-2	54,00	0,50	5,10	56,00	0,50	5,40
3-5-3-2	46,40	0,30	5,30	50,90	1,30	5,90
3-4-4-1	58,20	0,05	6,00	59,05	0,15	5,70
3-5-2-2	55,00	1,10	7,10	62,10	0,60	3,80
2-3-2	54,00	0,50	5,00	61,80	0,40	5,80
4-4-3	57,90	0,20	4,00	53,90	0,40	4,60
4-2-1	47,70	1,80	6,50	54,30	0,40	5,40
5-1-4	45,40	1,90	4,00	55,40	0,10	5,00
5-3-2	57,60	0,20	5,50	58,90	0,50	5,30
6-5-2	54,30	0,30	4,90	61,40	0,60	5,20
6-3-1	60,40	0,30	5,20	61,00	0,40	5,50
6-3-2	55,90	1,20	6,40	58,40	1,10	5,60

Table 27 – Mesures LAB