

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

**ProQuest Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600**

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**INFLUENCE DU TYPE DE MÛRISSEMENT ET DE L'AUTODESSICCATION SUR
LA RÉSISTANCE AU GEL DES BÉTONS**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Aleksandra POPIC

Sherbrooke (Québec), CANADA

Août 1999

IV - 1236



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67710-9

Canada

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'influence de l'autodessiccation, du degré de saturation de la porosité capillaire lors du mûrissement et lors du gel sur la durabilité au gel des bétons en utilisant l'essai accéléré normalisé ASTM C 666, Procédure A. Nous avons essayé de mieux comprendre quelle est l'influence du type de mûrissement (scellé ou non scellé) sur la résistance au gel des bétons ordinaires et des BHP en laboratoire.

Une grande partie de cette recherche a porté sur l'étude de la relation entre l'humidité relative interne et la durabilité au gel des bétons. Nous avons également mesuré comment varie l'humidité relative interne en fonction de la profondeur et du temps à l'intérieur de blocs en BHP constamment immergés sous l'eau pour pouvoir estimer à partir de quelle profondeur sous la surface, l'autodessiccation interne pourrait contribuer à la désaturation partielle de la porosité capillaire.

Deux séries de bétons sans air entraîné ont été réalisées. La première série a comporté deux bétons ordinaires et deux BHP. Chaque béton a été soumis à des cycles de gel-dégel en système scellé et non scellé après avoir subi un mûrissement en condition scellé ou non scellé. Le degré de saturation et l'humidité relative ont été déterminés avant et après les cycles. Pour réaliser la deuxième série, deux blocs en BHP ont été fabriqués et les profils d'humidité relative interne en fonction du temps ont été mesurés.

Cette recherche a démontré que le type de scellement lors des cycles de gel-dégel a une grande influence sur la résistance au gel des bétons en laboratoire. Les résultats tendent à montrer que l'essai accéléré normalisé ASTM C 666 permet d'estimer adéquatement la durabilité au gel des bétons ordinaires. Cependant, nos résultats suggèrent que cet essai sous-estime la durabilité réelle des BHP sans air entraîné en condition in situ. L'essai accéléré ne permet pas aux BHP de développer leurs caractéristiques pouvant améliorer considérablement la durabilité au gel tels que l'autodessiccation interne, la désaturation de la porosité capillaire et la baisse de l'humidité relative.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de mémoire, Monsieur Richard Gagné ing. Ph.D., qui m'a guidé et bien dirigé tout au long de cette recherche.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke pour l'aide technique qu'il m'a apporté lors de l'accomplissement de ce mémoire. Je remercie spécialement Messieurs Claude Faucher, Jean-Yves Roy, Sylvain Roy et Madame Gislaine Luc pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et pour leur collaboration.

Je remercie également tous les membres du Groupe de Recherche sur le Béton pour leurs conseils et leur soutien.

Enfin, je voudrais remercier le Centre Interuniversitaire sur le Béton et Monsieur Richard Gagné pour leur participation financière lors de la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|-----------|
| 1. HYDRATATION, BILAN VOLUMIQUE ET AUTODESSICCATION DE LA PÂTE DE CIMENT HYDRATÉ..... | 1 |
| 1.1 Introduction..... | 1 |
| 1.2 Le ciment Portland..... | 1 |
| 1.2.1 Fabrication du ciment Portland..... | 2 |
| 1.2.2 Composition chimique du ciment Portland..... | 2 |
| 1.2.3 Classification des ciments Portland..... | 4 |
| 1.3 Hydratation du ciment Portland..... | 4 |
| 1.3.1 Cinétique de l'hydratation du ciment Portland..... | 5 |
| 1.3.2 Hydratation des silicates..... | 10 |
| 1.3.3 Hydratation des aluminates..... | 10 |
| 1.4 Volume des produits d'hydratation..... | 11 |
| 1.4.1 Contraction Le Châtelier..... | 12 |
| 1.4.2 Équations de Powers..... | 13 |
| 1.5 Autodessiccation interne..... | 17 |
| 1.5.1 Origine de l'autodessiccation..... | 17 |
| 1.5.2 Loi de Laplace..... | 18 |
| 1.5.3 Loi de Kelvin..... | 19 |
| 1.5.4 Loi de Kelvin-Laplace..... | 20 |
| 1.5.5 Évolution de l'humidité relative interne en fonction du temps..... | 21 |
| 1.5.5.1 Influence du rapport E/L..... | 22 |
| 1.5.5.2 Influence de la fumée de silice..... | 25 |
| 1.5.5.3 Influence du type de ciment..... | 26 |
| 1.5.6 Isothermes d'adsorption et de désorption..... | 28 |
| 2. RÉSISTANCE AUX CYCLES DE GEL-DÉGEL..... | 30 |
| 2.1 Introduction..... | 30 |
| 2.2 Gélivité de la pâte de ciment hydraté..... | 30 |
| 2.2.1 Porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment..... | 31 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.2.2 | Point de fusion de la glace..... | 32 |
| 2.2.3 | Calorimétrie à basse température..... | 33 |
| 2.2.4 | Degré de saturation critique..... | 34 |
| 2.2.5 | Comportement dimensionnel de la pâte de ciment lors du gel..... | 38 |
| 2.3 | Fissuration interne..... | 39 |
| 2.3.1 | Modèle des pressions hydrauliques..... | 40 |
| 2.3.2 | Modèle des pressions osmotiques..... | 43 |
| 2.3.3 | Modèle thermodynamique..... | 45 |
| 2.4 | Résistance au gel des bétons à haute performance..... | 46 |
| 2.4.1 | Résistance à la fissuration interne en laboratoire..... | 46 |
| 2.4.1.1 | Représentativité de l'essai ASTM C 666 – A..... | 51 |
| 2.4.2 | Résistance à la fissuration interne en nature..... | 52 |
| 3. | BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS..... | 54 |
| 3.1 | Exposé de la problématique..... | 54 |
| 3.2 | Objectifs du projet..... | 55 |
| 3.3 | Méthodologie..... | 56 |
| 3.3.1 | Choix des paramètres à étudier..... | 56 |
| 3.3.2 | Procédure expérimentale et les caractéristiques des échantillons..... | 57 |
| 4. | MATERIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES.... | 60 |
| 4.1 | Matériaux..... | 60 |
| 4.1.1 | Ciments..... | 60 |
| 4.1.2 | Granulats..... | 61 |
| 4.1.3 | Adjuvants..... | 63 |
| 4.1.4 | Eau..... | 64 |
| 4.2 | Mélanges et procédures de gâchage..... | 64 |
| 4.2.1 | Mélanges..... | 64 |
| 4.2.2 | Procédure de gâchage..... | 67 |
| 4.2.3 | Échantillonnage et fabrication des blocs..... | 68 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3 | Procédures expérimentales..... | 69 |
| 4.3.1 | Mûrissement des éprouvettes de gel-dégel..... | 69 |
| 4.3.2 | Scellement des échantillons lors des essais de gel-dégel..... | 69 |
| 4.3.3 | Essais de gel-dégel..... | 70 |
| 4.3.3.1 | Mesure de la masse..... | 72 |
| 4.3.3.2 | Mesure de l'allongement..... | 73 |
| 4.3.3.3 | Mesure de la vitesse des ondes..... | 74 |
| 4.3.4 | Résistance à la compression..... | 75 |
| 4.3.5 | Caractéristiques des vides d'air..... | 75 |
| 4.3.6 | Degré de saturation du béton..... | 76 |
| 4.3.7 | Humidité relative interne..... | 78 |
| 4.3.7.1 | Mesures de l'humidité relative dans les échantillons de gel-dégel..... | 79 |
| 4.3.7.2 | Mesures de l'humidité relative dans les blocs..... | 80 |
| 5. | PRÉSENTATION DES RÉSULTATS..... | 82 |
| 5.1 | Introduction..... | 82 |
| 5.2 | Résistances à la compression et caractéristiques des bulles d'air..... | 82 |
| 5.2.1 | Résistances à la compression..... | 82 |
| 5.2.2 | Caractéristiques des bulles d'air..... | 86 |
| 5.3 | Essais de gel-dégel..... | 88 |
| 5.3.1 | Évolution des propriétés pendant le mûrissement (série I)..... | 88 |
| 5.3.1.1 | Variations de la masse..... | 88 |
| 5.3.1.2 | Variations de la vitesse des ondes sonores..... | 91 |
| 5.3.1.3 | Variations de l'allongement..... | 94 |
| 5.3.2 | Évolutions des propriétés pendant les cycles de gel-dégel (série I).... | 98 |
| 5.3.2.1 | Variations de la masse..... | 98 |
| 5.3.2.2 | Variations de la vitesse..... | 101 |
| 5.3.2.3 | Variations de l'allongement..... | 101 |
| 5.3.3 | Évolution des propriétés des témoins..... | 106 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.3.3.1 | Variations de la masse..... | 107 |
| 5.3.4 | Synthèse..... | 110 |
| 5.4 | Degré de saturation..... | 117 |
| 5.4.1 | Calcul du degré de saturation..... | 117 |
| 5.4.2 | Degré de saturation à la fin du mûrissement..... | 118 |
| 5.4.3 | Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel..... | 120 |
| 5.5 | Humidité relative interne..... | 122 |
| 5.5.1 | Humidité relative dans les prismes de gel-dégel..... | 123 |
| 5.5.1.1 | Humidité relative à la fin du mûrissement..... | 123 |
| 5.5.1.2 | Humidité relative à la fin des cycles de gel-dégel..... | 126 |
| 5.5.2 | Humidité relative dans les blocs..... | 128 |
| 6. | DISCUSSION DES RÉSULTATS..... | 132 |
| 6.1 | Relation entre le degré de saturation et la résistance au gel des bétons sans air entraîné..... | 132 |
| 6.2 | Relation entre l'humidité relative interne et la résistance au gel des bétons sans air entraîné..... | 133 |
| 6.3 | Analyse de la résistance au gel-dégel des BHP sans air entraîné en laboratoire et en conditions in situ..... | 139 |
| 6.3.1 | Introduction..... | 139 |
| 6.3.2 | Cycles de gel-dégel..... | 139 |
| 6.3.3 | État de saturation de la porosité capillaire..... | 141 |
| 6.3.3.1 | Historique de mûrissement..... | 141 |
| 6.3.3.2 | Effet d'échelle..... | 143 |
| 6.3.4 | Synthèse..... | 143 |
| | CONCLUSION..... | 146 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | 149 |

| | |
|--|------------|
| ANNEXE A : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA SÉRIE I ET DE LA SÉRIE II..... | 154 |
| ANNEXE B : CARACTÉRISTIQUES DES BULLES D’AIR DES BÉTONS DE LA SÉRIE I..... | 156 |
| ANNEXE C : VARIATION DE LA MASSE, DE LA VITESSE ET DE L’ALLONGEMENT AXIAL LORS DU MÛRISSEMENT DES BÉTONS DE LA SÉRIE I..... | 158 |
| ANNEXE D : VARIATION DE LA MASSE, DE LA VITESSE ET DE L’ALLONGEMENT AXIAL LORS DES CYCLES DE GEL- DÉGEL DES BÉTONS DE LA SÉRIE I..... | 171 |
| ANNEXE E : VARIATION DE LA MASSE DES TÉMOINS (BÉTONS DE LA SÉRIE I)..... | 196 |
| ANNEXE F : DEGRÉ DE SATURATION DES BÉTONS DE LA SÉRIE I..... | 205 |
| ANNEXE G : HUMIDITÉ RELATIVE INTERNE DES BÉTONS DE LA SÉRIE I..... | 212 |
| ANNEXE H : HUMIDITÉ RELATIVE INTERNE DES BÉTONS DE LA SÉRIE II..... | 215 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|--|------|
| Figure 1.1 Courbe calorimétrique de l'hydratation d'une pâte de ciment..... | 5 |
| Figure 1.2 Période de gâchage..... | 7 |
| Figure 1.3 Période dormante..... | 8 |
| Figure 1.4 Période de prise ou d'accélération..... | 8 |
| Figure 1.5 Période de durcissement..... | 9 |
| Figure 1.6 Période de ralentissement..... | 9 |
| Figure 1.7 Expérience de contraction Le Châtelier..... | 12 |
| Figure 1.8 Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,50 et 0,42 pour les différents degrés d'hydratation... | 15 |
| Figure 1.9 Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,35, 0,30 et 0,25 pour les différents degrés d'hydratation..... | 16 |
| Figure 1.10 Le phénomène de l'autodessiccation..... | 18 |
| Figure 1.11 Illustration de la loi de Laplace..... | 19 |
| Figure 1.12 Abaissement de l'humidité relative interne en fonction du temps pour les pâtes de ciment (CO et CH) et des bétons (BO et BH)..... | 22 |
| Figure 1.13 Courbes de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau..... | 23 |
| Figure 1.14 Évolution de l'humidité relative dans les pâtes de ciment pour les différents rapports E/C..... | 24 |
| Figure 1.15 Humidité relative des bétons en fonction du rapport E/C dans le cas d'un mûrissement scellé (S – 10 % de fumée de silice)..... | 24 |
| Figure 1.16 Évolution de l'humidité relative due à l'autodessiccation dans une pâte de ciment possédant un rapport E/C = 0,35 (contribution du ciment et de la fumée de silice)..... | 25 |
| Figure 1.17 Influence de la fumée de silice et du rapport E/L sur l'évolution de l'humidité relative dans des pâtes de ciment..... | 26 |
| Figure 1.18 Évolution de l'humidité relative des mortiers..... | 28 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Figure 1.19 | Isothermes d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau obtenus à la température de 23 °C..... | 29 |
| Figure 2.1 | Échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté..... | 31 |
| Figure 2.2 | Relation entre la température de formation de la glace et le diamètre des pores..... | 33 |
| Figure 2.3 | Influence du rapport E/C sur la formation de la glace (les échantillons séchés à 20 °C et 50 % d'humidité relative puis résaturés)..... | 34 |
| Figure 2.4 | Influence du degré de saturation d'un mortier (E/C = 0,60) sur son comportement dimensionnel au cours du gel..... | 35 |
| Figure 2.5 | Relation entre le paramètre F et le période d'absorption capillaire..... | 36 |
| Figure 2.6 | Influence du taux d'humidité relative interne sur la résistance au gel du béton..... | 37 |
| Figure 2.7 | Comportements dimensionnels des pâtes de ciment au cours de gel.... | 39 |
| Figure 2.8 | Représentation schématique de L_{max} et \bar{L}..... | 42 |
| Figure 2.9 | Illustration schématique du processus de la formation des pressions osmotiques dans la pâte de ciment..... | 44 |
| Figure 2.10 | Diagramme des phases de l'eau..... | 46 |
| Figure 2.11 | Influence du rapport E/C sur la résistance à la fissuration interne..... | 50 |
| Figure 2.12 | Influence de la résistance à la compression sur la résistance à la microfissuration interne..... | 50 |
| Figure 3.1 | Représentation schématique des paramètres choisis..... | 58 |
| Figure 4.1 | Courbe granulométrique du granulats fin et fuseau normalisé..... | 61 |
| Figure 4.2 | Courbe granulométrique du gros granulats et fuseau normalisé..... | 62 |
| Figure 4.3 | Clé pour l'identification des échantillons de gel-dégel..... | 67 |
| Figure 4.4 | Scellement des échantillons lors des cycles de gel-dégel..... | 70 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| Figure 4.5 | Combinaisons des types de scellement de la surface des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement et des cycles de gel-dégel..... | 71 |
| Figure 4.6 | Vue schématique du montage pour le conditionnement des éprouvettes..... | 77 |
| Figure 4.7 | La sonde Novasina ms1..... | 79 |
| Figure 4.8 | Mesure de l'humidité relative et de la température dans l'échantillon de gel-dégel..... | 80 |
| Figure 4.9 | Mesure de l'humidité relative et de la température dans le bloc..... | 81 |
| Figure 5.1 | Résistances à la compression des bétons de rapport E/L = 0,30 (série I)..... | 84 |
| Figure 5.2 | Résistances à la compression des bétons de rapport E/L = 0,40 (série I)..... | 84 |
| Figure 5.3 | Résistances à la compression des bétons de la série II..... | 86 |
| Figure 5.4 | Variations de la masse des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 89 |
| Figure 5.5 | Variations de la masse des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 90 |
| Figure 5.6 | Variations de la vitesse des ondes dans les échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 92 |
| Figure 5.7 | Variations de la vitesse des ondes dans les échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 93 |
| Figure 5.8 | Variations de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 96 |
| Figure 5.9 | Variations de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 97 |
| Figure 5.10 | Variations de la masse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 99 |
| Figure 5.11 | Variations de la masse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 100 |

| | | |
|--------------------|--|------------|
| Figure 5.12 | Variations de la vitesse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 102 |
| Figure 5.13 | Variations de la vitesse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 103 |
| Figure 5.14 | Variations de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 104 |
| Figure 5.15 | Variations de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 105 |
| Figure 5.16 | Variations de la masse des témoins lors du temps correspondant aux 300 cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)..... | 108 |
| Figure 5.17 | Variations de la masse des témoins lors du temps correspondant aux 300 cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)..... | 109 |
| Figure 5.18 | Variations de la masse du béton 0,3 CP-747 pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel..... | 113 |
| Figure 5.19 | Variations de la masse du béton 0,3 SF-539 pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel..... | 114 |
| Figure 5.20 | Variations de la masse du béton 0,4 CP-817 pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel..... | 115 |
| Figure 5.21 | Variations de la masse du béton 0,4 SF-976 pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel..... | 116 |
| Figure 5.22 | Degrés de saturation avant les cycles de gel-dégel..... | 119 |
| Figure 5.23 | Degrés de saturation après les cycles de gel-dégel..... | 122 |
| Figure 5.24 | Humidités relatives internes avant les cycles de gel-dégel..... | 124 |
| Figure 5.25 | Humidités relatives internes à la fin des cycles de gel-dégel..... | 127 |
| Figure 5.26 | Profil d'humidité relative interne dans le bloc en BHP sans fumée de silice (E/L = 0,30)..... | 131 |
| Figure 5.27 | Profil d'humidité relative interne dans le bloc en BHP avec fumée de silice (E/L = 0,30)..... | 131 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| Figure 6.1 | Relation entre le degré de saturation, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement non scellé)..... | 132 |
| Figure 6.2 | Relation entre le degré de saturation, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement scellé)..... | 132 |
| Figure 6.3 | Relation entre l'humidité relative, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement non scellé)..... | 134 |
| Figure 6.4 | Relation entre l'humidité relative, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement scellé)..... | 134 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--------------|---|
| Tableau 1.1 | Composition minéralogique des ciments Portland..... 3 |
| Tableau 1.2 | Composition et finesse typiques des ciments Portland..... 4 |
| Tableau 1.3 | Propriétés chimiques des ciments..... 27 |
| Tableau 2.1 | Valeurs du facteur d'espacement critique pour différents bétons en fonction du milieu de gel et du type de ciment..... 48 |
| Tableau 4.1 | Composition chimique des ciments..... 60 |
| Tableau 4.2 | Composition minéralogique des ciments..... 61 |
| Tableau 4.3 | Granulométrie du granulat fin et fuseau normalisé..... 62 |
| Tableau 4.4 | Granulométrie du gros granulat et fuseau normalisé..... 63 |
| Tableau 4.5 | Caractéristiques du superplastifiant DISAL..... 63 |
| Tableau 4.6 | Caractéristiques physiques du réducteur d'eau..... 64 |
| Tableau 4.7 | Dénominations et principales caractéristiques des bétons de la série I 65 |
| Tableau 4.8 | Dénominations et principales caractéristiques des bétons de la série II..... 65 |
| Tableau 4.9 | Caractéristiques des bétons de la série I..... 66 |
| Tableau 4.10 | Caractéristiques des bétons de la série II..... 66 |
| Tableau 4.11 | Conditions d'opération de l'appareil Novasina ms1..... 78 |
| Tableau 5.1 | Résistances à la compression des bétons de la série I..... 83 |
| Tableau 5.2 | Résistances à la compression des bétons de la série II..... 85 |
| Tableau 5.3 | Caractéristiques des bulles d'air (série I)..... 87 |
| Tableau 5.4 | Degrés de saturation avant les cycles de gel-dégel..... 118 |
| Tableau 5.5 | Degrés de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (gel-dégel scellé)..... 121 |
| Tableau 5.6 | Humidités relatives internes dans les prismes avant les cycles de gel-dégel..... 123 |
| Tableau 5.7 | Humidités relatives internes à la fin des cycles de gel-dégel..... 126 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| Tableau 5.8 | Humidités relatives internes dans les blocs immergés sous l'eau..... | 130 |
| Tableau 6.1 | Température de formation de la glace en fonction de l'humidité relative interne..... | 136 |

LISTE DES ÉQUATIONS

| | Page |
|---|------|
| Équation 1.1 Équations de Bogue..... | 4 |
| Équation 1.2 Réaction d'hydratation du C_3S | 10 |
| Équation 1.3 Réaction d'hydratation du C_2S | 10 |
| Équation 1.4 Réaction d'hydratation du C_3A (formation de l'ettringite)..... | 11 |
| Équation 1.5 Réaction d'hydratation du C_3A (formation du monosulfoaluminate de calcium hydraté)..... | 11 |
| Équation 1.6 Équation de Laplace..... | 18 |
| Équation 1.7 Humidité relative de la phase gazeuse dans un pore capillaire..... | 19 |
| Équation 1.8 Équation de Kelvin..... | 20 |
| Équation 1.9 Équation de Kelvin-Laplace..... | 20 |
| Équation 1.10 Équation de Kelvin-Laplace pour un pore cylindrique..... | 21 |
| | |
| Équation 2.1 Résistance potentielle d'un béton aux cycles de gel-dégel..... | 36 |
| Équation 2.2 Longueur maximale que l'eau peut parcourir sans fissurer la pâte..... | 41 |
| | |
| Équation 4.1 Allongement axial après n cycles de gel-dégel..... | 73 |
| Équation 4.2 Correction de l'allongement axial..... | 73 |
| Équation 4.3 Allongement axial corrigé après n cycles de gel-dégel..... | 74 |
| Équation 4.4 Vitesse des ondes après n cycles de gel-dégel..... | 74 |
| | |
| Équation 5.1 Degré de saturation des bétons..... | 118 |
| | |
| Équation 6.1 Relation théorique entre la température de formation de la glace et l'humidité relative interne des bétons..... | 135 |

1. HYDRATATION, BILAN VOLUMIQUE ET AUTODESSICCATION DE LA PÂTE DE CIMENT HYDRATÉ

1.1 Introduction

L'étude de la résistance aux cycles de gel-dégel des bétons à haute performance requiert une connaissance des principales propriétés des ciments Portland. Il est aussi important de comprendre le processus d'hydratation du ciment qui permet au béton de développer les propriétés mécaniques qu'on lui connaît.

Dans sa première partie, ce chapitre traite des caractéristiques principales des ciments Portland et de leur classification. Il décrit les différentes étapes de l'hydratation du ciment. Ensuite, la description de la réaction d'hydratation de chacun des constituants du ciment est présentée.

Dans sa deuxième partie, ce chapitre traite de la contraction Le Chatelier. C'est une contraction chimique due à l'hydratation du ciment qui engendre notamment une autodesiccation interne de la pâte. Étant plus prononcée dans des bétons à haute performance, l'autodesiccation provoque une diminution de l'humidité relative interne et une désaturation de la porosité capillaire, ce qui pourrait influencer la durabilité au gel de ces bétons.

1.2 Le ciment Portland

Le ciment Portland est le liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il fait sa prise et durcit en se combinant avec l'eau par la réaction d'hydratation.

L'invention du ciment Portland est généralement attribuée au maçon anglais Joseph Aspdin. En 1824, il obtint un brevet pour son produit. Aspdin le nomma ciment Portland car il produisait un béton ayant la couleur de la pierre naturelle retrouvée sur la presque île de Portland située sur la Manche, à l'ouest de l'île de Wight [Kosmatka et

coll., 1995]. De nos jours, ce nom reste utilisé pour le ciment artificiel, partout dans le monde.

1.2.1 Fabrication du ciment Portland

La fabrication du ciment Portland se fait à partir de la pierre calcaire et de l'argile ou du schiste. Ces matériaux sont extraits des carrières, concassés et stockés, puis l'analyse chimique est faite pour déterminer le dosage des matières premières. Après avoir été dosées, les matières premières sont broyées et mélangées. La poudre ainsi obtenue est introduite dans l'extrémité supérieure d'un four rotatif légèrement incliné. Un brûleur est placé à l'extrémité inférieure du four pour que la température soit comprise entre 1450 °C et 1650 °C. Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme chimiquement les matières premières en clinker de ciment. Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25 mm [Neville, 1996]. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) [Folliot, 1982] pour contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland. Ses grains sont généralement anguleux ayant un diamètre entre 1 et 80 µm. La densité du ciment Portland est d'environ 3,14.

1.2.2 Composition chimique du ciment Portland

Les principaux oxydes qu'on trouve dans le ciment Portland sont : Chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃) et oxyde de fer (Fe₂O₃). On trouve aussi les autres oxydes en plus faible quantité tels que l'oxyde de sodium (Na₂O), l'oxyde de potassium (K₂O), l'oxyde de soufre (SO₃) et la magnésie (MgO).

Ces quatre principaux oxydes sont combinés pour former quatre phases minérales qui représentent 90 % de masse du ciment Portland. Le tableau 1.1 montre les formules chimiques et les abréviations de ces phases minérales.

TABLEAU 1.1 – Composition minéralogique des ciments Portland

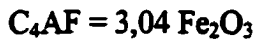
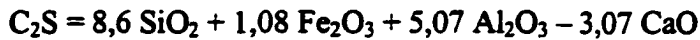
| | | |
|------------------------------|---|-----------------------|
| Silicate tricalcique | $3 \text{ CaO} \bullet \text{ SiO}_2$ | C_3S |
| Silicate bicalcique | $2 \text{ CaO} \bullet \text{ SiO}_2$ | C_2S |
| Aluminate tricalcique | $3 \text{ CaO} \bullet \text{ Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Aluminoferrite tétracalcique | $4 \text{ CaO} \bullet \text{ Al}_2\text{O}_3 \bullet \text{ Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Le silicate tricalcique (C_3S) est le plus important composant car il constitue environ 50 % du ciment. On le retrouve sous la forme des cristaux polygonaux. Le C_3S contient jusqu'à 4 % d'impuretés qui se retrouvent principalement sous la forme d'oxydes de magnésium, aluminium et fer [Baroghel-Bouny, 1994, Kosmatka et coll., 1995]. En présence de ces impuretés, le C_3S porte le nom d'*alite*.

Le silicate bicalcique (C_2S), qui représente environ 25 % du ciment, se retrouve sous la forme des cristaux arrondis [Kosmatka et coll., 1995]. Le C_2S contient aussi une certaine quantité d'oxydes sous forme d'impuretés. En présence de ces impuretés, le C_2S porte le nom de *belite*.

Les aluminates (C_3A et C_4AF) représentent environ 16 % du ciment. Le C_3A et le C_4AF se retrouvent sous la forme des cristaux rectangulaires mais les aluminates sont aussi partiellement vitreux en raison du refroidissement rapide du clinker [Baroghel-Bouny, 1994]. Dans les grains de clinker, les aluminates forment la phase interstitielle qui lie les cristaux de C_3S et C_2S .

La détermination de la composition potentielle des différentes phases minérales d'un ciment peut se faire à l'aide des équations de Bogue [1955] en utilisant les résultats de l'analyse chimique de ce ciment (Équations 1.1).



1.2.3 Classification des ciments Portland

Pour répondre à des besoins précis, on fabrique plusieurs types de ciment Portland ayant différentes caractéristiques physiques et chimiques. La norme CSA – A5 propose une classification des ciments en fonction de leur composition minéralogique. Le tableau 1.2 présente la composition et la finesse des cinq principaux types de ciments Portland disponibles sur le marché.

TABLEAU 1.2 - Composition et finesse typiques des ciments Portland [Kosmatka et coll., 1995]

| Type de ciment Portland | Proportion en pourcentage | | | | Finesse * |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | |
| 10 Normal | 50 | 24 | 11 | 8 | 72 |
| 20 Modéré | 42 | 33 | 5 | 13 | 72 |
| 30 Haute résistance initiale | 60 | 13 | 9 | 8 | - |
| 40 Faible chaleur d'hydratation | 26 | 50 | 5 | 12 | - |
| 50 Résistant aux sulfates | 40 | 40 | 3,5 | 9 | 72 |

* Pourcentage minimal passant le tamis de 45 µm

1.3 Hydratation du ciment Portland

Les constituants du ciment Portland sont hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils réagissent avec l'eau de gâchage dans un ensemble de réactions chimiques appelé l'hydratation. Ces réactions commencent dès la mise en contact de l'eau et du ciment. Très rapide au début, la réaction d'hydratation ralentit dans le temps et peut durer plusieurs années si les conditions d'humidité sont favorables. Pendant ce processus, le ciment fait sa prise et durcit ensuite pour former une structure mécaniquement résistante.

1.3.1 Cinétique de l'hydratation du ciment Portland

La réaction d'hydratation du ciment Portland est une réaction exothermique qui peut être suivie à l'aide d'une courbe calorimétrique (Figure 1.1).

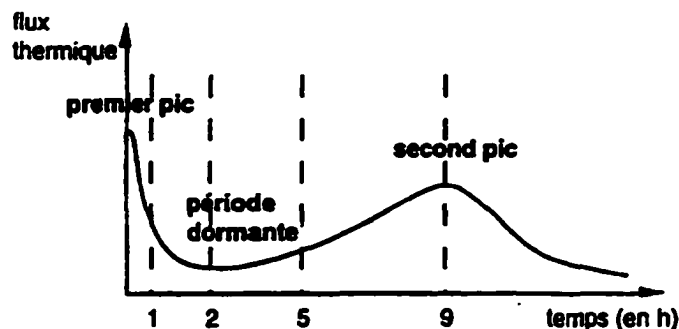


Figure 1.1 - Courbe calorimétrique de l'hydratation d'une pâte de ciment [Baroghel-Bouny, 1994]

Cette courbe (flux thermique) montre les cinq étapes principales du processus d'hydratation qui sont les suivants :

- Période de gâchage

Pendant la période de gâchage, des ions provenant des constituants du ciment passent en solution. La dissolution initiale est très rapide et exothermique ce qui provoque un pic de flux thermique. Pendant cette période, qui dure seulement quelques minutes, il se forme (Figure 1.2) :

- le silicate de calcium hydraté (C-S-H) par la combinaison des ions Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ et OH^- provenant des silicates de calcium;

- l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) par la combinaison des ions Ca^{2+} , AlO_2^- , SO_4^{2-} et OH^- provenant des aluminates et du régulateur de prise [Vernet et Cadoret, 1992]. Ces hydrates formés entourent les grains de ciment.

- Période dormante

Pendant la période dormante, qui dure quelques heures, l'élévation rapide du pH et de la teneur en calcium de l'eau de gâchage ralentit la dissolution des constituants du ciment ce qui provoque une diminution du flux thermique. La formation de C-S-H et

d'ettringite se poursuit lentement et la phase aqueuse se sursature en chaux (Figure 1.3) [Vernet et Cadoret, 1992].

- **Période de prise ou d'accélération**

La prise est déclenchée par la précipitation de la portlandite (Ca(OH)_2) qui survient après environ cinq heures. En effet, la réaction entre des ions Ca^{2+} et OH^- accélère la dissolution de tous les constituants du ciment. La précipitation de Ca(OH)_2 et de C-S-H est rapide mais l'augmentation du flux thermique est plus lente car la formation de portlandite est une réaction endothermique [Vernet et Cadoret, 1992]. Durant cette période, les grains de ciment commencent à être liés par les hydrates qui se forment et le matériau passe de l'état de suspension à l'état de solide (Figure 1.4).

Les ajouts minéraux, comme la fumée de silice, peuvent accélérer le déclenchement de la prise en catalysant la précipitation de la portlandite par leur surface très élevée [Baroghel-Bouny, 1994]. Également, elle accélère la dissolution de Ca^{++} de C_3S .

- **Période de durcissement**

La quantité de régulateur de prise (gypse, semi-hydrate, anhydrite) est limitée dans le ciment Portland. La formation rapide d'ettringite à la fin de la période de prise (entre 9 et 15 heures) aboutit à l'épuisement du gypse. Donc, l'ettringite devient la source des sulfates qui réagit avec les aluminates excédentaires pour former les monosulfoaluminates de calcium hydraté (Figure 1.5). Cette réaction est marquée par un pic thermique surtout prononcé pour les ciments riches en C_3A . La chaleur ainsi produite accélère l'hydratation des silicates [Vernet et Cadoret, 1992, Baroghel-Bouny, 1994].

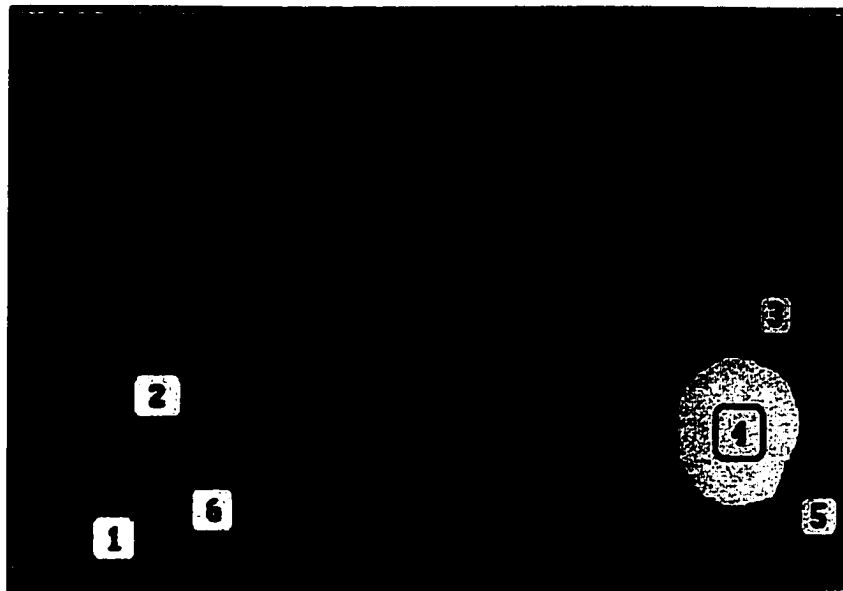
- **Période de ralentissement**

La coquille des hydrates qui entoure les grains de ciment devient de plus en plus épaisse, ce qui ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. Après environ quinze heures, commence la période de ralentissement diffusif. La matrice cimentaire devient plus dense et les espaces entre les grains de ciment diminuent (Figure

1.6). C'est durant la période de ralentissement que la fumée de silice commence à réagir chimiquement [Baroghel-Bouny, 1994].

Les figures 1.2 à 1.6 montrent l'évolution de la microstructure d'un mortier à faible rapport E/C en fonction du temps [Vernet et Cadoret, 1992].

T = 1 heure



| | | |
|-----------------|--------------------|----------------------|
| 1 - eau | 2 - clinker | 3 - gypse |
| 4 - bulle d'air | 5 - grain de sable | 6 - hydrates (C-S-H) |

Figure 1.2 – Période de gâchage [Vernet et Cadoret, 1992]

T = 2 heures



Cristaux d'ettringite

Figure 1.3 – Période dormante [Vernet et Cadoret, 1992]

T = 5 heures



Figure 1.4 – Période de prise ou d'accélération [Vernet et Cadoret, 1992]

T = 9 heures



Figure 1.5 – Période de durcissement [Vernet et Cadoret, 1992]

T = 28 jours

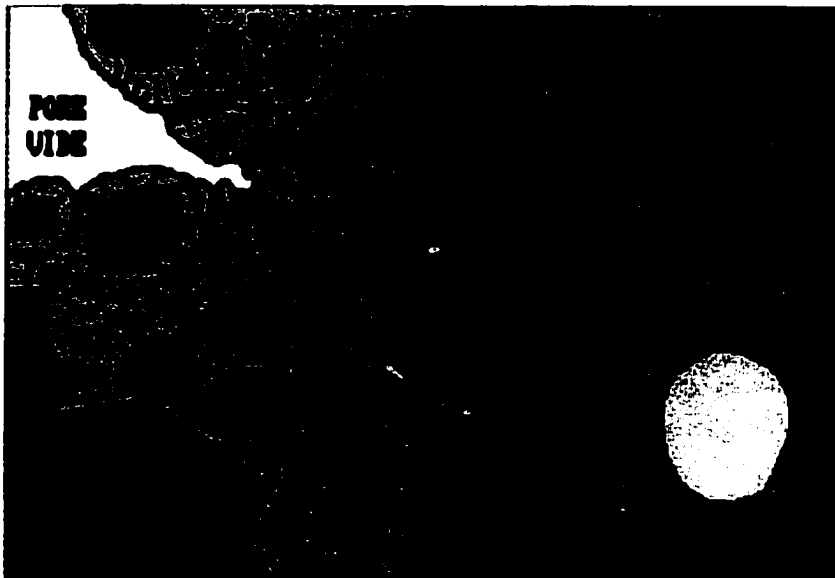


Figure 1.6 – Période de ralentissement [Vernet et Cadoret, 1992]

1.3.2 Hydratation des silicates

En ne tenant pas compte des lois de la stœchiométrie, la réaction d'hydratation du C_3S et C_2S peut être écrite de la façon suivante [Neville, 1996] :



Les équations 1.2 et 1.3 montrent qu'il existe deux produits d'hydratation des silicates. Le premier est le silicate de calcium hydraté ou C-S-H. Sa formule chimique est $C_3S_2H_3$ une fois que l'hydratation est complétée. Cette formule est approximative car la composition chimique des C-S-H est très variable. Les C-S-H sont mal cristallisés et possèdent une structure poreuse. Leur surface spécifique est très élevée (100 à 700 m²/g). Ils occupent de 50 à 60 % du volume de solides dans une pâte de ciment complètement hydratée [Khayat, 1991]. Les C-S-H sont la principale source de la résistance mécanique du béton.

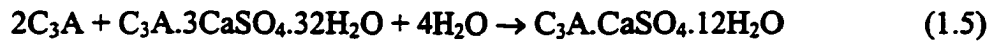
Le deuxième produit d'hydratation des silicates est l'hydroxyde de calcium ou *portlandite*. La portlandite possède une composition chimique connue ($Ca(OH)_2$) et elle se présente en forme des larges cristaux hexagonaux. Elle représente 20 à 25 % du volume de solide dans une pâte de ciment complètement hydraté [Khayat, 1996]. La portlandite ne contribue pas beaucoup à la résistance mécanique du béton puisque sa surface spécifique est faible. Cependant, elle a un rôle important dans de nombreux mécanismes associés à la durabilité des bétons.

1.3.3 Hydratation des aluminates

L'hydratation du C_3A est étroitement liée à la présence des ions sulfates provenant de la dissolution du gypse. Ces ions réagissent avec le C_3A pour former des trisulfoaluminates de calcium hydratés ou *ettringite*. La réaction dégage beaucoup de chaleur et survient lors du premier contact entre l'eau et le ciment. Cette réaction peut être présentée de la façon suivante [Baroghel–Bouny, 1994] :



Les cristaux d'ettringite, en forme de petites aiguilles, recouvrent les zones de C_3A . Étant donné que la quantité d'ions sulfates est limitée dans la solution, l'ettringite commence à réagir avec le C_3A excédentaire pour former le monosulfoaluminate de calcium hydraté dont la réaction peut être écrite de la façon suivante [Khayat, 1996] :



La quantité de sulfates provenant du gypse peut influencer sérieusement l'état du béton frais. L'absence ou une faible quantité de SO_3 , peut causer la prise éclair (une réaction très rapide entre le C_3A et l'eau, ce qui provoque un raidissement irréversible du béton frais). L'autre conséquence de la présence des sulfates est la fausse prise. Elle est due à la transformation partielle du gypse en semi-hydrate lors du broyage. Pendant le gâchage, le semi-hydrate se transforme en gypse et il peut y avoir un raidissement instantané. Si on continue à malaxer le béton, on peut cependant le fluidifier à nouveau [Khayat, 1996, Lessard, 1991].

La réaction d'hydratation du C_4AF est encore mal connue. Dans le cas du C_4AF , on obtient les mêmes produits qu'avec le C_3A , en substituant aux aluminates des alumino-ferrites [Baroghel-Bouny, 1994]. Cette réaction est lente et dégage peu de chaleur. Les aluminates représentent 15 à 20 % du volume de solide dans une pâte de ciment complètement hydraté [Khayat, 1996].

1.4 Volume des produits d'hydratation

Les réactions d'hydratation des composants du ciment Portland influencent beaucoup le volume des hydrates formés. On observe d'abord un gonflement structural (croissance cristalline de l'ettringite et de la portlandite) puis une diminution du volume total (contraction chimique ou contraction Le Chatelier).

1.4.1 Contraction Le Chatelier

Dans la réaction d'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes du ciment anhydre et de l'eau participant à la réaction. Ce phénomène, découvert par Le Chatelier en 1900, est appelé "contraction Le Chatelier". Il peut être observé à l'aide d'un récipient rempli d'eau et de ciment et surmonté d'un capillaire (Figure 1.7). On remarque que le niveau d'eau dans le capillaire diminue au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit [Buil, 1979].

Après l'hydratation complète, la contraction Le Chatelier est de l'ordre de 9 % du volume de pâte initial et aussi, elle est approximativement égale à 25 % [Czernin, 1956] ou 27,9 % [Powers et Brownyard, 1948] du volume d'eau liée chimiquement. La masse d'eau liée chimiquement est elle-même de l'ordre de 20 à 25 % de la masse de ciment anhydre initiale [Baroghel-Bouny, 1994].

Étant donné que la réaction d'hydratation se poursuit après la prise, le squelette rigide des hydrates formés s'oppose à la diminution du volume liée à l'hydratation. Par conséquent, la déformation extérieure apparente sera inférieure à la valeur prévue par la contraction Le Châtelier.

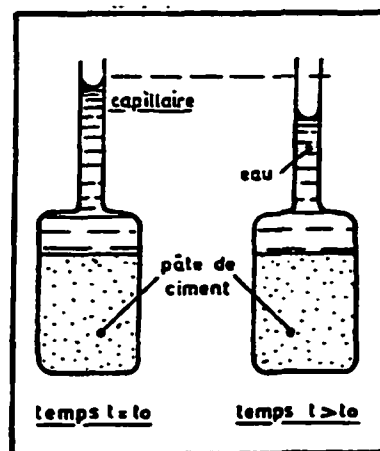


Figure 1.7 – Expérience de contraction Le Châtelier [Buil, 1979]

1.4.2 Équations de Powers

Pendant l'hydratation, à cause de la contraction Le Chatelier, il y a une formation des vides gazeux dans la porosité capillaire du béton (en système scellé). Le volume de ces vides, comme les volumes des autres constituants de la pâte de ciment, peuvent être calculés à l'aide des équations dites "de Powers" [Pigeon, 1981] :

- L'eau combinée chimiquement représente environ 23 % de masse du ciment qui s'hydrate;
- Le volume des produits solides d'hydratation est égal au volume de ciment hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combinée chimiquement;
- La porosité de l'ensemble des hydrates est approximativement de 28 % et ces pores sont nécessairement remplis d'eau lors de la formation des hydrates;
- Le volume final de la pâte de ciment est égal au volume occupé par l'eau et le ciment dans le mélange au départ;
- L'hydratation se produit en milieu scellé.

Les figures 1.8 et 1.9 montrent les proportions volumiques de l'hydratation dans les pâtes de ciment ayant les différents rapports E/C pour les différents degrés d'hydratation (on suppose l'utilisation de 100 g de ciment).

Pour un rapport $E/C = 0,42$ il y a juste assez d'eau pour hydrater tous les grains de ciment. Pour un degré d'hydratation de 100 % il ne reste plus d'eau dans la porosité capillaire mais, en système scellé, il existe une porosité capillaire vide (vapeur d'eau) ce qui correspond à la contraction Le Châtelier (Figure 1.8).

Pour un rapport $E/C = 0,50$, après l'hydratation complète du ciment, il reste un surplus d'eau dans la porosité capillaire (Figure 1.8).

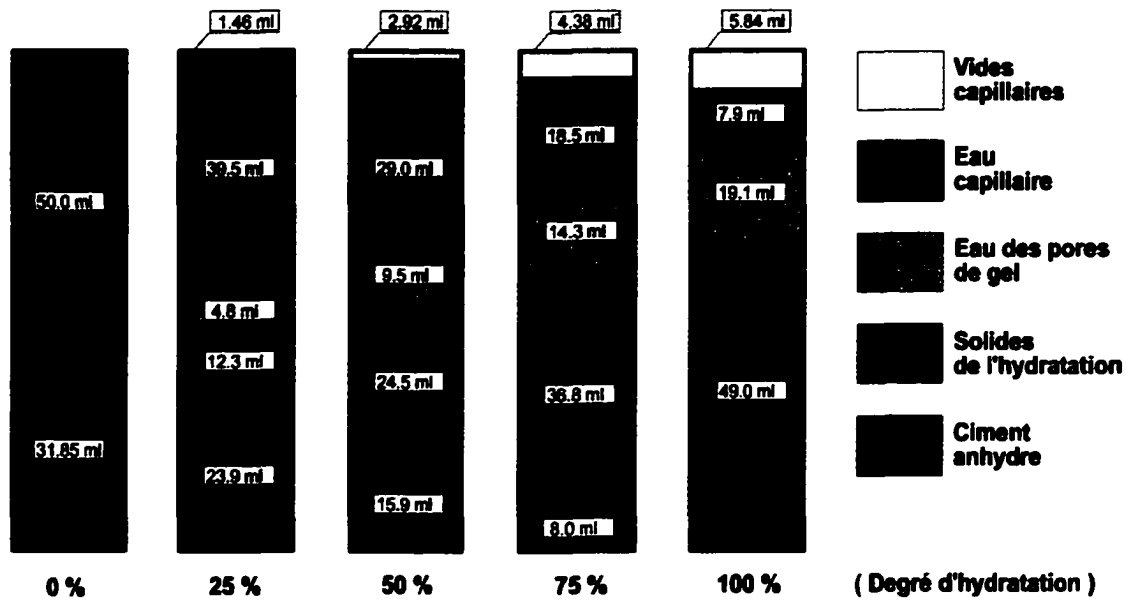
Ces exemples sont issus de calculs théoriques. Dans la réalité, l'hydratation n'est jamais complète à cause des gros grains de ciment qui ne s'hydratent jamais complètement. En effet, lors de l'hydratation, ces grains sont recouverts d'une épaisse

coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante [Gagné, 1997]. De plus, l'hydratation s'arrête lorsque l'humidité relative interne devient inférieure à environ 80 %.

Dans le cas des rapports E/C inférieurs à 0,42 (Figure 1.9), un manque d'eau dans le système arrête l'hydratation avant que tout le ciment ne se soit hydraté. Par exemple, pour un E/C = 0,30, le degré théorique maximal d'hydratation est de l'ordre de 70 %. En pratique, cette valeur est encore plus faible en raison de ce qu'on vient de mentionner.

Quel que soit le rapport E/C, on remarque que, dans un système scellé, il existe toujours une certaine proportion de la porosité capillaire qui demeure vide et cette proportion augmente avec le degré d'hydratation. Dans les bétons à haute performance, ces vides capillaires forcent la formation de ménisques qui contribuent au développement du retrait endogène et ils pourraient peut-être offrir une certaine protection contre l'attaque par les cycles de gel-dégel.

E/C = 0.50



E/C = 0.42

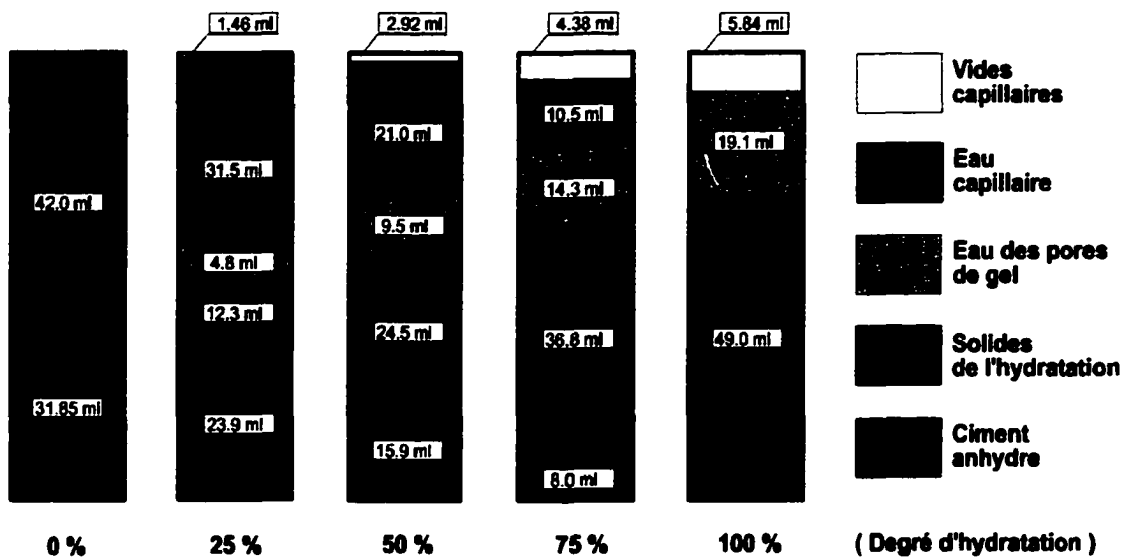
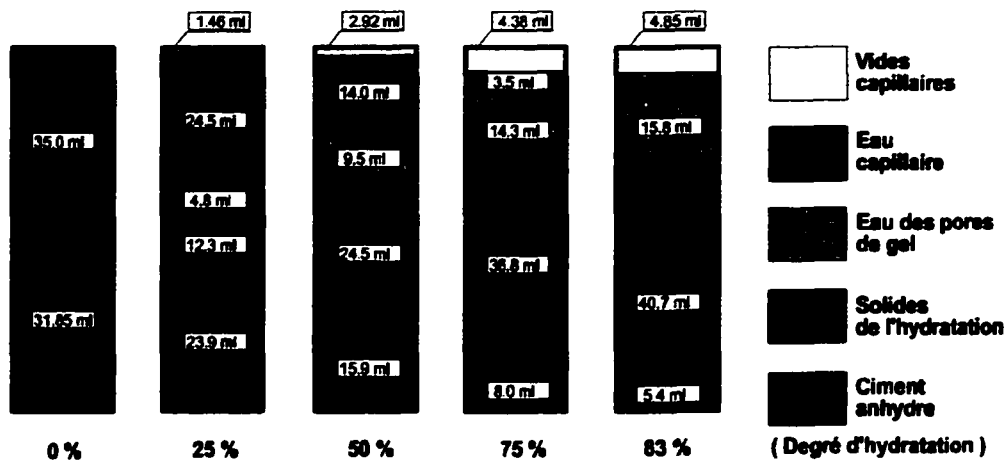
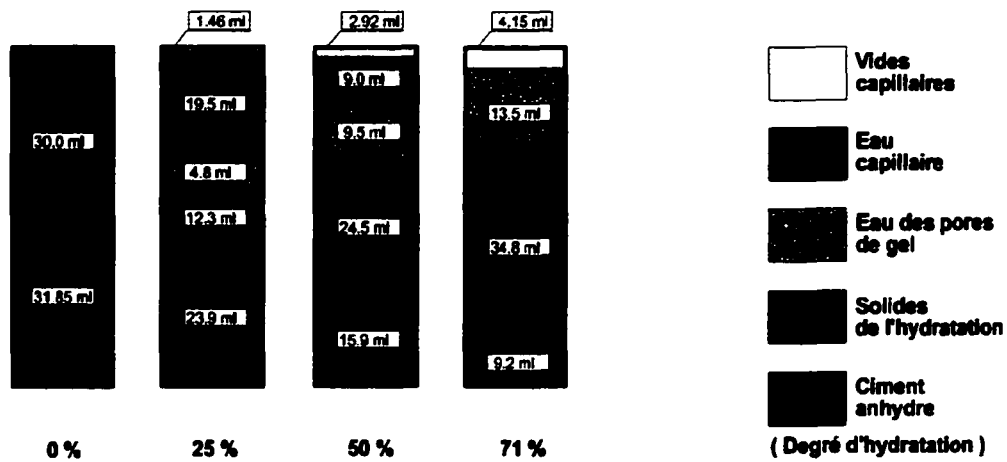


Figure 1.8 – Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,50 et 0,42 pour les différents degrés d'hydratation

E/C = 0.35



E/C = 0.30



E/C = 0.25

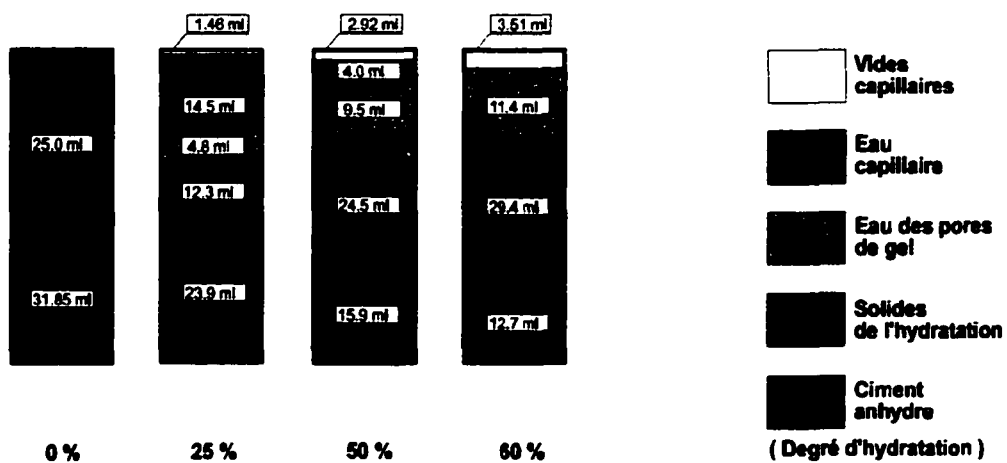


Figure 1.9 – Bilan volumique de l'hydratation des pâtes de ciment ayant les rapports E/C de 0,35, 0,30 et 0,25 pour les différents degrés d'hydratation

1.5 Autodessiccation interne

L'autodessiccation interne de la pâte, du mortier ou du béton est causée par la contraction chimique pendant l'hydratation du ciment Portland. Ce phénomène ne peut se produire que si le matériau est scellé (aucun échange hydrique avec l'environnement).

Les lois de Kelvin et de Laplace permettent l'étude du comportement hydrique du béton et sont à la base de l'équilibre thermodynamique des phases liquide et gazeuse dans la porosité capillaire.

1.5.1 Origine de l'autodessiccation

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, il y a une diminution de la quantité d'eau disponible pour la réaction avec le ciment et une augmentation de la quantité d'hydrates formés (Figures 1.8 et 1.9). À cause de la contraction Le Chatelier ces hydrates occupent moins de volume que les constituants au départ (eau et ciment). Après un certain degré d'hydratation l'eau ne peut donc plus occuper tout le volume de la porosité capillaire qui lui est offert. Il se forme une phase gazeuse dans les pores capillaires (constituée de vapeur d'eau et d'air) qui est séparé de la phase liquide par des ménisques d'interface [Baroghel-Bouny, 1994]. Étant donné que les tensions capillaires diminuent avec l'augmentation des tailles de pores, la phase gazeuse se formera premièrement dans les plus gros pores [Gagné, 1997]. La formation de ménisques entraîne une diminution de la pression partielle de vapeur d'eau et donc à température constante, de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte ou du béton (Figures 1.6 et 1.10).

Dans le matériau durci, le volume de la phase gazeuse augmente à mesure que le ciment s'hydrate et, par conséquent, l'humidité relative s'abaisse. Les plus gros pores se vident peu à peu et le processus se poursuit dans les pores de plus en plus petits.

Donc, à partir d'un certain degré d'hydratation, on observe une autodessiccation du matériau si celui-ci n'est pas en contact avec une source d'eau extérieure [Baroghel-Bouny, 1994].

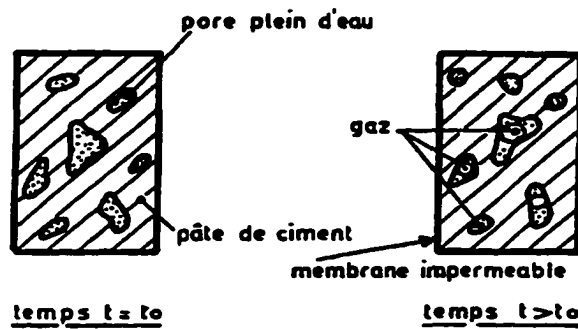


Figure 1.10 – Le phénomène de l'autodessiccation [Buil, 1979]

1.5.2 Loi de Laplace

En supposant que les pores capillaires dans la pâte de ciment sont cylindriques et que les interfaces liquide/gaz sont des ménisques sphériques (Figure 1.11), l'équilibre hydrostatique de l'eau liquide (l'eau ne s'écoule pas) dans un pore peut être exprimé par l'équation de Laplace [Baroghel-Bouny, 1994] :

$$\Delta P = P_g - P_l = \frac{2\sigma_{llg}}{r_{ms}} \quad (1.6)$$

$P_g = P_a + P_v$ Pression de la phase gazeuse;

P_a Pression partielle d'air sec;

P_v Pression partielle de vapeur d'eau;

P_l Pression de l'eau liquide;

σ_{llg} Tension d'interface eau liquide/phase gazeuse;

$r_{ms} = \frac{r}{\cos \alpha}$ Rayon du ménisque sphérique;

r Rayon du pore cylindrique;

α Angle de mouillage.

Selon l'équation de Laplace, l'eau liquide est en dépression par rapport à la phase gazeuse (dans un tube capillaire on suppose que la pression de la phase gazeuse est égale à la pression atmosphérique). Cette dépression de l'eau capillaire est compensée par une compression de la phase solide de la pâte ce qui produit une partie du retrait endogène externe [Baron, 1982, Gagné, 1997]. Selon l'équation 1.6, les pores capillaires ayant de faibles diamètres possèdent une dépression capillaire élevée et par conséquent produisent un retrait endogène plus grand. C'est le cas des BHP qui développent plus de retrait endogène que de retrait au séchage [Aïtcin, 1996, Tazawa et Miyazawa, 1996].

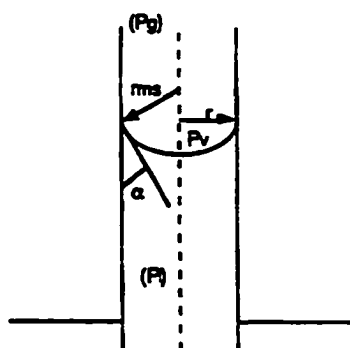


Figure 1.11 – Illustration de la loi de Laplace [Baroghel–Bouny, 1994]

1.5.3 Loi de Kelvin

Dans un pore capillaire, l'humidité relative h de la phase gazeuse, à la température T , peut être exprimée de la façon suivante [Baroghel–Bouny, 1994] :

$$h = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (1.7)$$

P_v Pression partielle de vapeur d'eau;

P_{vs} Pression de vapeur saturante de l'eau à la température T .

L'équilibre thermodynamique entre l'eau liquide et la vapeur d'eau (l'eau ne s'évapore pas) contenus dans un pore capillaire, à la température T peut être exprimé par l'équation de Kelvin [Baroghel-Bouny, 1994] :

$$-P_c = -(P_g - P_l) = \frac{R \times T \times \rho_l}{M} \times \ln h \quad (1.8)$$

- P_c Pression capillaire;
- R Constante des gaz parfaits;
- T Température absolue du système;
- ρ_l Masse volumique de l'eau liquide;
- M Masse molaire de l'eau.

L'équation de Kelvin donne une relation entre la dépression capillaire $-P_c$ et l'humidité relative h qui règnent dans un pore capillaire.

1.5.4 Loi de Kelvin-Laplace

L'équilibre total dans les pores capillaires de l'eau liquide avec la phase gazeuse (non écoulement et non évaporation d'eau) peut être défini en combinant les équations 1.6 et 1.8. Cette relation est appelée l'équation de Kelvin-Laplace [Baroghel-Bouny, 1994] :

$$\ln h = - \frac{2\sigma_{lg} \times M}{R \times T \times \rho_l \times r_{ms}} \quad (1.9)$$

Selon l'équation 1.9 l'humidité relative de la phase gazeuse est fonction de la courbure totale du ménisque. Plus le rayon du pore diminue, plus le ménisque est courbé. Quand la courbure du ménisque diminue, l'humidité relative de la phase gazeuse décroît.

En supposant que le pore est cylindrique est que le liquide est parfaitement mouillant ($\alpha=0$), l'équation de Kelvin-Laplace s'écrit [Baroghel-Bouny, 1994] :

$$r = \frac{2\sigma_{lg} \times M}{R \times T \times \rho_l \times \ln h} \quad (1.10)$$

Donc, dans un béton possédant une humidité relative h , il existe des pores capillaires de rayon r dans lesquels l'eau liquide est en équilibre total avec la phase gazeuse. Tous les pores capillaires de rayon inférieur au rayon r sont pleins d'eau et les pores possédant le rayon supérieur au rayon r sont vides. La connaissance de l'humidité relative d'un béton à la température T , dans un temps donné, permet de trouver ce rayon d'équilibre. Si l'isotherme d'absorption du corps poreux est connu, on peut aussi déterminer le degré de saturation de la pâte ce qui influence la résistance au gel.

1.5.5 Évolution de l'humidité relative interne en fonction du temps

Au fur et à mesure que le ciment s'hydrate, l'humidité relative dans la porosité capillaire passe d'une valeur de 100 % vers des valeurs plus petites. Selon Paillère et col. [1990], l'abaissement de l'humidité relative dans les pâtes de ciment et dans les mortiers dû à l'autodessiccation est limité approximativement à 75 % [Jensen, 1995]. En général, dans les pâtes de ciment, l'humidité relative interne ne diminue pas sous la limite de 75 % car à ce moment, l'hydratation s'arrête et le système devient thermodynamiquement stable. L'humidité relative interne peut atteindre des valeurs plus faibles dans les bétons à cause de la présence de granulats. La porosité des granulats (absorption d'eau lors du gâchage) diminue la quantité d'eau disponible pour la réaction avec le ciment. Dans le cas d'un béton, cela engendre une autodessiccation plus forte que celle d'une pâte de ciment ayant le même rapport E/C [Baroghel-Bouny, 1994].

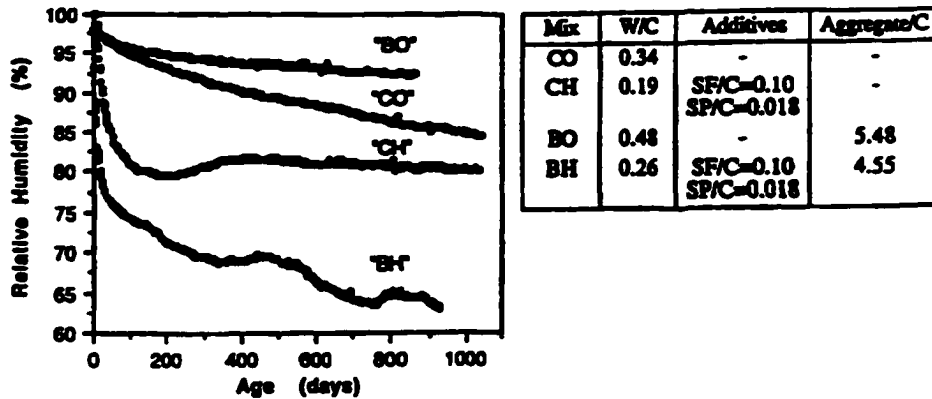


Figure 1.12 – Abaissement de l’humidité relative interne en fonction du temps pour les pâtes de ciment (CO et CH) et des bétons (BO et BH) [Baroghel-Bouny, 1996]

Dans un système fermé, l’évolution de l’humidité relative interne est influencée aussi par le rapport E/C, le type de ciment et l’ajout de la fumée de silice.

1.5.5.1 Influence du rapport E/L

Selon l’équation de Kelvin-Laplace, le taux d’humidité relative interne est fonction de la taille des pores. En même temps, la porosité est beaucoup influencée par le rapport E/C car ce rapport gouverne l’espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l’eau de gâchage. Pour les rapports E/C plus faibles, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces entre les grains sont moins grands et une très faible quantité d’hydrates est suffisante pour les combler [Gagné, 1997].

La réduction du rapport E/C permet de diminuer le volume total des pores capillaires et leur diamètre. Selon la figure 1.13, la réduction du rapport E/C de 0,45 à 0,25 permet de diminuer la porosité totale de 40 % à moins de 20 %. En même temps, le diamètre moyen des plus grands pores est diminué d’environ 10 fois.

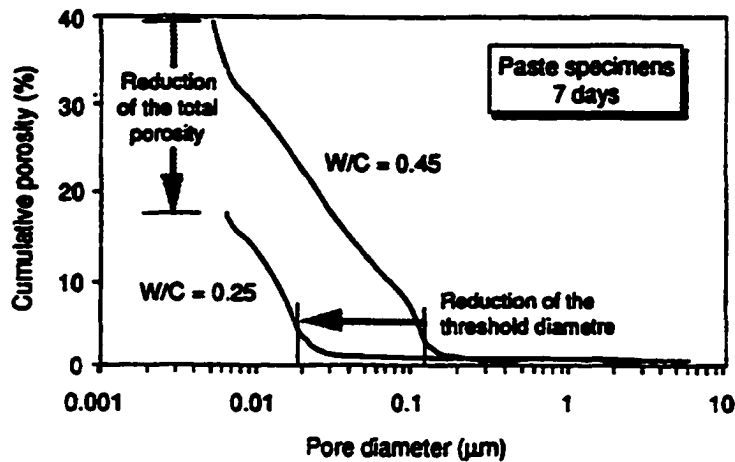


Figure 1.13 – Courbes de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau [Gagné et Aïtcin, 1993]

Donc, le béton ayant un rapport $E/C = 0,25$ possède des pores capillaires de plus faible diamètre que celui ayant un rapport $E/C = 0,45$. Selon l'équation 1.9, la diminution du diamètre des pores entraîne la diminution de l'humidité relative dans les pores car le ménisque de l'interface devient plus courbé.

Buil [1979] a regroupé les résultats de Copeland, Bragg et Wittmann sur l'évolution de l'humidité relative en fonction du rapport E/C (Figure 1.14). On peut constater que l'autodessiccation, négligeable pour un rapport E/C supérieur à 0,40, devient importante pour un E/C de l'ordre de 0,25.

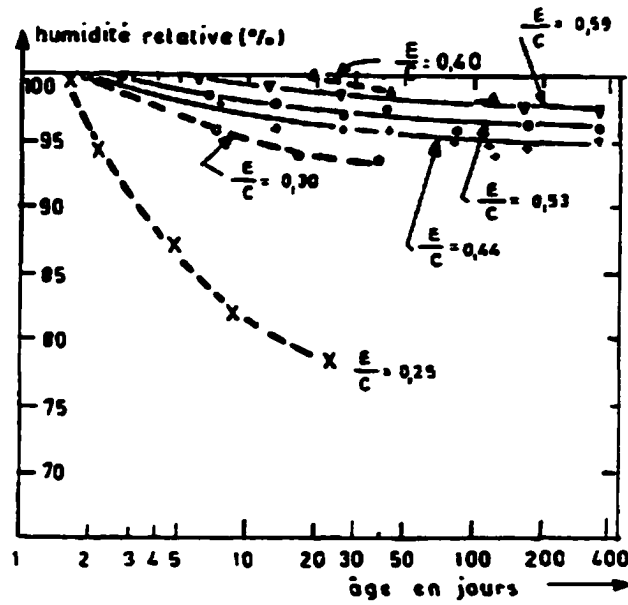


Figure 1.14 – Évolution de l’humidité relative dans les pâtes de ciment pour différents rapports E/C [Buil, 1979]

Selon Persson [1996], la réduction de l’humidité relative interne des bétons est fonction de leur rapport E/C (Figure 1.15). La même figure montre aussi que pour un même rapport E/C, l’humidité relative due à l’autodessiccation devient de plus en plus faible avec le temps.

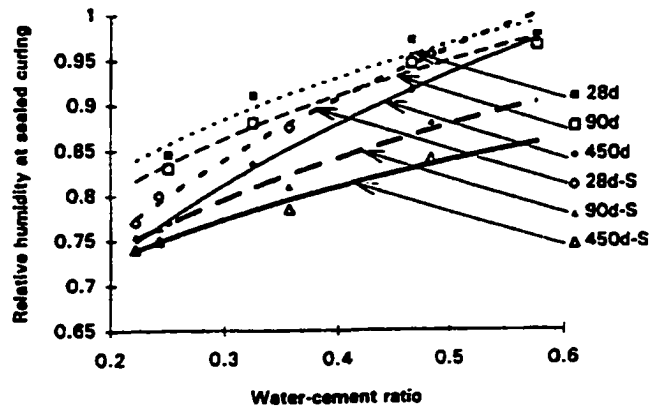


Figure 1.15 – Humidité relative des bétons en fonction du rapport E/C dans le cas d’un mûrissement scellé (S – 10 % de fumée de silice) [Persson, 1996]

1.5.5.2 Influence de la fumée de silice

Comme le rapport E/C, la fumée de silice influence aussi la porosité capillaire du béton. Selon Feldman et Cheng-yi [1985], la teneur en fumée de silice n'influence à peu près pas le volume total de porosité capillaire [Gagné, 1992]. C'est plutôt le diamètre des pores qui est influencé par l'ajout de la fumée de silice. En effet, pendant la réaction pouzzolanique, la fumée de silice réagit avec la portlandite pour produire de nouveaux C-S-H, ce qui raffine les pores capillaires. Le diamètre des pores étant plus petit, le taux d'humidité relative qui règne dans ces pores est lui aussi plus faible (Équation 1.9).

Les recherches de Jensen et Hansen [1995 et 1996] montrent que l'humidité relative due à l'autodessiccation est gouvernée par deux principaux paramètres. Ces deux principaux paramètres sont le rapport eau/liant et la teneur en fumée de silice.

La figure 1.16 montre l'évolution de l'H.R. en fonction du temps pour un rapport E/L de 0,35. On constate qu'en l'absence de la fumée de silice l'humidité relative se stabilise à environ 94 %. Le remplacement du ciment par de la fumée de silice a pour effet de provoquer une baisse supplémentaire considérable qui atteint 85 % pour 10 % de fumée de silice.

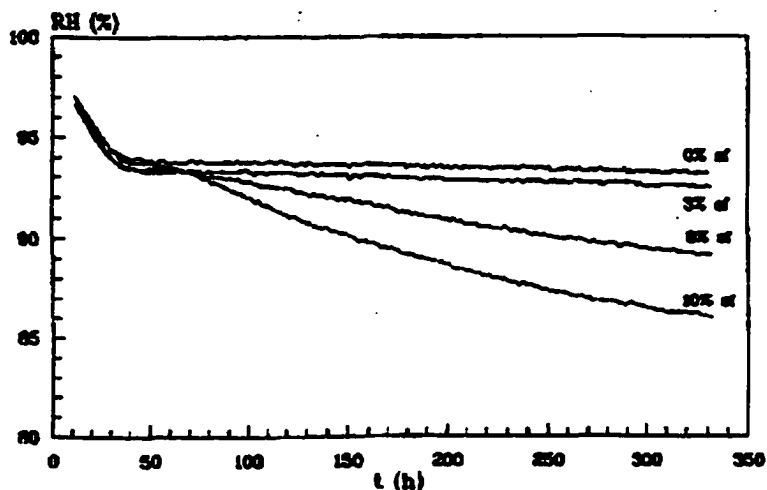


Figure 1.16 – Évolution de l'humidité relative due à l'autodessiccation dans une pâte de ciment possédant un rapport E/C = 0,35 (contribution du ciment et de la fumée de silice) [Jensen et Hansen, 1995]

Hiroshi et coll. [1997] ont mesuré l'autodessiccation interne des pâtes de ciment soumises à un mûrissement scellé. Les rapports E/C testés sont 0,50 et 0,25. Les pâtes ont été fabriquées avec un ciment Portland normal, un ciment mélangé avec laitier et un ciment mélangé avec 10 % de fumée de silice. La figure 1.17 montre que toutes les pâtes avec un rapport E/C de 0,50 ne présentent pas d'autodessiccation interne. Par contre, les pâtes avec un rapport E/C de 0,25 présentent une forte autodessiccation qui fait passer l'humidité relative de 100 à 80 % pendant les 8 premiers jours. Dans ce cas, on remarque que la fumée de silice joue un rôle mineur et que c'est plutôt le rapport E/L qui a la plus grande influence sur l'autodessiccation.

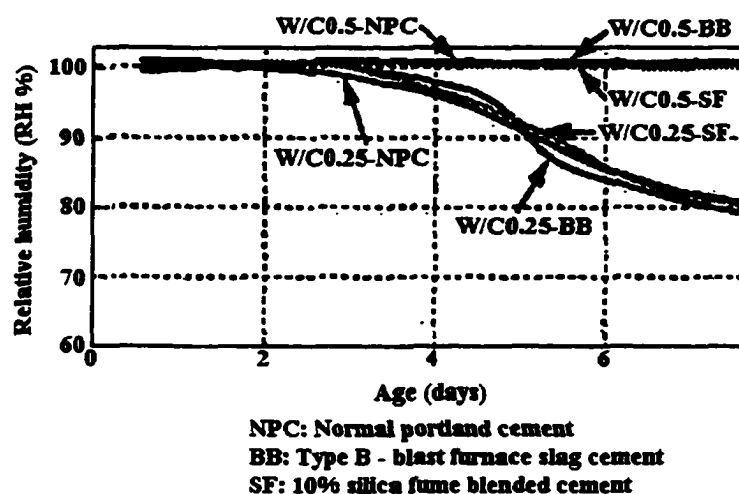


Figure 1.17 – Influence de la fumée de silice et du rapport E/L sur l'évolution de l'humidité relative dans des pâtes de ciment [Hiroshi et coll., 1997]

1.5.5.3 Influence du type de ciment

Les ciments Portland diffèrent par leurs compositions chimiques et par leur finesse. La cinétique d'hydratation est fonction de la proportion des quatre principaux phases (C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF), de la présence des sulfates alcalins, de type de sulfates de calcium et de la finesse du ciment. C'est à dire que la consommation d'eau pendant l'hydratation d'un ciment dépend de sa nature chimique et peut se traduire par une autodessiccation plus ou moins prononcée.

La teneur en C_3A est un des paramètres les plus influents. Les hydrates qui se forment à partir du C_3A réduisent le plus son volume pendant l'hydratation. C'est à dire qu'un béton fabriqué avec un ciment de faible teneur en C_3A aura une autodessiccation plus faible que celui fabriqué avec un ciment de plus forte teneur en C_3A [Tazawa, Miyazawa, 1995].

La teneur en alcalins du ciment est aussi importante. En effet, lors du gâchage, les ions alcalins engendrent une diminution de l'activité ionique dans la phase interstitielle ce qui se traduit par une diminution de l'humidité relative interne [Baroghel-Bouny, 1994].

Atlassi [1991] a testé des mortiers possédant des rapports E/C de 0,40 et 0,60 qui étaient fabriqués avec différents types de ciment (Tableau 1.3). Des mesures d'humidité relative ont été effectuées à 28, 90, 180 et 365 jours. Les résultats montrent que la composition chimique du ciment a une grande influence sur l'humidité relative interne. Les mortiers fabriqués avec les ciments ayant une faible teneur en C_3A et/ou une faible teneur en alcalis ont une humidité relative nettement plus élevée (Figure 1.18).

TABLEAU 1.3 – Propriétés chimiques des ciments [Atlassi, 1991]

| | Trade name | Spec. surf. area m ² /kg | Mineral ad- mixture | C ₃ A- con- tent % | H ₂ O- eq. % | |
|-----|-------------------------------|--|------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| DLS | Degerhans Anlåggnings-cement | 330 | - | 2 | 0.5 | low heat sulphate resistant |
| DIC | Degerhans Injekterings-cement | 600 | lime-stone 5% | 2 | 0.5 | |
| SKP | Skövde Standard Portland | 380 | lime-stone 5% | 8 | 1.0 | |
| SKR | Skövde Snabbhårdnande P. | 580 | - | 8 | 1.1 | rapid hardening |
| SKM | Skövde Modifierat P. | 580 | Zly ash 23% | 8 | 1.1 | |
| SLP | Slite Standard Portland | 380 | lime-stone 5% | 8 | 1.1 | |
| SLR | Slite Snabbhårdnande P. | 550 | - | 8 | 1.1 | rapid hardening |

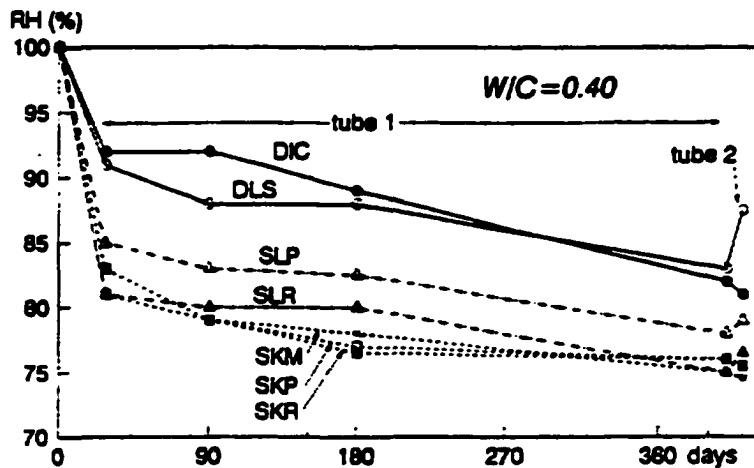


Figure 1.18 – Évolution de l'humidité relative des mortiers [Atlassi, 1991]

1.5.6 Isothermes d'adsorption et de désorption

Dans un milieu humide le béton adsorbe des molécules de vapeur d'eau sur ses surfaces. Étant un matériau poreux, il permet aussi la pénétration des molécules d'eau dans sa porosité par succion capillaire et par diffusion de vapeur. À une température donnée, le béton adsorbant un certain nombre de couches de molécules de vapeur d'eau en fonction de l'hygrométrie. Ce phénomène peut être présenté à l'aide des isothermes d'adsorption. Si l'hygrométrie dépasse une certaine valeur, les couches adsorbées deviennent suffisamment épaisses pour qu'une condensation capillaire se produise. Cette condensation modifie la forme des isothermes d'adsorption par un phénomène d'hystérésis. L'hystérésis peut être expliquée par la géométrie des pores capillaires (pores vides connectés entre eux par des cols de tailles inférieures) [Buil et Ollivier, 1992].

La figure 1.19 montre des isothermes d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau pour un béton ordinaire (*BO*) et un béton à haute performance (*BH*) dont les caractéristiques sont présentées à la figure 1.12.

Dans la zone où l'humidité relative dépasse 44 % l'influence du rapport E/C sur les propriétés hydriques du béton est bien visible. Les courbes d'adsorption, et surtout de désorption du béton *BH*, sont plus basses car ce béton est moins poreux.

Dans la même zone (H.R. > 44 %) on peut voir l'effet de l'ajout de fumée de silice et du faible rapport E/L sur l'état hydrique du béton. Les pentes des courbes de désorption et d'adsorption sont plus faibles pour le béton *BH* qui possède une porosité bien plus fine. C'est à dire que ce béton est peu sensible aux variations d'humidité et possède une autodesiccation plus forte [Baroghel-Bouny, 1994].

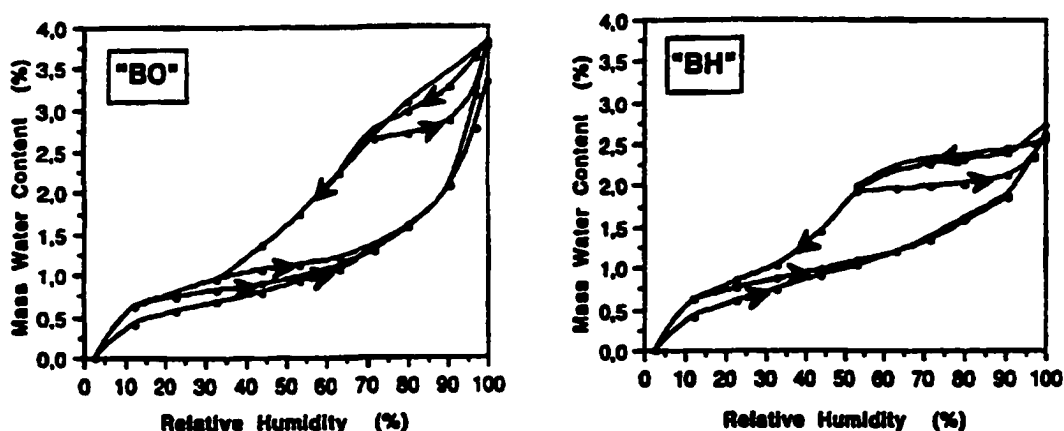


Figure 1.19 – Isothermes d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau obtenus à la température de 23 °C [Baroghel-Bouny, 1996]

L'effet du type de ciment est plus évident dans la zone de faible l'humidité relative (H.R. < 44 %) [Atlassi, 1991]. Selon Atlassi, c'est la finesse de ciment qui a l'influence la plus évidente sur les isothermes de désorption et d'adsorption.

2. RÉSISTANCE AUX CYCLES DE GEL- DÉGEL

2.1 Introduction

La durabilité au gel est très importante dans le cas des structures en béton exposées aux basses températures. Le béton exposé aux cycles répétés de gel et de dégel peut notamment être endommagé par la fissuration interne. Dans le cas des bétons ordinaires, l'utilisation des adjuvants entraîneurs d'air permet une bonne protection contre la fissuration interne. Le cas des bétons à hautes performances est plus complexe. Certains BHP à faible rapport E/L (0,25) sont résistants à la fissuration interne sans air entraîné alors que d'autres BHP ($E/L > 0,35$) ont définitivement besoin de la protection d'un réseau de bulles d'air pour résister aux essais de gel accélérés (ASTM C 666). Des résultats récents montrent aussi qu'il semble que l'essai ASTM C 666 – Procédure A, couramment utilisé en laboratoire pour évaluer la durabilité au gel des bétons, tend à sous-estimer la durabilité réelle des BHP en conditions in situ [Hénault, 1995].

Ce chapitre présente les principaux phénomènes à la base de la fissuration interne des bétons lors du gel. Ensuite, il traite du cas particulier de la résistance au gel des BHP en laboratoire et en nature.

2.2 Gélivité de la pâte de ciment hydraté

La pâte de ciment durcie est constituée de trois phases. La phase solide, constituée des hydrates et du ciment non hydraté, occupe le plus grand volume. La phase fluide contient de l'eau et des substances en solution, notamment des ions sodium et potassium. La dernière phase est la phase gazeuse contenue dans la porosité capillaire et dans les bulles d'air. Le comportement de la pâte de ciment lors des cycles de gel-dégel dépend du comportement de chacune de ces phases et de leur interaction. La phase liquide possède le rôle le plus important. Elle se transforme en glace lors du gel, génère des pressions internes et peut aussi être le site d'un déséquilibre de concentration ionique pouvant causer des pressions osmotiques lors du gel.

2.2.1 Porosité interne et l'état de l'eau dans la pâte de ciment

La phase liquide est principalement localisée dans la porosité de la pâte qui comprend plusieurs familles de vides. Selon la figure 2.1, la dimension des vides est comprise entre quelques millimètres et quelques dizaines d'angströms.

Les plus grands vides sont les vides d'air entrappé et les défauts de compaction (diamètre > 1mm). Ensuite on retrouve les bulles d'air entraîné, dont le diamètre peut varier de 10 μm à 1 mm. Viennent ensuite les pores capillaires ayant des diamètres compris entre 0,01 μm et 5 μm . Les plus petits sont les pores de gel possédant des diamètres inférieurs à 40 angströms.

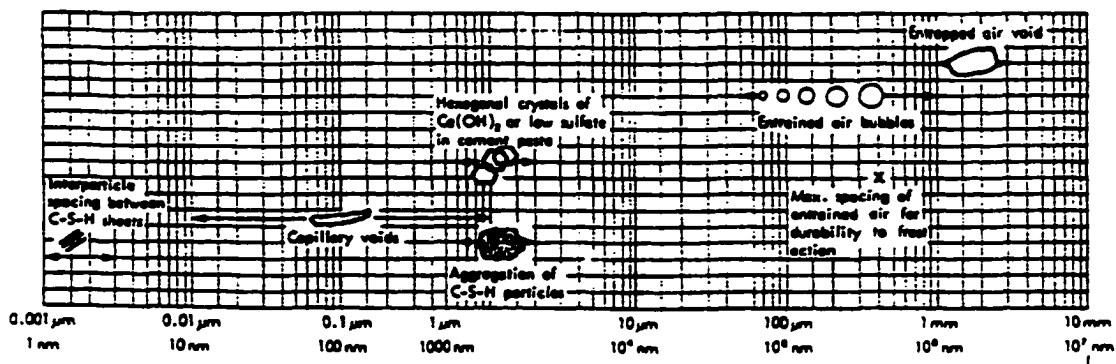


Figure 2.1 – Échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté [Metha, 1986]

L'eau dans la pâte de ciment hydraté peut être sous différentes formes selon l'endroit où elle se trouve.

On retrouve, tout d'abord, l'eau des pores capillaires. Il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment. L'eau contenue dans les plus gros pores (diamètre > 0,05 μm) est libre car les forces de surface n'affectent qu'une proportion faible du volume total de pore. Par contre, l'eau contenue dans les pores plus petits (0,01 à 0,05 μm) est non libre. Elle est presque toute soumise à des forces de surface qui deviennent de plus en plus importantes à mesure que le diamètre diminue.

On retrouve aussi de l'eau adsorbée qui est retenue par les forces de surface sur les solides, surtout sur les parois des pores capillaires et des pores de gel.

Dans la structure même des C-S-H, on retrouve de l'eau zéolitique et de l'eau combinée chimiquement. La première est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène. Comme son nom l'indique, la deuxième est combinée chimiquement avec le ciment et fait partie intégrante des C-S-H. Elle représente environ 23 % de la masse du ciment qui s'est hydraté (Paragraphe 1.4.2).

2.2.2 Point de fusion de la glace

Dans une pâte de ciment durci, la quantité d'eau gelable, contenue dans la porosité capillaire, est fonction de taille des pores. C'est à dire que toute l'eau contenue dans les pores ne se transforme pas complètement en glace dès que la température s'abaisse au-dessous de 0 °C [Pigeon et Pleau, 1995]. Quand la température s'abaisse au-dessous de 0 °C, la glace se forme d'abord dans les plus gros pores pour ensuite se former dans les pores de plus en plus petits à mesure que la température s'abaisse. La formation de la glace est donc un processus graduel qui dépend de la dimension des pores, de la vitesse de refroidissement et de la température.

Selon Carles-Gibergues et Pigeon [1992], l'eau contenue dans les pores de gel (l'eau adsorbée sur les parois des pores de C-S-H) ne gèle que si la température s'abaisse au-dessous de - 78 °C. Pratiquement, cette eau est donc non gelable.

La figure 2.2 montre l'abaissement théorique du point de fusion de la glace en fonction du diamètre des pores dans le cas de l'eau pure.

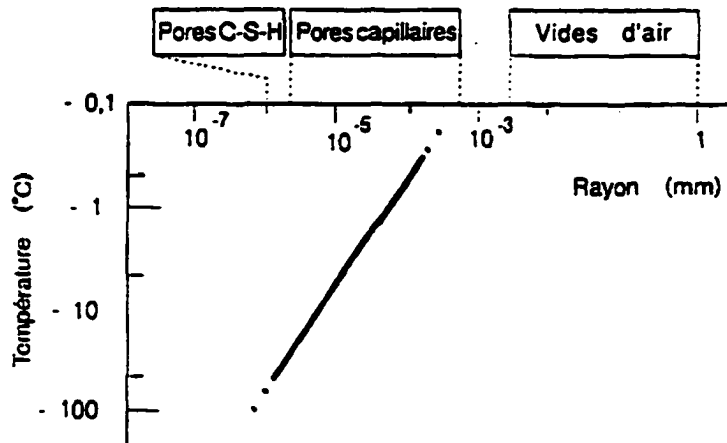


Figure 2.2 – Relation entre la température de formation de la glace et le diamètre des pores [Carles-Gibergues et Pigeon, 1992]

En pratique, l'eau des pores n'est jamais pure. Elle contient des substances en solution, notamment des alcalis. Leur présence abaisse d'avantage les points de fusion de la glace présentés à la figure 2.2.

En résumé, plus la porosité capillaire d'un béton est faible et fine, plus la quantité de glace en mesure de se former lors de gel sera faible.

2.2.3 Calorimétrie à basse température

La calorimétrie à basse température est très utile pour évaluer la quantité de glace formée dans un béton. Cette technique est basée sur la mesure du flux de chaleur dégagé lorsque l'eau se transforme en glace à une température donnée.

Marchand [1993] a utilisé cette méthode pour étudier la formation de la glace dans les bétons à haute performance ayant des rapports E/C de 0,25 à 0,45. Les résultats de ces travaux sont présentés à la figure 2.3 où la quantité de glace formée, dans un intervalle de température, est proportionnelle à la surface sous la courbe. Chaque pic sur les courbes indique qu'une quantité importante de la glace a été formée pour un intervalle de température donné. Par exemple, lorsque la température est d'environ -5 °C , l'eau dans les plus gros pores gèle complètement pour chaque rapport eau/ciment. Il est

évident que la quantité de glace formée est plus grande pour un E/C de 0,45 car ce béton possède une grande quantité de pores relativement gros et saturés. Par contre, la quantité de glace formée dans le béton ayant un rapport E/C de 0,25 est plus faible car sa porosité est faible et est constituée de pores relativement petits. En effet, pour le béton de E/C = 0,25, moins de 10 % de l'eau évaporable gèle à la température de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Marchand et coll., 1996]. Cela montre bien l'effet positif de la diminution du rapport E/C sur la formation de la glace dans les bétons.

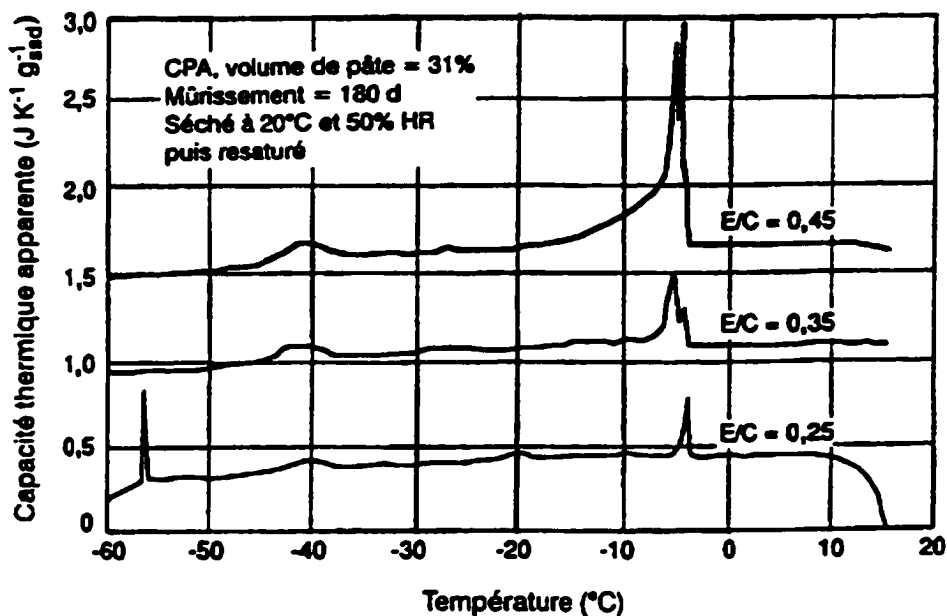


Figure 2.3 – Influence du rapport eau/ciment sur la formation de la glace (les échantillons séchés à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 50 % d'humidité relative puis résaturés) [Marchand et coll., 1996]

2.2.4 Degré de saturation critique

Le degré de saturation d'une pâte de ciment est défini comme le rapport entre la quantité d'eau liquide et le volume de la porosité. Selon Carles-Gibergues et Pigeon [1992], le degré de saturation critique, qui définit la résistance au gel, est voisin de 0,90 (Figure 2.4). C'est à dire que la pâte de ciment ayant un degré de saturation supérieur à 0,90 a besoin d'air entraîné comme protection contre la fissuration interne. Par contre, la pâte de ciment ayant un degré de saturation inférieur à 0,90 possède une protection naturelle par les vides gazeux dans la porosité capillaire (Paragraphe 1.5.1). Ces vides

pourraient constituer un volume tampon dans lequel la glace pourrait se former sans exercer de contraintes internes [Gagné, 1997].

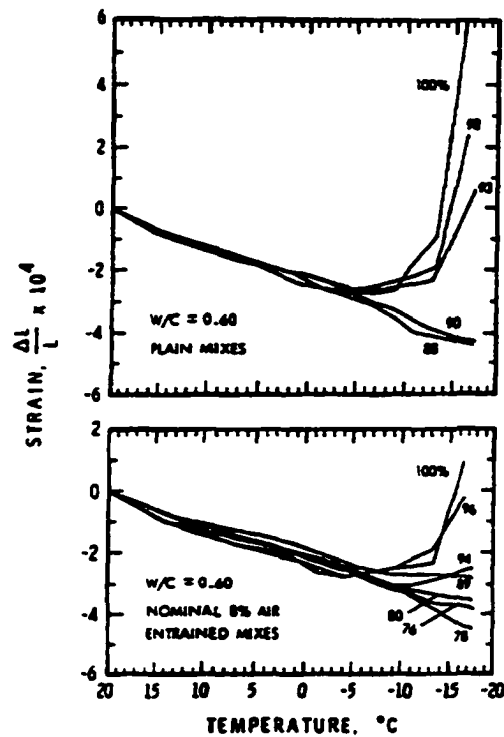


Figure 2.4 – Influence du degré de saturation d'un mortier ($E/C = 0,60$) sur son comportement dimensionnel au cours du gel [Ramachandran et coll., 1981 via Gagné, 1997]

La figure 2.4 montre que : - la glace et l'expansion commencent à se former vers $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- dans les mortiers sans air entraîné, le degré de saturation critique est d'environ 90 %;
- l'air entraîné augmente légèrement le seuil de saturation critique à environ 94 % et diminue significativement les expansions des mortiers saturés.

La notion de degré de saturation critique peut être utilisée pour estimer la résistance potentielle aux cycles de gel-dégel d'un béton. La RILEM a adopté la méthode du degré de saturation critique proposée suite aux travaux de Fagerlund [1971 et 1977]. Selon cette méthode, la résistance potentielle aux cycles de gel-dégel se définit par l'équation suivante [Pigeon et Pleau, 1995] :

$$F = S_{cr} - S_{cap} \quad (2.1)$$

Où : F représente la résistance potentielle aux cycles de gel-dégel;

S_{cr} est la plus forte valeur du degré de saturation d'un béton qui puisse être atteinte pendant un gel sans qu'il y ait détérioration;

S_{cap} est le degré de saturation atteint par absorption capillaire.

La figure 2.5 montre qu'il existe, pour chaque béton, un seuil de saturation critique au-delà duquel le béton n'est plus résistant au gel. Ce degré de saturation peut être atteint suite à une période d'immersion dans l'eau plus ou moins longue. En principe, tous les types de béton, quels qu'ils soient, seront éventuellement détruits par le gel suite à une exposition plus ou moins longue dans l'eau. La destruction par le gel s'amorcera lorsque la quantité d'eau absorbée sera suffisante pour atteindre le degré de saturation critique.

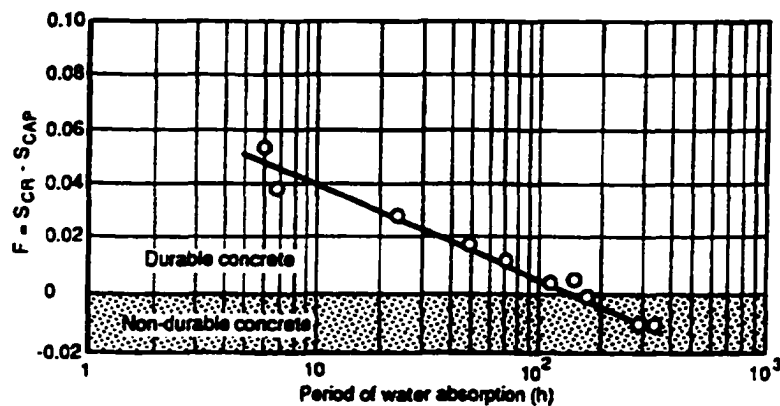


Figure 2.5 – Relation entre le paramètre F et le période d'absorption capillaire [RILEM 4-CDC Committee, 1977 via Pigeon et Pleau, 1995]

La méthode du degré de saturation critique montre que la résistance au gel d'un béton est non seulement fonction des propriétés du béton mais est aussi fonction des conditions d'essais ou d'exposition. Par contre, l'essai ASTM C 666 ne prend pas en considération les conditions d'exposition réelles qui ne sont jamais aussi sévères que celles de l'essai accéléré. Il faut également mentionner que le degré de saturation est

relié à la saturation possible des bulles d'air entraîné et que le degré de saturation critique est fonction du nombre et de la taille des bulles.

Le degré de saturation de 100 % défini par cette méthode correspond au remplissage complet des pores capillaires et des bulles d'air. En réalité les bulles d'air ne peuvent jamais être remplies par la succion capillaire. C'est donc à dire qu'aucun béton à air entraîné n'atteindra l'état de saturation critique ($S_{cr} = 100\%$). Par conséquent, dans le cas des bétons à air entraîné, le temps de bonne tenue au gel, défini à la figure 2.5, devient infini [Pigeon et Pleau, 1995]. Les bétons ayant un faible rapport E/L peuvent avoir un degré de saturation qui varie en fonction de la profondeur sous la surface. En effet, leur très faible perméabilité peut faire en sorte que le cœur de l'élément ne puisse jamais atteindre le degré de saturation critique alors que la pâte en surface l'ait déjà atteint. Au cœur, l'absence de pénétration d'eau externe, combinée à l'autodessiccation, peut donc créer des conditions de saturation très favorables à une bonne résistance à la fissuration interne.

Les travaux de Hooton et McGrath [1991] mettent en relation le taux d'humidité relative interne, dû à l'autodessiccation, et la résistance au gel des bétons (Figure 2.6).

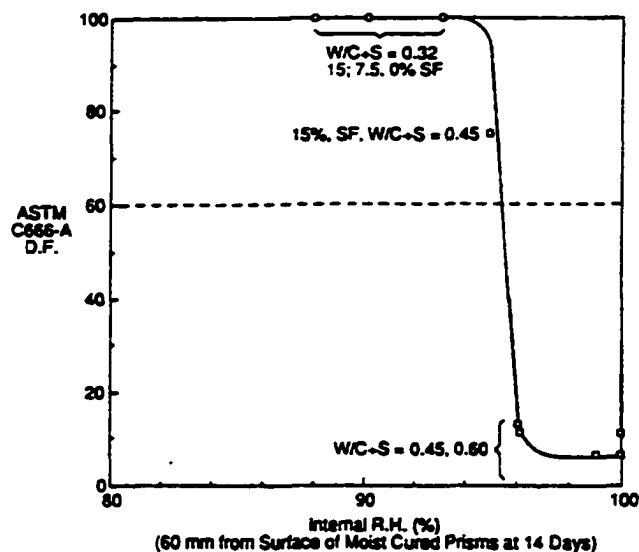


Figure 2.6 – Influence du taux d'humidité relative interne sur la résistance au gel du béton [Hooton et McGrath, 1991]

La figure 2.6 montre que les bétons ayant une H.R. > 95 % n'ont pas résisté aux 300 cycles de gel-dégel selon la norme ASTM C 666 – A. Par contre, les bétons possédant une H.R. < 93 % ont conservé un facteur de durabilité de 100 % à la fin des essais. Ces résultats montrent, de nouveau, qu'il semble exister un seuil de saturation critique qui gouverne la résistance à la fissuration interne des bétons.

2.2.5 Comportement dimensionnel de la pâte de ciment lors du gel

La thermodynamique montre que, sous l'effet d'un gel suffisamment lent pour permettre de maintenir la pâte de ciment dans un état proche de l'équilibre, la glace se forme à l'extérieur du corps poreux. Cela provoque alors une contraction due au départ de l'eau à l'extérieur du corps poreux (surface, bulles d'air) [Carles-Gibergues et Pigeon,1992].

Dans une pâte de ciment sans air entraîné et saturé, on mesure un gonflement lorsque la température s'abaisse au-dessous de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 2.7). Ce gonflement est en partie provoqué par la formation de glace dans la porosité capillaire, ce qui entraîne une pression interne sur les parois des pores.

Dans le cas d'une pâte de ciment sèche, la courbe de contraction est à peu près égale à la courbe de contraction thermique.

Pour une pâte de ciment à air entraîné, on observe une forte contraction lors du gel. Cette contraction s'explique par la contraction thermique et par le départ de l'eau des plus petits pores capillaires ou des pores de gel vers les bulles d'air ou vers les plus grands pores non complètement saturés. C'est à dire que l'eau est attirée vers les sites de la formation de la glace plutôt que d'en être expulsée [Gagné, 1997].

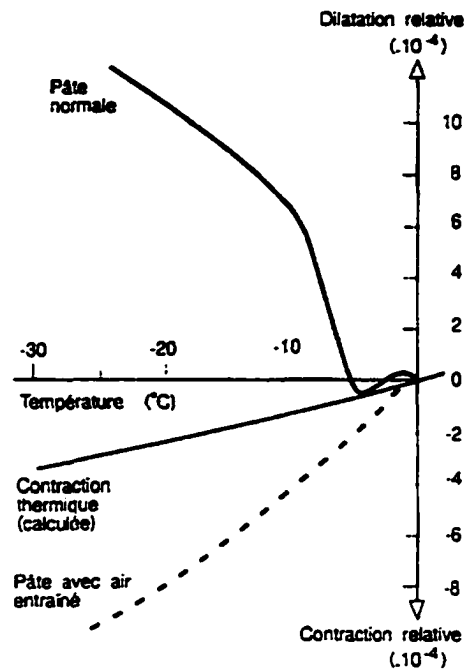


Figure 2.7 – Comportements dimensionnels des pâtes de ciment au cours de gel [Powers et Helmuth, 1953 via Carles-Gibergues et Pigeon, 1992]

2.3 Fissuration interne

La fissuration interne est la destruction de toute la masse du béton causée par les cycles de gel-dégel. Un des facteurs qui influence ce phénomène est l'eau. Elle se trouve dans les pores de gel (C-S-H) et dans les pores capillaires.

Les pores de gel sont de très faibles diamètres (< 40 angströms). L'eau qu'ils contiennent est en grande partie adsorbée entre les feuillets de C-S-H. Étant très fortement retenue, elle ne gèle que si la température s'abaisse au-dessous de -78 $^{\circ}\text{C}$. Pratiquement, on peut considérer que cette eau est non gelable.

Les pores capillaires sont beaucoup plus gros que les pores de gel ($0,01$ μm à 5 μm). Par conséquent, l'eau des pores capillaires est moins retenue par les forces de surface. Elle se déplace et gèle plus facilement. Puisque les pores capillaires possèdent des diamètres différents, l'eau qu'ils contiennent gèle à des températures différentes. La formation de la glace commence dans les plus gros pores et se poursuit dans les plus petits à mesure que la température s'abaisse. La présence de substances en solution dans

un pore peut diminuer d'avantage le point de fusion de la glace. Donc, la formation de la glace dans les pores capillaires est un processus graduel qui dépend de la taille de pores et de la température. Il est important de souligner que la formation de la glace est reliée au phénomène de nucléation, et que la compréhension de ce phénomène est requise pour bien comprendre comment et où la glace peut se former.

Le degré de saturation de porosité capillaire joue un rôle important face à la fissuration interne du béton. Si ce degré est supérieur à environ 90 %, la glace qui se forme va générer des pressions suffisamment élevées pour fissurer la pâte qui entoure les pores. Si ce degré est inférieur à environ 90 %, il y a assez d'espaces vides où l'eau, en gelant, peut augmenter son volume sans créer de dommages. Dans ce cas, la pâte peut résister aux pressions internes mais seulement si la température s'abaisse suffisamment lentement.

Les trois modèles qui expliquent l'action du gel dans la pâte de ciment prennent en considération les phénomènes mentionnés ci-dessus. Ils prennent aussi en compte le rôle des bulles d'air.

2.3.1 Modèle des pressions hydrauliques

Ce modèle a été développé par Powers et publié en 1949. Selon ce modèle, l'eau des pores capillaires commence à geler lorsque la température s'abaisse au-dessous de 0 °C. Lors de la diminution de température, la formation de glace se fait graduellement en fonction du diamètre des pores et de la concentration des substances en solution dans l'eau. Si la pâte de ciment est saturée, les pores capillaires sont pleins d'eau. En gelant, l'eau augmente son volume de 9 % et causera une expulsion d'une certaine quantité d'eau contenue dans les pores. Si les pressions hydrauliques ainsi formées dépassent la résistance en traction de la pâte, il y aura une fissuration. Les bulles d'air peuvent recueillir une certaine quantité d'eau expulsée qui s'écoule au travers de la pâte. Si les bulles sont suffisamment rapprochées cette eau pourra geler sans créer de dommages (Figure 2.8).

L'eau expulsée des pores capillaires s'écoule dans un milieu poreux possédant une certaine perméabilité. L'application de la loi de Darcy permet de calculer la pression nécessaire pour qu'une certaine quantité d'eau traverse un milieu semi-perméable en un temps et une distance donnée. Si la pâte est peu perméable, ou le trajet de parcours est trop long, ou le taux de formation de glace est trop élevé, les pressions de l'écoulement deviennent supérieures à la résistance en traction de la pâte. La pâte commence à fissurer, ce qui représente le début de la destruction par le gel.

En utilisant la loi de Darcy, Powers a calculé la longueur maximale que l'eau peut parcourir sans fissurer la pâte. Pour une pâte bien protégée contre le gel, cette longueur maximale représente la distance maximale entre un pore capillaire et une bulle d'air. En supposant une seule bulle entourée d'une coquille de pâte (Figure 2.8) Powers a calculé L_{max} en utilisant la formule suivante [Pigeon et Pleau, 1995] :

$$\frac{L_{max}^3}{r_b} + \frac{3L_{max}^2}{2} = \frac{K \times T}{U \times R} \times (const) \quad (2.2)$$

- L_{max} Longueur maximale que l'eau peut parcourir sans fissurer la pâte;
- r_b Rayon de bulle d'air;
- K Coefficient de perméabilité de la pâte de ciment;
- T Résistance à la traction de la pâte;
- U Quantité d'eau gelable lorsque la température s'abaisse de 1 °C;
- R Vitesse de refroidissement.

L'équation 2.2 montre que la valeur de L_{max} diminue si la vitesse de refroidissement augmente ou la perméabilité de la pâte s'abaisse. L'augmentation de la quantité d'eau gelable diminue aussi la valeur de L_{max} car la quantité d'eau qui s'écoule au travers de la pâte est plus importante.

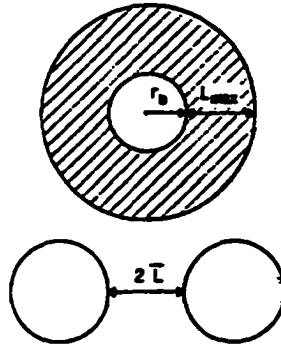


Figure 2.8 – Représentation schématique de L_{max} et \bar{L} [Carles-Gibergues et Pigeon, 1992]

L'équation 2.2 s'applique seulement aux pâtes possédant les bulles d'air de même diamètre et espacées également. Dans la pâte réelle, l'espacement et le diamètre des bulles d'air sont variables. Donc, il faut considérer L_{max} comme une valeur qui ne doit pas être dépassée en aucun point de la pâte. Powers a également estimé la valeur moyenne de la distance maximale (\bar{L}) que l'eau doit parcourir pour venir jusqu'à la bulle d'air la plus proche. Selon lui, pour une pâte saturée de rapport $E/C = 0,50$ cette valeur est égale à $250 \mu\text{m}$ quand le taux de gel est $11 \text{ }^\circ\text{C}$ à l'heure.

La méthode des pressions hydrauliques est la seule méthode qui lie mathématiquement les propriétés de la pâte, le taux de gel et l'espacement des bulles d'air. Cette méthode explique aussi la protection du béton par les bulles d'air entraînées. Cependant, elle ne prend pas en considération la température minimale lors du gel [Pigeon et Pleau, 1995]. Également, cette méthode n'explique pas la contraction de la pâte lors de gel due au départ de l'eau des plus petits pores capillaires ou des pores de gel vers les bulles d'air ou vers les plus grands pores non complètement saturés. C'est la raison principale pour laquelle cette méthode a été trouvée inexacte par plusieurs chercheurs dont Powers lui-même. Même si elle n'explique pas la contraction de la pâte lors du gel, la méthode des pressions hydrauliques reste applicable en certains endroits de la pâte ou les conditions de saturation sont très élevées [Gagné, 1992].

2.3.2 Modèle des pressions osmotiques

Le modèle des pressions osmotiques a été formulé par Powers et Helmuth en 1953 après qu'ils aient constaté que le modèle des pressions hydrauliques ne pouvait pas expliquer la contraction de la pâte lors de gel. Ce modèle est basé sur le fait que l'eau des pores capillaires n'est pas pure. Elle contient des substances en solution, notamment des ions alcalins (Na^+ , K^+). Quand la température s'abaisse au-dessous de 0 °C, l'eau des pores capillaires ne gèle pas immédiatement car les substances en solution dans l'eau et la taille faible des pores diminuent le point de fusion de la glace. Si la température devient suffisamment basse, l'eau commence à geler. La formation de la glace débute dans les plus gros pores. Puisque la glace est formée d'eau pure, la concentration de la solution non gelée augmente et le point de fusion de la glace s'abaisse.

Donc, lors du gel, il y a un déséquilibre de concentration entre les solutions plus concentrées dans les plus gros pores et les solutions moins concentrées dans les pores plus petits et dans les pores de gel. Selon le phénomène d'osmose, l'eau des pores plus petits ou des pores de gel, a tendance à rééquilibrer les concentrations en se dirigeant vers les plus gros pores. Si ces derniers sont pleins, les pressions osmotiques peuvent dépasser la résistance en traction de la pâte et causer sa fissuration. De plus, l'eau qui arrive dans les plus gros pores diminue la concentration de la solution ce qui permet de former davantage de glace et d'augmenter les pressions dans la pâte. L'abaissement de la température permet la formation de glace dans les pores plus petits, ce qui amplifie le phénomène.

Habituellement, les bulles d'air contiennent un peu d'eau. Cette eau gèle relativement tôt sur leurs parois à cause de leur grand diamètre. La solution non gelée devient plus concentrée et attire l'eau des pores capillaires vers les bulles d'air. Si les bulles d'air sont suffisamment rapprochées, la plus grande quantité d'eau contenue dans la porosité capillaire se dirige vers ces bulles ou elle peut s'accumuler sans créer de dommages (Figure 2.9).

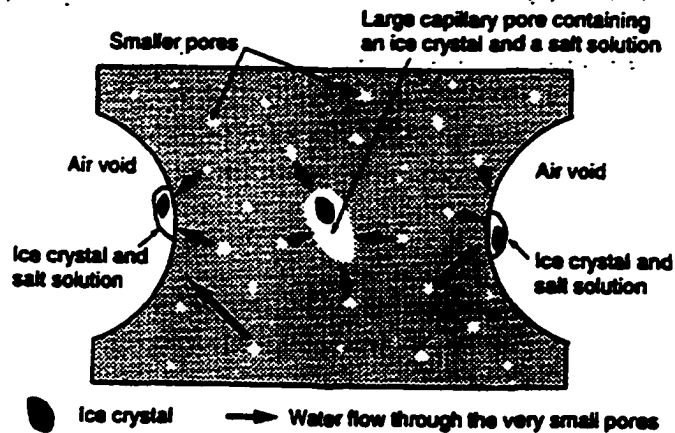


Figure 2.9 - Illustration schématique du processus de la formation des pressions osmotiques dans la pâte de ciment [Pigeon et Pleau, 1995]

La méthode des pressions osmotiques permet d'expliquer la contraction de la pâte lors du gel. Elle explique aussi l'action néfaste des sels fondants. En effet, les sels dissous dans l'eau capillaire augmentent les pressions osmotiques et le degré de saturation de la pâte, ce qui explique la plus faible résistance au gel des bétons en contact avec des sels fondants [Gagné, 1997]. Selon Pigeon et Pleau [1995], la méthode des pressions osmotiques n'explique pas l'influence du taux de gel. Ils pensent également que le rôle des bulles d'air est mal expliqué. Plus précisément, le rôle des bulles d'air ne dépend pas de leur nombre dans la pâte. Il existe toujours entre deux bulles d'air une zone où les pores capillaires gagnent "la compétition". Donc, certaines régions de la pâte ne sont pas bien protégées par les bulles d'air. C'est plutôt la méthode des pressions hydrauliques qui s'applique dans ce cas.

2.3.3 Modèle thermodynamique

Ce modèle a été proposé par Litvan en 1972. Il est basé sur la constatation que l'eau des pores capillaires ne gèle pas sur place lorsque la température descend sous 0 °C. Cette eau est plutôt surrefroidie. Sa présence dans la pâte provoque des gradients de pression de vapeur ce qui entraîne l'endommagement par le gel.

Supposons une pâte de ciment saturée. L'abaissement de la température au-dessous de 0 °C provoque la formation de la glace d'abord sur les parois des bulles d'air. En même temps, l'eau des pores capillaires est surrefroidie. La pression de vapeur au-dessus de l'eau surrefroidie étant plus élevée qu'au-dessus de la glace (Figure 2.10), une partie de l'eau capillaire se déplace vers les bulles d'air pour rétablir l'équilibre. La fissuration interne est causée par des mouvements désordonnés de l'eau. Un taux de gel trop élevé, ou un trajet à parcourir trop long, peuvent causer les fortes pressions dans la pâte et par conséquent sa fissuration.

Selon la loi de Kelvin-Laplace (Équation 1.10), l'évaporation affecte premièrement les plus gros pores. L'eau dans les pores plus petits s'évapore plus difficilement car cette eau est retenue plus fortement par les forces de surface. Donc, l'abaissement de la température cause un assèchement de la pâte qui atteint des pores de plus en plus fins.

Le modèle de Litvan met en liaison le taux de gel et la porosité de la pâte avec la quantité d'eau instable lors de gel. Si le taux de gel ou la porosité de la pâte augmentent, la quantité d'eau qui se déplace et sa vitesse augmentent aussi. Les contraintes dues aux mouvements de l'eau deviennent élevées et il y a la fissuration de la pâte. Cependant, cette méthode ne donne pas une relation claire entre l'espacement des bulles d'air requis pour protéger la pâte contre le gel [Pigeon et Pleau, 1995].

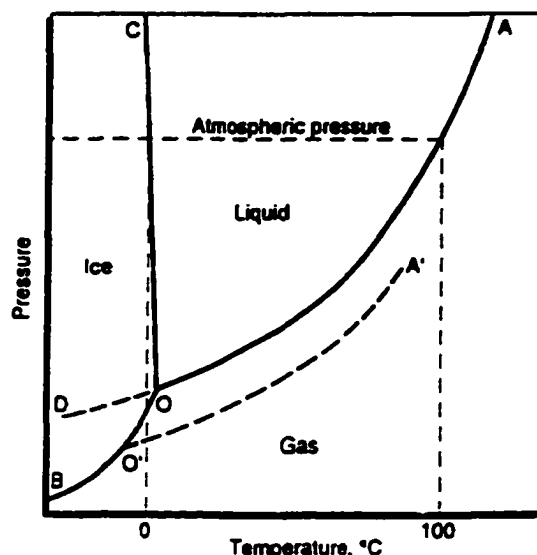


Figure 2.10 – Diagramme des phases de l'eau [Pigeon et Pleau, 1995]

2.4 Résistance au gel des bétons à haute performance

Pour des bétons ordinaires, l'entraînement de l'air permet une bonne protection contre la fissuration interne lors du gel. Dans le cas des bétons à haute performance l'entraînement des bulles d'air nécessite une quantité élevée d'agent entraîneur d'air. De plus, l'air entraîné a pour conséquence une diminution de la résistance en compression. En effet, une augmentation de 1 % du volume d'air peut diminuer jusqu'à 5 % la résistance en compression du béton. Pour cette raison, il peut être utile de limiter ou même parfois d'éviter la quantité d'air entraîné dans les BHP car cela facilite la production et abaisse les coûts.

2.4.1 Résistance à la fissuration interne en laboratoire

L'essai ASTM C 666 – A est très souvent utilisé en laboratoire pour estimer la résistance à la fissuration interne des bétons ordinaires et des BHP. C'est un essai accéléré effectué sur des éprouvettes immergées dans l'eau. Il a été utilisé par plusieurs chercheurs pour tester la résistance au gel des BHP avec et sans air entraîné.

Malhotra et col. [1987] ont étudié la résistance au gel des bétons ayant des rapports E/C entre 0,35 et 0,25. Tous les bétons sans air entraîné se sont détruits avant 90 cycles de gel-dégel. Seuls les bétons avec air entraîné ont résistés aux 300 cycles de gel-dégel en laboratoire. Ces résultats laissent croire qu'il est nécessaire d'utiliser l'air entraîné pour protéger les bétons contre le gel, quel que soit le rapport E/C [Malhotra et Mehta, 1996].

Selon Gagné [1992], l'abaissement du rapport E/C améliore la durabilité au gel des BHP (Tableau 2.1). Pour le béton possédant un rapport E/C de 0,50 la valeur du facteur d'espacement critique est 500 μm . Par contre, pour le rapport E/C de 0,25, la valeur de ce facteur devient très élevée (750 μm). Les résultats du tableau 2.1 montrent que globalement, la résistance au gel augmente lorsque le rapport E/L diminue. Ces résultats montrent aussi que la fumée de silice a plutôt un effet légèrement défavorable sur la tenue au gel du béton.

Okada et coll. [1981] ont testé des bétons ayant un rapport E/C entre 0,55 et 0,25. Les résultats de cette étude montrent que les bétons dont le rapport E/C est inférieur à 0,35 sont résistants au gel sans air entraîné ($\bar{L}_{\text{crit}} > 1000 \mu\text{m}$). Seuls les bétons de rapport E/C $> 0,50$ requièrent un facteur d'espacement d'environ 200 μm ce qui correspond approximativement à la valeur prescrite par la norme CSA (230 μm) [Gagné, 1992].

Cependant, les études de Cohen et coll. [1992] ont montré que les bétons ayant un rapport E/C de 0,35 ne peuvent pas résister à 300 cycles de gel-dégel (ASTM C 666 – A).

Hooton [1993] a testé des bétons de rapport E/L = 0,35 contenant 0, 10, 15 et 20 % de fumée de silice. Les bétons sans fumée de silice se sont tous détruits après 58 cycles. Tous les bétons fabriqués avec fumée de silice possédaient des facteurs de durabilité supérieurs à 90 % après 300 cycles de gel-dégel.

TABLEAU 2.1 – Valeurs du facteur d’espacement critique pour différents bétons en fonction du milieu de gel et du type de ciment [Gagné, 1992]

| E/L | Facteur d’espacement critique, \bar{L} (μm) | | |
|-----------|--|--------------|----------------------|
| | Gel-dégel dans l’eau | | Gel-dégel dans l’air |
| | Type 10 | Type 10 + FS | Type 10 + FS |
| 0,50 | 500 | 250 | 400 |
| 0,50 (SP) | 500 | 200 | 400 |
| 0,30 (SP) | 400 | 300 | 450 |
| 0,25 (SP) | 750 | - | - |

Selon les études de Pigeon et coll. [1991] faites sur un grand nombre de mélanges, les bétons de rapport $E/L \leq 0,30$ fabriqués avec un ciment type 30 sont, en général, résistants aux cycles de gel-dégel dans l’eau même sans la protection d’un bon réseau de bulles d’air. De plus, les bétons ayant un rapport $E/L \leq 0,26$ fabriqués avec un ciment type 10 SF ont résisté au gel sans air entraîné ($\bar{L} > 690 \mu\text{m}$).

Certains chercheurs ont étudié l’influence de fumée de silice sur la résistance au gel des bétons. Malhotra [1984] a testé des bétons avec et sans air entraîné ayant des rapports E/L de 0,40, 0,50 et 0,60 et possédant 0, 5, 10, 15, 20 et 30 % de fumée de silice. Tous les bétons sans fumée de silice possédaient des facteurs de durabilité inférieurs à 20 % à la fin des cycles. Dans le cas des bétons à air entraîné, la fumée de silice n’a pas augmenté la durabilité au gel. Dans une autre étude Malhotra et coll. [1986] ont testé des bétons possédant des rapports E/L de 0,35, 0,30 et 0,25 avec 0, 10 et 20 % de fumée de silice. Les bétons sans air entraîné se sont détruits en moins de 100 cycles de gel-dégel. Les bétons à air entraîné ne contenant pas la fumée de silice se sont comportés mieux que ceux avec 10 et 20 % de fumée de silice. Suite à ces expériences, Malhotra a conclu que la fumée de silice n’améliore pas la durabilité au gel des bétons avec ou sans air entraîné. Malhotra et plusieurs autres chercheurs pensent que la fumée de silice empêche les mouvements de l’eau dans la pâte en diminuant sa perméabilité. Les pressions générées lors de gel sont plus élevées dans ce cas et l’entraînement de l’air devient nécessaire pour

une bonne protection du béton contre la fissuration interne lors du gel [Malhotra et Mehta, 1996].

Hooton et McGrath [1991] ont étudié la résistance au gel de bétons avec et sans air entraîné ayant des rapports E/L de 0,60, 0,45 et 0,32 et contenant 0, 7,5 et 15 % de fumée de silice. Leurs résultats montrent que les bétons sans air entraîné ayant un rapport E/L de 0,32 et contenant de la fumée de silice possédaient un facteur de durabilité de 100 % après 300 cycles de gel-dégel (ASTM C 666 – A) (Figure 2.6). Hooton et McGrath expliquent cette bonne durabilité au gel par le phénomène d'autodessiccation plus prononcée dans les bétons contenant de la fumée de silice.

Il est évident que les résultats obtenus par différents chercheurs sont assez contradictoires. En essayant de mieux présenter le phénomène, Marchand et coll. [1996] ont groupé les résultats de 11 publications récentes (Figures 2.11 et 2.12) en mettant en relation le facteur de durabilité avec le rapport E/C et la résistance en compression.

La figure 2.11 est divisé en deux zones. Dans la zone II on retrouve des bétons ordinaires. Ces bétons requièrent un facteur d'espacement inférieur à 250 μm pour avoir un facteur de durabilité supérieur à 60 %. Les BHP sont présentés dans la zone I. Il est évident que leur résistance au gel est très variable. Selon la figure 2.11, il ne semble pas y avoir de rapport E/L au-dessous duquel les BHP sont résistants au gel sans air entraîné. Certains bétons de la zone I, ont été scellés pendant la cure. On constate que ces bétons ont, en général, une bien meilleure résistance au gel probablement en raison d'un degré de saturation plus faible en partie dû à l'autodessiccation.

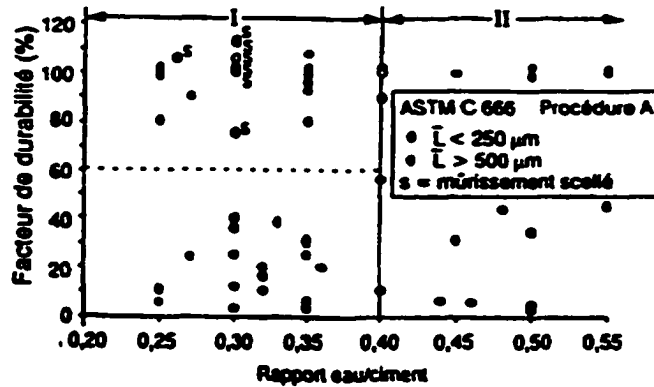


Figure 2.11 – Influence du rapport eau/ciment sur la résistance à la fissuration interne [Marchand et coll., 1996]

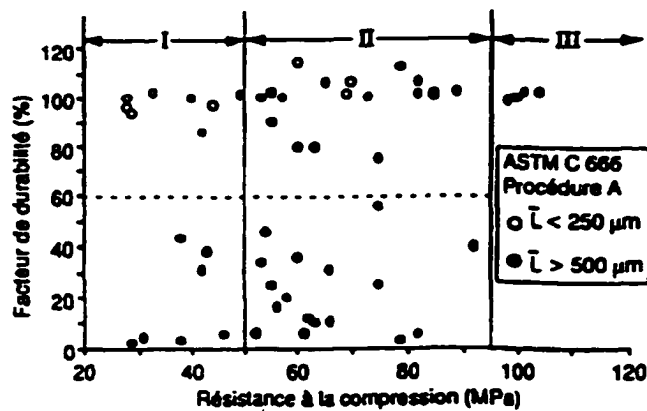


Figure 2.12 – Influence de la résistance à la compression sur la résistance à la microfissuration interne [Marchand et coll., 1996]

Selon la figure 2.12, la résistance au gel augmente avec la résistance en compression. Les bétons possédant une résistance en compression inférieure à 50 MPa ne sont pas résistants au gel sans air entraîné (zone I). Les bétons dont la résistance en compression est supérieure à 95 MPa peuvent résister au gel sans air entraîné (zone III). Dans la zone II, on retrouve des bétons possédant une résistance en compression de 50 MPa à 95 MPa dont la résistance au gel est très variable, ce qui montre que la résistance en compression n'est pas un indice très fiable.

Puisque les résultats obtenus par des chercheurs sont assez variables, il apparaît prudent de recommander l'utilisation d'agent entraîneur d'air dans les BHP. L'utilisation d'une petite quantité d'air entraîné est souhaitable, non seulement pour améliorer la maniabilité mais aussi pour éviter de produire des facteurs d'espacement très élevés ($\bar{L} > 700 \mu\text{m}$) n'offrant absolument aucune protection contre le gel [Gagné, 1997].

2.4.1.1 Représentativité de l'essai ASTM C 666 - A

Lors de l'essai ASTM C 666 – A des éprouvettes en béton sont soumises à plusieurs cycles rapides de gel–dégel dans l'eau. La température durant un cycle varie de +4 à –18 °C. Plusieurs chercheurs pensent que les cycles de gel–dégel lors de l'essai sont trop sévères par rapport à ceux en nature. Durant l'essai, le taux de gel est de 8 à 16 °C/h alors qu'en nature, au Québec la valeur maximale du taux de gel est 3 °C/h [Pigeon et Pleau, 1995].

Gagné et coll. [1998], ont étudié les températures minimales, le nombre de cycles de gel–dégel et le taux de gel dans des dalles sur sol exposées aux conditions in situ pendant deux ans. Ils ont trouvé que la température minimale caractéristique pendant un hiver est de –11 °C à 5 mm et de –8 °C à 100 mm au-dessous de la surface des dalles. Des valeurs moyennes par hiver montrent que le béton à 5 mm de profondeur a subi environ 50 cycles de gel–dégel dont 15 cycles ayant une température inférieure à –5 °C et 5 cycles ayant une température inférieure à –10 °C. Le béton situé à 100 mm au-dessous de la surface a subi environ 27 cycles de gel–dégel dont 6 cycles avec une température inférieure à –5 °C et seulement 1 cycle avec une température inférieure à –10 °C. Les valeurs moyennes de taux de gel à 5 et 100 mm sont respectivement de 0,87 °C/h et 0,49 °C/h. La valeur maximale de taux de gel mesurée à 5 mm de profondeur a été de 4,9 °C/h et de 1,0 °C/h à 100 mm.

Lorsqu'on utilise l'essai ASTM C 666 – A, les éprouvettes de gel–dégel sont, à partir de 24 heures, mûries dans l'eau pendant 13 jours. Puisqu'elles sont de faibles dimensions, les éprouvettes deviennent complètement saturées avant d'être exposées au gel. En nature, les éléments de béton sont rarement mûris dans l'eau après le démoulage.

Donc, ils sont presque toujours moins saturés que les éprouvettes de gel-dégel. En plus, les éléments sont plus massifs et par conséquent, leur cœur n'est pas complètement saturé. C'est surtout valable pour les BHP dont le cœur reste faiblement saturé en raison de l'autodessiccation interne et de leur faible perméabilité.

Kamada et coll. [1991] ont étudié l'influence du taux de gel, de la plus basse température atteinte lors du gel et du temps pendant lequel le béton est maintenu à cette température, sur la résistance au gel des bétons ordinaires ($E/C = 0,50$ et $E/C = 0,70$). Ils ont aussi étudié l'influence des conditions de mûrissement sur la résistance au gel en utilisant l'essai ASTM C 666 – A. Ils ont utilisé quatre différentes conditions de mûrissement durant trois semaines tels que le mûrissement dans l'eau, le mûrissement à l'air, le séchage à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et le séchage à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deux types de bétons ont été étudiés : des bétons résistants au gel et des bétons susceptibles au gel. Les résultats de cette étude montre que le séchage a peu d'effet sur la résistance au gel des bétons sans air entraîné. Par contre, les bétons à air entraîné qui ont été séchés avant de subir les essais se comportent beaucoup mieux au gel-dégel que les bétons qui ont subi les 2 autres types de mûrissement. Cette étude a aussi confirmé que le taux de gel a une influence significative sur la durabilité au gel des bétons à air entraîné possédant un rapport E/L de $0,50$. Cependant, l'influence du taux de gel sur la durabilité au gel des bétons sans air entraîné a été négligeable. Finalement, l'étude a montré que la destruction lors du gel augmente avec l'abaissement de la température minimale du cycle de gel.

2.4.2 Résistance à la fissuration interne en nature

En nature, la résistance à la fissuration interne des bétons à haute performance est encore mal connue. Selon certaines études sur ce sujet faites à l'Université de Sherbrooke, il est sûr que la résistance au gel des BHP en nature est plus élevée que celle obtenue par l'essai ASTM C 666 – A. Gagné et coll. [1998] ont étudié la durabilité au gel de 9 dalles en BHP ($200 \times 750 \times 1000\text{ mm}$) qui ont été exposées à l'extérieur pendant 4 ans. Les dalles ont été fabriquées avec 9 bétons différents ayant un rapport E/L de $0,30$ et $0,25$ et contenant 4 types de liant : un ciment type 10, un ciment type 10 mélangé avec fumée de silice à la cimenterie, un ciment type 30, et un ciment type 30 avec 8% de

fumée de silice. Certains bétons contenaient de l'air entraîné (maximum de 4,6 % dans le béton frais). Des éprouvettes de gel-dégel ont aussi été coulées en même temps que les dalles et ensuite soumises à l'essai de fissuration interne en laboratoire. Après 4 ans d'exposition, toutes les dalles sont encore durables au gel. Par contre, certains échantillons de gel-dégel ne contenant pas d'air entraîné n'ont pas résisté aux 300 cycles. L'essai ASTM C 666 – A ne semble pas approprié pour déterminer la durabilité au gel des dalles en BHP sans air entraîné. Selon ces chercheurs, la faible durabilité au gel en laboratoire des bétons sans air entraîné est partiellement due à un degré de saturation élevé des échantillons.

Après 24 heures, les échantillons de faibles dimensions sont immergés dans l'eau pendant 13 jours avant d'être exposés aux cycles de gel-dégel. Donc, avant les cycles, les échantillons sont proches de la saturation complète car des vides, formés par la contraction Le Châtelier, sont remplis d'eau extérieure. Une faible humidité relative interne, mesurée dans les dalles (85 % - 92 %), indique que les bétons ne sont pas complètement saturés. Les dalles sont probablement suffisamment massives et imperméables pour ne pas permettre un remplissage par l'eau extérieure des vides créés par la contraction Le Châtelier. Alors, ces vides représentent une protection contre les pressions internes générées par l'action du gel.

Hooton [1993] a fait une étude sur la durabilité au gel de blocs en béton sans air entraîné (300 x 300 x 450 mm) semi-immersés dans l'eau ayant subi entre 45 et 72 cycles de gel-dégel par année. Tous les bétons avaient un rapport E/L de 0,35 et contenaient 0, 10, 15 et 20 % de fumée de silice. Un suivi de comportement sur plusieurs années a montré que ces bétons semblent parfaitement en mesure de résister au gel en condition in situ sans la protection d'un bon réseau de bulles d'air.

3. BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS

3.1 Exposé de la problématique

Les bétons à haute performance sont de plus en plus utilisés pour la construction d'infrastructures de transport en raison de leur plus grande durabilité en général et notamment de leur meilleure résistance au gel-dégel. De nos jours, il est bien connu que le coût initial des structures exposées à un environnement sévère peut être largement dépassé par les coûts de réparation. Par conséquent, il est important de mieux comprendre le comportement au gel des BHP pour pouvoir profiter pleinement de leur plus grande durabilité.

Pour être durable face aux cycles de gel-dégel, les bétons ordinaires doivent nécessairement être protégés par un bon réseau de bulles d'air entraîné. Par contre, des résultats de recherche en laboratoire ont démontré que certains BHP peuvent résister aux cycles de gel-dégel sans cette protection. Il faut cependant abaisser le rapport E/L à un niveau inférieur ou égal à 0,25 pour obtenir un BHP sans air entraîné résistant aux cycles de gel-dégel en laboratoire. Plus globalement, les résultats de recherche en laboratoire démontrent, en fait, que la plupart des BHP doivent être protégés des effets du gel par un réseau de bulles d'air entraîné. La production d'un réseau de bulles d'air dans les BHP diminue significativement les propriétés mécaniques et engendre des coûts de production supplémentaires pour maintenir le système de contrôle de qualité requis pour produire un réseau de bulles d'air stable durant le transport et la mise en place. La question actuelle est de déterminer s'il est vraiment nécessaire de produire un très bon réseau de bulles d'air ($\bar{L} < 230 \mu\text{m}$) pour assurer la durabilité au gel des BHP (in situ), compte tenu de la grande sévérité des essais de laboratoire.

Lors des essais de laboratoire, les échantillons sont soumis à des cycles de gel-dégel beaucoup plus sévères que ceux mesurés en nature. Le taux de gel utilisé est notamment beaucoup plus élevé que celui rencontré dans des conditions réelles d'exposition. Par exemple, durant les essais de laboratoire, le taux de gel est de 8 à 16

°C/h alors qu'en nature, au Québec, la valeur maximale du taux de gel est d'environ 3 °C/h [Pigeon et Pleau, 1995]. De plus, les essais en laboratoire s'effectuent avec des échantillons de petites dimensions qui sont constamment immergés dans l'eau durant le mûrissement et lors des périodes de gel. En pratique, les éléments en béton sont rarement en contact constant avec de l'eau. C'est notamment le cas du béton de "cœur" situé à l'intérieur des éléments. On constate que les conditions lors des essais de laboratoire diffèrent beaucoup des conditions naturelles d'exposition et nous pensons que, dans le cas particulier des BHP, ces différences peuvent avoir des conséquences importantes lors de l'interprétation des résultats des essais en laboratoire.

Le bon comportement in situ des BHP sans air entraîné pourrait être attribué à leur forte autodessiccation. C'est la contraction Le Châtelier qui est à l'origine de cette autodessiccation importante. L'autodessiccation interne contribue à désaturer partiellement la porosité capillaire. De plus, dans des conditions réelles d'exposition, il est probable que la pâte située à l'intérieur des éléments soit isolée du milieu extérieur. Ceci est particulièrement vrai pour les BHP qui sont beaucoup moins perméables que les bétons ordinaires. L'autodessiccation interne se développant au cœur des éléments en BHP pourrait donc contribuer à améliorer la résistance au gel des BHP soumis à des conditions d'exposition naturelles. En laboratoire, les conditions des essais ne permettent pas au béton de profiter de la protection offerte par l'autodessiccation. Nous croyons donc que les résultats des essais de gel-dégel en laboratoire doivent être interprétés différemment dans le cas des BHP.

3.2 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet de recherche est de mieux comprendre la durabilité au gel des BHP pour pouvoir tirer pleinement profit de leur plus grande durabilité lors de la construction d'infrastructures de transport soumises à des conditions environnementales sévères. Plus précisément, ce projet de recherche tentera de déterminer s'il est vraiment nécessaire de produire un bon réseau de bulles d'air (6 % à 7 % d'air entraîné, $\bar{L} < 230 \mu\text{m}$) pour protéger des effets du gel-dégel les BHP soumis à des conditions réelles d'exposition.

Pour pouvoir répondre à cet objectif, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants :

- Étudier les relations entre l'autodessiccation, le degré de saturation de la porosité capillaire (lors du mûrissement et pendant les cycles) et la durabilité au gel des bétons en laboratoire (essai ASTM C 666 - Procédure A). Ces essais permettront notamment de mieux comprendre quelle est l'influence du mode de mûrissement (scellé ou non scellé) sur la durabilité au gel en laboratoire. Ils permettront aussi de mieux comprendre dans quelle mesure l'absorption d'eau externe lors des cycles peut influencer le comportement au gel des bétons conventionnels et des BHP.
- Étudier la relation entre l'humidité relative interne et la durabilité au gel des bétons en laboratoire. On vise notamment à déterminer si la mesure de l'humidité relative interne d'un béton (en laboratoire et in situ) peut être utile pour prévoir son comportement au gel à long terme.
- Déterminer comment varie l'humidité relative interne en fonction de la profondeur et du temps à l'intérieur de blocs en BHP constamment immergés sous l'eau. Ces essais permettront notamment d'estimer à partir de quelle profondeur sous la surface l'autodessiccation interne est en mesure de contribuer à la désaturation partielle de la porosité capillaire.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Choix des paramètres à étudier

Pour répondre aux objectifs du projet, quatre types de bétons ont été réalisés. Plus précisément, deux BHP ($E/L = 0,30$ avec et sans fumée de silice) et deux bétons ordinaires ($E/L = 0,40$ avec et sans fumée de silice) ont été fabriqués afin d'étudier les paramètres suivants :

- Le rapport eau/liant (0,30 et 0,40)
- La teneur en fumée silice (0 % et 8 %)
- Le type de mûrissement ("ouvert" et "fermé")
- Le type d'exposition aux cycles de gel-dégel ("ouvert" et "fermé")

La condition de type "ouvert" a consisté à immerger les éprouvettes directement dans l'eau lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel. La condition de type "fermé" a consisté à empêcher l'absorption ou l'évaporation d'eau en scellant les éprouvettes dans un papier d'aluminium autocollant. Dans le cas des éprouvettes scellées soumises au gel, on a aussi utilisé des sacs en plastique épais pour s'assurer d'une étanchéité parfaite lors des cycles de gel-dégel.

La figure 3.1 présente les différentes conditions d'essais utilisées lors des essais de gel-dégel et pour les mesures du degré de saturation.

3.3.2 Procédure expérimentale et caractéristiques des éprouvettes

Les essais de gel-dégel ont été effectués selon la norme ASTM C 666 - Procédure A. Dans certains cas, on a cependant dû modifier légèrement la procédure normalisée pour pouvoir étudier l'influence du mode de scellement durant le mûrissement et lors des cycles de gel-dégel. Pour chaque mélange, on a fabriqué 14 éprouvettes de gel-dégel (75 x 75 x 350 mm). Huit éprouvettes ont été soumises à toutes les combinaisons type de mûrissement – scellement de surface lors du gel (2 éprouvettes par condition).

Les mesures de masse, d'allongement et de vitesse des ondes sonores ont été effectuées lors du mûrissement (1, 3, 7, 11, 14 jours) et tout au long des cycles de gel-dégel (maximum 300 cycles). À la fin des cycles de gel-dégel, on a mesuré le niveau d'endommagement et l'humidité relative interne à l'intérieure des éprouvettes. Les autres éprouvettes ont été utilisées pour les mesures d'humidité relative interne à 14 jours. Les mesures d'humidité relative interne ont été effectuées à l'aide d'une sonde hygrométrique de type Novasina ms1.

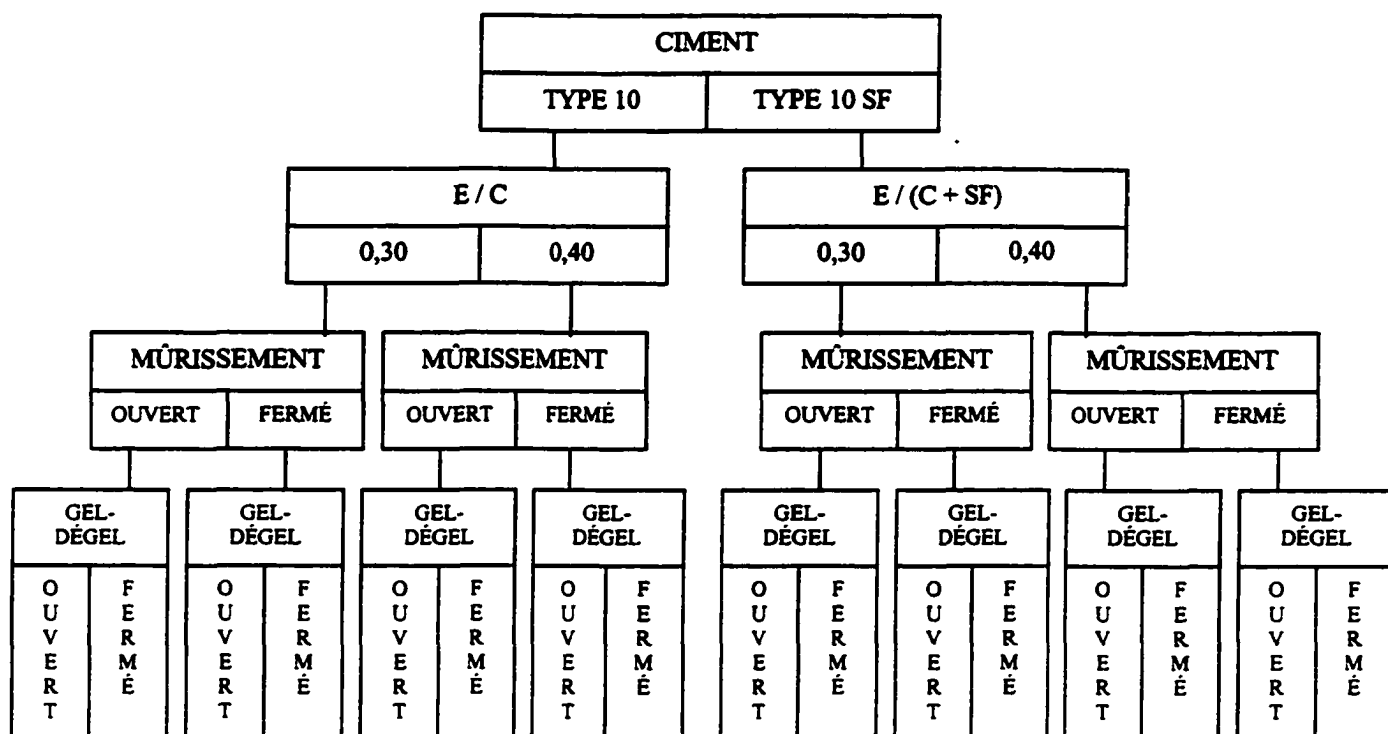


Figure 3.1 - Représentation schématique des paramètres choisis

La détermination du degré de saturation de la porosité capillaire a été effectuée au début et à la fin des cycles de gel-dégel. Chaque essai a été effectué à partir de 2 éprouvettes de 75 x 75 x 350 mm ayant aussi été utilisées pour les mesures d'humidité relative.

Pour chaque mélange, on a fabriqué 20 cylindres de 100 x 200 mm. Deux cylindres ont été utilisés pour déterminer les caractéristiques du réseau de bulles d'air. Les autres cylindres ont été utilisés pour déterminer la résistance à la compression à 14, 28 et 91 jours (3 cylindres par condition d'essai). Pour chaque échéance, 3 cylindres ont été mûris dans l'eau et 3 cylindres ont été scellés avec du papier d'aluminium autocollant.

L'étude de l'évolution de l'humidité relative interne en fonction de la profondeur et de la teneur en fumée de silice a été réalisée à partir de deux blocs en BHP de 240 x

420 x 540 mm. Ces blocs ont été constamment conservés dans l'eau à partir de 24 heures. Les mesures de l'humidité relative interne ont été effectuées à 3, 7, 14, 28, 91 et 350 jours à des profondeurs de 50 mm et 75 mm. Les profils d'humidité relative interne ainsi obtenus permettront d'estimer la profondeur à laquelle l'autodessiccation peut se développer.

4. MATERIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

4.1 Matériaux

4.1.1 Ciments

Tous les bétons ont été fabriqués avec deux types de ciment provenant de la même usine. Ces deux types de ciment sont un ciment Portland normal (type 10) et un ciment Portland contenant 8 % de fumée de silice (type 10 SF). Les compositions chimiques et minéralogiques de ces ciments sont présentées aux tableaux 4.1 et 4.2. La finesse Blaine est de 409 m²/kg pour le ciment type 10 et de 572 m²/kg pour le ciment type 10 SF.

TABLEAU 4.1 - Composition chimique des ciments

| COMPOSITION CHIMIQUE (%) | CIMENT TYPE 10 | CIMENT TYPE 10 SF |
|--------------------------------|----------------|-------------------|
| SiO ₂ | 20,31 | 25,08 |
| Al ₂ O ₃ | 4,50 | 4,06 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,07 | 3,22 |
| CaO total | 62,27 | 58,63 |
| MgO | 2,79 | 2,58 |
| SO ₃ | 3,18 | 2,82 |
| K ₂ O | 0,94 | 0,94 |
| Na ₂ O | 0,36 | 0,43 |
| TiO ₂ | 0,22 | 0,17 |
| P ₂ O ₅ | 0,24 | 0,20 |
| SrO | 0,29 | 0,28 |
| Mn ₂ O ₃ | 0,06 | 0,07 |
| Perte au feu | 2,14 | 1,30 |
| TOTAL | 100,37 | 99,78 |
| Na ₂ O équivalent | 0,98 | 1,05 |

TABLEAU 4.2 - Composition minéralogique des ciments (composition de Bogue)

| COMPOSITION MINÉRALOGIQUE (%) | CIMENT TYPE 10 | CIMENT TYPE 10 SF |
|-------------------------------|----------------|-------------------|
| C ₃ S | 55 | - |
| C ₂ S | 16 | - |
| C ₃ A | 7 | 5 |
| C ₄ AF | 9 | 10 |

4.1.2 Granulats

Le granulat fin utilisé est un sable siliceux naturel de la région de Sherbrooke. Sa densité à l'état saturé superficiellement sec est de 2,65, son module de finesse est de 2,40 et son coefficient d'absorptivité est de 1,2 % (selon la norme CAN/CSA - A23.2 - 6A). La granulométrie du granulat fin et le fuseau normalisé (selon les normes CAN/CSA - A23.2 - 2A et CAN/CSA - A23.1) sont présentés au tableau 4.3 et à la figure 4.1.

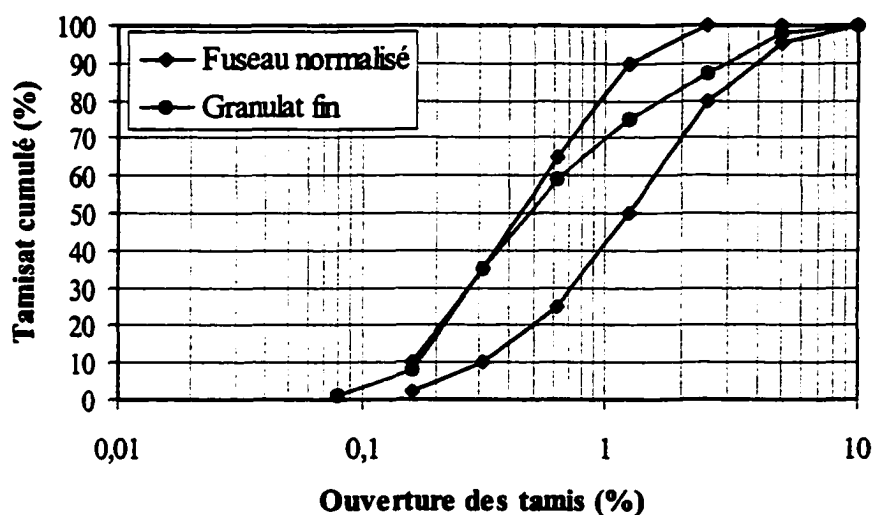


Figure 4.1 - Courbe granulométrique du granulat fin et fuseau normalisé

TABLEAU 4.3 - Granulométrie du granulat fin et fuseau normalisé

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ouverture des tamis (mm) | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,630 | 0,315 | 0,160 | 0,080 |
| Tamisat cumulé (%) | 100 | 98 | 87 | 75 | 59 | 35 | 8 | 1 |
| Fuseau normalisé (%) | 100 | 95-100 | 80-100 | 50-90 | 25-65 | 10-35 | 2-10 | - |

Le gros granulat utilisé est une pierre calcaire dolomitique provenant de la région de Montréal. La pierre possède un diamètre nominal de 10 mm. Sa densité à l'état saturé superficiellement sec est de 2,78 et son absorption de 0,8 % (selon la norme CAN/CSA - A23.2 - 12A). La granulométrie du gros granulat et le fuseau normalisé (selon les normes CAN/CSA - A23.2 - 2A et CAN/CSA - A23.1) sont présentés au tableau 4.4 et à la figure 4.2.

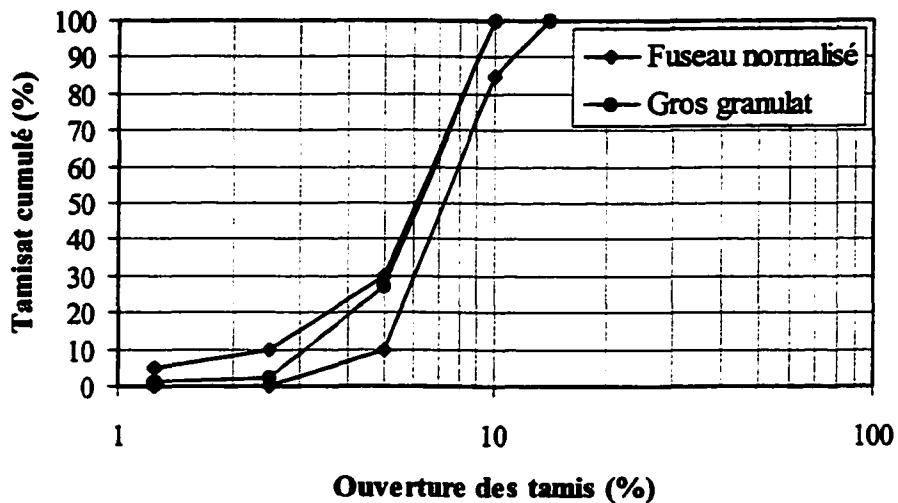


Figure 4.2 - Courbe granulométrique du gros granulat et fuseau normalisé

TABLEAU 4.4 - Granulométrie du gros granulat et fuseau normalisé

| | | | | | |
|---------------------------------|------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
| Ouverture des tamis (mm) | 14 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 |
| Tamisat cumulé (%) | 100 | 100 | 27 | 2 | 1 |
| Fuseau normalisé (%) | 100 | 85-100 | 10-30 | 0-10 | 0-5 |

4.1.3 Adjuvants

Lors de cette étude nous avons utilisé deux types d'adjuvants. Le premier est le superplastifiant Disal. C'est un sel de sodium d'acide poly-naphtalène sulfonique dont les caractéristiques sont présentées au tableau 4.5.

TABLEAU 4.5 - Caractéristiques du superplastifiant DISAL

| | |
|--|---|
| Apparence | Liquide brun clair |
| Forme | Solution aqueuse |
| Nature ionique | Anionique |
| Dilution dans l'eau | dilution rapide dans l'eau douce ou dure |
| Teneur en solides (% poids) | 40,0-42,0 |
| Sulfates (% poids) (sous forme SO₄⁻²) | 1,35 max. |
| PH de la solution à 41 % | 7,0-9,0 |
| Densité à 25 °C | 1,19-1,24 |
| Chlorures (ppm) (sous forme Cl⁻) | 250 max. |

Le deuxième adjuvant est un réducteur d'eau nommé TCDA DX et conforme aux exigences de la norme CAN/CSA - A266.2. Ce produit est composé d'acides hydroxycarboxyliques et d'un catalyseur permettant une hydratation plus complète du liant. Les principales caractéristiques physiques de ce réducteur d'eau sont présentées au tableau 4.6.

TABLEAU 4.6 - Caractéristiques physiques du réducteur d'eau

| | |
|--------------------------|------------------|
| Densité relative à 25 °C | 1,15 |
| Solides | 30 % |
| Valeur du pH | 8,5 |
| Couleur | Brun transparent |
| Ions chlorures | Max. 245 ppm |

4.1.4 Eau

Pour le gâchage, nous avons utilisé l'eau du robinet provenant du système d'aqueduc de la Ville de Sherbrooke.

4.2 Mélanges et procédure de gâchage

4.2.1 Mélanges

Deux séries de bétons ont été fabriquées dans le cadre de cette recherche. La première série avait pour le but d'évaluer l'influence du mode de mûrissement et de l'autodessiccation interne sur la résistance au gel des bétons ordinaires et des bétons à haute performance (selon la norme ASTM C 666 - A). La deuxième série avait pour but d'étudier l'autodessiccation et les profils d'humidité interne dans deux blocs en BHP constamment immergés sous l'eau.

Pour réaliser la première série, nous avons fabriqué quatre bétons dont les dénominations et les caractéristiques principales sont présentées au tableau 4.7.

TABLEAU 4.7 – Dénominations et principales caractéristiques des bétons de la série I

| Béton | Caractéristiques de formulation |
|--------|---|
| 0,3 CP | E/L = 0,30; liant = ciment portland |
| 0,3 SF | E/L = 0,30; liant = ciment portland + 8 % de fumée de silice* |
| 0,4 CP | E/L = 0,40; liant = ciment portland |
| 0,4 SF | E/L = 0,40; liant = ciment portland + 8 % de fumée de silice* |

* La fumée de silice est ajoutée à la cimenterie lors du broyage du ciment

Pour la deuxième série, nous avons fabriqué deux bétons ayant un rapport E/L de 0,30 sans et avec fumée de silice. Les dénominations et les principales caractéristiques de ces bétons sont présentées au tableau 4.8.

TABLEAU 4.8 – Dénominations et principales caractéristiques des bétons de la série II

| Béton | Caractéristiques de formulation |
|-------------|---|
| 0,3 CP bloc | E/L = 0,30; liant = ciment portland |
| 0,3 SF bloc | E/L = 0,30; liant = ciment portland + 8 % de fumée de silice* |

* La fumée de silice est ajoutée à la cimenterie lors du broyage du ciment

Dans tous nos mélanges, le rapport entre le volume de la pâte (liant + eau + superplastifiant) et le volume du granulat (sable + pierre) a été maintenu constant ($V_p/V_g = 0,4$). Ce choix a été fait pour faire en sorte que seule la porosité intrinsèque de la pâte varie d'un béton à l'autre. Les tableaux 4.9 et 4.10 présentent les caractéristiques de formulation détaillées des bétons des deux séries d'essais.

TABLEAU 4.9 - Caractéristiques des bétons de la série I

| Béton | 0,3 CP | 0,3 SF | 0,4 CP | 0,4 SF |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Eau (kg/m ³) | 138 | 139 | 163 | 162 |
| Ciment (kg/m ³) | 456 | 418 | 396 | 365 |
| Fumée de silice (kg/m ³) | 0 | 36 | 0 | 32 |
| Granulat fin (kg/m ³) | 759 | 746 | 765 | 755 |
| Gros granulat (kg/m ³) | 1107 | 1101 | 1111 | 1117 |
| Superplastifiant (l/m ³) | 8 | 6 | 3 | 2 |
| Réducteur d'eau (ml/100 kg de liant) | 200 | 150 | 150 | 150 |
| Affaissement (mm) | 190 | 190 | 140 | 110 |
| Teneur en air (%) | 2,5 | 2,7 | 2,1 | 2,0 |
| Masse volumique (kg/m ³) | 2470 | 2447 | 2439 | 2433 |

TABLEAU 4.10 - Caractéristiques des bétons de la série II

| Béton | 0,3 CP bloc | 0,3 SF bloc |
|--------------------------------------|-------------|-------------|
| Eau (kg/m ³) | 140 | 139 |
| Ciment (kg/m ³) | 455 | 418 |
| Fumée de silice (kg/m ³) | 0 | 36 |
| Granulat fin (kg/m ³) | 758 | 749 |
| Gros granulat (kg/m ³) | 1103 | 1105 |
| Superplastifiant (l/m ³) | 7,5 | 5,2 |
| Réducteur d'eau (ml/100 kg de liant) | 200 | 150 |
| Affaissement (mm) | 160 | 150 |
| Teneur en air (%) | 2,6 | 2,4 |
| Masse volumique (kg/m ³) | 2465 | 2453 |

Pour faciliter l'analyse ultérieure des essais de gel-dégel, nous avons inclus dans les noms des éprouvettes certaines de leurs caractéristiques de formulation : Type de mûrissement avant les essais de gel, type de scellement durant les essais de gel et les caractéristiques de ses vides d'air. Un exemple d'interprétation des noms d'éprouvettes est donné à la figure 4.3. Les deux premiers chiffres indiquent d'abord la valeur du rapport eau/liant utilisé. Les deux lettres suivantes servent à déterminer le type de ciment qui a été employé. Les trois chiffres (à droite du premier trait d'union) indiquent la valeur du facteur d'espacement des vides d'air (μm). Le type de mûrissement employé est défini par la lettre qui suit le deuxième trait d'union. La dernière lettre indique enfin le type de scellement lors du gel.

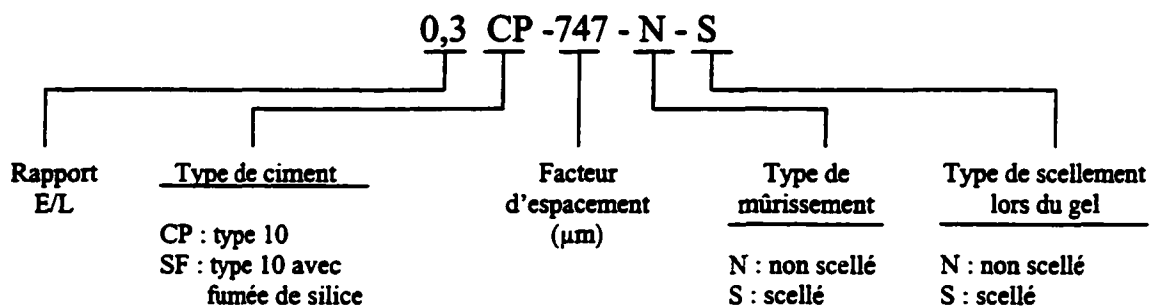


Figure 4.3 – Clé pour l'identification des éprouvettes de gel-dégel

4.2.2 Procédure de gâchage

Tous les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur d'une capacité maximale de 200 kg. La même procédure de gâchage a été utilisée pour tous les bétons :

1. Introduction du sable; malaxage pendant 30 secondes. Mesurer la teneur en eau et corriger si nécessaire les quantités d'eau et de sable;
2. Introduction de la pierre et de 50 % d'eau de gâchage. Malaxage pendant 30 secondes;
3. Introduction du ciment et poursuite du malaxage;
4. Trente secondes après l'introduction du ciment, ajouter le réducteur d'eau dilué dans la même quantité d'eau de gâchage;

5. Deux minutes après l'introduction du ciment, ajouter le superplastifiant préalablement dilué dans le restant de l'eau de gâchage et continuer le malaxage jusqu'à 4 minutes;
6. Faire une pause jusqu'à 5 minutes et continuer le malaxage jusqu'à 8 minutes;
7. Mesurer l'affaissement. Celui-ci doit être compris entre 150 et 190 mm pour les bétons de rapport E/L = 0,30 et entre 110 et 150 mm pour les bétons de rapport E/L = 0,40;
8. Mesurer la masse volumique et la teneur en air.

4.2.3 Échantillonnage et fabrication des blocs

Chaque béton de la série I a permis la fabrication de 14 éprouvettes de gel-dégel de 75 x 75 x 350 mm et 20 cylindres de 100 x 200 mm. Les éprouvettes de gel-dégel ont été coulées dans les moules en PVC préalablement huilés et comportant des plots permettant la mesure de l'allongement lors du mûrissement et des cycles de gel-dégel. Le béton frais est placé en deux couches vibrées pendant 10 secondes à l'aide de la table vibrante. Une fois le moule rempli, le surplus du béton a été arasé et la surface a été égalisée à la truelle. Les moules remplis par le béton frais ont été ensuite recouverts par les plaques de plastique jusqu'au démoulage.

Le démoulage a été fait après 24 heures. Les mesures de masse, d'allongement et de vitesse des ondes ont été effectuées pour la première fois immédiatement après le démoulage. Ensuite, 7 éprouvettes ont été emballées dans le papier d'aluminium autocollant et placées dans la chambre à température et à humidité contrôlées ($T = 23 \pm 1,7$ °C; H.R. = 50 ± 4 %). Sept autres éprouvettes ont été conservées dans l'eau saturée en chaux. Les méthodes du scellement de la surface lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel seront expliquées plus précisément dans les paragraphes 4.3.1. et 4.3.2.

Les cylindres ont été fabriqués dans des moules de PVC préalablement huilés qui ont été remplis en deux couches. Chaque couche a été vibrée sur la table vibrante pendant 10 à 15 secondes pour obtenir une bonne compacité. Les cylindres ont été

démoulés après 24 heures. Neuf cylindres ont été emballés dans le papier d'aluminium autocollant et placés dans la chambre à température et à humidité contrôlées. Onze cylindres ont été conservés dans l'eau saturée en chaux jusqu'au moment des essais.

Chaque béton de la série II a permis la fabrication d'un bloc de 240 x 420 x 540 mm et 9 cylindres de 100 x 200 mm. Les blocs ont été coulés dans des moules en bois préalablement huilés. Le béton a été placé en plusieurs couches et ensuite vibré à l'aide d'une aiguille vibrante. Le démoulage a été fait après 24 heures. Après le démoulage, les blocs ont été immergés dans des barils remplis d'eau. La manipulation des blocs a pu se faire à l'aide des crochets installés lors de la mise en place du béton dans les moules.

Les cylindres de cette série ont été fabriqués de la même façon que les cylindres de la série I. Ils ont été démoulés après 24 heures et placés dans l'eau saturée en chaux jusqu'au moment des essais.

4.3 Procédures expérimentales

4.3.1 Mûrissement des éprouvettes de gel-dégel

Pour les éprouvettes de la série I nous avons choisi deux types de mûrissement : scellé et non scellé. Les éprouvettes soumises au mûrissement scellé ont été démoulées après 24 heures et ensuite emballées dans un papier d'aluminium autocollant. Ces éprouvettes ont ensuite été conservées dans la chambre à température et humidité contrôlées pendant 13 jours. Le mûrissement non scellé a consisté à immerger les éprouvettes dans l'eau sans aucun enrobage.

4.3.2 Scellement des éprouvettes lors des essais de gel-dégel

Pour les essais de gel-dégel, nous avons aussi choisi deux types d'enrobage de surface : scellé et non scellé. L'enrobage scellé a consisté à placer des éprouvettes préalablement emballées dans du papier d'aluminium autocollant dans des sacs en plastique. Ces derniers ont été ensuite fermés de façon étanche à l'aide d'une reliure en

plastique maintenue en place à l'aide de pinces métalliques. Avant de procéder à la fermeture complète du sac, on a pris soin d'expulser le maximum d'air de manière à ce que le sac de plastique épouse bien la forme de l'éprouvette (Figure 4.4). L'enrobage non scellé ne comportait aucun enrobage lors des cycles de gel-dégel (tel que recommandé par la norme ASTM C 666 – A).

Les différentes combinaisons possibles type de mûrissement – type d'enrobage lors du gel-dégel sont présentées à la figure 4.5. Pour chaque combinaison, 2 éprouvettes de gel-dégel et 1 témoin ont été fabriqués.



Figure 4.4 – Scellement des éprouvettes lors des cycles de gel-dégel

4.3.3 Essais de gel-dégel

Pour évaluer la résistance au gel des bétons, nous avons utilisé des essais accélérés de gel-dégel selon la norme ASTM C 666 – A : *Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*.

Les éprouvettes non scellées lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel ont été soumises aux cycles accélérés selon la procédure A. Les éprouvettes (prismes de

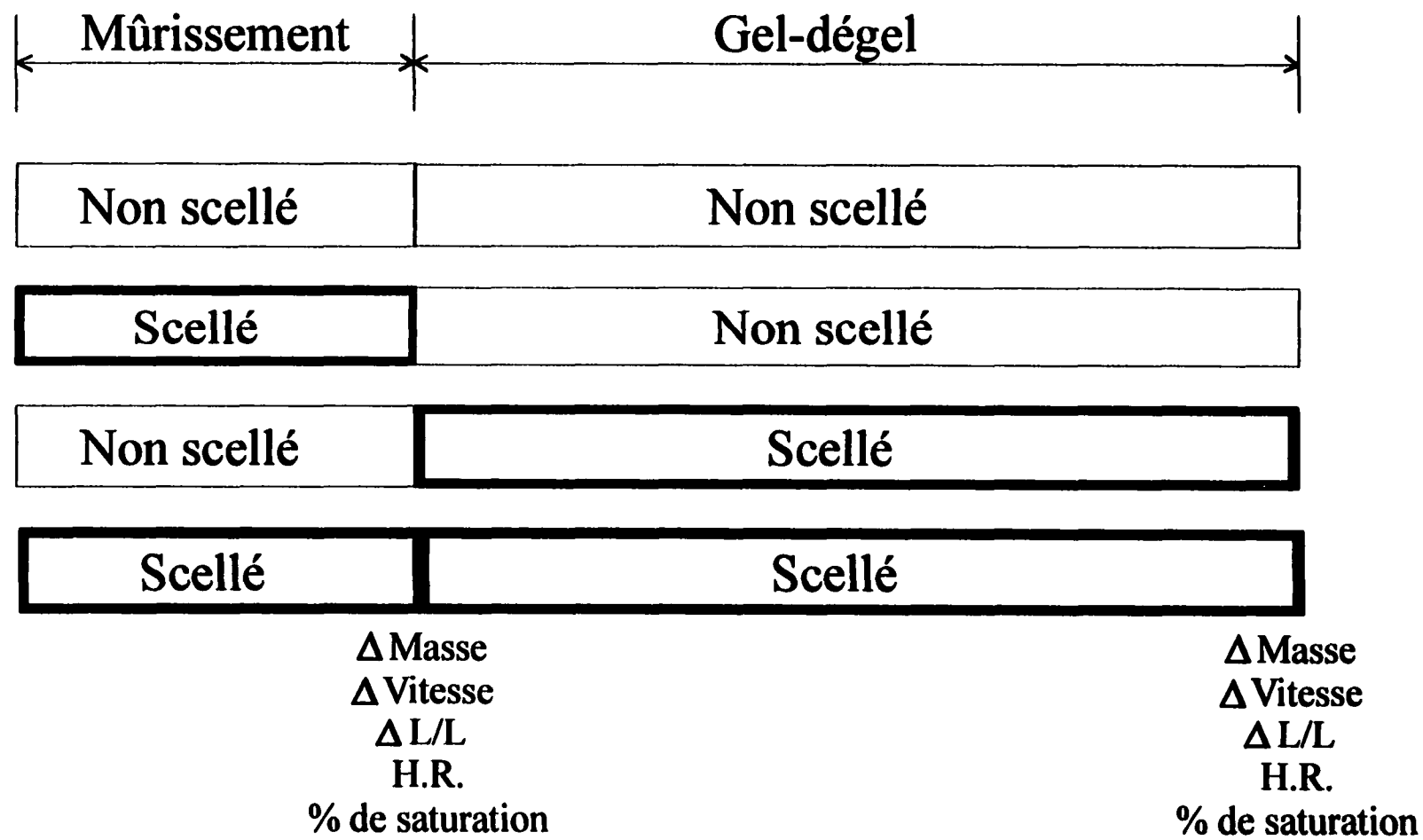


Figure 4.5 - Combinaisons des types de scellement de la surface des éprouvettes de gel-dégel lors du mûrissement et des cycles de gel-dégel

75 x 75 x 350 mm) ont été mûries dans l'eau pendant 13 jours et ensuite soumises aux cycles de gel-dégel dans l'eau. Lors d'un cycle, la température du béton passe de $4,4 \pm 1,7$ °C à $-17,8 \pm 1,7$ °C. L'appareil de gel-dégel fait environ 5 cycles par jour et chaque cycle a une durée de 3 à 5 heures. À tous les 35 cycles environ, on mesure la masse, l'allongement des éprouvettes et la vitesse de propagation des ondes ultrasonique. Lorsque l'allongement d'une éprouvette dépasse 0,10 % ou lorsque le module d'élasticité dynamique (calculé à partir de la vitesse de propagation des ondes) devient inférieur à 60 %, l'éprouvette est considérée détruite et elle est retirée de l'appareil de gel-dégel.

Dans le cas des éprouvettes scellées lors du mûrissement ou lors des cycles de gel-dégel, une procédure légèrement différente a dû être utilisée. Les prismes scellés lors du mûrissement ont été gardés dans la chambre à température et humidité contrôlées pendant 13 jours. Pour s'assurer de l'étanchéité lors des cycles de gel-dégel les prismes, recouverts de papier d'aluminium, ont été placés dans des sacs en plastique. Les sacs en plastique épais ont été ensuite fermés de façon étanche puis placés dans l'appareil de gel-dégel. Les prismes, dans ces conditions, ont subi le même nombre de cycles journaliers, c'est à dire environ 5 cycles par jour. La présence des sacs a diminué légèrement la quantité d'eau dans les bacs de l'appareil. Dans ce cas, la température à l'intérieur des prismes a varié de $11,7 \pm 1,7$ °C à $-20,7 \pm 1,7$ °C. Les prismes scellés ont donc subi un taux de gel légèrement plus sévère.

4.3.3.1 Mesure de la masse

Les mesures de masse ont été effectuées au moyen d'une balance électronique précise à $\pm 0,5$ gramme.

Au démoulage les éprouvettes ont été pesées pour la première fois. Ensuite la masse a été mesurée environ une fois par semaine lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel. Toutes les éprouvettes non scellées ont été amenées à l'état saturé superficiellement sec avant d'être pesées. Toutes les éprouvettes scellées ont été pesées avec le papier d'aluminium autocollant.

4.3.3.2 Mesure de l'allongement

L'allongement des éprouvettes a été mesuré à l'aide d'un extensomètre muni de pointes coniques pouvant s'insérer dans la tête des plots. La précision de cet appareil est de $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Les mesures ont été effectuées environ une fois par semaine pendant le mûrissement et pendant les cycles de gel-dégel. La mesure est prise deux fois sur chacune des faces et l'extensomètre a été étalonné à chaque mesure.

L'allongement axial (ε_n) après n cycles de gel-dégel est obtenu par l'expression :

$$\varepsilon_n = \frac{l_n - l_0}{l_0} \quad (4.1)$$

l_n Longueur mesurée entre les plots après n cycles de gel;

l_0 Longueur mesurée entre les plots au début des cycles de gel.

La température des éprouvettes ayant pu varier d'une séance de mesure à l'autre, les valeurs obtenues de l'équation 4.1 doivent être corrigées afin de tenir compte de la dilatation thermique du béton. La valeur du coefficient de dilatation thermique que nous avons utilisé est celle que Lachance [1979] a déterminé pour des bétons usuels contenant des granulats calcaires, soit : $5,5 \times 10^{-6}$ [Gagné, 1992].

La correction à utiliser est donnée par :

$$\varepsilon_c = 5,5 \times 10^{-6} (\theta_n - \theta_0) \quad (4.2)$$

θ_n Température en $^{\circ}\text{C}$ lors des mesures après n cycles de gel;

θ_0 Température en $^{\circ}\text{C}$ lors des mesures au début des cycles de gel.

L'allongement axial corrigé est ensuite obtenu par :

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n - \varepsilon_c \quad (4.3)$$

4.3.3.3 Mesure de la vitesse des ondes

La mesure de la vitesse de transmission des ondes a été effectuée à l'aide d'un appareil appelé PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicator Testor*). Cet appareil mesure le temps que prend une onde ultrasonique pour parcourir la distance comprise entre l'émetteur et le récepteur placés à chaque extrémité de l'échantillon. Pour assurer une bonne continuité des interfaces émetteur-béton et béton-récepteur, une couche de vaseline a été appliquée à la surface du béton et des pièces métalliques. Dans le cas des prismes scellés, la vaseline a été directement appliquée sur le papier d'aluminium autocollant. Cette façon de procéder a certainement légèrement diminué la vitesse de propagation des ondes, mais la variation relative des vitesses demeure cependant valable.

Pour chaque éprouvette, quatre mesures consécutives ont été réalisées et l'appareil a été étalonné avant chaque mesure. La vitesse moyenne des ondes a été obtenue en divisant la distance parcourue par la moyenne des 4 mesures de temps.

La vitesse après n cycles (exprimée en pourcentage de la vitesse initiale) est obtenue par :

$$V = \frac{V_n}{V_0} \times 100 \quad (4.4)$$

V_n Vitesse après n cycles (m/s);

V_0 Vitesse au début des cycles de gel (m/s).

En général on utilise les vitesses de propagation des ondes sonores pour calculer le module d'élasticité dynamique et le facteur de durabilité. Ces deux quantités sont en

fait proportionnelles au carré de la vitesse de propagation des ondes sonores. Lors de cette étude nous n'avons pas exprimé les résultats sous ces deux formes. Nous pensons que l'expression de la vitesse relative (V_n/V_0) représente un indice fiable qui permet bien comparer la tenue au gel des bétons. Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré qu'une chute de 5 à 10 % de la vitesse relative ($V_n/V_0 < 90 \%$) était le signe de l'amorce d'une destruction par le gel.

4.3.4 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des cylindres 100 x 200 mm conformément à la norme ASTM C 39 – 94 : *Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Pour chaque béton de la série I, nous avons testé 3 cylindres scellés et 3 cylindres non scellés après 14, 28, et 91 jours de conservation. Pour les bétons de la série II, 3 cylindres non scellés ont été testés après 14, 28 et 91 jours.

Avant les essais, tous les cylindres ont été surfacés à l'aide d'une meule diamantée. Dans le cas des cylindres scellés le papier d'aluminium autocollant a dû être enlevé des extrémités du cylindre avant le surfacage. Le reste du papier autocollant a été enlevé juste avant d'effectuer l'essai de compression pour éviter toute possibilité de confinement de l'éprouvette.

4.3.5 Caractéristiques des vides d'air

Pour chaque béton de la série I, nous avons coupé 2 plaques de 100 x 100 x 20 mm dans des cylindres de 100 x 200 mm après environ 14 jours de mûrissement. Les caractéristiques du réseau de bulles d'air ont été déterminées conformément à la norme ASTM C 457 – 90 : *Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete (Modified Point Count Method)*.

4.3.6 Degré de saturation du béton

Le degré de saturation a été déterminé pour tous les bétons de la série I après 14 jours de mûrissement et à la fin des cycles de gel-dégel. Pour la mesure du degré de saturation, les prismes ont d'abord été cassés à l'aide d'un petit marteau piqueur électrique qui permet de casser rapidement le béton en petits morceaux. Le prélèvement des morceaux est ensuite fait le plus vite possible pour éviter l'évaporation d'eau à la surface du béton. Pour chaque prisme, 4 morceaux pesant entre 180 et 350 grammes ont été prélevés. Lors des mesures à 14 jours, des morceaux ont été prélevés dans un prisme scellé et dans un prisme non scellé. Dans le cas des prismes soumis aux cycles de gel-dégel, nous avons prélevé des morceaux lorsque l'état du prisme permettait de le faire. En effet, les prismes non scellés se sont tous complètement détruits et il n'a pas été possible d'y prélever des morceaux suffisamment solides pour pouvoir effectuer les mesures.

Les morceaux ont été pesés immédiatement après le prélèvement, ce qui correspond alors à la masse humide. Les mesures de masse ont été effectuées à l'aide d'une balance précise à $\pm 0,01$ gramme. Les échantillons ont ensuite été conservés dans la chambre à température et humidité contrôlées jusqu'au moment de l'essai de saturation.

L'essai de saturation utilisé est le même que celui recommandé dans la norme ASTM C 1202 – 94 : *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. La saturation des morceaux de béton est réalisée dans une boîte de conditionnement contenant 8 cellules (Figure 4.6). La boîte étanche est reliée à une pompe à vide pouvant maintenir un vide inférieur à 1 μm (hauteur de mercure) pendant 4 heures. Pour protéger la pompe à vide contre l'attaque par l'humidité, la boîte de conditionnement est aussi reliée à un vase Dewar rempli d'azote liquide (Figure 4.6).

Dans un premier temps, les morceaux ont été placés dans la boîte de conditionnement. Après avoir fermé la boîte, la pompe à vide est activée et un vide inférieur à 1 μm est maintenu pendant 3 heures. De l'eau distillée est ensuite introduite

dans les cellules et les morceaux sont maintenus sous vide pendant une heure supplémentaire. Lorsque l'essai de saturation est terminé, on mesure alors la masse des morceaux dans l'eau et la masse saturée superficiellement sèche. Les morceaux sont ensuite placés dans l'étuve jusqu'à masse constante (masse sèche). Le degré de saturation peut alors être calculé à partir de la masse humide, de la masse saturée superficiellement sèche et de la masse sèche (Paragraphe 5.4.1).

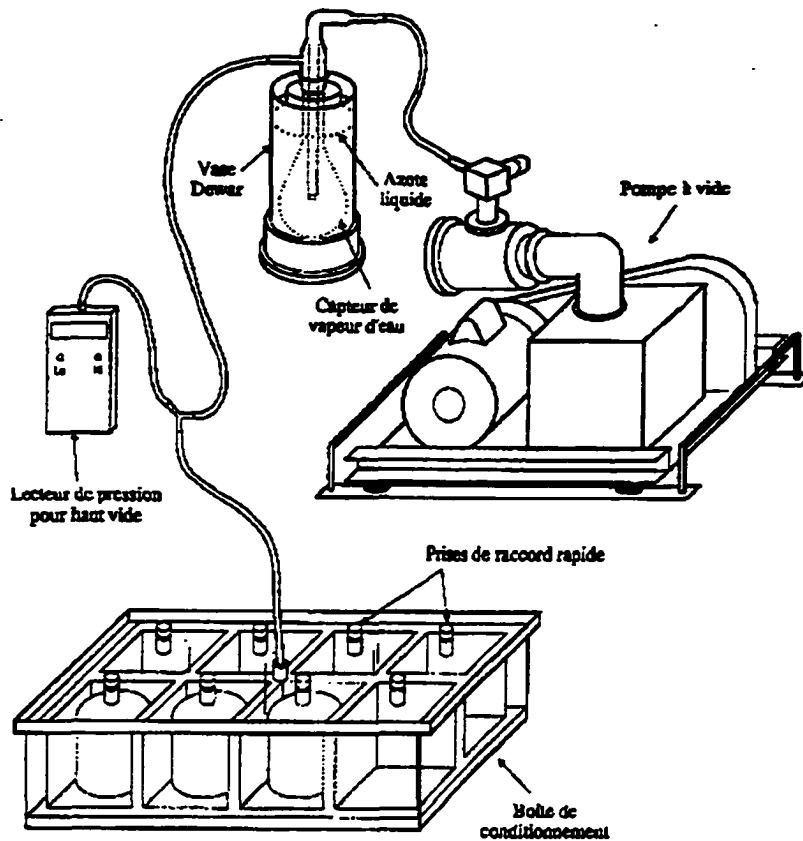


Figure 4.6 - Vue schématique du montage pour le conditionnement des éprouvettes

4.3.7 Humidité relative interne

L'humidité relative interne a été mesurée à l'aide d'une sonde Novasina ms1 (Figure 4.7). Cet appareil portable permet de mesurer simultanément l'humidité relative et la température à l'intérieur du béton. La précision de cette sonde est d'environ ± 1 % H.R. L'humidité relative est calculée à partir de la température et de la mesure de la résistivité électrique d'un électrolyte hygroscopique. Les conditions d'opération de la sonde sont présentées au tableau 4.11.

TABLEAU 4.11 - Conditions d'opération de l'appareil Novasina ms1

| | |
|----------------------------|--------|
| Température minimale | -20 °C |
| Température maximale | +50 °C |
| Humidité relative minimale | 6 % |
| Humidité relative maximale | 98 % |

Pour la mesure de l'humidité relative interne dans le béton, on a utilisé la procédure suivante. Un trou de 18 mm de diamètre et d'une profondeur variable (minimum 50 mm) est d'abord percé à l'aide d'un foret à sec et à percussion. La poussière à l'intérieur du trou est ensuite enlevée à l'aide d'une brosse. Un manchon en plastique spécialement conçu à cet effet est ensuite poussé jusqu'au fond de trou. Le rôle du manchon est de créer une chambre étanche en isolant l'air au fond du trou de forage de l'air de l'atmosphère extérieure. Après un temps de stabilisation de 2 heures, on perce la membrane supérieure du manchon pour y introduire le senseur d'humidité situé à l'extrémité de la tige de la sonde. L'extrémité de la sonde est poussée jusqu'au fond du trou de forage. Le manchon est spécialement conçu pour maintenir l'étanchéité de la chambre, même après y avoir introduit la tige de la sonde. La sonde est maintenue au fond du trou pendant 30 à 45 minutes.

Dans le cas des surfaces non scellées, nous avons recouvert la surface du béton avec un linge humide pendant le temps d'attente pour éviter une trop forte évaporation de l'eau en surface. L'humidité relative interne des bétons a été notée en même temps que

la température, ce qui nous a permis de corriger toutes les valeurs d'humidité à une température constante de 22 °C. L'appareil a été calibré régulièrement en utilisant des solutions de calibration contenant des sels en équilibre avec une atmosphère à 75 % et 90 % d'humidité relative.

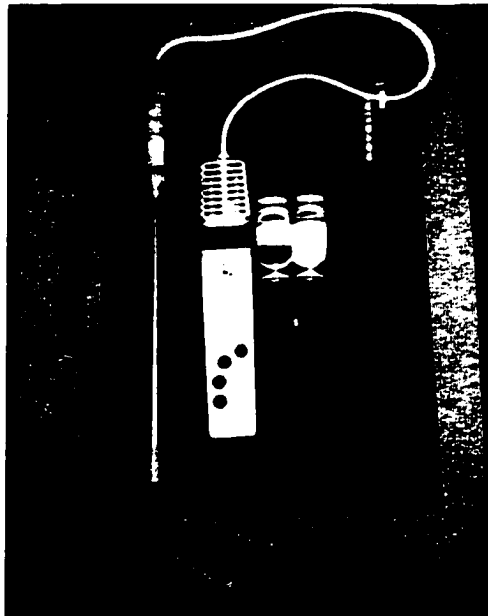


Figure 4.7 - La sonde Novasina msl

4.3.7.1 Mesures de l'humidité relative dans les éprouvettes de gel-dégel

Les mesures d'humidité relative et de température ont été effectuées dans tous les bétons de la série I. Les mesures ont été prises à 14 jours (un prisme scellé et un prisme non scellé) et à la fin des cycles de gel-dégel. Les trous nécessaires pour les mesures ont été forés de chaque côté de prisme (surface 75 x 75 mm). La profondeur des trous était de 75 mm (Figure 4.8). L'humidité relative correspond donc à la moyenne des deux mesures effectuées dans chaque prisme.

Les mesures d'humidité ont été réalisées dans tous les prismes soumis au gel-dégel dont l'état final le permettait. Pour chaque combinaison de scellement lors du

mûrissement et lors du gel-dégel (Figure 4.5), deux prismes ont été soumis au gel. L'humidité relative a été mesurée une fois dans chaque prisme et la moyenne de deux mesures a été calculée.

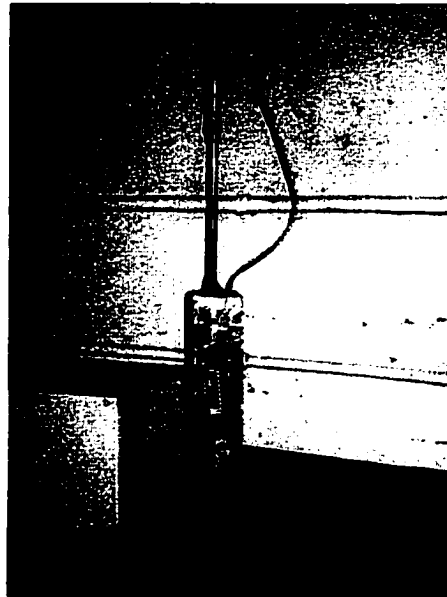


Figure 4.8 - Mesure de l'humidité relative et de la température dans l'éprouvette de gel-dégel

4.3.7.2 Mesures de l'humidité relative dans les blocs

La deuxième série de bétons est constituée de 2 blocs de 240 x 420 x 540 mm. Dans chaque bloc, les mesures d'humidité relative ont été effectuées après 3, 7, 14, 28, 91 et 350 jours d'immersion complète dans l'eau. À chaque échéance, nous avons effectué 2 mesures à 50 mm et 2 mesures à 75 mm de profondeur. L'humidité relative correspond à la moyenne de 2 mesures à chaque profondeur.

Après chaque série de mesures, les trous ont été bouchés à l'aide d'une résine polyester pour éviter la pénétration de l'eau par les orifices ayant servi à la mesure de l'humidité. La figure 4.9 illustre la procédure utilisée pour mesurer l'humidité relative interne dans les blocs.



Figure 4.9 - Mesure de l'humidité relative et de la température dans le bloc

5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats obtenus avec les bétons des séries I et II (bétons sans air entraîné). La série I a permis d'étudier l'influence du mode de mûrissement et de l'autodessiccation interne sur la résistance au gel des bétons ordinaires et des bétons à haute performance. Pour ce faire, nous avons fabriqué 4 bétons en faisant varier le rapport E/L et la quantité de fumée de silice (0,3 CP, 0,3 SF, 0,4 CP, 0,4 SF). La deuxième série avait pour le but d'étudier l'autodessiccation interne des BHP pour pouvoir déterminer dans quelle mesure celle-ci peut être utile pour estimer la résistance au gel dans des conditions naturelles. Pour ce faire, nous avons fabriqué 2 BHP en variant seulement la quantité de fumée de silice (0,3 CP bloc et 0,3 SF bloc).

Dans le cas de la série I, nous présenterons les résistances à la compression, les caractéristiques des bulles d'air, les variations de masse, de vitesse et d'allongement lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel. Également, nous présenterons les degrés de saturation et les humidités relatives internes avant et après les cycles de gel-dégel. Pour la série II, nous présenterons les résistances à la compression et les profils d'humidité relative interne dans les blocs.

5.2 Résistances à la compression et caractéristiques des bulles d'air

5.2.1 Résistance à la compression

Les résistances à la compression des bétons de la série I sont présentées au tableau 5.1 et aux figures 5.1 et 5.2. Les mesures à 14, 28 et 91 jours correspondent à la moyenne de 3 essais. Les valeurs individuelles de chaque essai de résistance à la compression et le mode de rupture sont présentées dans l'annexe A.

TABLEAU 5.1 - Résistances à la compression des bétons de la série I

| Béton | | | Résistance à la compression (MPa) | | | | | |
|-------|---------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|------------------------------|
| E/L | Fumée de silice (%) | Mûrissement | 14 jours | Coefficient de variation (%) | 28 jours | Coefficient de variation (%) | 91 jours | Coefficient de variation (%) |
| 0,30 | 0 | Eau | 68,3 | 1 | 75,4 | 0 | 84,2 | 3 |
| | | Scellé | 66,1 | 2 | 72,5 | 1 | 83,4 | 2 |
| | 8 | Eau | 79,4 | 1 | 84,9 | 1 | 95,4 | 1 |
| | | Scellé | 78,4 | 1 | 83,8 | 1 | 93,6 | 0 |
| 0,40 | 0 | Eau | 49,7 | 2 | 56,2 | 2 | 63,4 | 3 |
| | | Scellé | 48,8 | 1 | 52,4 | 3 | 59,2 | 1 |
| | 8 | Eau | 57,6 | 1 | 66,1 | 1 | 72,1 | 1 |
| | | Scellé | 56,5 | 1 | 64,8 | 2 | 66,1 | 2 |

Les figures 5.1 et 5.2 montrent que les résistances à la compression à 28 jours des bétons de rapport E/L = 0,40 varient de 52,4 à 66,1 MPa. Ces valeurs sont typiques pour des bétons ordinaires de bonne qualité et sans air entraîné. Dans le cas des bétons de rapport E/L = 0,30, les résistances à la compression à 28 jours sont comprises entre 72,5 et 83,8 MPa.

Les figures 5.1 et 5.2 montrent que les résistances à la compression augmentent avec le temps quel que soit le rapport E/L, la teneur en fumée de silice ou le type de mûrissement. On constate aussi que les bétons avec fumée de silice ont systématiquement une plus grande résistance à la compression quel que soit le rapport E/L ou le type de mûrissement.

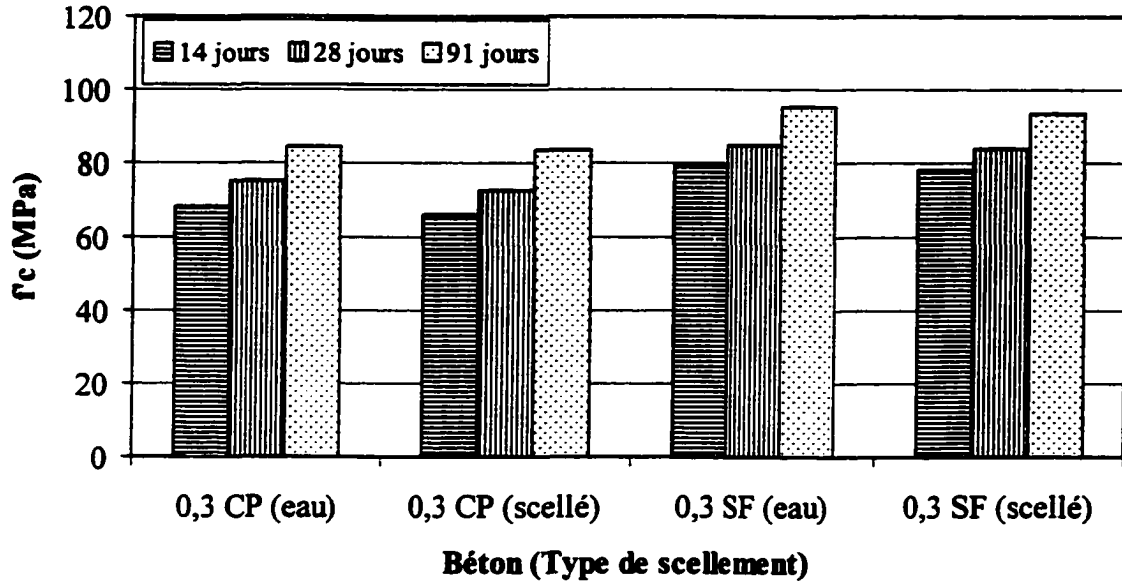


Figure 5.1 – Résistances à la compression des bétons de rapport E/L = 0,30 (série I)

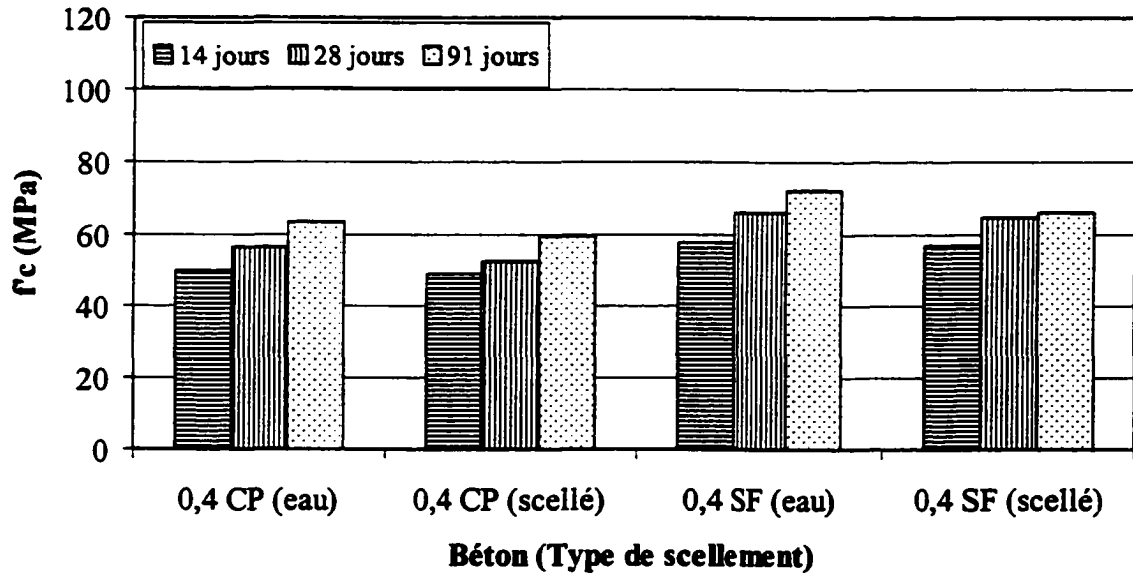


Figure 5.2 – Résistances à la compression des bétons de rapport E/L = 0,40 (série I)

Les figures 5.1 et 5.2 montrent que le type de mûrissement influence la résistance à la compression. Pour un type de liant donné, on remarque que la résistance à la compression des cylindres scellés est toujours légèrement inférieure à celle des cylindres mûris dans l'eau. Puisque l'eau est nécessaire au processus d'hydratation du liant, une moins grande disponibilité de l'eau (scellé) a pour effet de diminuer légèrement la quantité d'hydrates formés. Les cylindres scellés ont donc probablement une pâte de ciment hydraté un peu moins compacte, ce qui diminue la résistance à la compression à tous les âges.

Dans le cas des bétons de la série II, les cylindres ont été testés à 14, 28 et 91 jours. Tous les cylindres ont été mûris dans l'eau. Les résultats présentés au tableau 5.2 correspondent à la moyenne de 3 essais. Les résultats détaillés des essais de résistance à la compression et le mode de rupture sont présentés dans l'annexe A.

TABLEAU 5.2 – Résistances à la compression des bétons de la série II

| Béton | | | Résistance à la compression (MPa) | | | | | |
|-------|---------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|------------------------------|
| E/L | Fumée de silice (%) | Mûrissement | 14 jours | Coefficient de variation (%) | 28 jours | Coefficient de variation (%) | 91 jours | Coefficient de variation (%) |
| 0,30 | 0 | Eau | 65,1 | 1 | 73,2 | 2 | 82,5 | 1 |
| | 8 | Eau | 77,0 | 1 | 83,7 | 3 | 97,2 | 1 |

Les résultats du tableau 5.2 et de la figure 5.3 indiquent que, comme dans le cas des bétons de la série I, les résistances à la compression augmentent avec le temps et que la fumée de silice améliore les résistances quel que soit l'âge du béton.

La comparaison des résistances à la compression des bétons de la série I (0,3 CP et 0,3 SF) avec celles des mélanges similaires de la série II (0,3 CP bloc et 0,3 SF bloc) montre que l'écart maximal est inférieur à 2,5 MPa. Ce faible écart confirme que ces deux types de béton sont parfaitement comparables malgré le fait qu'ils aient été produits lors de gâchées distinctes.

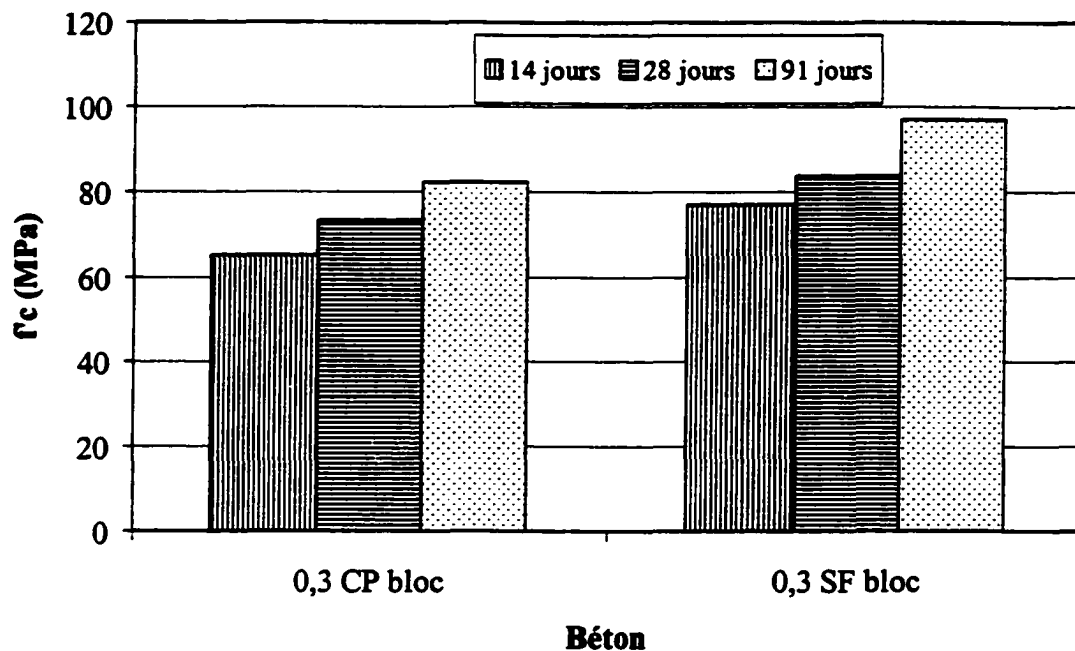


Figure 5.3 – Résistances à la compression des bétons de la série II

5.2.2 Caractéristiques des bulles d'air

Les caractéristiques des bulles d'air de tous les bétons de la série I sont présentées au tableau 5.3. Les caractéristiques des vides d'air ont été déterminées conformément à la norme ASTM C 457. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe B.

Les résultats du tableau 5.3, indiquent que les volumes d'air entraîné dans le béton durci sont tous inférieurs à 2,6 %, ce qui est normal pour des bétons sans air entraîné. Les valeurs de \bar{L} , comprises entre 500 et 1000 μm , sont elles aussi caractéristiques des bétons sans air entraîné.

On constate qu'il existe de légères variations entre les volumes d'air mesurés dans le béton durci et dans le béton frais. En général, les écarts sont relativement faibles (< 0,7 %) et sont donc considérés comme tout à fait normaux.

Les facteurs d'espacement relativement élevés des bétons de la série I ($> 500 \mu\text{m}$) résultent d'un faible volume d'air ($< 3 \%$) et d'une surface spécifique faible ($\alpha < 13 \text{ mm}^{-1}$). Cette faible surface spécifique indique que le faible volume d'air est contenu dans les bulles relativement grosses, ce qui contribue à espacer davantage les bulles les unes des autres.

La fumée de silice n'a pas semblé affecter significativement les caractéristiques du réseau de bulles d'air sauf dans du béton 0,3 SF dont la valeur de \bar{L} est significativement plus faible que celle du béton sans fumée de silice.

TABLEAU 5.3 – Caractéristiques des bulles d'air (série I)

| E/L | Béton | Teneur en air (%) | | Surface spécifique $\alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ | Facteur d'espacement $\bar{L} \text{ (}\mu\text{m)}$ |
|------|---------------------|-------------------|-------|---|---|
| | Fumée de silice (%) | Frais | Durci | | |
| 0,30 | 0 | 2,5 | 1,8 | 11 | 750 |
| | 8 | 2,7 | 2,6 | 13 | 540 |
| 0,40 | 0 | 2,1 | 2,3 | 9 | 820 |
| | 8 | 2,0 | 1,3 | 10 | 980 |

5.3 Essais de gel-dégel

5.3.1 Évolution des propriétés pendant le mûrissement (série D)

Pour évaluer dans quelle mesure le type de mûrissement peut influencer la résistance au gel, nous avons analysé les variations de la masse, de la vitesse des ondes et de l'allongement des prismes avant qu'ils soient soumis aux cycles de gel-dégel. Ces mesures ont été effectuées après 1, 3, 7, 11 et 14 jours de mûrissement. Ce chapitre présente les résultats obtenus sous forme de graphiques. Les résultats détaillés sont présentés sous forme de tableaux dans l'annexe C.

5.3.1.1 Variations de la masse

Les figures 5.4 et 5.5 présentent les variations de la masse en fonction du temps et du type de mûrissement. Globalement, on remarque que les variations de masse sont directement fonction du type de mûrissement. Dans le cas des éprouvettes non scellées, la masse augmente en fonction du temps. Cela est dû à la contraction Le Châtelier qui se développe lors de l'hydratation (Paragraphe 1.4.1). En effet, les vides formés dans la porosité de la pâte de ciment peuvent alors se remplir d'eau.

Le taux d'absorption diminue avec le temps car l'hydratation ralentit et les hydrates remplissent graduellement la porosité capillaire. De plus, les hydrates formés diminuent la perméabilité du béton, ce qui nuit à la pénétration de l'eau dans la pâte de ciment.

Dans le cas des prismes scellés, leur masse ne change pas car le papier d'aluminium autocollant empêche toute possibilité d'échange avec l'extérieur.

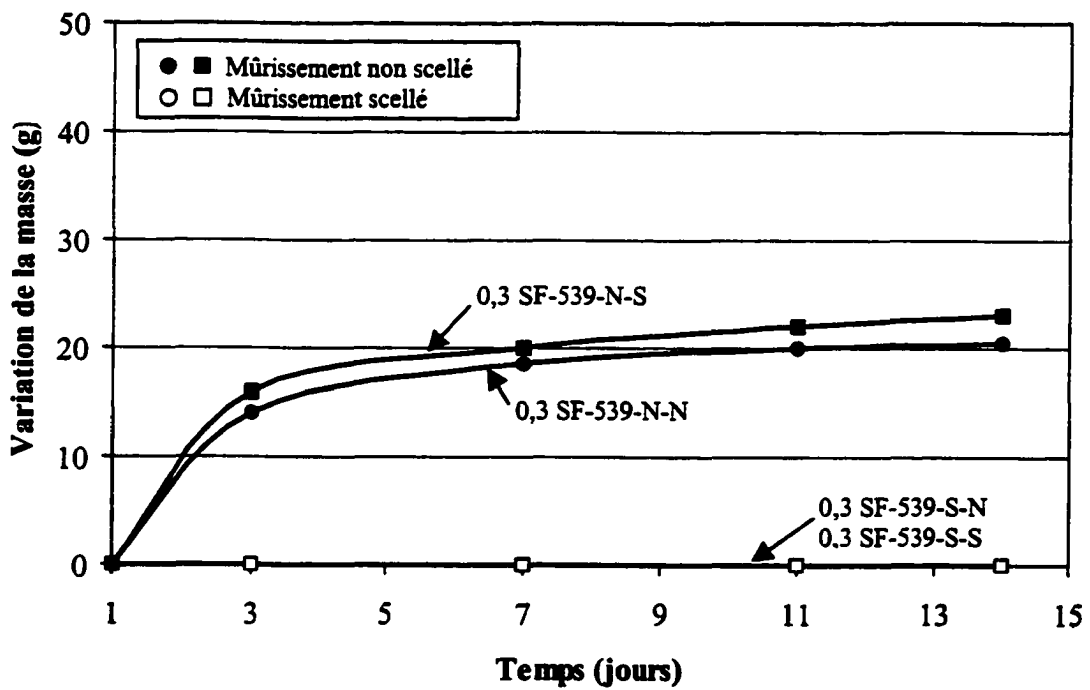
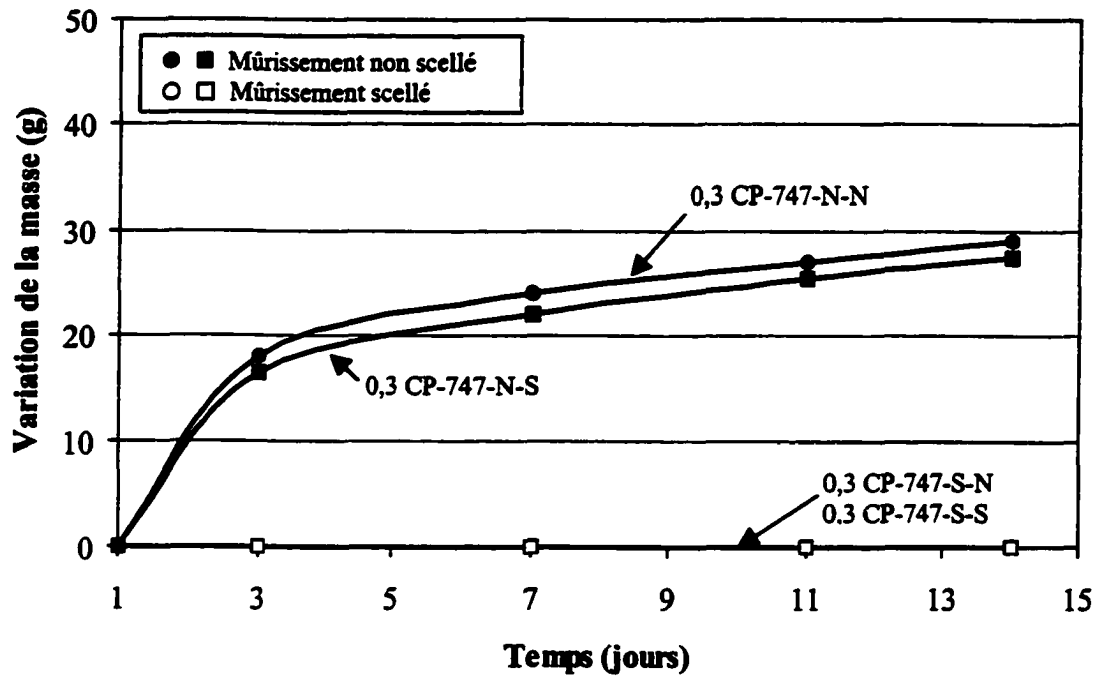


Figure 5.4 – Variation de la masse des éprouvettes de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

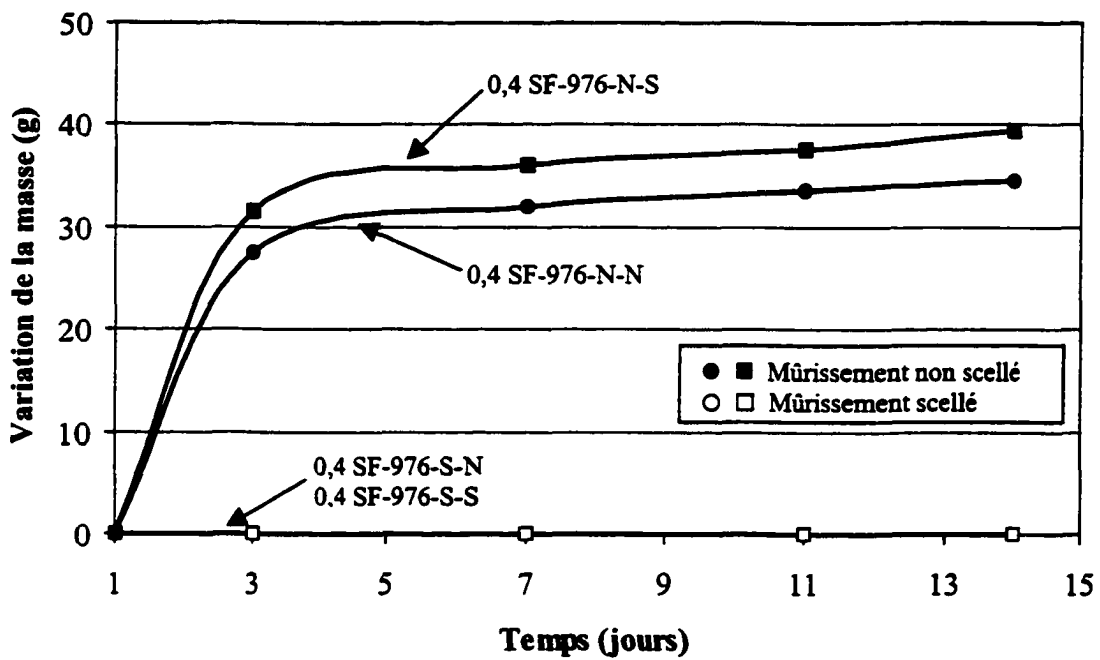
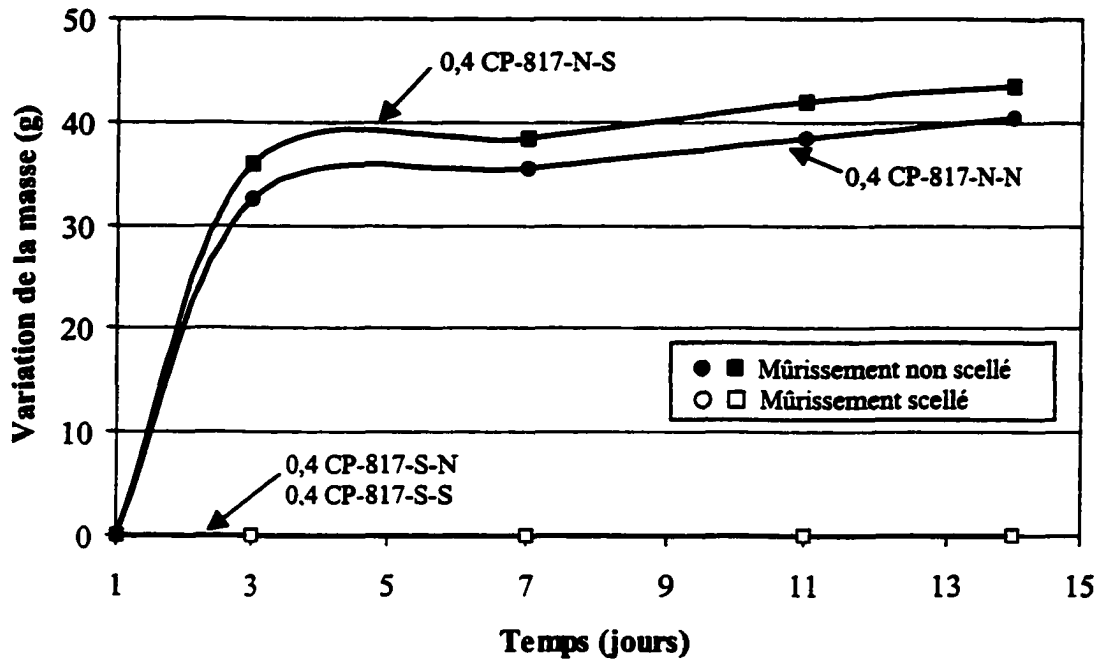


Figure 5.5 – Variation de la masse des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

Les figures 5.4 et 5.5 montrent que les bétons de rapport $E/L = 0,30$ ont absorbé moins d'eau que les bétons de rapport $E/L = 0,40$, quelle que soit la teneur en fumée de silice. Globalement, les bétons 0,3 CP et 0,3 SF ont absorbé entre 22 g et 28 g d'eau par éprouvette en 14 jours alors que, les bétons 0,4 CP et 0,4 SF ont absorbé entre 37 g et 42 g d'eau par éprouvette. La plus faible absorption des bétons avec $E/L = 0,30$ s'explique d'une part par leur plus faible perméabilité qui nuit à la pénétration de l'eau externe et, d'autre part, par la plus faible quantité d'hydrates formés qui limite le volume total de la contraction Le Châtelier et, par conséquent, la quantité d'eau externe en mesure de pénétrer à l'intérieur de la pâte.

L'influence de la fumée de silice sur l'absorption d'eau lors du mûrissement est moins importante que celle du rapport eau/liant. En moyenne, les bétons avec fumée de silice ont légèrement moins absorbé d'eau (2 à 5 g) que les bétons sans fumée de silice. Cette plus faible absorption est probablement due à leur porosité capillaire plus faible et plus fine qui s'oppose à la pénétration de l'eau externe.

5.3.1.2 Variations de la vitesse des ondes sonores

Les figures 5.6 et 5.7 présentent les variations de la vitesse sonique lors du mûrissement des éprouvettes de la série I. Dans le cas des prismes n'ayant pas le même type de scellement lors du mûrissement et lors des cycles de gel-dégel, la vitesse des ondes n'a pu être mesurée qu'après 1 et 14 jours. Pour les autres prismes, les mesures ont été effectuées en même temps que les mesures de la masse et de l'allongement soit après 1, 3, 7, 11, et 14 jours.

On remarque qu'en général la vitesse tend à augmenter avec le temps. La vitesse des ondes est principalement fonction de la compacité du béton. Plus le temps de mûrissement dans l'eau augmente, plus la pâte de ciment s'hydrate et se densifie et plus la vitesse des ondes augmente. Dans tous les cas, les rapports V/V_0 sont toujours supérieurs à 100 % après 14 jours de mûrissement. On remarque le même comportement dans le cas des échantillons scellés. Il y a donc peu d'effet des conditions de scellement sur la vitesse sonique lors du mûrissement. Il est probable que la quantité d'hydrates

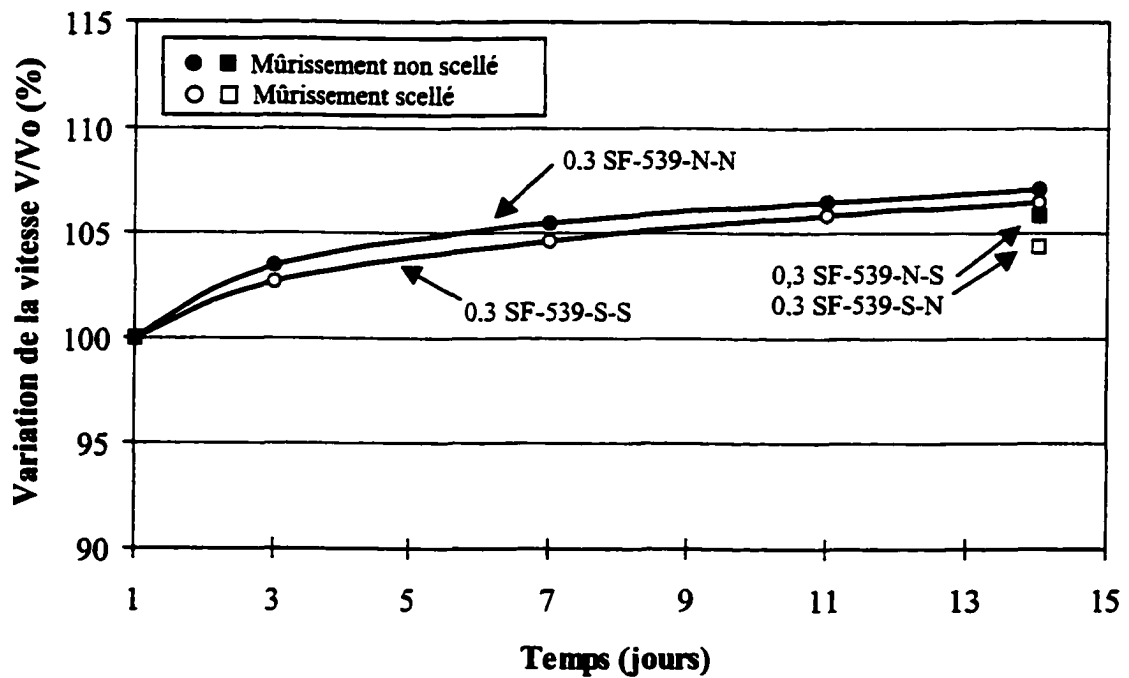
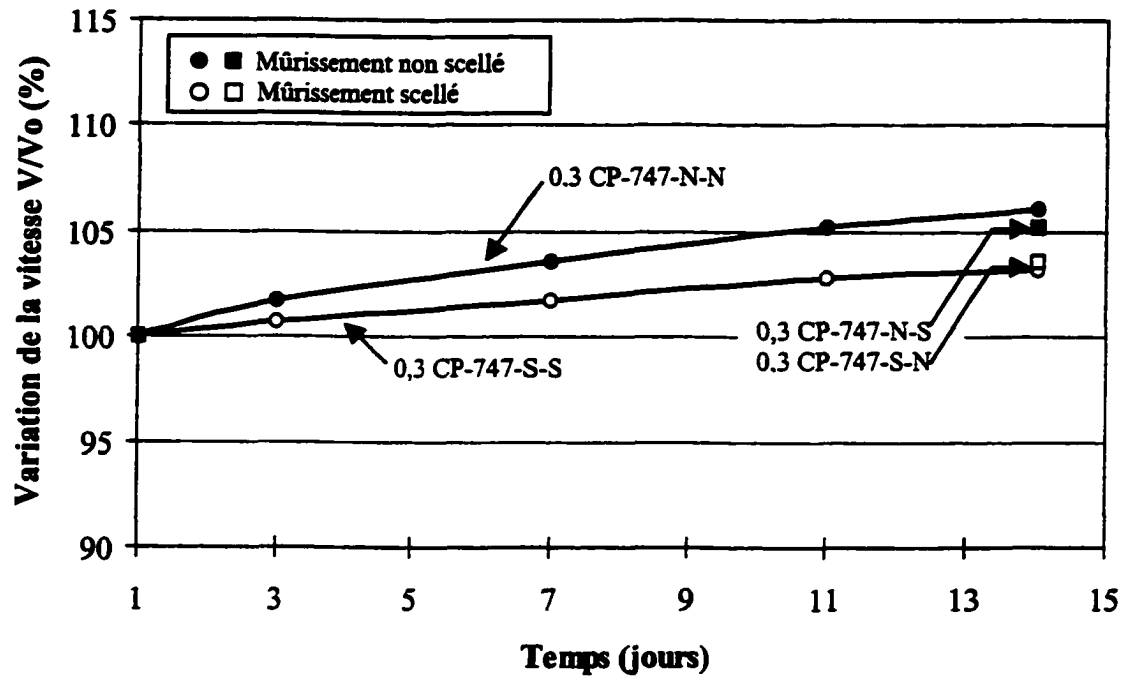


Figure 5.6 – Variation de la vitesse des ondes dans les échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

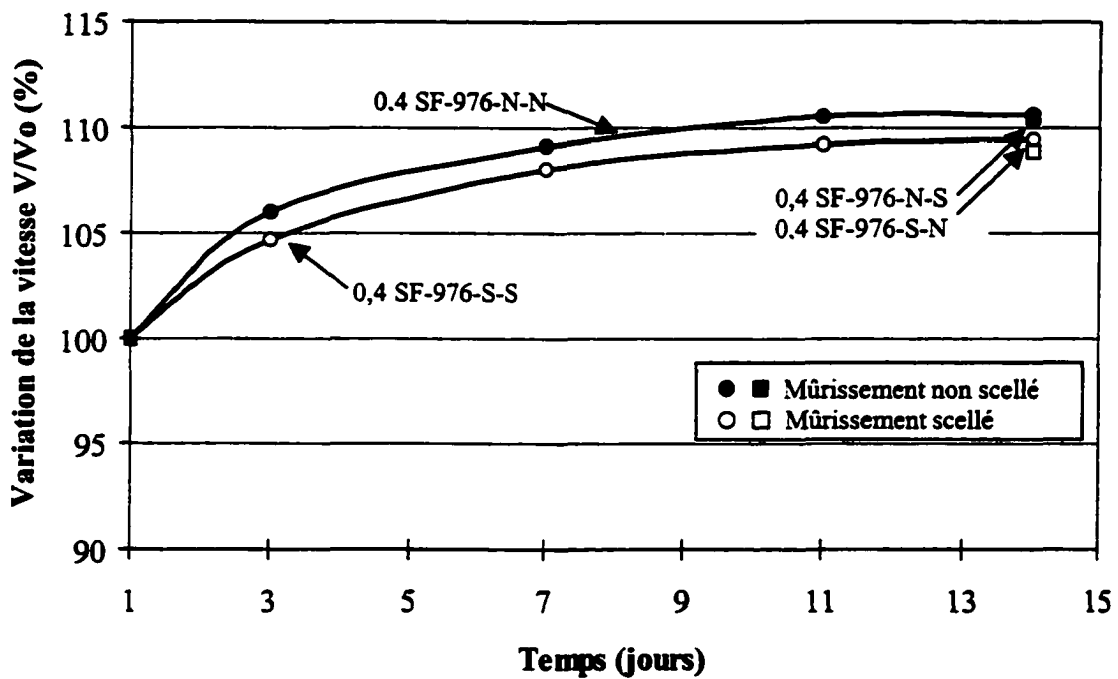
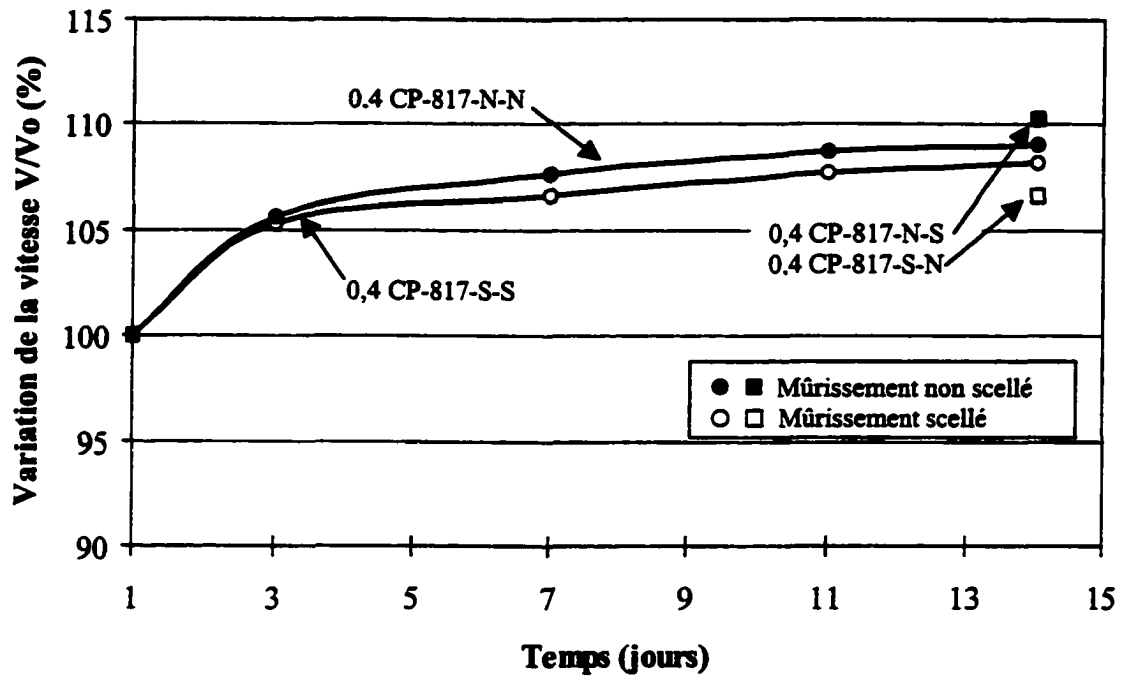


Figure 5.7 – Variation de la vitesse des ondes dans les échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

supplémentaires résultant de la pénétration d'eau extérieure lors du mûrissement non scellé, est négligeable par rapport à la quantité totale d'hydrates formés lors du mûrissement scellé.

L'augmentation de la vitesse sonique est plus faible pour les bétons de rapport $E/L = 0,30$ que pour les bétons de rapport $E/L = 0,40$. Avant le premier jour, la microstructure des bétons de rapport $E/L = 0,30$ évolue rapidement car les grains de ciment sont initialement très rapprochés les uns des autres. Une fraction importante de l'hydratation se produit donc durant les 24 premières heures si bien que la microstructure évolue plus lentement par la suite. Cette évolution plus lente se traduit par une évolution légèrement plus lente de la vitesse des ondes durant les 13 jours suivants.

Dans le cas des bétons de rapport $E/L = 0,40$, les grains de ciment sont initialement plus éloignés. Après 24 heures, la microstructure est relativement moins dense et l'hydratation se développe plus lentement sur une plus longue période. Ce phénomène explique probablement pourquoi l'augmentation de vitesse du béton de rapport $E/L = 0,40$ est plus importante.

La teneur en fumée de silice n'a pas eu d'effet significatif sur la variation des ondes lors du mûrissement. La fumée de silice favorise la formation d'hydrates supplémentaires mais leur quantité est probablement négligeable par rapport à la quantité d'hydrates totale formés en absence de la fumée de silice.

5.3.1.3 Variations de l'allongement

Les variations de l'allongement sont présentées aux figures 5.8 et 5.9. On constate que les prismes non scellés développent un léger gonflement dû à l'absorption d'eau et au remplissage des vides dans la porosité capillaire. Les gonflements varient de 25 à 75 $\mu\text{m}/\text{m}$, ce qui est presque négligeable compte tenu de la précision de la mesure. Par contre, les prismes scellés présentent un léger retrait dû à la formation de ménisques dans les pores capillaires (l'absorption d'eau est empêchée). La formation de ménisques entraîne la mise en tension de l'eau dans les capillaires qui comprime le squelette minéral

et provoque le retrait du béton. Les valeurs du retrait mesurées sont cependant relativement faibles car elles sont toutes inférieures à 200 $\mu\text{m/m}$.

On remarque aussi que dans les conditions scellées, le retrait est nettement plus important avec le rapport $E/L = 0,30$ (200 $\mu\text{m/m}$) qu'avec le rapport $E/L = 0,40$ (50 $\mu\text{m/m}$). La porosité plus fine des bétons avec un $E/L = 0,30$ fait en sorte que les ménisques sont plus courbés et les forces développées à l'intérieur des pores sont alors plus fortes (Paragraphe 1.5.2). Ces forces de traction capillaires plus importantes expliquent le retrait endogène légèrement plus prononcé des BHP ($E/L = 0,30$).

Sur chacune des figures, on constate que le retrait à 14 jours des prismes scellés lors du mûrissement et lors du gel est légèrement plus important que celui des prismes scellés lors du mûrissement mais non scellés lors du gel. Cet écart est difficile à expliquer mais pourrait résulter d'une différence dans la méthode de scellement lors du mûrissement (0-14 jours). En effet, les éprouvettes destinées à être non scellées lors du gel ont d'abord été recouvertes par un film de papier cellophane pour faciliter le décollement du papier d'aluminium autocollant avant le début des cycles.

Dans le cas des bétons de rapport $E/L = 0,30$ on remarque, dans tous les cas, une légère diminution du retrait après 7 jours. Cette diminution du retrait ne peut pas être due à l'absorption d'eau car ces éprouvettes ont subi un mûrissement scellé. Nous ne sommes pas en mesure d'expliquer ce phénomène.

Pour tous les rapports E/L (notamment pour $E/L = 0,30$), la fumée de silice augmente non seulement le retrait des éprouvettes scellées mais le retrait des éprouvettes non scellées. Il est probable que ce phénomène soit dû au raffinage des pores capillaires et par conséquent, à l'augmentation des tensions capillaires.

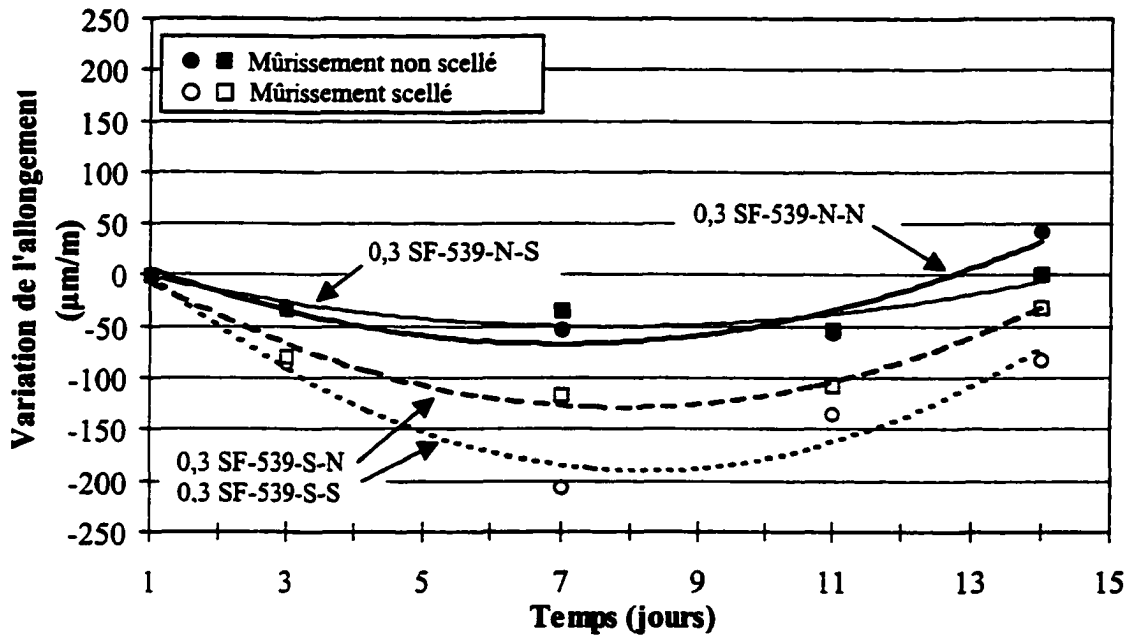
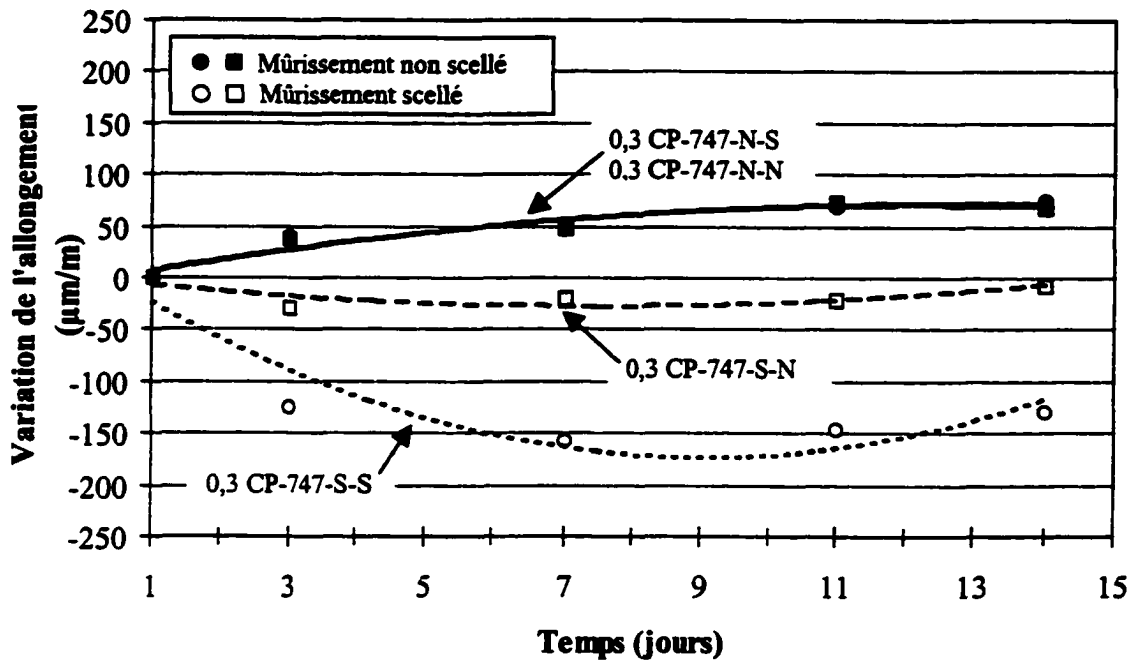


Figure 5.8 – Variations de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

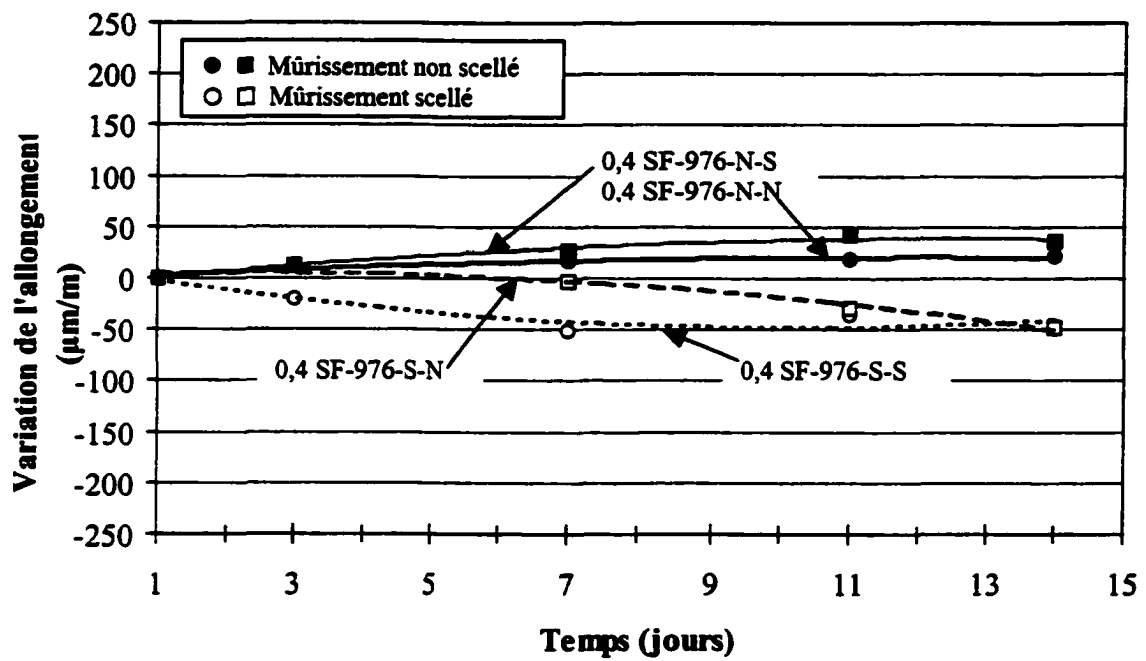
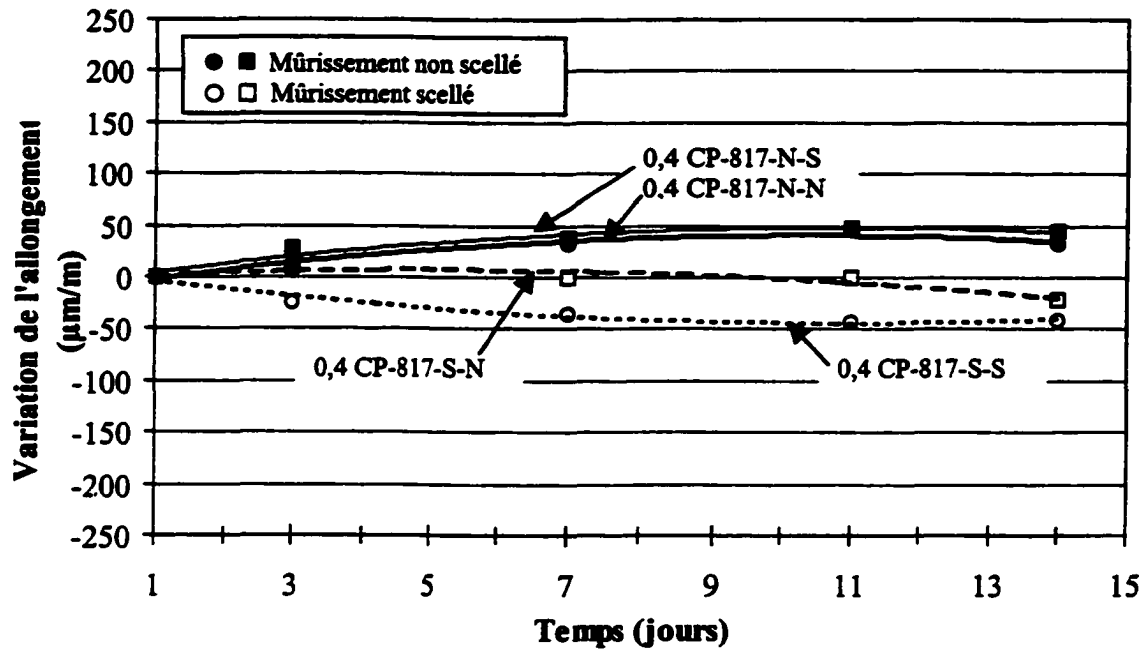


Figure 5.9 – Variation de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors du mûrissement (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

5.3.2 Évolution des propriétés pendant les cycles de gel-dégel

Les éprouvettes soumises au gel ont subi un maximum de 300 cycles de gel et dégel. Cependant, certaines éprouvettes particulièrement sensibles au gel ont parfois été retirées de l'appareil avant l'échéance de 300 cycles. Les résultats détaillés des essais de gel-dégel sont présentés dans l'annexe D.

5.3.2.1 Variations de la masse

Les variations de masse durant les cycles de gel sont présentées aux figures 5.10 et 5.11. Ces figures montrent que les prismes qui absorbent beaucoup d'eau se détruisent très rapidement. En général, la quantité d'eau absorbée par les prismes détruits au gel varie entre 35 et 100 g. On remarque aussi que le type de mûrissement avant les cycles de gel a une grande influence sur la quantité d'eau absorbée lors du gel. En effet, les prismes scellés lors du mûrissement ont systématiquement absorbé plus d'eau (environ 70 g) que les prismes mûris dans l'eau (environ 45 g). Cela est dû au fait que les prismes scellés lors du mûrissement sont probablement moins bien hydratés et possèdent une porosité et une perméabilité plus importantes à 14 jours. Dès les premiers cycles de gel-dégel, ils absorbent plus d'eau, ce qui augmente la quantité d'eau gelable et augmente leur susceptibilité au gel.

Les résultats des figures 5.10 et 5.11 montrent que le type de scellement durant le gel a une influence majeure sur le comportement au gel. En effet, les échantillons scellés lors du gel ne se sont pas détruits, quels que soient le rapport E/L ou le dosage en fumée de silice. À l'inverse, tous les échantillons non scellés lors du gel se sont détruits, ce qui est tout à fait normal compte tenu qu'ils ne contiennent pas d'air entraîné.

Les bétons non scellés de rapport $E/L = 0,30$ ont subi très peu d'écaillage, notamment ceux contenant de la fumée de silice. Certains bétons non scellés de rapport $E/L = 0,40$ ont subi un écaillage très important (Figure 5.11), ce qui a provoqué une importante perte de masse avant la destruction complète par le gel (0,4 SF-976-N-N).

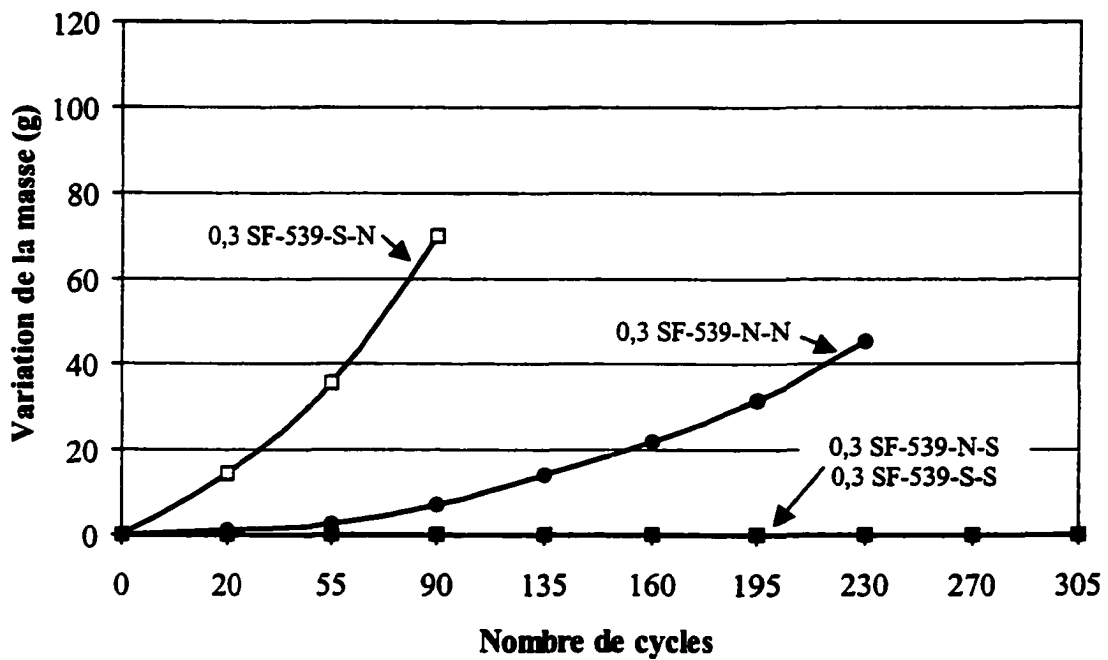
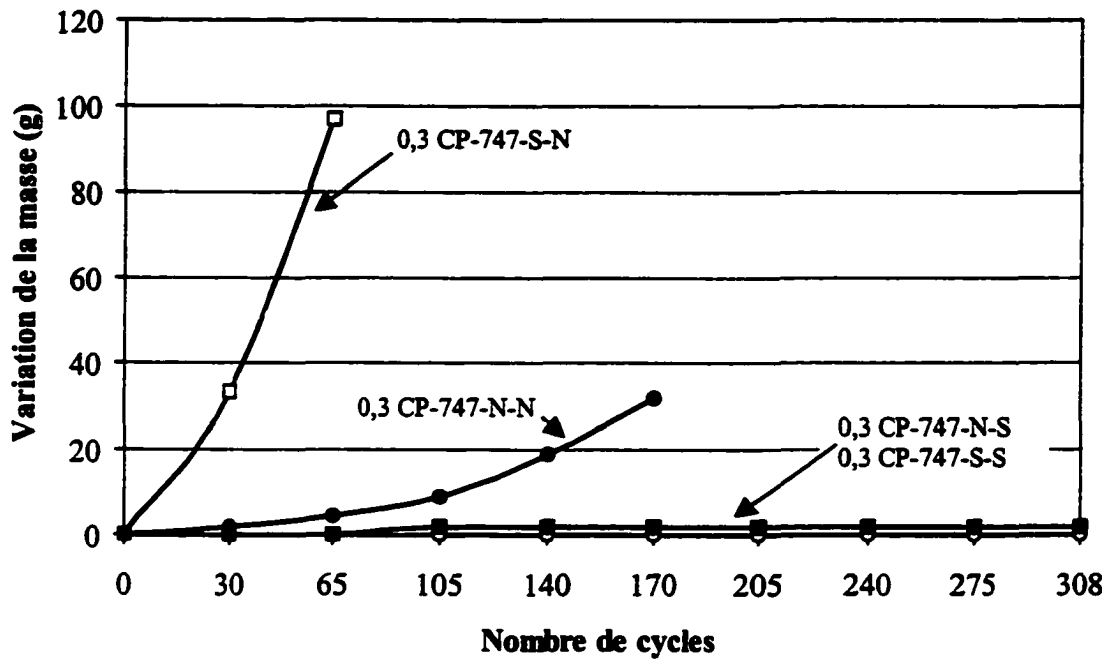


Figure 5.10 – Variation de la masse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

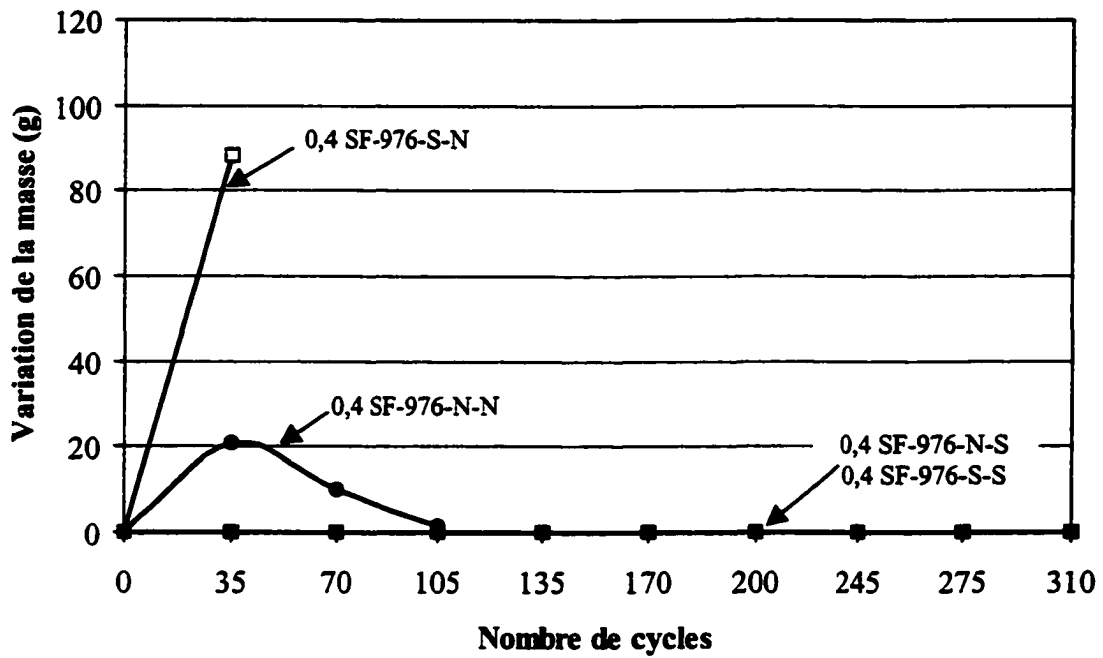
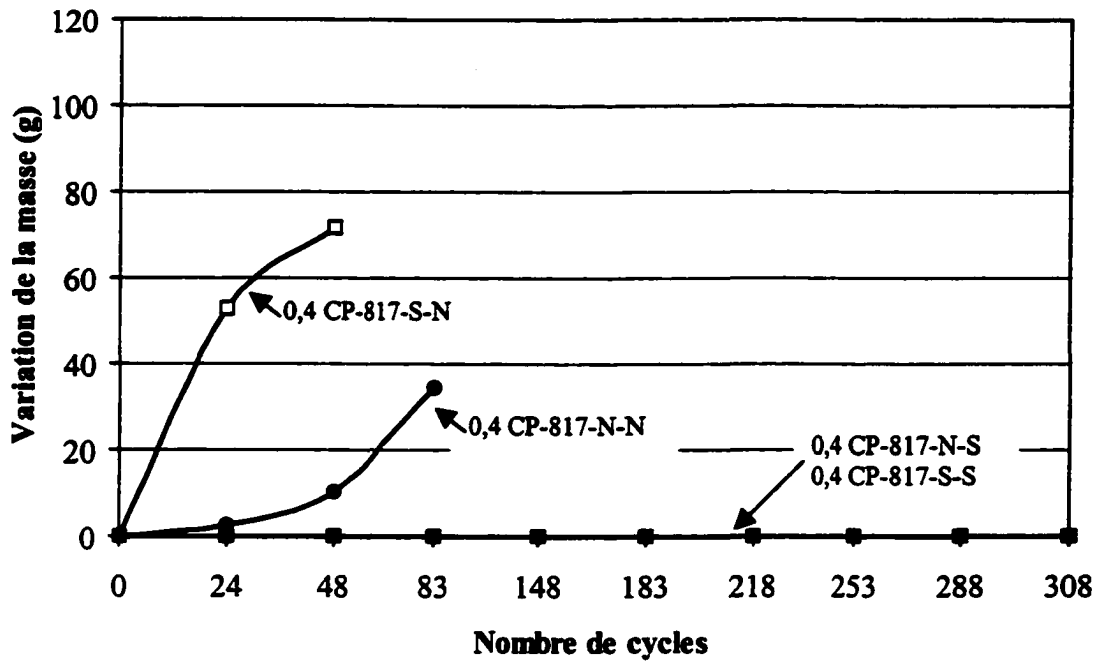


Figure 5.11 – Variation de la masse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

5.3.2.2 Variation de la vitesse

Les figures 5.12 et 5.13 présentent l'évolution de la vitesse des ondes sonore en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. On constate à nouveau que le type de scellement durant le gel a une influence majeure sur la résistance au gel des bétons. En effet, les prismes scellés durant les cycles de gel-dégel ne se sont pas détruits quels que soient le rapport E/L ou la teneur en fumée de silice. À l'inverse, les prismes non scellés se sont tous détruits relativement rapidement (moins de 200 cycles).

Les mesures de vitesse confirment à nouveau que le type de scellement lors du mûrissement a aussi une influence sur la tenue au gel des bétons. Les courbes des figures 5.12 et 5.13 montrent que les prismes scellés lors du mûrissement se sont détruits plus rapidement que les prismes non scellés. La destruction plus rapide des prismes ayant subi un mûrissement scellé est probablement due à une perméabilité plus importante et une porosité plus grossière qui ont pour effet d'augmenter la quantité d'eau gelable dans la pâte.

Dans le cas des prismes non scellés, les figures 5.12 et 5.13 montrent aussi que le rapport E/L a aussi une légère influence sur la tenue au gel des bétons sans air entraîné. Les bétons possédant un rapport E/L plus faible (0,30) se sont détruits un peu moins rapidement que les bétons comparables mais fabriqués avec un E/L de 0,40.

L'influence de la fumée de silice sur la tenue au gel est variable en fonction du rapport E/L. Dans le cas du rapport E/L plus faible (0,30), la fumée de silice a pour effet de ralentir la destruction lors du gel. Dans le cas du rapport E/L élevé (0,40), elle a légèrement accéléré la destruction.

5.3.2.3 Variation de l'allongement

Les figures 5.14 et 5.15 présentent l'évolution des allongements en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Lors de l'analyse on a considéré qu'un béton est détruit lorsque son allongement dépasse 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$.

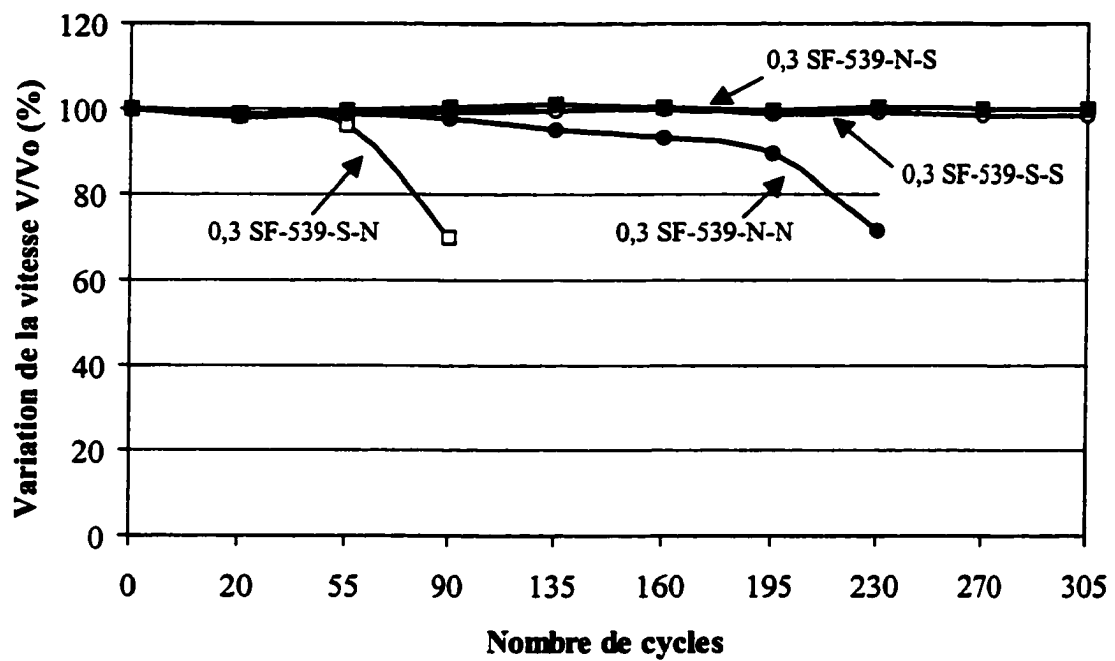
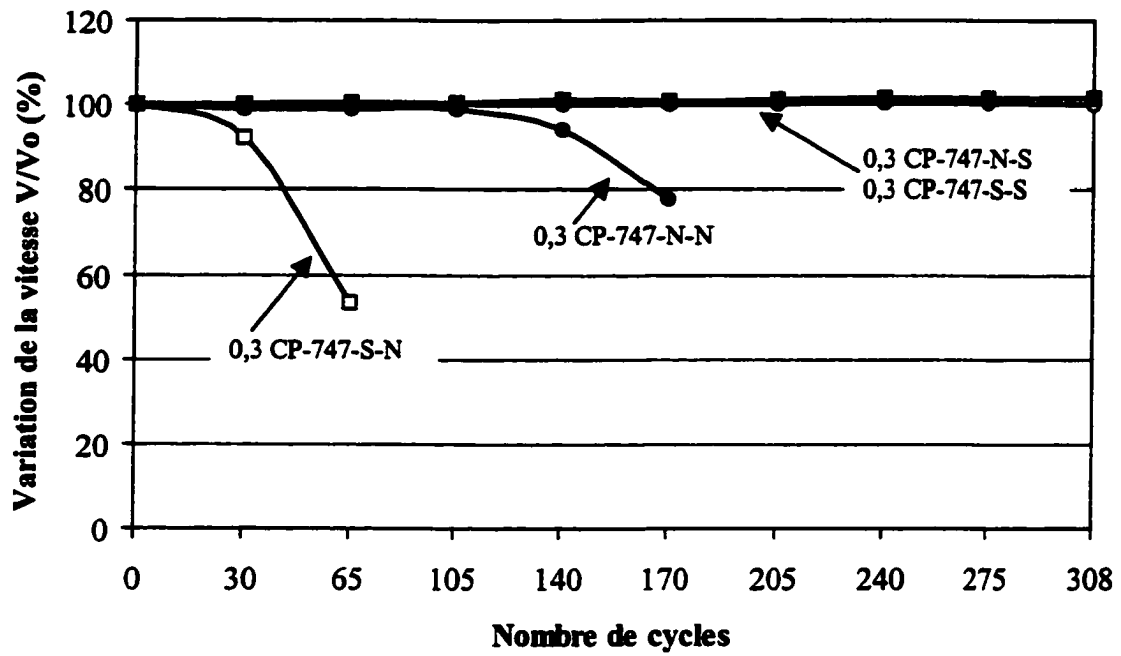


Figure 5.12 – Variation de la vitesse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

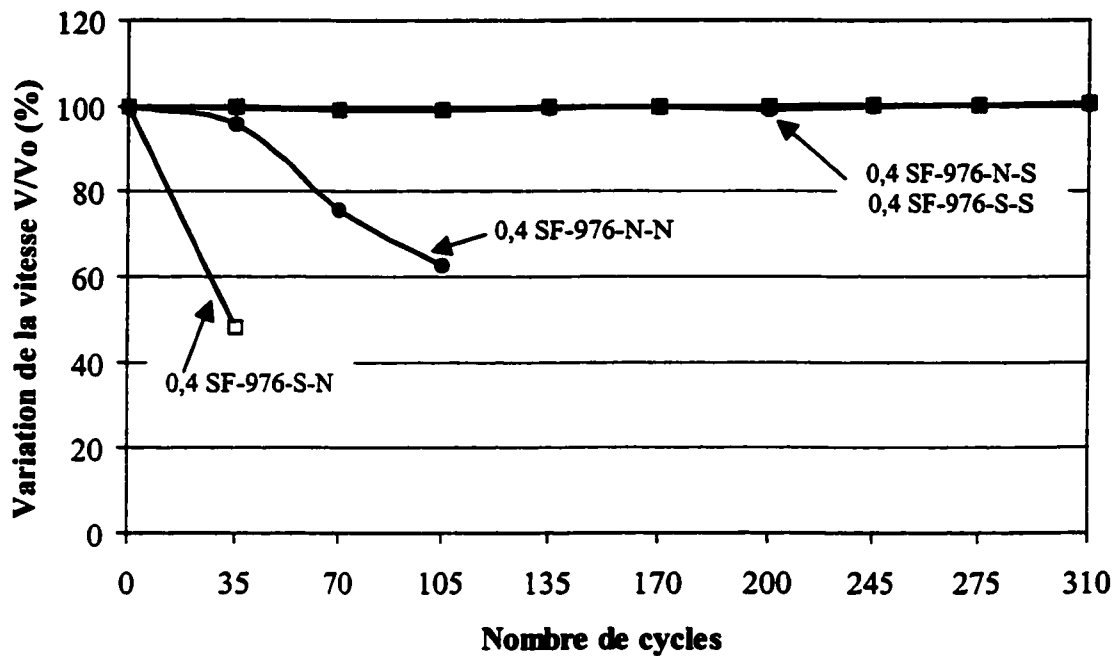
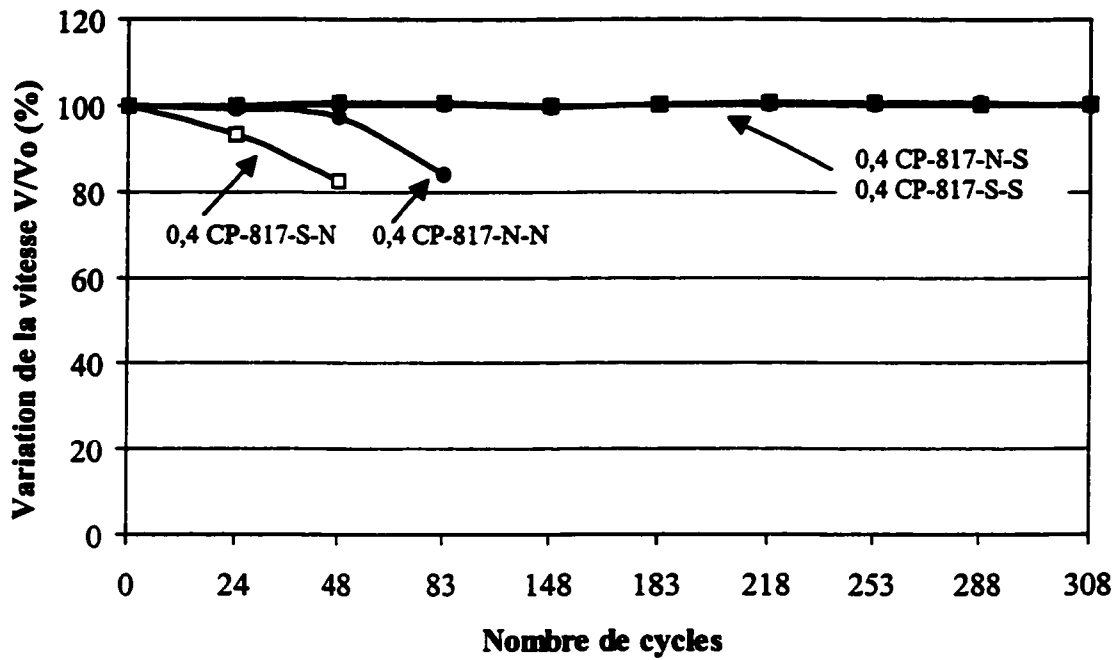


Figure 5.13 – Variation de la vitesse des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

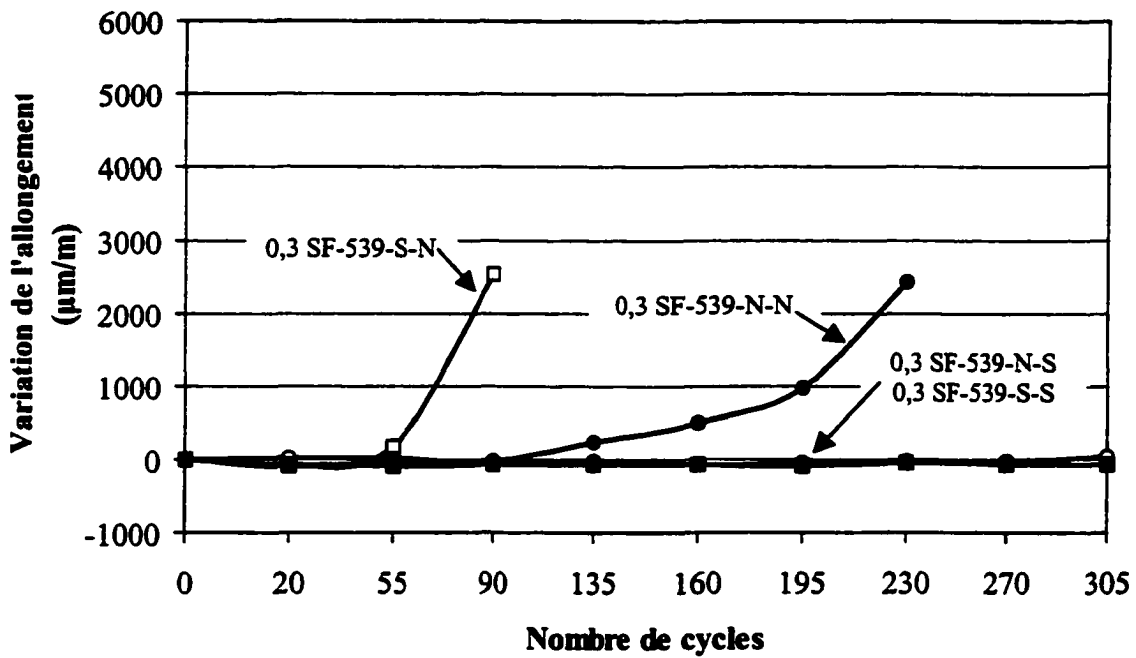
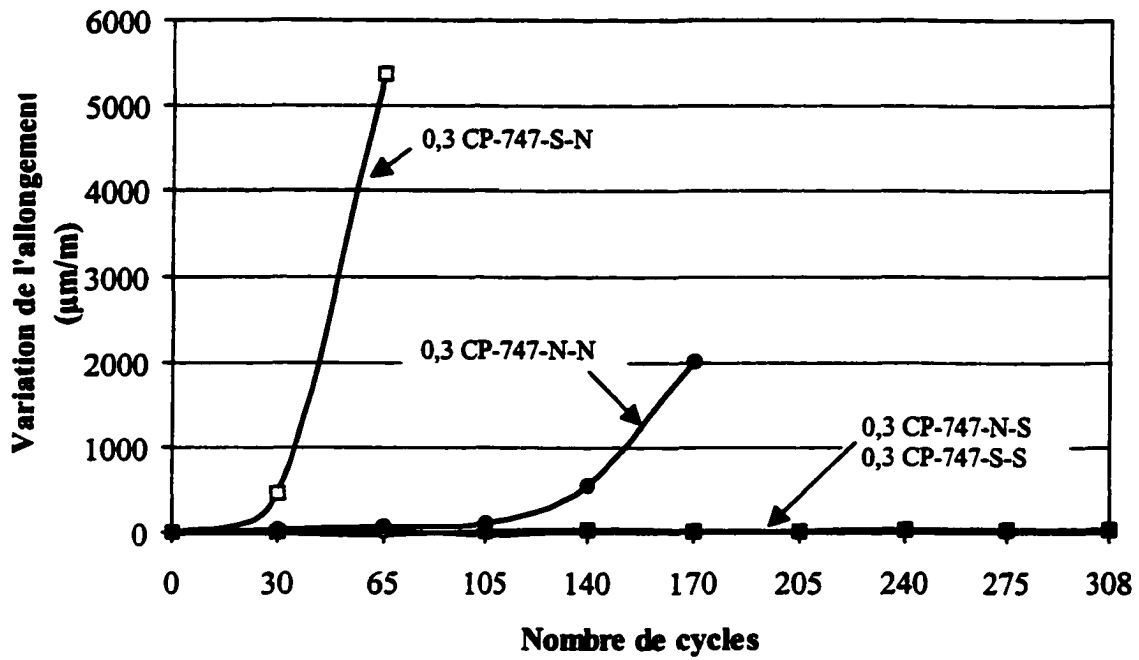


Figure 5.14 – Variation de l’allongement des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

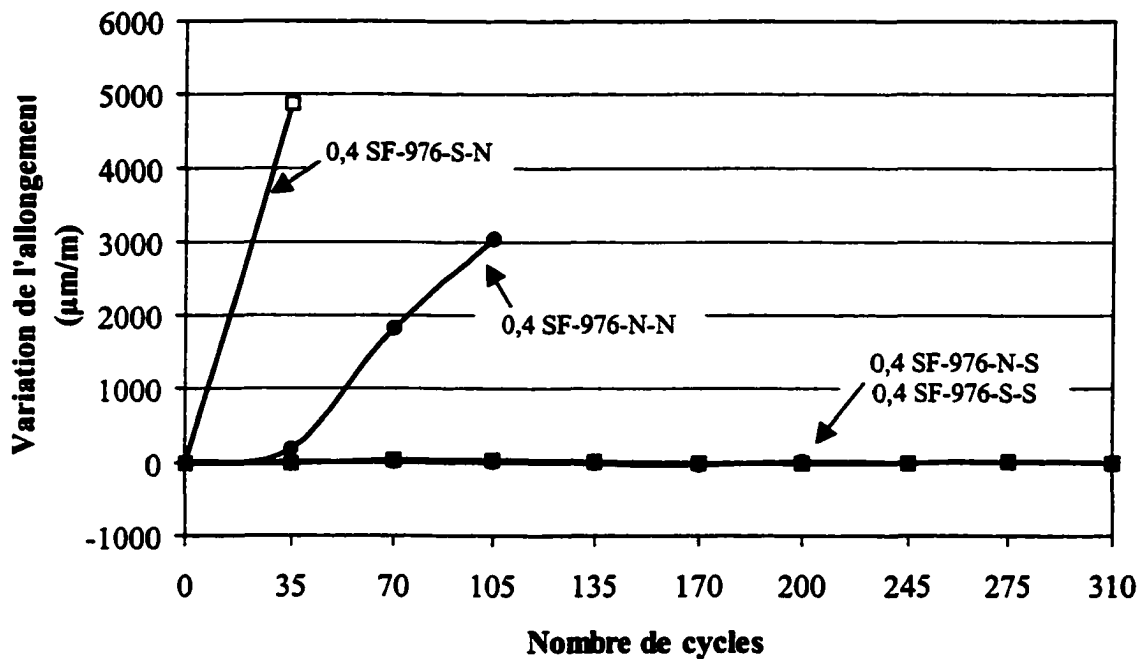
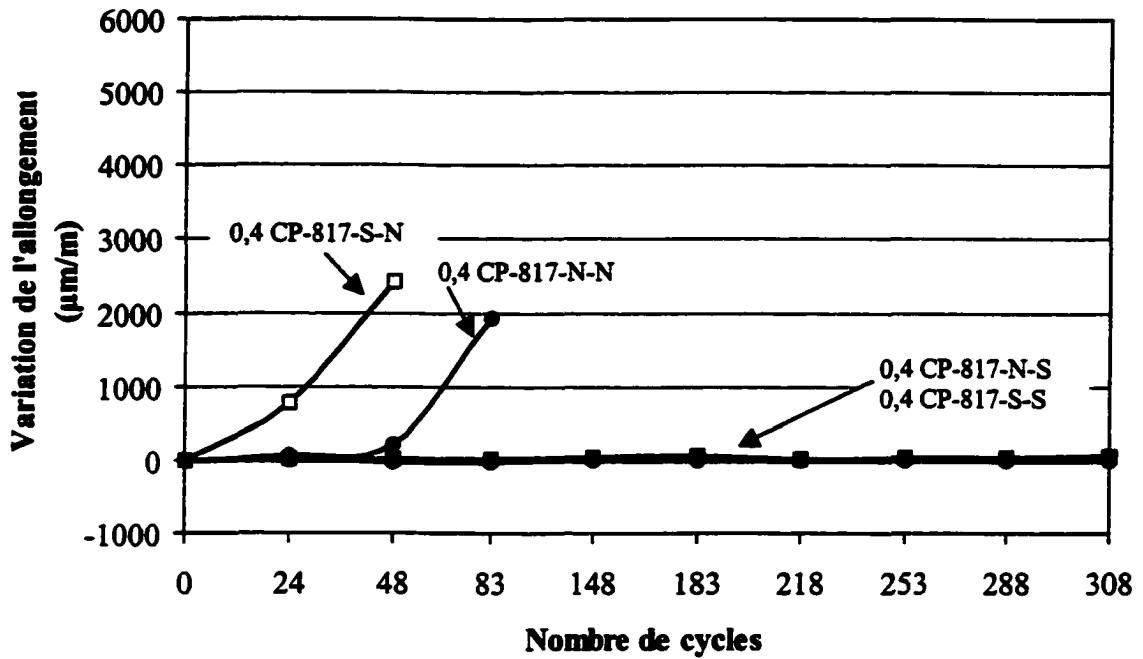


Figure 5.15 – Variation de l'allongement des échantillons de gel-dégel lors des cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

Les courbes d'allongement des figures 5.14 et 5.15 confirment essentiellement les conclusions dégagées lors de l'analyse des variations de masse et de vitesse. On constate à nouveau que le scellement lors du gel a une influence majeure sur le comportement au gel des bétons. En effet, le scellement lors du gel fait en sorte que même les bétons sans air entraîné ($E/L = 0,40$ et $0,30$) sont alors en mesure de résister à 300 cycles de gel-dégel.

Le type de scellement lors du mûrissement influence aussi la tenue au gel mais dans une moindre mesure. Cependant, on trouve à nouveau que le scellement durant le mûrissement a pour effet de diminuer légèrement la durabilité car les bétons scellés lors du mûrissement (et non scellés lors du gel) se sont toujours détruits plus rapidement que les bétons non scellés lors du mûrissement.

5.3.3 Évolution des propriétés des témoins

Nous avons fabriqué des éprouvettes témoins pour chaque combinaison de types de scellement lors du mûrissement et lors du gel. Ces éprouvettes témoins ont d'abord subi un mûrissement scellé ou non scellé, puis, au lieu d'être soumises au gel, elles ont été conservées soit dans l'eau, soit dans un état scellé dans une chambre à température et humidité contrôlées.

Cette section présente les variations de masse des éprouvettes témoins scellées ou non scellées durant une période de temps correspondant à environ 300 cycles de gel-dégel. Ces résultats permettront d'évaluer les variations de masse au cours du temps des éprouvettes n'ayant pas subi de cycles de gel-dégel. Les résultats détaillés des variations de masse sont présentés dans l'annexe E.

5.3.3.1 Variations de la masse

Les courbes des figures 5.16 et 5.17 montrent clairement que l'absorption d'eau des éprouvettes témoins dépend fortement du type de mûrissement (scellé ou non scellé). Les échantillons ayant subi un mûrissement scellé pendant 14 jours ont absorbé une plus grande quantité d'eau après avoir été immergées dans l'eau par la suite. On remarque la même tendance quels que soient le rapport E/L ou la teneur en fumée de silice. Les éprouvettes témoins ayant subi un mûrissement scellé sont probablement moins hydratées en raison de la faible disponibilité de l'eau. La pâte possède donc une porosité plus ouverte et plus connectée qui favorise une plus grande absorption d'eau par la suite.

Les figures 5.16 et 5.17 montrent aussi que les éprouvettes témoins ayant subi un mûrissement dans l'eau (non scellé) pendant 14 jours absorbent relativement peu d'eau lorsqu'elles sont maintenues dans l'eau pendant un temps correspondant à environ 300 cycles de gel. Cette plus faible variation de masse peut être due à deux facteurs. Premièrement, l'hydratation a probablement favorisé une microstructure plus dense et plus imperméable. Deuxièmement, ces éprouvettes ont déjà pu commencer à absorber de l'eau lors de leur mûrissement, ce qui a probablement limité leur absorption par la suite. Globalement, on peut montrer que, sur une longue période, les éprouvettes ont absorbé à peu près la même quantité d'eau totale quel que soit le type de mûrissement subi pendant les 14 premiers jours.

Pour un type de liant donné, la quantité d'eau absorbée a plutôt tendance à augmenter légèrement avec l'augmentation du rapport E/L. Ce phénomène est particulièrement évident dans le cas des éprouvettes témoins mûries à l'état scellé pendant 14 jours. Il est probable que la microstructure plus ouverte et la plus grande quantité d'hydrates formés dans les pâtes avec un E/L de 0,40 aient favorisé cette plus grande absorption.

La fumée de silice possède aussi certain effet sur les variations de la masse. Pour chaque rapport E/L, la fumée de silice diminue la quantité d'eau absorbée quel que soit le type de mûrissement.

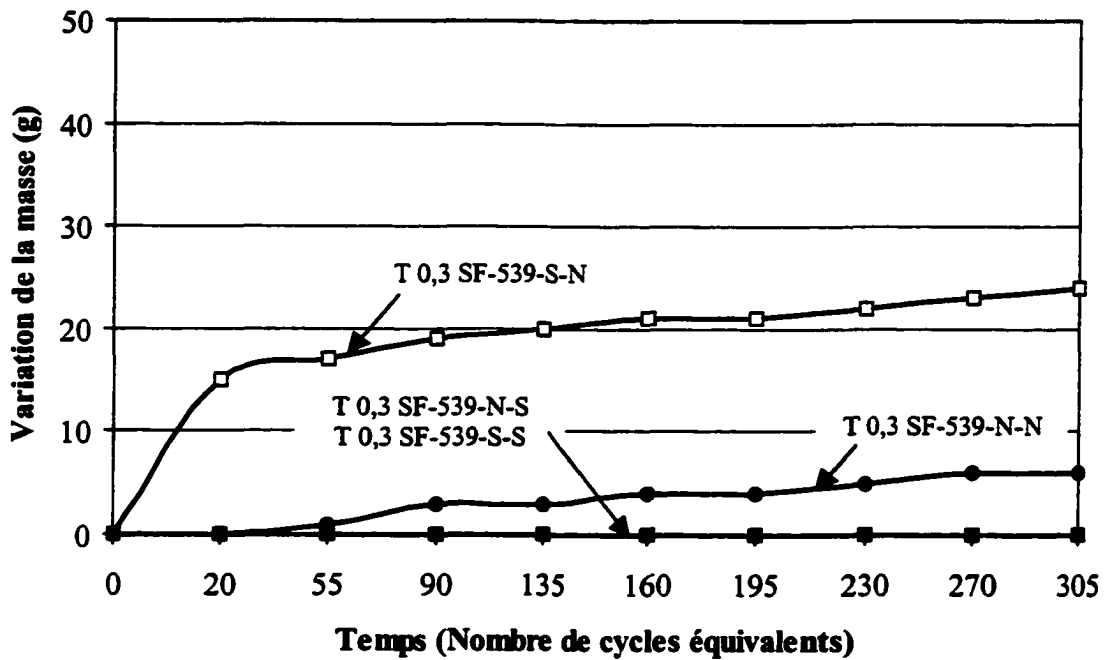
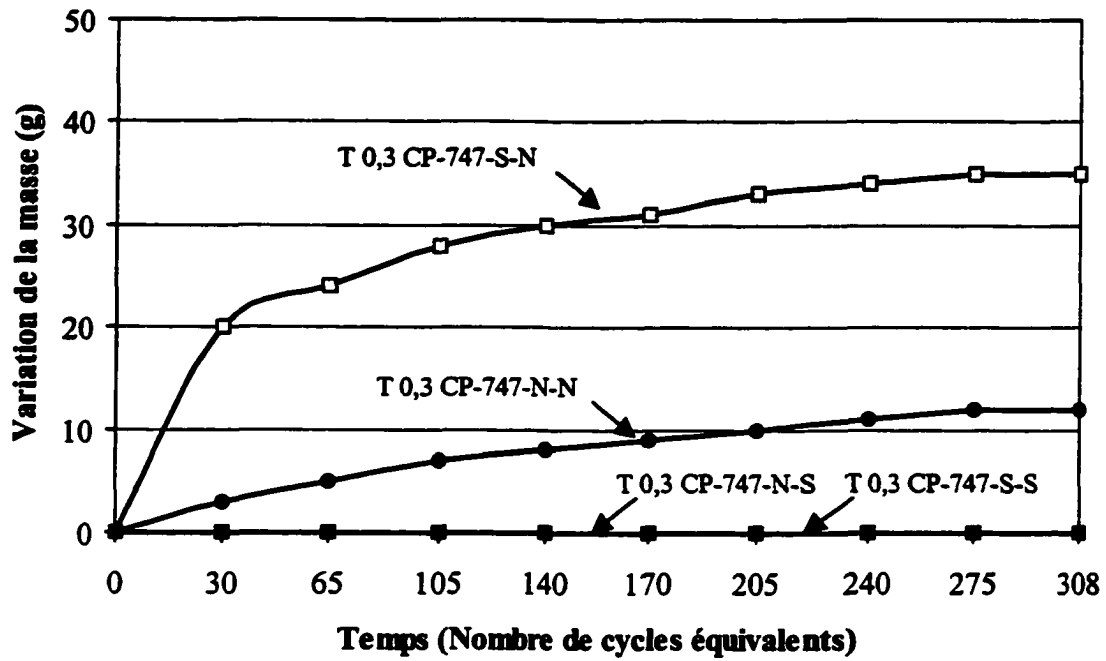


Figure 5.16 – Variation de la masse des témoins lors du temps correspondant aux 300 cycles de gel-dégel (Bétons : 0,3 CP-747 et 0,3 SF-539)

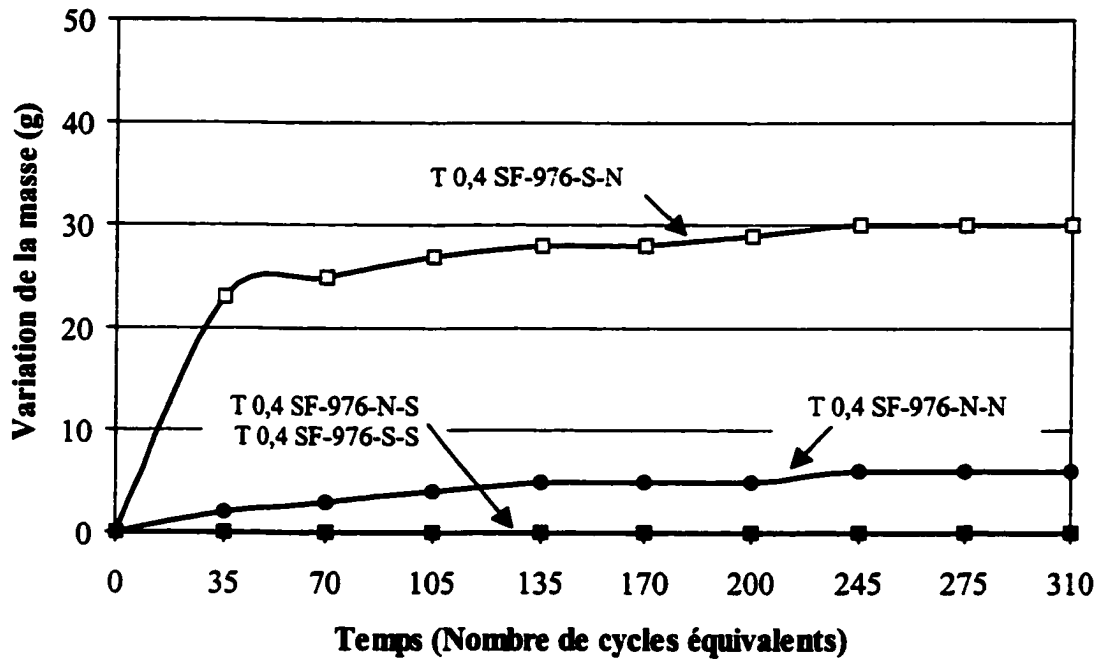
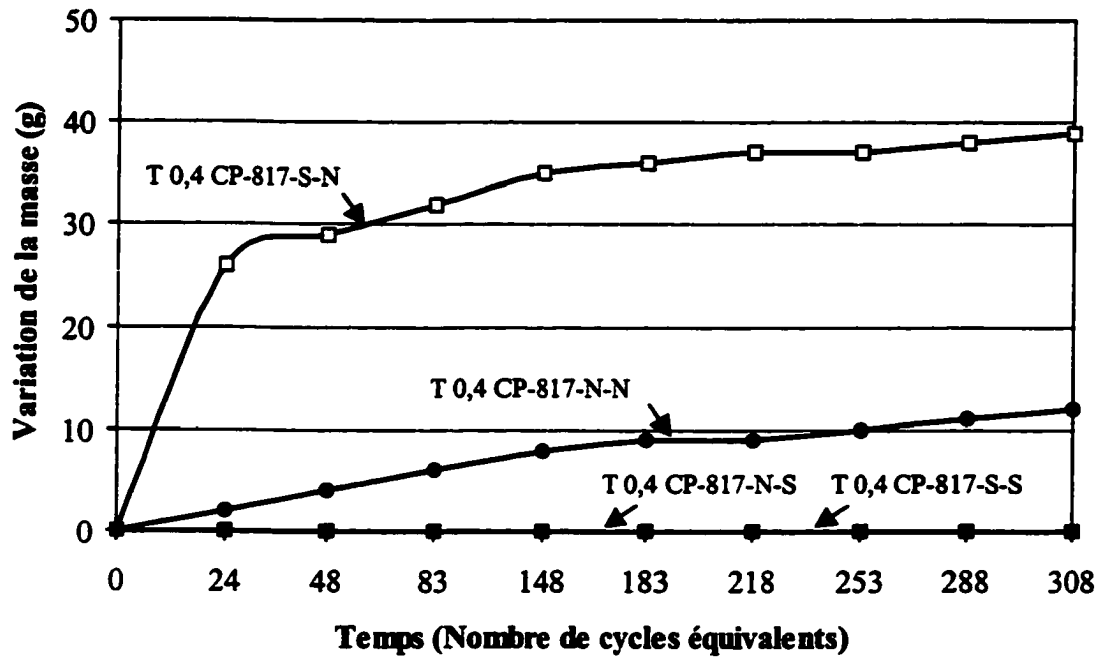


Figure 5.17 – Variation de la masse des témoins lors du temps correspondant aux 300 cycles de gel-dégel (Bétons : 0,4 CP-817 et 0,4 SF-976)

5.3.4 Synthèse

Les figures 5.18 à 5.21 présentent les relations entre la variation de masse, le type de mûrissement et la résistance aux cycles de gel-dégel. Chaque figure est divisée en deux parties. La partie gauche présente la variation de masse durant le mûrissement et la partie droite présente la variation de masse durant les cycles de gel-dégel. Pour chaque courbe, on a indiqué le type de comportement au gel (DURABLE ou NON DURABLE) en se basant sur les résultats des mesures d'allongement et de vitesse des ondes sonores (Chapitre 4).

Globalement, on constate d'abord que les courbes obtenues ont sensiblement la même allure quels que soient le rapport E/L ou la teneur en fumée de silice. Cette première analyse suggère donc que l'influence du type de mûrissement (scellé vs non-scillé) est à peu près la même quel que soit le type de béton étudié.

Les courbes des figures 5.18 à 5.21 montrent clairement que le type de scellement, avant et pendant les cycles de gel-dégel, est un paramètre clé gouvernant la résistance aux cycles de gel-dégel des bétons ordinaires et des BHP sans air entraîné.

Considérons d'abord le cas des éprouvettes soumises à un mûrissement non scillé avant le début des cycles de gel-dégel (1 jour dans le moule et 13 jours dans l'eau). Lors du mûrissement, toutes ces éprouvettes ont d'abord absorbé une certaine quantité d'eau due au remplissage des vides gazeux créés par la contraction Le Châtelier. Au terme de ce mûrissement, on peut penser que toutes ces éprouvettes sont alors dans un état très voisin de la saturation complète. Dans ce groupe d'éprouvettes, celles ayant été soumises au gel sans scellement de surface se sont graduellement détruites en moins de 300 cycles de gel-dégel alors que celles ayant été soumises au gel avec scellement de surface sont demeurées intactes après plus de 300 cycles de gel-dégel. Dans le cas des éprouvettes non scellées lors du gel, ce comportement était tout à fait prévisible compte tenu de l'absence d'air entraîné dans tous les bétons étudiés. Le très bon comportement des bétons sans air entraîné soumis au gel en condition scellée est plus surprenant et suggère que l'absorption d'eau lors des cycles a une influence majeure sur le comportement au

gel des bétons sans air entraîné. Ces résultats montrent notamment que des bétons sans air entraîné (et initialement saturés) peuvent être néanmoins durables au gel, à condition d'empêcher la pénétration d'eau externe lors des cycles de gel-dégel.

Considérons maintenant le cas des éprouvettes soumises à un mûrissement scellé avant le début des cycles de gel-dégel. L'absence d'apport d'eau externe lors du mûrissement a probablement favorisé une plus grande autodessiccation interne tout en ralentissant la cinétique d'hydratation par la suite. Juste avant d'être soumis aux premiers cycles de gel-dégel, ce groupe d'éprouvettes possédait vraisemblablement une porosité plus importante, plus ouverte et non complètement saturée. Parmi ce groupe d'éprouvettes, on observe à nouveau que celles ayant été soumises au gel sans scellement de surface se sont rapidement détruites alors que les éprouvettes scellées sont demeurées intactes après plus de 300 cycles de gel. En l'absence de scellement lors du gel, toutes les éprouvettes absorbent rapidement une grande quantité d'eau externe dès les 50 ou 100 premiers cycles (Figure 5.18 à 5.21). Cette grande absorption d'eau est due à une porosité plus ouverte et moins saturée de la pâte. Dès les premiers cycles de gel, les éprouvettes soumises à ces conditions de scellement possèdent donc une quantité d'eau gelable plus importante qui a pour effet de diminuer leur durabilité au gel. Les éprouvettes scellées lors du mûrissement et lors du gel ont toutes bien résisté au gel car, même si leur porosité est plus importante et plus ouverte, leur niveau de saturation plus faible (lors du gel), contribue vraisemblablement à les protéger contre la destruction par le gel.

En résumé, cette série d'essais démontre clairement que le scellement de surface lors du mûrissement a un effet légèrement défavorable alors que le scellement de surface lors des cycles de gel a un effet très favorable sur la tenue au gel des bétons ordinaires et des BHP.

La comparaison des courbes des figures 5.18 à 5.21 montre aussi que, pour une condition de scellement donnée, les éprouvettes en béton ordinaire ($E/L=0,40$) se détruisent systématiquement plus rapidement que celles en BHP ($E/L=0,30$). L'influence

de la fumée de silice est variable en fonction du rapport E/L. Celle-ci a pour effet ralentir la destruction dans le cas des E/L faibles (0,30) alors qu'elle a plutôt tendance à accélérer légèrement la destruction dans le cas des E/L plus élevé (0,40).

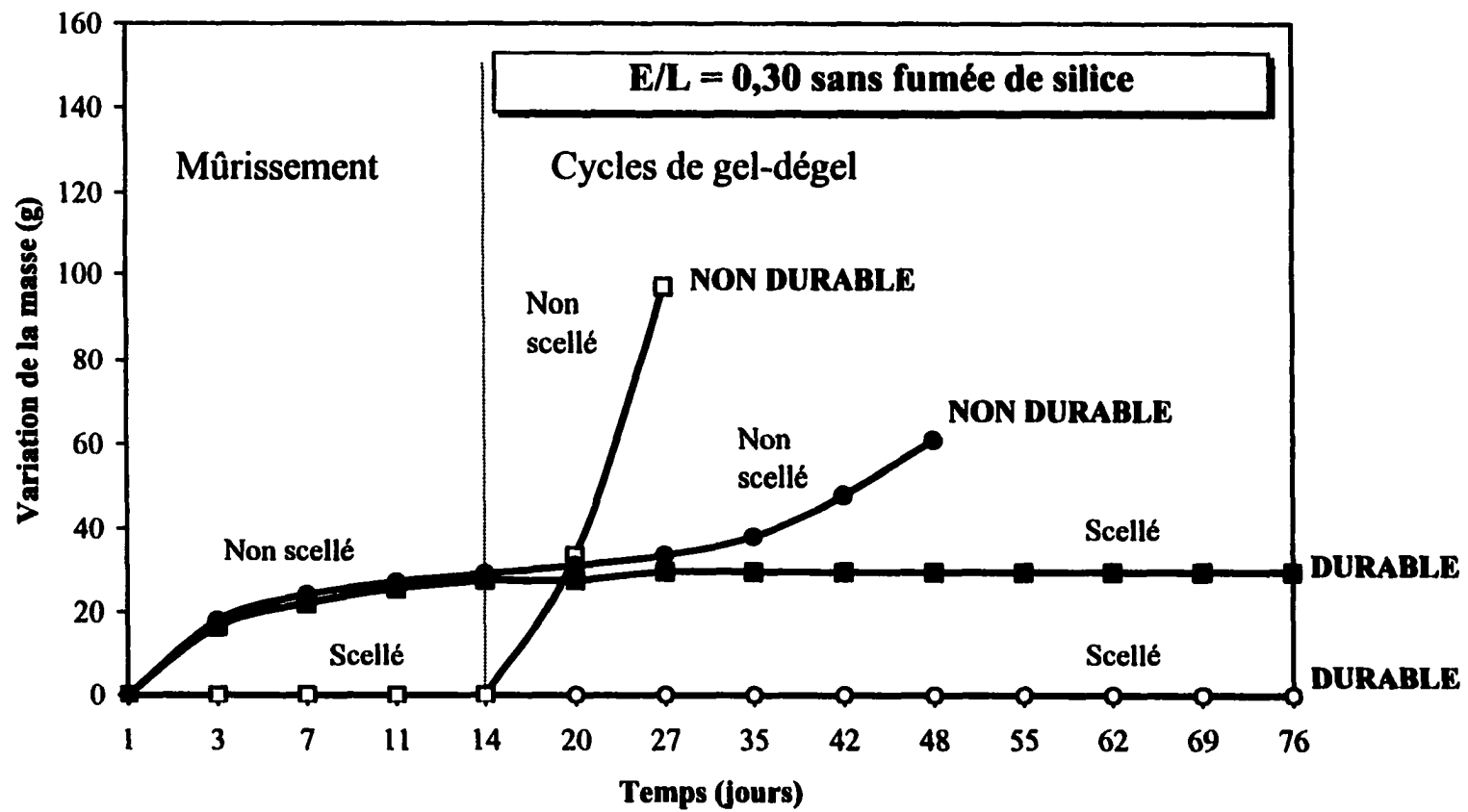


Figure 5.18 - Variations de la masse du béton 0,3 CP pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel

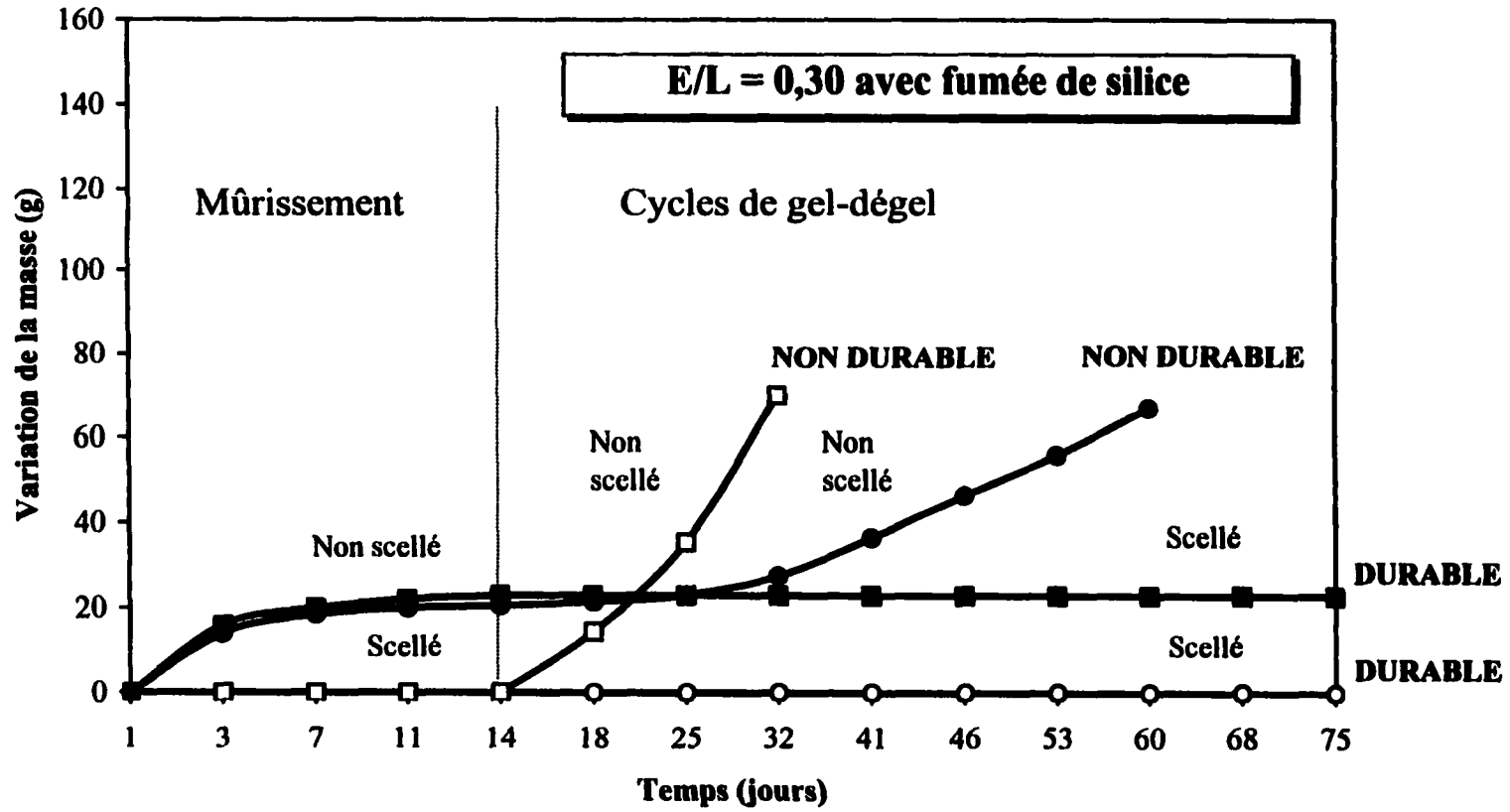


Figure 5.19 - Variations de la masse du béton 0,3 SF pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel

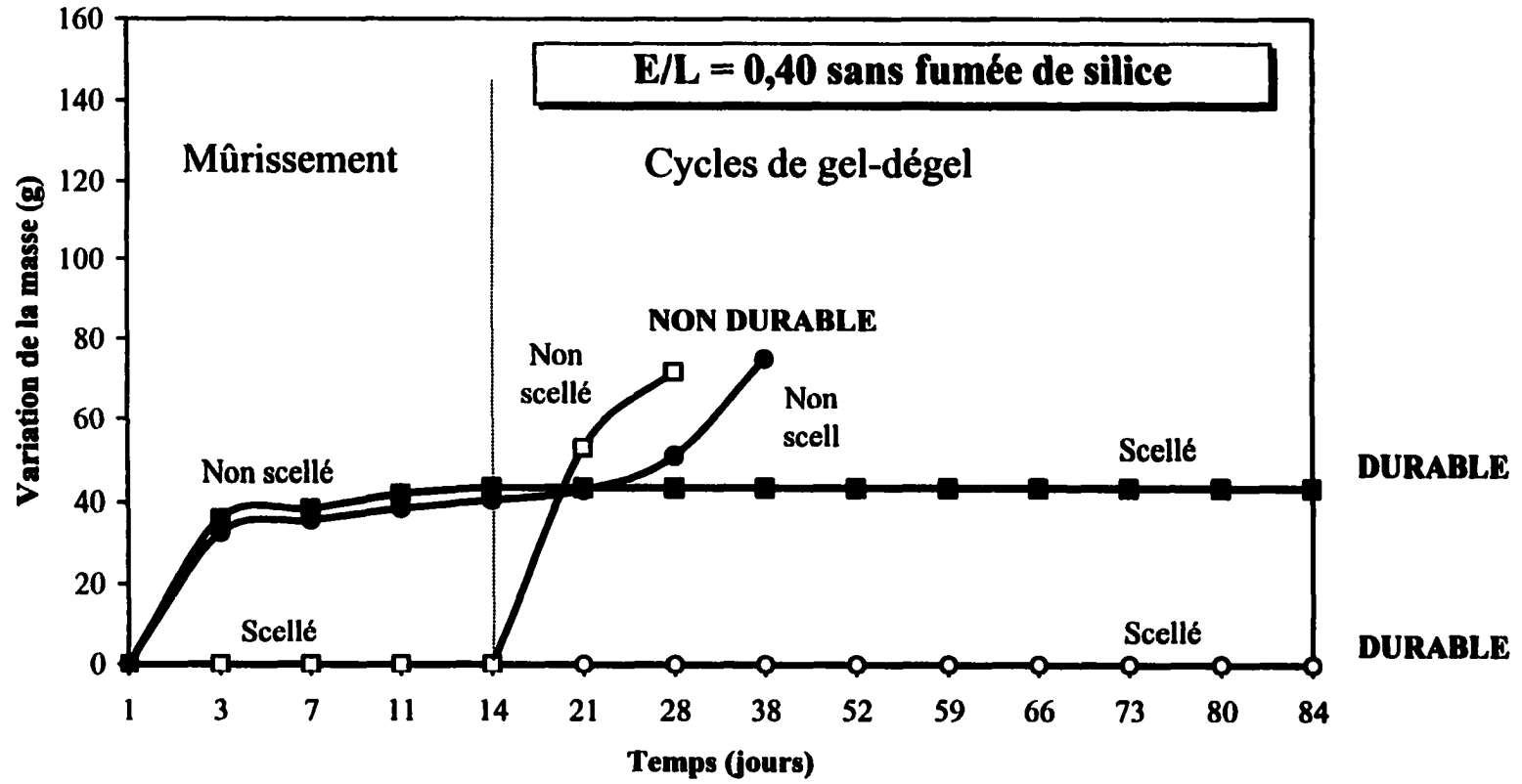


Figure 5.20 - Variations de la masse du béton 0,4 CP pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel

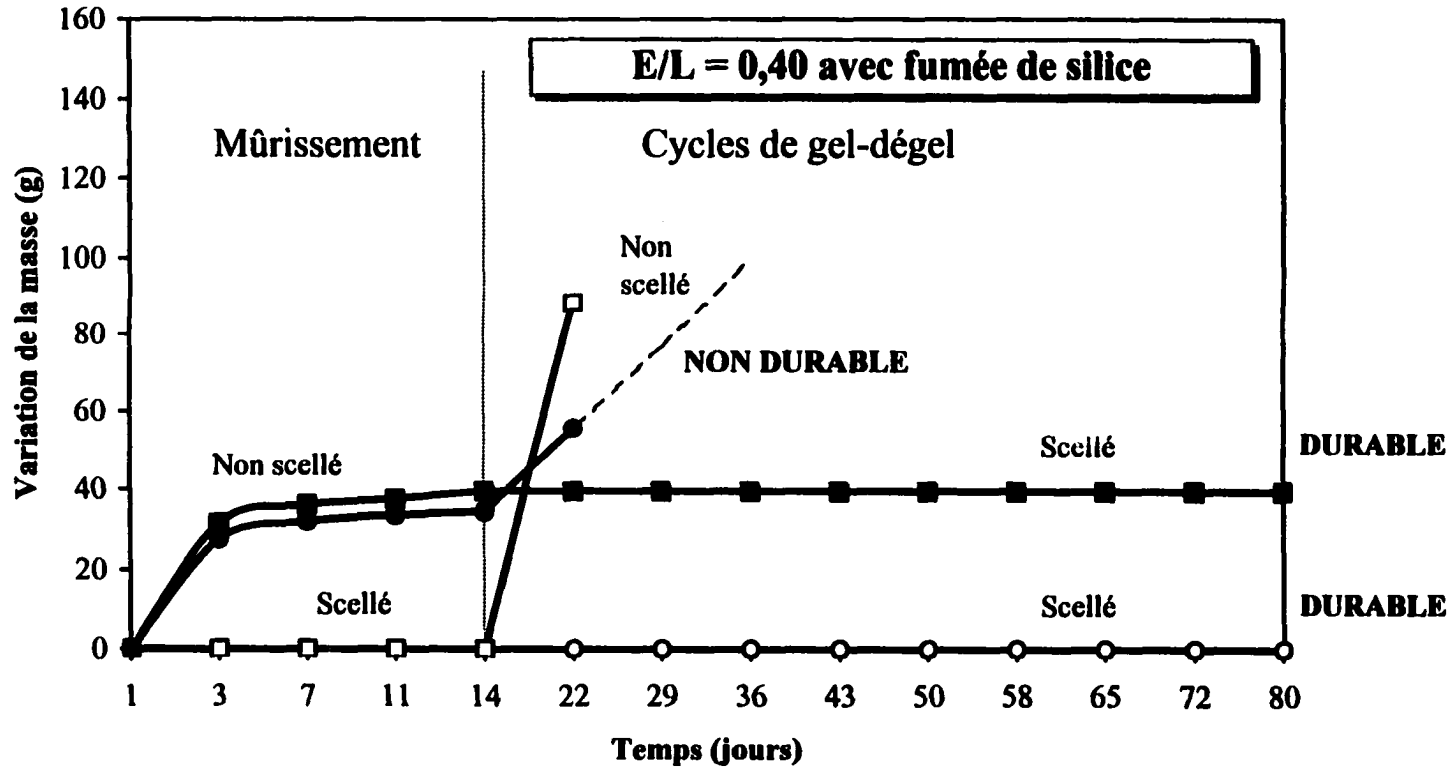


Figure 5.21 - Variations de la masse du béton 0,4 SF pendant le mûrissement et les cycles de gel-dégel

5.4 Degré de saturation

Le degré de saturation est un paramètre important gouvernant la résistance au gel des bétons. La connaissance du degré de saturation d'un béton avant son exposition au gel pourrait permettre d'estimer sa sensibilité au gel. Bien entendu, ce n'est pas le seul facteur qui gouverne la résistance au gel, mais, nous avons voulu déterminer de quelle manière ce facteur affecte la résistance au gel des bétons.

5.4.1 Calcul du degré de saturation

Le degré de saturation a été déterminé pour tous les bétons de la série I. Nous l'avons déterminé avant et après les cycles de gel-dégel selon la procédure expliquée au Chapitre 4. Rappelons que le calcul du degré de saturation est basé sur les hypothèses suivantes :

- Toute la porosité du sable et du gros granulat est complètement remplie d'eau lors de la saturation sous vide;**
- Tous les pores du sable et du gros granulat sont complètement asséchés lors du séchage à l'étuve ($T = 105\text{ °C}$);**
- 25 % du volume des bulles d'air est remplis par l'eau lors de la saturation sous vide.**

Quand nous parlons des bulles d'air nous pensons aux vides remplis d'air entrappé car nous n'avons pas entraîné d'air dans nos bétons. En général, les vides d'air entrappé ont un grand diamètre. En contact avec de l'eau ils se saturent plus ou moins facilement. Lors de l'essai de saturation sous vide, il est logique de croire qu'un certain volume d'eau est forcé à l'intérieur de ces vides. En supposant que, suite à la saturation sous vide, 25 % du volume des bulles d'air est occupé par de l'eau, on trouve que le degré de saturation des bétons après 14 jours de mûrissement dans l'eau est compris entre 98 % et 102 %. L'hypothèse, selon laquelle 25 % du volume d'air est rempli par l'eau lors de la saturation sous vide, permet donc d'obtenir un degré de saturation des pores capillaires d'environ 100 %, ce qui nous semble à priori logique.

Le degré de saturation des bétons avant et après les cycles de gel-dégel est déterminé en utilisant la formule suivante :

$$DS (\%) = \frac{m_h - m_{sec}}{m_{sss} - m_{sec}} * 100 \quad (5.1)$$

m_h masse humide de l'échantillon;

m_{sec} masse sèche de l'échantillon (après le séchage à l'étuve à 105 °C);

m_{sss} masse de l'échantillon à l'état saturé superficiellement sec (après la saturation sous vide).

5.4.2 Degré de saturation à la fin du mûrissement

Dans cette partie nous présenterons les résultats sous forme de tableaux et de graphiques. Le tableau 5.4 et la figure 5.22 présentent les degrés de saturation de la porosité capillaire avant les cycles de gel-dégel. Le calcul exact du degré de saturation est présenté dans l'annexe F.

TABLEAU 5.4 – Degrés de saturation avant les cycles de gel-dégel

| Béton | | | Degré de saturation de la porosité capillaire (%) | | | | | Écart type |
|-------|---------------------|-------------|---|----------|----------|----------|---------|------------|
| E/L | Fumée de silice (%) | Mûrissement | Mesure 1 | Mesure 2 | Mesure 3 | Mesure 4 | Moyenne | |
| 0,30 | 0 | Eau | 102 | 100 | 101 | 100 | 101 | 1,2 |
| | | Scellé | 90 | 93 | 82 | 86 | 88 | 4,9 |
| | 8 | Eau | 98 | 97 | 98 | 97 | 98 | 0,5 |
| | | Scellé | 89 | 89 | 92 | 87 | 89 | 2,0 |
| 0,40 | 0 | Eau | 103 | 103 | 101 | 100 | 102 | 1,5 |
| | | Scellé | 86 | 84 | 86 | 82 | 84 | 2,0 |
| | 8 | Eau | 101 | 100 | 101 | 104 | 101 | 1,8 |
| | | Scellé | 85 | 90 | 83 | 83 | 85 | 3,5 |

On remarque que les résultats présentés au tableau 5.4 sont assez reproductifs, surtout dans le cas des bétons mûris dans l'eau. Pour ces derniers, l'écart type est toujours inférieur à 2. Pour les bétons mûris scellés, l'écart type varie de 2 à 5 %. Nous pensons qu'une variabilité de 5 % est acceptable car la différence entre les degrés de saturation des bétons mûris dans l'eau et à l'état scellé est d'environ 15 %.

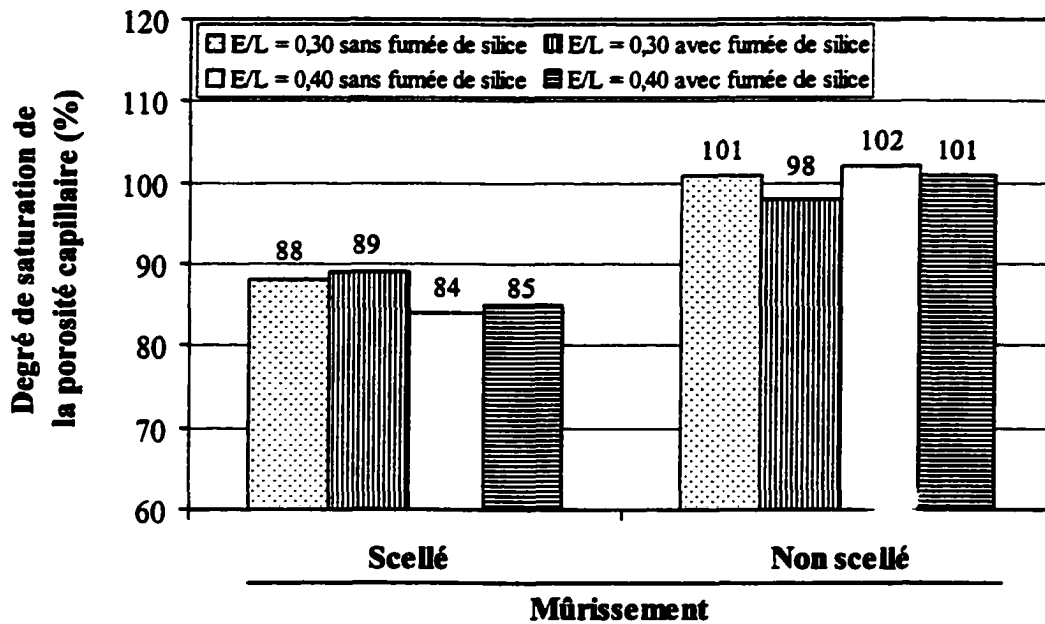


Figure 5.22 – Degrés de saturation avant les cycles de gel-dégel

Les résultats de la figure 5.22 montrent que toutes les éprouvettes ayant subi un mûrissement scellé ont un degré de saturation compris entre 84 et 89 %. Ce phénomène est vraisemblablement dû à la contraction Le Châtelier qui ne peut pas être compensée par l'absorption d'eau extérieure. On remarque aussi que l'effet du rapport E/L ou de la fumée de silice sur le degré de saturation est peu significatif.

La figure 5.22 montre que la porosité capillaire des bétons mûris dans l'eau est complètement saturée puisque les degrés de saturation sont compris entre 98 et 102 %. Il faut mentionner que un degré de saturation de 102 % n'a pas de signification physique. Cela découle de l'hypothèse de la saturation des bulles d'air lors de l'essai de saturation sous vide et aussi de la variabilité statistique de la mesure. Ces résultats laissent croire

que, dans le cas des bétons mûris dans l'eau, la contraction Le Châtelier est complètement compensée par l'absorption d'eau extérieure.

En résumé, on peut conclure que le scellement lors du mûrissement a pour effet de créer des vides gazeux dans la porosité capillaire. Ces vides correspondent à environ 15 % du volume total de la porosité capillaire.

5.4.3 Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel

Le tableau 5.5 et la figure 5.23 présentent les résultats des mesures du degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel. Le calcul détaillé est présenté en annexe F. Comme dans le cas précédant, on remarque une assez bonne reproductibilité des résultats. On constate aussi que la variabilité des résultats est plus faible pour les bétons mûris dans l'eau que pour les bétons mûris scellés.

Rappelons que les degrés de saturation des bétons non scellés lors du gel ont été supposés à 100 % (Figure 5.23). En effet, ces bétons ont toujours été détruits avant la fin des cycles de gel-dégel et l'état avancé de destruction ne permettait pas le prélèvement d'échantillons pour l'essai de saturation sous vide.

Dans le cas des prismes scellés durant les cycles de gel-dégel, on constate que les degrés de saturation sont très voisins de ceux des prismes scellés durant le mûrissement (Figures 5.22 et 5.23). Ce phénomène est tout à fait logique car le scellement lors du gel ne permet pas ni l'absorption ni la perte d'eau. Cela confirme aussi l'efficacité de la technique de scellement utilisée lors des cycles de gel-dégel.

TABLEAU 5.5 – Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (gel-dégel scellé)

| Béton | | | | Degré de saturation de la porosité capillaire (%) | | | | | | | | | |
|-------|---------------------|-------------|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|------------|
| E/L | Fumée de silice (%) | Mûrissement | Gel-dégel * | Mesure 1 | Mesure 2 | Mesure 3 | Mesure 4 | Mesure 5 | Mesure 6 | Mesure 7 | Mesure 8 | Moyenne | Écart type |
| 0,30 | 0 | Eau | Scellé | 101 | 97 | 100 | 95 | 100 | 100 | 102 | 100 | 99 | 2,2 |
| | | Scellé | Scellé | 87 | 86 | 80 | 92 | 86 | 88 | 89 | 90 | 87 | 3,5 |
| | 8 | Eau | Scellé | 100 | 98 | 95 | 98 | 96 | 97 | 101 | - | 98 | 2,3 |
| | | Scellé | Scellé | 90 | 88 | 88 | 82 | 83 | 92 | 87 | - | 87 | 3,7 |
| 0,40 | 0 | Eau | Scellé | 100 | 102 | 98 | 101 | 100 | 101 | 103 | 100 | 101 | 1,5 |
| | | Scellé | Scellé | 91 | 87 | 96 | 91 | 86 | 82 | 83 | 90 | 88 | 4,6 |
| | 8 | Eau | Scellé | 98 | 96 | 99 | 100 | 99 | 100 | 101 | 100 | 99 | 1,4 |
| | | Scellé | Scellé | 90 | 90 | 85 | 88 | 85 | 89 | 84 | 92 | 88 | 2,8 |

* Il n'a pas été possible de déterminer expérimentalement le degré de saturation des bétons soumis au gel-dégel en condition non-scellé car ceux-ci se sont tous détruits avant la fin de l'essai.

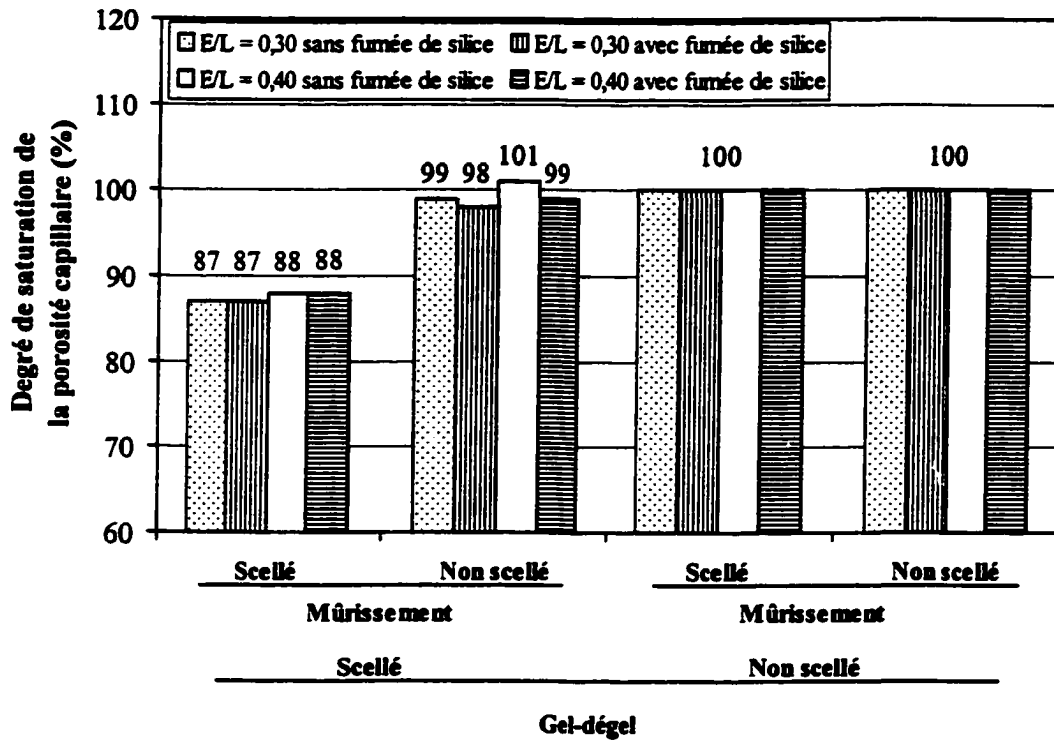


Figure 5.23 – Degrés de saturation après les cycles de gel-dégel

5.5 Humidité relative interne

L'humidité relative interne est un autre facteur dont l'influence sur la résistance au gel a été étudiée. Plus précisément, nous voulons déterminer si la connaissance de l'humidité relative interne d'un béton pourrait être utile pour estimer sa résistance au gel à long terme. Dans le cadre de cette étude, nous avons déterminé l'humidité relative dans des prismes avant et après les cycles de gel-dégel et dans des blocs gardés sous l'eau pendant un an.

5.5.1 Humidité relative dans les prismes de gel-dégel

Des mesures d'humidité relative interne ont été effectuées dans tous les bétons de la série I. Dans les prismes de gel-dégel, l'humidité relative interne a été mesurée à l'aide de la sonde Novasina ms1. La procédure expérimentale a été présentée au Chapitre 4. Les mesures ont été effectuées à la fin du mûrissement et à la fin des cycles de gel-dégel.

5.5.1.1 Humidité relative à la fin du mûrissement

Les résultats des essais sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques. Toutes les valeurs de l'humidité relative ont été corrigées de manière à les exprimer par rapport une température de référence de 22 °C. Chaque résultat correspond à la moyenne de deux mesures. Le tableau 5.6 présente les humidités relatives avant les cycles de gel-dégel. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe G.

TABLEAU 5.6 – Humidités relatives internes dans les prismes avant les cycles de gel-dégel

| E/L | Béton | | Humidité relative interne (%) | | | Écart type |
|------|---------------------|-------------|-------------------------------|----------|---------|------------|
| | Fumée de silice (%) | Mûrissement | Mesure 1 | Mesure 2 | Moyenne | |
| 0,30 | 0 | Eau | 97,8 | 98,1 | 98 | 0,2 |
| | | Scellé | 94,6 | 95,7 | 95 | 0,7 |
| | 8 | Eau | 92,8 | 94,4 | 94 | 1,1 |
| | | Scellé | 93,5 | 94,1 | 94 | 0,4 |
| 0,40 | 0 | Eau | 96,9 | 97,8 | 97 | 0,7 |
| | | Scellé | 94,3 | 96,2 | 95 | 1,4 |
| | 8 | Eau | 90,8 | 92,9 | 92 | 1,5 |
| | | Scellé | 91,6 | 94,4 | 93 | 2,0 |

L'ensemble des résultats du tableau 5.6 est assez reproductif car les écarts types sont toujours inférieurs à 2. Lors des essais, nous avons cependant constaté une certaine dérive de la sonde pour des valeurs d'humidité relatives supérieures à environ 91 %. Dans ce cas, la valeur indiquée par la sonde est instable et a tendance à augmenter lentement en fonction du temps. Pour tenter d'obtenir des lectures les plus consistantes

possibles, nous avons alors choisi de ne retenir que la valeur indiquée après un temps de "stabilisation" de 30 minutes.

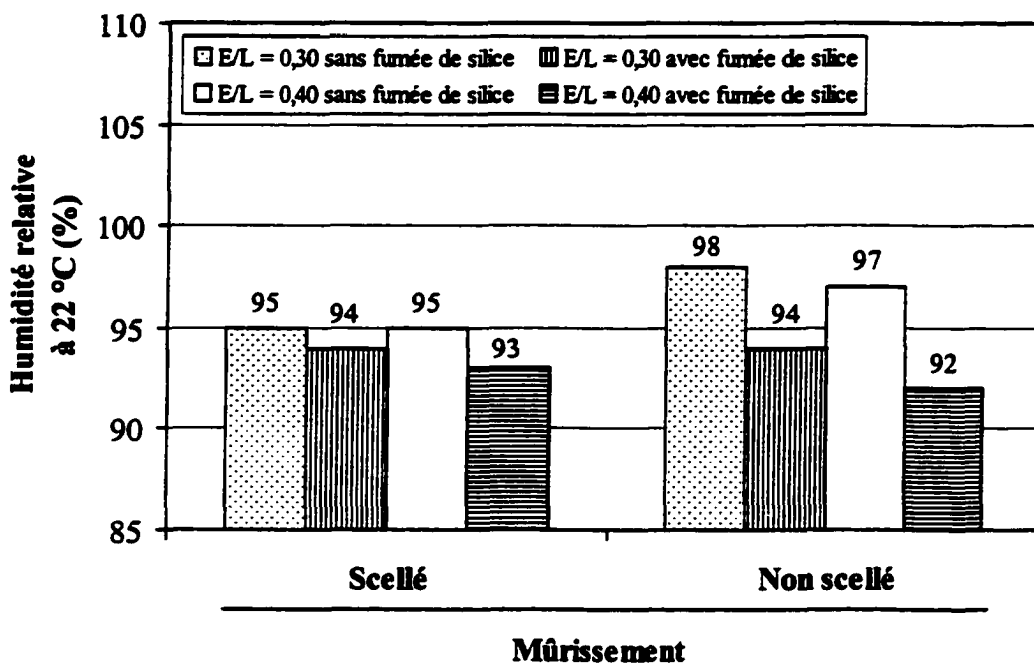


Figure 5.24 - Humidités relatives internes avant les cycles de gel-dégel

Globalement, les résultats de la figure 5.24 montrent que le mode de scellement a relativement peu d'effet sur l'humidité relative interne à l'intérieur des prismes de gel-dégel. En effet, l'humidité relative interne mesurée dans les prismes scellés est comprise entre 93 % et 95 % alors que celle mesurée dans les prismes non scellés est comprise entre 92 % et 98 %. Les résultats montrent que l'influence du type de scellement varie en fonction de la formulation du béton, plus particulièrement en fonction de la teneur en fumée de silice. Dans le cas des bétons sans fumée de silice, le mûrissement non scellé a produit des humidités relatives internes légèrement plus élevées que celles obtenues avec le mûrissement scellé. Ces résultats sont logiques compte tenu que le mûrissement non scellé permet la pénétration de l'eau externe qui sature les plus grands pores et contribue ainsi à augmenter l'humidité relative interne. Dans le cas des bétons avec fumée de silice, les résultats tendent à montrer que le mode de mûrissement n'a pas d'influence significative sur l'humidité relative interne car les variations obtenues, en fonction du

type de mûrissement, sont toutes inférieures à 1%. Dans ce cas, on peut formuler l'hypothèse que la présence de fumée de silice ait abaissé suffisamment la perméabilité de la pâte pour empêcher la pénétration de l'eau externe dans les prismes conservés dans l'eau. Cette hypothèse doit cependant être mise en doute compte tenu que les mesures du degré de saturation et de la variation de masse tendent plutôt à montrer que les prismes avec ou sans fumée de silice ont absorbé à peu près la même quantité d'eau lors du mûrissement non scellé.

Pour un mode de mûrissement donné, on remarque que le rapport E/L a relativement peu d'effet sur l'humidité relative dans les prismes de gel. Il est cependant surprenant de constater que l'humidité relative interne tend à être légèrement plus faible dans les bétons avec un E/L de 0,40. Selon la documentation scientifique, quand le rapport E/L augmente, le volume total et le diamètre des pores augmentent. D'après l'équation de Kelvin-Laplace, l'augmentation du rayon des pores entraîne une diminution de la courbure totale des ménisques formés, ce qui devrait, par conséquent, engendrer une augmentation de l'humidité relative. C'est plutôt le phénomène contraire qu'on observe avec les résultats de la figure 5.24.

Pour un mode de mûrissement donné, on trouve que la fumée de silice a systématiquement pour effet de diminuer l'humidité relative interne. Ces résultats sont, cette fois-ci, conformes à la théorie selon laquelle la fumée de silice contribue à abaisser l'humidité relative interne par son action physico-chimique qui contribue à raffiner la porosité capillaire.

En résumé, nous croyons qu'il faut analyser les mesures d'humidité relative dans les prismes de gel avec prudence car, d'une part, la faible dimension des éprouvettes a peut-être influencé le résultat de la mesure et, d'autre part, nous avons déjà constaté que la précision de la sonde diminue pour des valeurs supérieures à environ 91 %.

5.5.1.2 Humidité relative à la fin des cycles de gel-dégel

Le tableau 5.7 présente les humidités relatives dans les prismes à la fin des cycles de gel-dégel. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe G.

TABLEAU 5.7 – Humidités relatives internes à la fin des cycles de gel-dégel

| E/L | Béton | | | Humidité relative interne (%) | | | |
|------|---------------------|-------------|------------|-------------------------------|----------|---------|------------|
| | Fumée de silice (%) | Mûrissement | Gel-dégel* | Mesure 1 | Mesure 2 | Moyenne | Écart type |
| 0,30 | 0 | Eau | Scellé | 97,2 | 97,9 | 98 | 0,5 |
| | | Scellé | Scellé | 94,3 | 96,2 | 95 | 1,3 |
| | 8 | Eau | Scellé | 92,5 | 94,4 | 93 | 1,4 |
| | | Scellé | Scellé | 91,7 | 92,5 | 92 | 0,6 |
| 0,40 | 0 | Eau | Scellé | 98,1 | 96,8 | 98 | 0,9 |
| | | Scellé | Scellé | 92,5 | 96,7 | 95 | 3,0 |
| | 8 | Eau | Scellé | 93,7 | 93,0 | 93 | 0,6 |
| | | Scellé | Scellé | 92,2 | 93,5 | 93 | 0,9 |

* Il n'a pas été possible de déterminer expérimentalement l'humidité relative des bétons soumis au gel-dégel en condition non scellé car ceux-ci se sont tous détruits avant la fin de l'essai.

Comme pour la section précédente, on remarque à nouveau que les résultats sont reproductifs puisque les écarts sont inférieurs à 1,5 à l'exception d'un résultat possédant un écart type de 3. Dans le cas des humidités relatives supérieures à 91 %, la remarque précédente sur la précision et la dérive de la sonde est encore applicable.

Avant d'analyser les résultats de la figure 5.25, il est important de rappeler qu'on a, par hypothèse, fixé à 100 % la valeur de l'humidité relative dans les prismes soumis au gel-dégel en condition non scellée (moitié droite de la figure 5.25). Pour cette condition d'essai, on a supposé que tous les bétons étaient complètement saturés en raison de leur état de destruction très avancé (donc H.R. = 100 %).

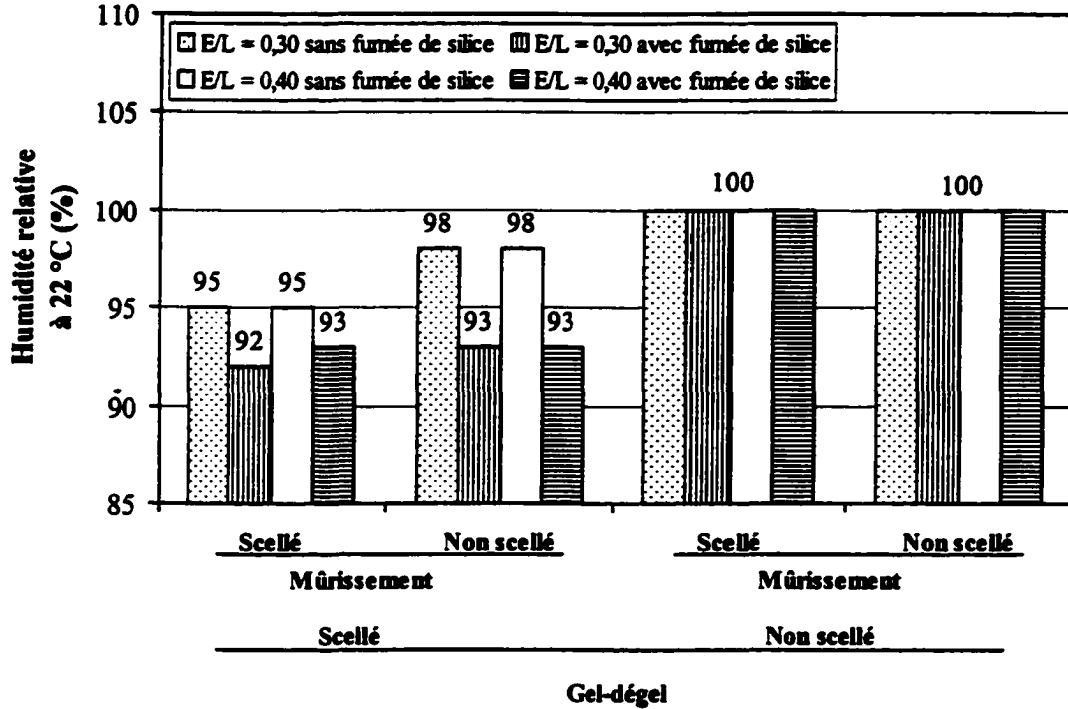


Figure 5.25 – Humidités relatives internes à la fin des cycles de gel-dégel

Globalement, les résultats de la moitié gauche de la figure 5.25 (prismes soumis au gel-dégel en condition scellée) sont très similaires à ceux de la figure 5.24. En effet, pour un type de mûrissement et une formulation donnés, l'écart entre les humidités relatives mesurées avant et après les cycles (gel-dégel en condition scellée) est toujours inférieur à 2 %. Ces résultats confirment l'efficacité de la technique de scellement utilisée lors des cycles de gel qui a effectivement été en mesure de bloquer les échanges d'eau avec l'extérieur. Ils tendent aussi à montrer que, malgré la variabilité de la sonde hygrométrique, celle-ci semble néanmoins donner des lectures consistantes pour une formulation de béton donnée (les deux séries de mesures ayant été prises à plus de 2 mois d'intervalle).

5.5.2 Humidité relative dans les blocs

Les blocs utilisés pour cette série de mesures ont été fabriqués avec les bétons de la série II ($E/L = 0,30$ avec et sans fumée de silice). Ils ont été immergés dans l'eau immédiatement après le démoulage et les mesures d'humidité relative ont été effectuées après 3, 7, 14, 28, 91 et 350 jours.

Le tableau 5.8 présente les mesures d'humidité relative et les moyennes en fonction du temps et de la teneur en fumée de silice. Les mesures ont été prises à 50 et 75 mm de profondeur. L'humidité relative a été obtenue à partir de la moyenne de 2 mesures. Tous les résultats ont été exprimés par rapport à une température de référence de 22 °C pour pouvoir comparer les valeurs obtenues dans les blocs et dans les prismes de gel-dégel. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe H.

Les figures 5.26 et 5.27 présentent les profils d'humidité relative interne en fonction du temps pour chaque béton étudié ($E/L = 0,30$ sans et avec fumée de silice).

Les courbes de la figure 5.26 montrent que l'humidité initiale à 3 jours est comprise entre 95 et 98 %. Après 350 jours, elle a diminué pour atteindre 88 %. Le phénomène d'autodessiccation est donc présent dans ce type de béton ($E/L = 0,30$ sans fumée de silice). On remarque que les valeurs obtenues à 75 mm de profondeur sont systématiquement inférieures à celles obtenues à 50 mm. Il est probable que l'autodessiccation est moins importante en surface à cause de la pénétration d'eau externe dans les premiers millimètres de béton sous la surface. On remarque aussi que l'humidité relative interne est stabilisée après environ 28 jours.

Les courbes de la figure 5.27 montrent que l'humidité relative à 3 jours est comprise entre 93 et 94 %. Après 350 jours elle a diminué graduellement pour atteindre 88 %. Le phénomène d'autodessiccation est donc présent dans ce type de béton ($E/L = 0,30$ avec fumée de silice). Les courbes obtenues à 50 et 75 mm sont pratiquement identiques. Les niveaux d'autodessiccation à 50 et 75 mm sont donc pareils. Il n'y a

pratiquement pas de pénétration d'eau externe à 50 ou 75 mm de profondeur. On constate à nouveau que l'humidité relative interne se stabilise après environ 28 jours.

La comparaison des courbes des figures 5.26 et 5.27 suggère que, à une échéance donnée, la fumée de silice tend à diminuer légèrement l'humidité relative donc à augmenter l'autodessiccation interne. Il y a cependant peu d'effet de fumée de silice sur l'humidité relative à long terme.

La faible perméabilité des BHP a pour effet de limiter la pénétration d'eau dans la peau. Même à 50 mm de profondeur la pâte n'est vraisemblablement pas saturée (H.R. < 88 %) après plus de 350 jours d'immersion dans l'eau. Ces résultats suggèrent que même à 50 mm de profondeur, on puisse pratiquement considérer que la pâte pourrait donc subir des cycles de gel-dégel en conditions quasi scellées (peu d'échanges avec l'extérieur).

TABLEAU 5.8 – Humidités relatives internes dans les blocs immergés sous l'eau

| Béton | | Temps de mesure (jours) | Humidité relative à 50 mm (%) | | | Humidité relative à 75 mm (%) | | |
|-------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|----------|---------|-------------------------------|----------|---------|
| E/L | Fumée de silice (%) | | Mesure 1 | Mesure 2 | Moyenne | Mesure 1 | Mesure 2 | Moyenne |
| 0 | | 3 | 97,0 | 97,8 | 97 | 94,5 | 95,7 | 95 |
| | | 7 | 90,1 | 90,9 | 91 | 88,3 | 88,9 | 89 |
| | | 14 | 90,4 | 90,3 | 90 | 88,3 | 89,2 | 89 |
| | | 28 | 89,7 | 89,4 | 90 | 88,6 | 89,0 | 89 |
| | | 91 | 88,5 | 88,9 | 89 | 88,7 | 88,8 | 89 |
| | | 350 | 88,5 | 88,8 | 89 | 88,3 | 88,6 | 88 |
| | | 0,30 | | 3 | 92,9 | 92,6 | 93 | 93,0 |
| 8 | | 7 | 91,3 | 91,9 | 92 | 91,3 | 91,4 | 91 |
| | | 14 | 89,6 | 88,6 | 89 | 88,9 | 88,2 | 89 |
| | | 28 | 87,1 | 89,4 | 88 | 87,1 | 89,5 | 88 |
| | | 91 | 87,8 | 88,2 | 88 | 87,7 | 88,3 | 88 |
| | | 350 | 88,0 | 87,8 | 88 | 87,8 | 87,8 | 88 |

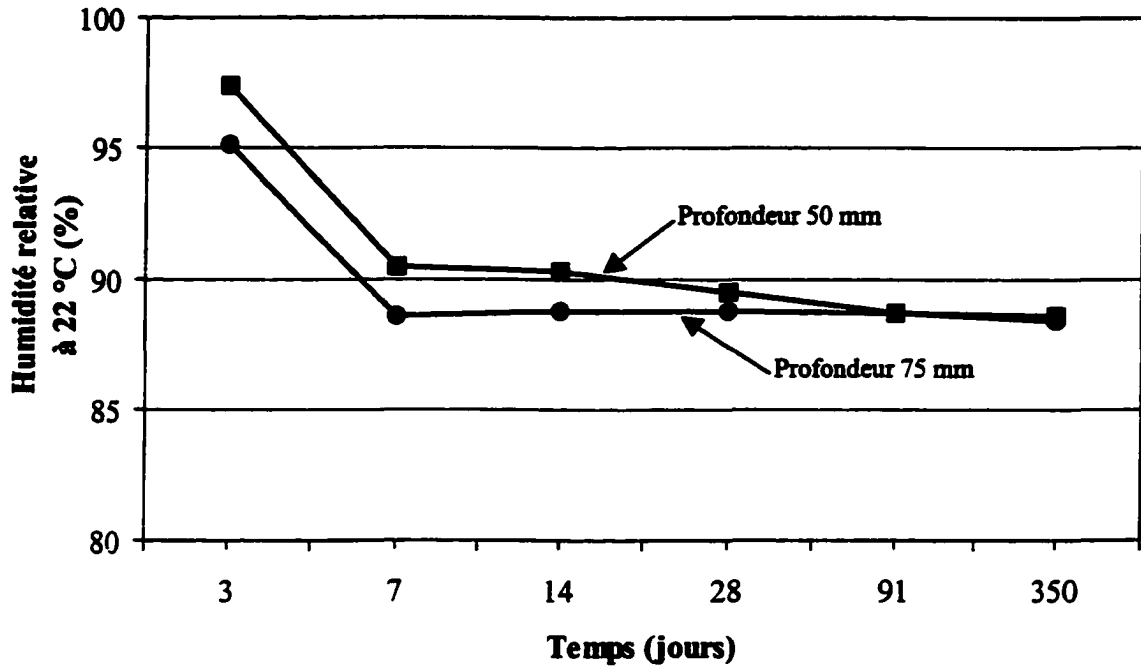


Figure 5.26 – Profil d’humidité relative interne dans le bloc en BHP sans fumée de silice (E/L = 0,30)

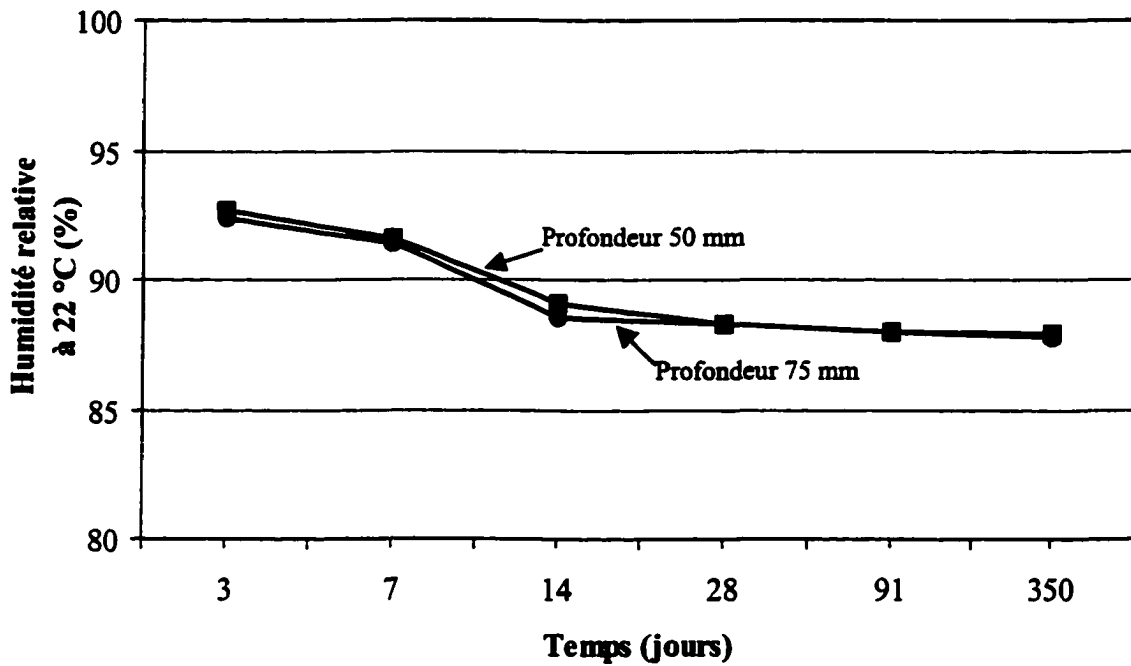


Figure 5.27 – Profil d’humidité relative interne dans le bloc en BHP avec fumée de silice (E/L = 0,30)

6. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente une analyse plus approfondie des résultats expérimentaux présentés au chapitre 5. On y retrouve notamment une étude des relations entre le degré de saturation, l'humidité relative, le mode de mûrissement et la résistance au gel des bétons de la série I. Nous analyserons aussi les relations entre la résistance au gel des BHP sans air entraîné en laboratoire et en conditions in situ sur la base des résultats expérimentaux de la série II.

6.1 Relation entre le degré de saturation et la résistance au gel des bétons sans air entraîné

Les figures 6.1 et 6.2 présentent les relations entre le degré de saturation, le type de scellement et la résistance au gel des bétons de la série I. Pour chaque condition d'essai, les degrés de saturation indiqués sur les figures 6.1 et 6.2 correspondent à la moyenne des degrés de saturation des bétons de la série I. Cette simplification a été faite pour clarifier la présentation, compte tenu qu'on a déjà constaté qu'il y avait peu de variations du degré de saturation en fonction du rapport E/L ou de la teneur en fumée de silice (Paragraphe 5.4).

Les résultats de la figure 6.1 montrent que les éprouvettes ayant subi un mûrissement non scellé ont débuté les cycles de gel avec une porosité capillaire complètement saturée (indépendamment du rapport E/L ou de la teneur en fumée de silice). Dans ces conditions, il était tout à fait prévisible que les éprouvettes soumises au gel sans scellement de surface (conformément à la norme ASTM C 666) se détruiraient au gel, compte tenu de l'absence d'air entraîné et de leur facteur d'espacement élevé ($\bar{L} > 500 \mu\text{m}$). Les résultats de la figure 6.1 sont néanmoins très intéressants dans la mesure où on constate que, malgré une porosité capillaire initialement saturée, les éprouvettes soumises au gel en condition scellée se sont révélées parfaitement durables au gel. Ces résultats suggèrent que l'absorption d'eau lors du gel semble être un paramètre important gouvernant la tenue au gel des bétons soumis à l'essai accéléré ASTM C 666. Il est aussi

important de retenir que, dans ces conditions, les bétons ordinaires ($E/L=0,40$) se révèlent tout aussi durables au gel que les BHP ($E/L=0,30$).

Les résultats obtenus avec les prismes soumis à un mûrissement scellé (Figure 6.2) montrent clairement qu'une porosité capillaire initialement non saturée ($< 90\%$) n'offre pas nécessairement une protection suffisante pour garantir un bon comportement face aux cycles accélérés de gel-dégel. En effet, malgré un degré de saturation moyen de 87% , tous les bétons soumis au gel sans scellement de surface se sont rapidement détruits. Les mesures de variation de masse (Paragraphe 5.3) ont bien montré que, dans ces conditions, la destruction s'accompagne effectivement d'une absorption rapide d'eau lors des premiers cycles de gel-dégel. Cette série de résultats confirme aussi que le scellement de surface durant les cycles (pas d'absorption d'eau) semble offrir une protection très efficace contre la destruction par le gel.

6.2 Relation entre l'humidité relative interne et la résistance au gel des bétons sans air entraîné

Les figures 6.3 et 6.4 présentent les relations entre l'humidité relative interne, le type de scellement et la résistance au gel des bétons étudiés. Les valeurs indiquées sont des moyennes pour tous les bétons de la série I. Comme pour la section précédente, nous avons choisi de ne présenter que des valeurs moyennes car l'humidité relative interne varie peu en fonction du rapport E/L ou de la teneur en fumée de silice (Paragraphe 5.5). De plus, la présentation des résultats s'en trouve fortement simplifiée.

Avant d'analyser les résultats des figures 6.3 et 6.4, il est bon rappeler que les mesures d'humidité relatives doivent être interprétées avec prudence en raison de l'incertitude relativement importante associée à ce type de mesure.

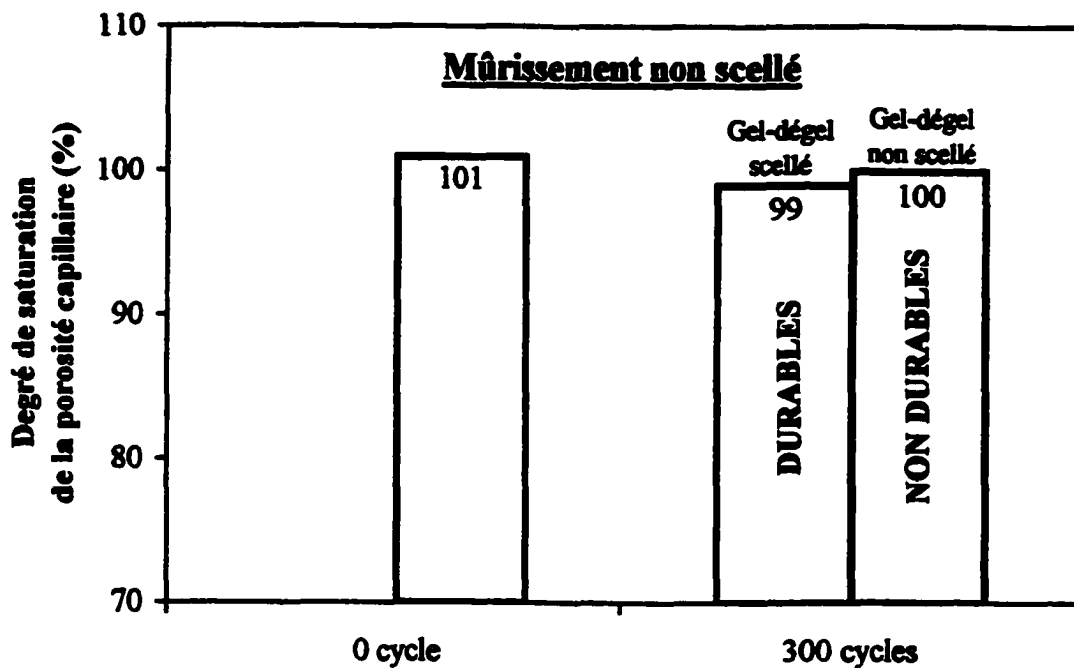


Figure 6.1 – Relation entre le degré de saturation, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement non scellé)

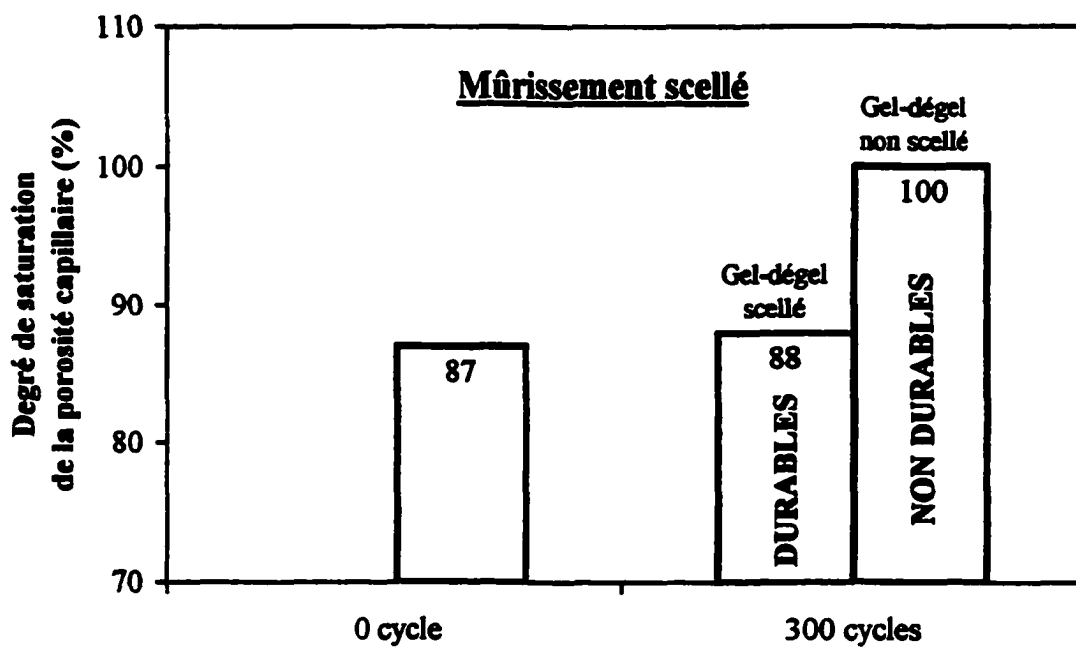


Figure 6.2 – Relation entre le degré de saturation, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement scellé)

Les résultats de la figure 6.3 montrent que les éprouvettes ayant subi un mûrissement non scellé ont débuté les cycles de gel avec une humidité relative interne inférieure à 100 % (94 %), alors que les mesures du degré de saturation tendent plutôt à indiquer que ces bétons étaient complètement saturés. Après 300 cycles de gel-dégel, avec ou sans scellement de surface, l'humidité relative interne a légèrement augmenté (96 % - 100 %) mais tout porte à croire que ces bétons étaient, en fait, complètement saturés. Les mêmes remarques s'appliquent aussi aux résultats de la figure 6.4 (mûrissement scellé) puisque les valeurs d'humidité relatives et les variations mesurées en fonction des différentes conditions d'essais sont pratiquement les mêmes.

Globalement, on constate qu'il n'y a pas de relation nette entre les mesures du degré d'humidité relative interne et le comportement face aux cycles de gel-dégel. Cette absence de relation est probablement due à deux phénomènes. Premièrement, on a déjà constaté que les résultats expérimentaux étaient plus ou moins fiables, notamment dans la plage de lecture comprise entre 91 et 100 %. Par conséquent, l'imprécision attachée à cette lecture a peut-être contribué à masquer, en partie, la relation entre l'humidité relative interne et la durabilité au gel. Deuxièmement, la valeur de l'humidité relative interne est théoriquement liée à la courbure du ménisque situé dans le plus grand pore. À l'équilibre, une humidité relative interne élevée (94 %) indique que les interfaces gaz-eau sont situées dans des grands pores mais n'indique pas nécessairement que la porosité capillaire est presque complètement saturée.

En pratique, l'humidité relative interne ne semble donc pas être un indice fiable de la durabilité au gel des bétons. C'est une mesure relativement simple et rapide (comparativement au degré de saturation) mais l'absence de relation directe avec le degré de saturation complique passablement l'interprétation de ce type de résultat.

L'analyse des mesures d'humidité relative et du degré de saturation, en rapport avec la résistance aux cycles de gel-dégel, montre clairement que la durabilité au gel est directement reliée à la capacité du béton à absorber de l'eau lors des cycles de gel.

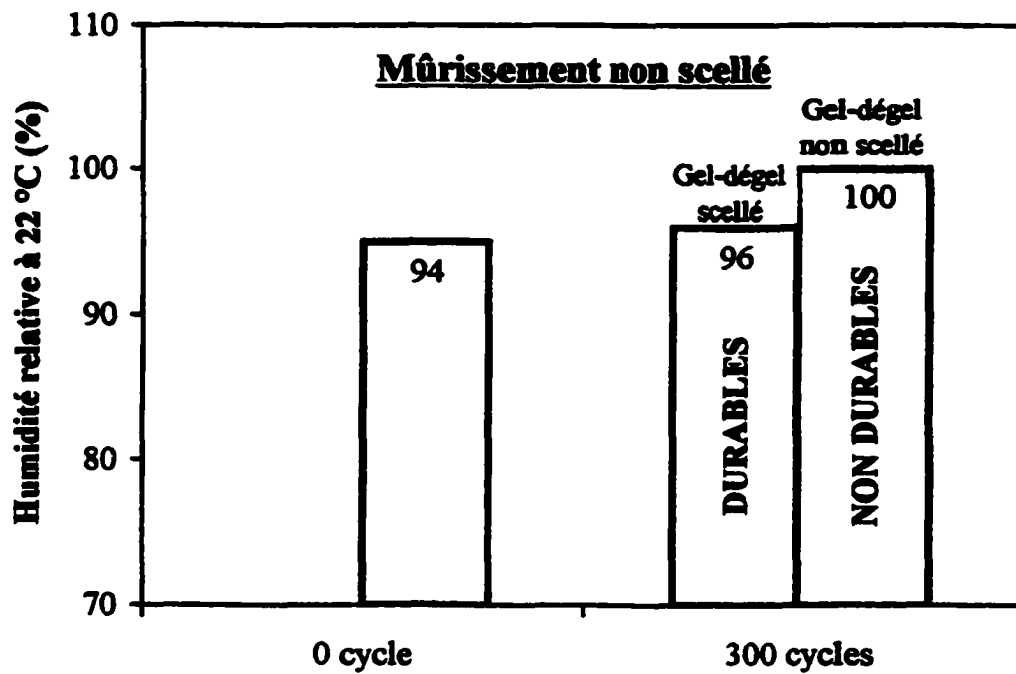


Figure 6.3 – Relation entre l’humidité relative, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement non scellé)

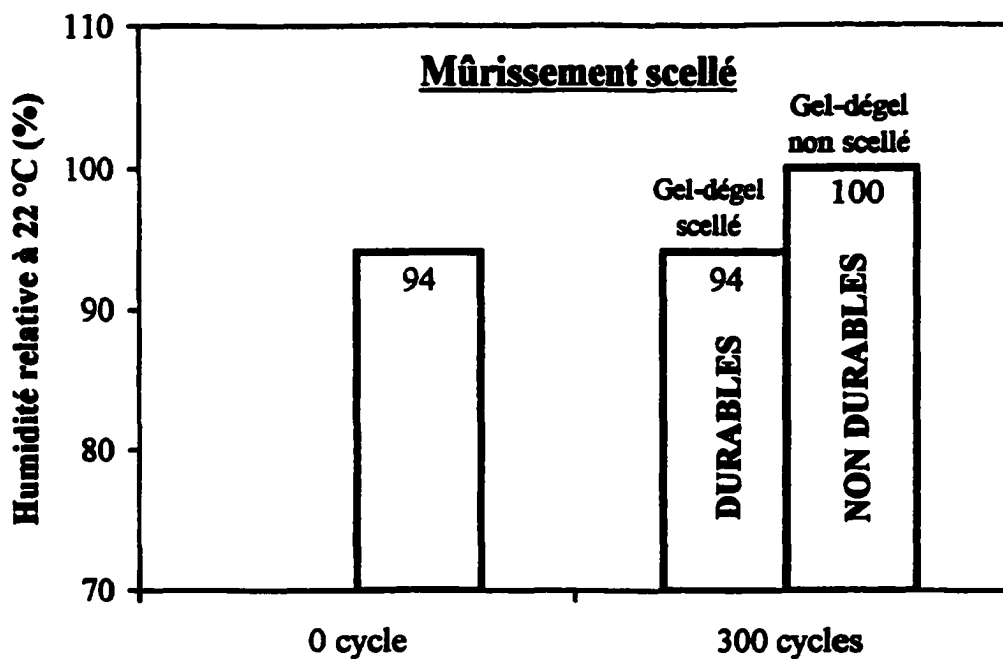


Figure 6.4 – Relation entre l’humidité relative, le type de scellement lors du gel et la durabilité au gel des bétons (mûrissement scellé)

L'absorption de l'eau lors des cycles de gel-dégel a été déjà étudié par Moukwa [1988]. Selon Moukwa, l'absorption de l'eau se fait, en plus grande partie, durant la phase de dégel. Il y a alors une augmentation de température à la surface du béton qui est accompagnée d'une augmentation de pression de vapeur d'eau, d'après la loi de Clayperon-Clausius [Adkins, 1983]. L'eau se déplace alors dans la direction des températures plus basses, c'est à dire vers le cœur du béton. Ce phénomène favorise la pénétration de l'eau externe, ce qui cause une augmentation de masse des échantillons. Moukwa mentionne aussi que l'action du gel peut microfissurer le matériau. Lors du dégel, l'eau externe peut alors pénétrer dans les microfissures, ce qui augmente la quantité d'eau gelable et favorise la formation de nouvelles fissures. Dans le cas des bétons mal protégés contre le gel, ce processus se répète de cycle en cycle jusqu'à la destruction complète du béton. Sans toute fois décrire de processus thermodynamique impliqué Fagerlund [1997] a aussi confirmé que les cycles de gel-dégel pouvaient favoriser l'absorption d'eau dans les bétons.

Selon Fagerlund [1997], il existe une relation théorique entre la température de formation de la glace et l'humidité relative interne des bétons. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$\ln \Phi = \frac{\Delta H}{293R} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (6.1)$$

- Φ Humidité relative;
- ΔH Enthalpie de formation de la glace (J/kmol);
- T Température de formation de la glace (°K);
- T_0 Température de formation de la glace dans l'eau libre (°K);
- R Constante des gaz parfaits (J/kmol).

Le tableau 6.1 présente différentes températures de formation de la glace en fonction de l'humidité relative. On remarque que plus l'humidité relative diminue, plus la température de formation de la glace (ou la quantité d'eau gelable), diminue. Par exemple, pour un béton ayant une humidité relative interne de 85 %, il faut diminuer la température à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour commencer à y former de la glace.

TABLEAU 6.1 – Température de formation de la glace en fonction de l'humidité relative interne [Fagerlund, 1997]

| Humidité relative (%) | Température de formation de la glace ($^{\circ}\text{C}$) |
|--------------------------|--|
| 100 | 0 |
| 98 | -2 |
| 95 | -6 |
| 92 | -10 |
| 88 | -15 |
| 85 | -20 |
| 79 | -30 |
| 74 | -40 |

D'après l'équation 6.1 et les valeurs présentées au tableau 6.1 [Fagerlund, 1997], on constate que la quantité d'eau gelable est significativement affectée pour des variations d'humidité relative internes comprises entre 95 % et 100 %. En effet, dans cette plage, une baisse d'humidité relative interne de seulement 5 % a pour effet d'abaisser de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température de formation de la glace. Ces résultats s'avèrent très utiles pour comprendre l'influence du scellement de surface lors du gel. En effet, on a constaté que les éprouvettes scellées lors du gel avaient une humidité relative comprise entre 94 % et 96 % (Figures 6.3 et 6.4). Par conséquent, il est possible que la meilleure durabilité de ces bétons ne résulte pas uniquement d'un degré de saturation plus faible. Elle peut aussi, en partie, résulter d'une plus faible quantité d'eau gelable due à l'abaissement de la température de formation de la glace.

Les valeurs proposées par Fagerlund montrent qu'à une humidité relative de 85 %, la température de formation de la glace s'abaisse à -20 °C. Dans les BHP, généralement soumis à une forte autodessiccation, il est relativement fréquent de mesurer des valeurs encore plus faibles (généralement comprises entre 80 % et 85 %). Selon l'équation 6.1, ces bétons contiennent donc une quantité d'eau gelable pratiquement négligeable. Même si on a déjà mentionné que l'humidité relative interne ne constituait pas toujours un indice fiable pour estimer la durabilité au gel des bétons, il est cependant raisonnable de croire que les très faibles valeurs (inférieures à 85 %) doivent vraisemblablement être associées à une excellente durabilité au gel à long terme.

6.3 Analyse de la résistance au gel-dégel des BHP sans air entraîné en laboratoire et en conditions in situ

6.3.1 Introduction

La résistance au gel des bétons, en laboratoire et en condition in situ, est gouvernée par de nombreux paramètres. Parmi les plus importants, on retrouve notamment : les caractéristiques des cycles de gel-dégel, l'historique de mûrissement, les conditions de saturation de la porosité capillaire et les effets d'échelle. Dans cette section, nous tenterons de mieux comprendre les différences entre le comportement au gel des bétons en laboratoire et en condition in situ. Pour y arriver, nous utiliserons certains résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude et d'autres résultats issus de la documentation scientifique.

6.3.2 Cycles de gel-dégel

Il est bien connu que les cycles de gel-dégel en condition in situ sont beaucoup moins sévères que ceux utilisés pour les essais accélérés en laboratoire (ASTM C 666 – A).

D'après Pigeon et Pleau [1995], le taux de gel maximum mesuré dans un bloc de béton d'environ 20 kg exposé à l'extérieur est de l'ordre de 3 °C/h. Hénault [1995] a mesuré des taux de gel maximum de 2 à 3 °C/h à la surface de dalles sur sol exposées à l'extérieur pendant deux hivers consécutifs. Cependant, au cœur de ces dalles (150 mm

de profondeur), le taux de gel maximum a toujours été inférieur à 1 °C/h. Ces résultats montrent clairement que les taux de gel en nature sont nettement inférieurs de ceux généralement utilisés en laboratoire (6 à 10 °C/h).

Les températures minimales atteintes lors du gel en condition in situ sont généralement moins basses que celles utilisées lors des essais accélérés en laboratoire. Les températures minimales sont très variables en fonction de la profondeur sous la surface exposée. Hénault [1995] a mesuré des écarts thermiques moins importants au cœur du béton par rapport à la surface. En moyenne, lors d'un hiver, la surface des dalles sur sol a subi environ 15 cycles ayant une température minimale inférieure à -5 °C et environ 5 cycles ayant une température minimale inférieure à -10 °C. Au cœur des dalles, le béton a subi environ 6 cycles ayant une température minimale inférieure à -5 °C et environ 1 cycles ayant une température minimale inférieure à -10 °C.

Les mesures in situ effectuées par plusieurs chercheurs montrent que les sollicitations thermiques réelles sont bien moins sévères que celles utilisées en laboratoire. En nature, les taux de gel maximum au cœur et à la surface, sont généralement inférieures à 3 °C/h. Selon Pigeon et Lachance [1981] un taux de gel aussi faible ne produit généralement pas de destruction par le gel, même dans le cas de bétons sans air entraîné. Les mesures in situ montrent aussi que la température minimale atteinte est très rarement inférieure à -10 °C. Selon Marchand [1993], les effets des cycles de gel (écaillage) deviennent pratiquement négligeables lorsque la température minimale du cycle est supérieure à -10 °C [Hénault, 1995].

Le bon comportement des BHP sans air entraîné soumis à des conditions réelles d'exposition au gel [Hénault, 1995] peut donc, en partie, être expliqué par des sollicitations thermiques relativement peu sévères, probablement inférieures à un certain seuil critique nécessaire pour engendrer la destruction par le gel.

6.3.3 État de saturation de la porosité capillaire

Le comportement au gel n'est pas uniquement influencé par les caractéristiques des cycles de gel-dégel. Il peut aussi être influencé par l'état de saturation de la porosité capillaire lors des cycles de gel-dégel. Par exemple, la durabilité au gel des bétons ayant une porosité capillaire complètement drainée est toujours excellente, quelles que soient leurs caractéristiques de formulation. Par conséquent, pour bien comprendre, la sévérité relative des cycles accélérés de gel en laboratoire, par rapport aux conditions réelles d'exposition, il est donc essentiel de prendre en compte l'état de saturation de la porosité capillaire associé à chaque type d'exposition.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le degré de saturation de la porosité capillaire du béton soumis à un environnement donné. Parmi les plus importants, on retrouve : l'historique de mûrissement, la profondeur sous la surface exposée et l'effet d'échelle (rapport surface/volume, dimension minimale de l'élément).

6.3.3.1 Historique de mûrissement

Les résultats de cette recherche ont notamment montré que les bétons conventionnels et à haute performance soumis à l'essai accéléré normalisé ASTM C 666 sont dans un état de saturation presque complet (> 98 %) avant et pendant les cycles de gel-dégel. Du point de vue de la durabilité au gel, ces conditions de saturation sont certainement parmi les plus défavorables. Le résultat de l'essai normalisé tend donc vers une estimation sécuritaire de la durabilité au gel des bétons.

Le degré de saturation élevé des bétons soumis à l'essai ASTM C 666 découle principalement du fait que les petites éprouvettes (dimension minimale de 75 mm) sont démoulés après 24 heures de mûrissement avant d'être immergées sous l'eau pendant les 13 jours suivants. À l'âge de 24 heures, même dans le cas des BHP, la pâte est encore très perméable et l'eau externe peut pénétrer facilement pour saturer complètement les vides gazeux créés par la contraction Le Châtelier durant les premiers jours d'hydratation.

Plusieurs facteurs permettent de croire que les bétons exposés à des conditions réelles d'exposition ne sont pas nécessairement toujours dans un état de saturation aussi élevé.

- **En pratique, les bétons sont rarement mûris sous l'eau pendant une période de 14 jours. Le mûrissement à l'eau est souvent interrompu après 3 à 7 jours. On utilise aussi fréquemment des membranes de mûrissement. Ces types de mûrissement engendrent une discontinuité dans la phase liquide, ce qui a pour effet de ralentir la pénétration de l'eau externe, sous l'effet de la contraction Le Châtelier et de diminuer le degré de saturation.**
- **Avant la première exposition au gel, et entre les saisons froides, la peau des bétons a la possibilité de sécher, donc de se désaturer.**
- **Dans le cas des BHP, les profils d'humidité dans les blocs montrent bien que l'autodessiccation peut se développer même à des profondeurs relativement faibles (50 mm). La pâte située à cette profondeur est donc non saturée. De plus, la faible perméabilité de la pâte s'oppose à la pénétration de l'eau externe durant les périodes humides et pendant les cycles de gel.**

À très long terme, il ne faut pas négliger le fait que le degré de saturation des bétons conventionnels tende vraisemblablement à augmenter graduellement jusqu'à atteindre la saturation complète. En effet, leur perméabilité n'est généralement pas assez faible pour empêcher l'absorption d'eau externe durant les phases humides ou lors des cycles de gel-dégel. L'expérience pratique (in situ) montre d'ailleurs qu'il est nécessaire de prévoir un bon réseau de bulles d'air entraîné pour protéger ces bétons lorsqu'ils sont soumis à des cycles sévères de gel-dégel.

6.3.3.2 Effet d'échelle

La dimension des éléments en béton est importante car elle influence le rapport entre le volume du béton de "peau" (profondeur < 50 mm) et le volume du béton de "cœur" (profondeur > 50 mm). Rappelons que dans le cadre de ce travail, la peau du béton est définie comme la couche de béton dans les conditions de saturation variant en fonction des conditions d'exposition du béton. Cette définition sous entend que l'épaisseur de cette peau est variable d'un béton à l'autre. Elle est plus importante dans le cas des bétons conventionnels et elle est plus mince dans le cas des BHP.

Le béton de peau est certainement la région la plus affectée par les cycles de gel-dégel. En effet, c'est la peau qui se sature en premier et qui subi les cycles de gel-dégel les plus sévères. En laboratoire, en raison des dimensions réduites des éprouvettes (75 x 75 mm), on teste essentiellement du béton de "peau". Les conclusions de cet essai sont donc surtout applicables à la peau des bétons. En nature, le béton de "peau" correspond généralement à un volume relativement faible de l'élément. S'il y a une destruction de la peau de béton, le risque de compromettre la stabilité structurale de l'élément est faible. Cependant, les risques d'écaillage et problèmes d'ordre esthétiques (destruction de surface) demeurent toujours possibles.

6.3.4 Synthèse

Les résultats de cette étude tendent à montrer que l'essai accéléré normalisé ASTM C 666 permet d'estimer adéquatement la durabilité au gel des bétons conventionnels soumis à des conditions d'expositions réelles, mais néanmoins relativement sévères (fréquents cycles de gel-dégel dans un environnement humide favorisant la saturation du béton). Cette conclusion s'appuie sur le fait qu'on a montré que le mode de mûrissement et les conditions d'essai normalisé font en sorte que les éprouvettes soumises aux cycles de gel-dégel accélérés sont complètement saturées, comme c'est le cas des bétons conventionnels exposés à un environnement humide. En laboratoire et en conditions réelles d'exposition, la perméabilité élevée et l'absence d'autodessiccation interne dans les bétons conventionnels contribuent à maintenir leur porosité complètement saturée.

L'essai accéléré utilise un taux de gel plus élevé et une température minimale bien plus faible que ce que l'on mesure en conditions réelles d'exposition. L'expérience pratique montre cependant que les bétons conventionnels qui ne résistent pas à l'essai accéléré ASTM C 666 ne possèdent généralement pas une bonne durabilité lorsqu'ils sont soumis à des cycles sévères de gel-dégel en condition in situ. La grande sévérité des cycles en laboratoire semble donc raccourcir l'échéance de destruction sans pour autant faire en sorte de rejeter des bétons qui pourraient être durables en condition in situ.

La représentativité de l'essai accéléré ASTM C 666 dans le cas particulier des BHP est plus problématique. La comparaison de leur durabilité au gel en laboratoire et en condition in situ montre que les essais accélérés ASTM C 666 tendent à sous estimer la durabilité réelle des BHP sans air entraîné en condition in situ [Hénault, 1995, Gagné et coll., 1998]. Les résultats de cette recherche permettent de dégager quelques hypothèses pour tenter d'expliquer ce phénomène.

- Le mode de mûrissement de l'essai ASTM C 666 entraîne la saturation complète de la porosité capillaire avant le début des cycles de gel-dégel. Nos résultats expérimentaux (séries I et II) et les résultats de Gagné et coll. [1998] montrent plutôt que la porosité capillaire (au cœur) des BHP en condition in situ n'est jamais complètement saturée.
- Les profils d'humidité relative de la série II, suggèrent qu'à long terme, la pâte située au cœur des éléments en BHP (> 50 mm de profondeur) demeurera dans un état non saturé en raison de la faible perméabilité de la peau qui s'oppose à la pénétration de l'eau externe lors du mûrissement et lors des cycles de gel.

En pratique, on ne peut pas ignorer le fait que la peau des éléments en BHP risque d'atteindre la saturation complète et, par conséquent, d'être endommagée par les cycles de gel-dégel. Cependant, durant les saisons sèches, la peau est soumise à des périodes de séchage qui peuvent contribuer à retarder la pénétration de l'eau et éviter d'atteindre la saturation complète lors des périodes de gel. C'est peut-être pour cette raison, qu'après

plus de 5 hivers d'exposition intense, on n'observe aucune détérioration (fissuration interne, écaillage) à la surface d'éléments en BHP sans air entraîné [Gagné et coll., 1998].

Il n'est pas encore possible, pour l'instant, de proposer des modifications à la norme ASTM C 666 pour améliorer la représentativité de l'essai dans le cas particulier des BHP. Avant de pouvoir proposer des modifications précises (mode de mûrissement, scellement de surface), il est nécessaire de mieux caractériser l'état de saturation de la porosité capillaire (notamment en fonction de la profondeur) d'une large gamme de BHP soumise à différentes conditions d'exposition en nature.

L'utilisation d'un mûrissement scellé (13 jours) pourrait permettre de mieux simuler les conditions de saturation et la microstructure au cœur des éléments en BHP. Cependant ce n'est pas le cœur des éléments en BHP qui est le plus fortement exposé aux cycles de gel, c'est plutôt la peau. Par conséquent, il apparaît donc plus logique de conserver un mûrissement dans l'eau. Pour les mêmes raisons, nous ne pouvons pas non plus recommander de sceller la surface des éprouvettes de BHP lors des cycles de gel (représentatif des conditions au cœur mais pas représentatif de la peau). De plus, le fait de sceller la surface lors du gel aurait automatiquement pour effet de rendre durables tous les BHP puisque nos essais ont montré que, dans ces conditions, même un béton conventionnel sans air entraîné est durable au gel.

CONCLUSION

Cette recherche nous a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- Le mûrissement non scellé favorise l'absorption d'une certaine quantité d'eau consécutive au remplissage des vides gazeux créés par la contraction Le Châtelier. Ce type de mûrissement amène les éprouvettes dans un état très voisin de la saturation complète. Même si les éprouvettes sont alors dans un état presque saturé juste avant les cycles de gel-dégel, on a montré que ce type de mûrissement a néanmoins un effet favorable sur la résistance au gel. Nous pensons que le mûrissement dans l'eau produit une porosité capillaire moins importante et plus fine, ce qui pourrait contribuer à diminuer la quantité d'eau gelable et compenser l'effet défavorable d'une plus grande saturation.
- Le mûrissement scellé favorise une autodessiccation interne du béton tout en ralentissant la cinétique d'hydratation. Avant les cycles de gel-dégel, les éprouvettes possèdent donc une porosité capillaire plus importante et plus grossière. On a montré que lorsque ces éprouvettes sont ensuite soumises à des cycles de gel-dégel en condition non scellée, elles se resaturaient très rapidement dès les premiers cycles. Ce type de mûrissement a été le plus défavorable pour la résistance au gel en laboratoire.
- Le scellement de surface lors des cycles de gel-dégel empêche la pénétration d'eau externe et a eu un effet très favorable sur la durabilité au gel de tous nos bétons. Même les bétons sans air entraîné ($E/L = 0,40$ et $0,30$) se sont révélés parfaitement durables au gel, même si pourtant, ils étaient dans un état très voisin de la saturation complète juste avant le début des cycles.
- Comme c'était à prévoir, les bétons sans air entraîné ($E/L = 0,30$ et $0,40$) non scellés lors des cycles de gel-dégel ne sont pas durables au gel en laboratoire.

Ils n'ont pas résistés à 300 cycles de gel-dégel conformément à la norme ASTM C 666 – Procédure A.

- Le rapport E/L a une influence importante sur la durabilité au gel des bétons sans air entraîné. En effet, pour une condition de scellement donnée, les éprouvettes de béton ordinaire ($E/L = 0,40$) se détruisent systématiquement plus rapidement que celles en BHP ($E/L = 0,30$).
- L'influence de la fumée de silice sur la durabilité au gel des bétons étudiés est variable en fonction du rapport E/L. La fumée de silice a pour effet de ralentir la destruction lors du gel dans le cas des E/L faibles (0,30) alors qu'elle a plutôt tendance à accélérer légèrement la destruction dans le cas des E/L élevés (0,40). La porosité capillaire des bétons de rapport E/L élevé contient une quantité importante de l'eau gelable qui exerce les fortes pressions interne sur la pâte ayant une perméabilité plus faible grâce à la fumée de silice.
- Nos résultats montrent qu'il ne semble pas y avoir de relation directe entre le degré de saturation de la porosité capillaire et le comportement au gel des bétons sans air entraîné. Les éprouvettes non saturées avant et pendant les cycles (mûrissement et gel scellés) ont évidemment une excellente durabilité au gel. Cependant, certaines éprouvettes saturées lors de cycle de gel dégel ont aussi montré une excellente durabilité (éprouvettes ayant subi un mûrissement non scellé puis soumises au gel en condition scellée). Ces résultats suggèrent que même des bétons dans un état très voisin de la saturation complète seraient en mesure de résister au gel, mais à condition d'empêcher la pénétration d'eau extérieure lors des cycles.
- Nos résultats démontrent qu'il n'y a pas de relation nette entre les mesures du degré d'humidité relative interne et le comportement face aux cycles de gel-dégel. Une humidité relative interne très élevée ($> 95\%$) n'entraîne pas nécessairement une mauvaise durabilité au gel.

- Les résultats démontrent clairement que la capacité des éprouvettes à absorber de l'eau lors des cycles est un paramètre majeur gouvernant la durabilité au gel des bétons sans air entraîné. Toutes les éprouvettes n'ayant pas pu absorber de l'eau lors des cycles (condition scellée) se sont révélées parfaitement durables au gel alors que celles en mesure d'absorber de l'eau (condition non scellée) se sont systématiquement détruites.
- Les mesures d'humidité relative interne dans les blocs en BHP démontrent que l'autodessiccation se développe dans ce type de béton. Même à 50 mm de profondeur, la pâte de ciment n'est pas saturée après 350 jours d'immersion sous l'eau. En condition réelle d'exposition, ces résultats laissent croire que la pâte des BHP, située à une faible profondeur sous la surface (> 50 mm), pourrait être soumise au gel en condition de quasi-scellement (non saturée). Ce phénomène pourrait être à la base de la bonne durabilité au gel in situ des BHP sans air entraîné.

D'autres travaux de recherche devraient être entrepris pour analyser plus précisément la relation entre l'humidité relative interne et la durabilité au gel in situ et en laboratoire. Cette étude devrait être basée sur une technique de mesure plus précise, notamment dans la plage comprise en 90% et 100% H.R, et permettant un suivi en continu de l'évolution de l'H.R. interne dans des éprouvettes en laboratoire et en condition in situ.

Il serait aussi intéressant de disposer d'un calorimètre à basse température pour pouvoir mesurer les variations de quantité d'eau gelable en fonction du type de mûrissement et en fonction du nombre de cycles de gel-dégel en condition scellée et non scellée. Ces mesures pourraient permettre de mieux comprendre l'influence de l'absorption d'eau lors des cycles sur la durabilité au gel des bétons.

BIBLIOGRAPHIE

- ADKINS, C. J. (1983) *Equilibrium Thermodynamics*, Cambridge University Press, p 180 – 186.
- AÏTCIN, P-C. (1998) *The Art and Science of High-performance Concrete*, L'industria italiana del Cemento, No. 731, p. 350 – 365.
- AÏTCIN, P-C. (1997) *Liants hydrauliques*, Notes de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 485 p.
- AÏTCIN, P-C. (1996) *Le mûrissement des BHP*, présenté dans Liants Hydrauliques Notes de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 6 p.
- AÏTCIN, P-C., JOLICOEUR, G., MERCIER, M. (1992) *Technologie des granulats*, Deuxième édition édité par Le Griffon d'argile, Sainte-Foy, p. 23 – 89.
- ASTM C 39 – 94 *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM, Vol. 04.02 – Concrete and Aggregate.
- ASTM C 457 – 90 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*, ASTM, Vol. 04.02 – Concrete and Aggregate.
- ASTM C 666 – 92 *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, ASTM, Vol. 04.02 -- Concrete and Aggregate.
- ASTM C 1202 – 94 *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM, Vol. 04.02 – Concrete and Aggregate.
- ATLASSI, E. (1991) *Influence of cement type on the desorption isotherm of mortar*, Nordic Concrete Research, Vol. 10, p. 25 - 36
- BAROGHEL-BOUNY, V., PERRIN, B., CHEMLOUL, L. (1997) *Détermination expérimentale des propriétés hydriques des pâtes de ciment durcies – Mise en évidence des phénomènes d'hystérésis*, Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 30, p. 340 – 348
- BAROGHEL-BOUNY, V., GODIN, J., GAWSEWITCH, J. (1996) *Microstructure and Moisture Properties of High-performance Concrete*, 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, Paris, p. 451 – 461.

- BAROGHEL-BOUNY, V., CHAUSSADENT, T. (1995) *Pore Structure and Moisture Properties of Cement-based Systems From Water Vapour Sorption Isotherms*, Materials Research Society, p. 245 – 254
- BAROGHEL-BOUNY, V. (1994) *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétation*, Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 468 p.
- BAROGHEL-BOUNY, V., CHAUSSADENT, T. (1993) *Caractérisation de la texture d'un béton durci à partir des isothermes de sorption de vapeur d'eau*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, No. 187, p. 69 - 75
- BARON, J. (1982) *Les retraits de la pâte de ciment*, Présenté dans Le béton hydraulique, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 485 - 501
- BUIL, M., OLLIVIER, J.-P. (1992) *Conception des bétons : la structure poreuse*, présenté dans La durabilité des bétons par BARON, J. et OLLIVIER, J.-P. Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 227 – 284.
- BUIL, M. (1979) *Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante*, Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, p. 6 – 19.
- CARLES-GIBERGUES, A., PIGEON, M. (1992) *La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse*, présenté dans La durabilité des bétons par BARON, J. et OLLIVIER, J.-P. Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 227 – 284.
- COHEN, M. D., ZHOU, Y., DOLCH, W. L. (1992) *Non-Air-Entrained High-Strength Concrete – Is It Frost Resistant ?*, ACI Materials Journal, V. 89, No. 2, p. 406 – 415
- FAGERLUND, G. (1997) *Effect of Self-desiccation on the Internal Frost Resistance of Concrete*, Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology, Lund, édité par B. Persson et G. Fagerlund, p 227 – 238.
- FAGERLUND, G. (1997) *The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze-thaw resistance of concrete*, Matériaux et Construction, No. 58, p. 231 – 253.
- FAGERLUND, G. (1994) *Frost Resistance of High Performance Concrete – Some Theoretical Considerations*, Durability of High Performance Concrete, Vienna, édité par H. Sommer, p 112 – 140.
- FAGERLUND, G. (1971) *Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction*, Matériaux et Construction, No. 23, p. 271 – 285

- FOLLIOT, A. (1982) *Le ciment*, Présenté dans Le béton hydraulique, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 19 – 37
- GAGNÉ, R., HÉNAULT, G., MARCHAND, J. (1998) *In-situ and Laboratory Evaluation of Chloride Penetration and Freeze-thaw Durability of High-performance Concrete Slabs*, Concrete Under Severe Conditions 2, édité par O. E. GJORV, K. SAKAI et N. BANTHIA, Tromso, Norway, p. 173 – 182.
- GAGNÉ, R. (1997) *Durabilité et réparations du béton*, Notes de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, p. 21 – 200.
- GAGNÉ, R., BOISVERT, A., PIGEON, M. (1996) *Effect of Superplasticizer Dosage on Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Durability of High Strength Concrete With and Without Silica Fume*, ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 2 p. 111 – 120.
- GAGNÉ, R., AÏTCIN, P.-C. (1993) *Superplasticizers for durable concrete*, Présenté dans Durabilité et réparations du béton, Notes de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 15 p.
- GAGNÉ, R. (1992) *Durabilité au gel des bétons à hautes performances*, Thèse de Doctorat, Département de génie civil, Université Laval, Québec, 433 p.
- GAGNÉ, R., PIGEON, M., AÏTCIN, P.-C. (1990) *Durabilité au gel des bétons de hautes performances mécaniques*, Matériaux et Constructions, No. 23, p. 103 – 109.
- HÉNAULT, G. (1995) *Etude de la durabilité in-situ et en laboratoire des bétons à haute performance avec et sans air entraîné face aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants*, Mémoire de Maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 193 p.
- HIROSHI, H., HIROSHI, U., SHUNSUKE, H. (1997) *Influence of Structural and Humidity Changes at the Inner Part of Hardened Cement Paste on Autogenous Shrinkage*, Journal of Research of the Chichibu Onoda Cement Corporation, Vol. 48, No. 132, p. 3 – 9.
- HOOTON, R. D. (1993) *Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity*, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 2, p. 143 – 151.
- HOOTON, R.D., McGRATH, P. (1991) *Influence of self-dessication of non-air entrained silica fume mortars on resistance to freezing and thawing*, CANMET / ACI International Workshop on the Use of Silica Fume in Concrete, Washington D.C., p. 7 – 9.

- JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. (1996) *Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste*, ACI Materials Journal, V. 93, No. 6, p. 539 – 543.
- JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. (1995) *Autogenous relative humidity change in silica fume-modified cement paste*, Advances in Cement Research, Vol. 7, No. 25, p. 33 – 38.
- JENSEN, O. M. (1995) *Thermodynamic limitation of self-desiccation*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, p. 157 – 164.
- KAMADA, E., TABATA, M., KATSURA, O. (1991) *A study of the Environmental Conditions Affecting Frost Damage of Concrete*, Low Temperature Effects on Concrete. Proceedings Second Canada / Japan Workshop, NRC-CNRC, p. 191 – 207.
- KHAYAT, K. H. (1996) *Technologie avancée du béton*, Note de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 389 p.
- KOSMATKA, S. H., PANARESE, W. C. et col. (1995), *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Ottawa, Association Canadienne du Ciment Portland, 228 p.
- LANGAN, B. W., WARD, M. A. (1997) *The Freezing-thawing Damage of Non Air-entrained High Strength Concrete*, Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Sydney, Australia, p 341 – 356.
- LESSARD, M., GENDREAU, M., GAGNÉ, R. (1993) *Statistical Analysis of the Production of a 75 MPa Air Entrained Concrete*, High-strength Concrete, Lillehammer, Norway, p.793 – 800.
- LESSARD, M. (1991) *Les bétons à haute performance*, présenté dans Liants Hydrauliques par AÏTCIN, P-C., Département de génie civil, Université de Sherbrooke, p. 10.1 - 10.53
- MALHOTRA, V. M., MEHTA, P.K. (1996) *Pozzolanic and Cementitious Materials*, Advanced Concrete Technology Program, CANMET, Ottawa, Ontario, 190 p.
- MARCHAND, J., GAGNÉ, R., JACOBSEN, S., PIGEON, M., SELLEVOLD, E.J. (1996) *La résistance au gel des bétons à haute performance*, Revue canadienne de génie civil, Vol. 23, No. 5, p. 1070 – 1080.
- MARCHAND, J., PLEAU, R., GAGNÉ, R. (1994) *Deterioration of Concrete Due to Freezing and Thawing*, Materials Science of Concrete IV, p. 283 – 354.
- MOUKWA, M. (1988) *Durabilité du béton dans les mers arctiques*, Thèse de Doctorat, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, p. 1 – 200.

- NEVILLE, A. M. (1996) *Properties of concrete*, édité par John Wiley & Sons, Inc., Fourth édition, 844 p.
- PERSSON, B. (1997) *Self-desiccation and its importance in concrete technology*, Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 30, p. 293 – 305.
- PERSSON, B. (1996) *Hydration and Strength of High Performance Concrete*, Advanced Cement Based Materials, Vol. 3, No. ¾, p. 107 – 123.
- PIGEON, M., PLEAU, R. (1995) *Durability of concrete in cold climates*, E & FN Spon, London, 244 p.
- PIGEON, M., GAGNÉ, R., AÏTCIN, P.-C., BANTHIA, N. (1991) *Freezing and Thawing Tests of High-Strength Concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 21, p. 844 – 852.
- PIGEON, M., GAGNÉ, R., FOY, C. (1987) *Critical air-void spacing factors for low water-cement ratio concretes with and without condensed silica fume*, Cement and Concrete Research, Vol. 17, p. 896 – 906
- PIGEON, M. (1981) *Composition et hydratation du ciment Portland*, Symposium Progress in Concrete, Québec, Canada, p. 36 – 72.
- RUTHERFORD, J. H., LANGAN, B. W., WARD, M. A. (1994) *Use of Control Specimens in Freezing and Thawing Testing of Concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 16, No. 1, p. 78 – 82.
- TAGNIT-HAMOU, A. (1997) *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, Notes de cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 287 p.
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1996) *Influence of autogenous shrinkage on cracking in high-strength concrete*, 4th International Symposium on Utilisation of High-strength/High-performance Concrete, Paris, p. 321 – 330
- TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. (1995) *Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, p 281 – 287.
- VERNET, C., CADORET, G. (1992) *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à haute performance pendant les premiers jours*, Technodes, présenté dans Liants Hydrauliques par AÏTCIN, P.-C. , Département de génie civil, Université de Sherbrooke, p. 7.L1-7.L13.

ANNEXE A : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION DES BÉTONS DE LA SÉRIE I ET DE LA SÉRIE II

Le tableau A.1 présente les résultats des essais de résistances à la compression des cylindres non scellés (mûris dans l'eau) et des cylindres scellés (mûris scellés dans un papier d'aluminium autocollant) provenant des bétons de la série I. Les résultats des essais de résistance à la compression sur des cylindres (mûris dans l'eau) provenant des bétons de la série II sont présentés au tableau A.2. Pour 2 séries, les cylindres ont eu des dimensions de 100 x 200 mm.

TABLEAU A.1 - Résistance à la compression des cylindres de la série I

| Âge (jours) | Béton | Mûrissement | Résistance à la compression (Mpa) | | Mode de rupture |
|----------------|--------|-------------|-----------------------------------|---------|--------------------|
| | | | Individuelle | Moyenne | |
| 14 | 0,3 CP | Eau | 67,2 / 69,2 / 68,4 | 68,3 | J / J / A |
| | | Scellé | 67,3 / 65,5 / 65,5 | 66,1 | J / J / A |
| | 0,3 SF | Eau | 78,7 / 79,0 / 80,4 | 79,4 | A / J / A |
| | | Scellé | 78,5 / 79,4 / 77,3 | 78,4 | J / J / A |
| | 0,4 CP | Eau | 48,7 / 49,5 / 51,0 | 49,7 | J / J / J |
| | | Scellé | 49,0 / 48,1 / 49,3 | 48,8 | J / J / J |
| | 0,4 SF | Eau | 57,2 / 58,0 / 57,6 | 57,6 | J / J / J |
| | | Scellé | 56,4 / 56,9 / 56,3 | 56,5 | J / A / J |
| 28 | 0,3 CP | Eau | 75,2 / 75,2 / 75,7 | 75,4 | J / J / J |
| | | Scellé | 73,1 / 71,7 / 72,6 | 72,5 | J / J / A |
| | 0,3 SF | Eau | 86,0 / 84,8 / 83,8 | 84,9 | J / J / J |
| | | Scellé | 83,5 / 84,6 / 83,3 | 83,8 | J / J / A |
| | 0,4 CP | Eau | 57,2 / 55,5 / 56,1 | 56,2 | A / J / J |
| | | Scellé | 51,0 / 52,1 / 54,1 | 52,4 | J / J / A |
| | 0,4 SF | Eau | 66,8 / 65,6 / 65,8 | 66,1 | J / A / J |
| | | Scellé | 65,5 / 65,4 / 63,6 | 64,8 | J / A / A |
| 91 | 0,3 CP | Eau | 86,5 / 83,9 / 82,2 | 84,2 | J / A / A |
| | | Scellé | 83,5 / 81,7 / 85,0 | 83,4 | J / A / J |
| | 0,3 SF | Eau | 95,9 / 95,3 / 94,8 | 95,4 | A / A / J |
| | | Scellé | 93,2 / 94,0 / 93,6 | 93,6 | A / J / A |
| | 0,4 CP | Eau | 63,6 / 61,1 / 65,3 | 63,4 | J / J / A |
| | | Scellé | 60,1 / 58,8 / 58,8 | 59,2 | A / J / J |
| | 0,4 SF | Eau | 71,8 / 71,8 / 72,8 | 72,1 | J / A / J |
| | | Scellé | 66,1 / 64,7 / 67,1 | 66,1 | J / A / J |

TABLEAU A.2 - Résistance à la compression des cylindres de la série II

| Âge (jours) | Béton | Mûrissement | Résistance à la compression (Mpa) | | Mode de rupture |
|----------------|-------------|-------------|-----------------------------------|---------|--------------------|
| | | | Individuelle | Moyenne | |
| 14 | 0,3 CP bloc | Eau | 65,3 / 64,1 / 65,9 | 65,1 | A / A / J |
| | 0,3 SF bloc | Eau | 76,5 / 77,0 / 77,6 | 77,0 | J / A / A |
| 28 | 0,3 CP bloc | Eau | 73,2 / 74,7 / 71,8 | 73,2 | J / J / J |
| | 0,3 SF bloc | Eau | 81,3 / 84,8 / 85,1 | 83,7 | J / J / A |
| 91 | 0,3 CP bloc | Eau | 81,5 / 82,3 / 83,7 | 82,5 | J / A / A |
| | 0,3 SF bloc | Eau | 97,7 / 96,5 / 97,4 | 97,2 | A / A / A |

ANNEXE B : CARACTÉRISTIQUES DES BULLES D'AIR DES BÉTONS DE LA SÉRIE I

Les tableaux B.1 à B.4 présentent les caractéristiques du réseau de bulles d'air des bétons de la série I. Les lectures ont été effectuées sur les plaques de 100 x 100 x 20 mm coupées dans des cylindres de 100 x 200 mm après environ 14 jours de mûrissement. Les caractéristiques des bulles d'air ont été déterminées conformément à la norme ASTM C 457 – 90 : *Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete (Modified Point Count Method)*.

TABLEAU B.1 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton 0,3 CP

| Lectures expérimentales | | | | |
|-------------------------|------|-----|----|-----|
| Plaque | St | N | Sv | Sp |
| Plaque A Haut | 1600 | 57 | 23 | 461 |
| Plaque B Bas | 1600 | 55 | 33 | 482 |
| Total | 3200 | 112 | 56 | 943 |

| Résultats | | | |
|---------------|---------|------------------------------|----------------|
| Plaque | Air (%) | α (mm ⁻¹) | \bar{L} (µm) |
| Plaque A Haut | 1,4 | 13,2 | 650 |
| Plaque B Bas | 2,1 | 8,9 | 843 |
| Total | 1,8 | 10,7 | 747 |

TABLEAU B.2 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton 0,3 SF

| Lectures expérimentales | | | | |
|-------------------------|------|-----|----|-----|
| Plaque | St | N | Sv | Sp |
| Plaque A Haut | 1600 | 109 | 41 | 485 |
| Plaque B Bas | 1600 | 88 | 43 | 481 |
| Total | 3200 | 197 | 84 | 966 |

| Résultats | | | |
|---------------|---------|------------------------------|----------------|
| Plaque | Air (%) | α (mm ⁻¹) | \bar{L} (µm) |
| Plaque A Haut | 2,6 | 14,2 | 482 |
| Plaque B Bas | 2,7 | 10,9 | 611 |
| Total | 2,6 | 12,5 | 539 |

TABLEAU B.3 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton 0,4 CP

| Lectures expérimentales | | | | |
|--------------------------------|-------------|------------|-----------|-------------|
| Plaque | St | N | Sv | Sp |
| Plaque A Haut | 1600 | 75 | 38 | 502 |
| Plaque B Bas | 1600 | 47 | 34 | 514 |
| Total | 3200 | 122 | 72 | 1016 |

| Résultats | | | |
|------------------|----------------|--|----------------------------------|
| Plaque | Air (%) | α (mm⁻¹) | \bar{L} (μm) |
| Plaque A Haut | 2,4 | 10,5 | 681 |
| Plaque B Bas | 2,1 | 7,4 | 1032 |
| Total | 2,3 | 9,0 | 817 |

TABLEAU B.4 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air du béton 0,4 SF

| Lectures expérimentales | | | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Plaque | St | N | Sv | Sp |
| Plaque A Haut | 1600 | 39 | 18 | 505 |
| Plaque B Bas | 1600 | 34 | 23 | 477 |
| Total | 3200 | 73 | 41 | 982 |

| Résultats | | | |
|------------------|----------------|--|----------------------------------|
| Plaque | Air (%) | α (mm⁻¹) | \bar{L} (μm) |
| Plaque A Haut | 1,1 | 11,6 | 858 |
| Plaque B Bas | 1,4 | 7,9 | 1106 |
| Total | 1,3 | 9,5 | 976 |

ANNEXE C : VARIATION DE LA MASSE, DE LA VITESSE ET DE L'ALLONGEMENT AXIAL LORS DU MÛRISSEMENT DES BÉTONS DE LA SÉRIE I

Les tableaux C.1 à C.12 présentent les variations de la masse, de la vitesse et de l'allongement axial des bétons de la série I lors du mûrissement.

Les prismes ont subi deux types de mûrissement : scellé et non scellé. Les prismes soumis au mûrissement scellé ont été démoulés après 24 heures et ensuite emballés dans un papier d'aluminium autocollant. Ils ont été ensuite conservés dans la chambre à température et humidité contrôlées pendant 13 jours. Les prismes soumis au mûrissement non scellé ont été aussi démoulés après 24 heures et ensuite immergés dans l'eau pendant 13 jours. Les mesures de masse, d'allongement et de vitesse des ondes ont été effectuées à 1, 3, 7, 11 et 14 jours. Les techniques de mesure et les traitements des résultats de mesure sont expliqués au chapitre 4.

Tous les prismes ont été nommés en utilisant certaines de leurs caractéristiques de formulation : Rapport eau/liant, type de mûrissement, type de scellement durant les cycles de gel-dégel, les caractéristiques des bulles d'air. Un exemple d'interprétation des noms de prisme est présenté au chapitre 4.

TABLEAU C.1 – Variation de la masse lors du mûrissement (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-S-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5191 | 5261 | 5226 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5191 | 5261 | 5226 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5191 | 5261 | 5226 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5191 | 5261 | 5226 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5191 | 5261 | 5226 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5161 | 5141 | 5151,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5178 | 5157 | 5167,5 | 17 | 16 | 16,5 | 100,33 | 100,31 | 100,32 |
| 7 | 5184 | 5162 | 5173,0 | 23 | 21 | 22,0 | 100,45 | 100,41 | 100,43 |
| 11 | 5187 | 5166 | 5176,5 | 26 | 25 | 25,5 | 100,50 | 100,49 | 100,50 |
| 14 | 5189 | 5168 | 5178,5 | 28 | 27 | 27,5 | 100,54 | 100,53 | 100,53 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5177 | 5134 | 5155,5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5194 | 5153 | 5173,5 | 17 | 19 | 18 | 100,33 | 100,37 | 100,35 |
| 7 | 5200 | 5159 | 5179,5 | 23 | 25 | 24 | 100,44 | 100,49 | 100,47 |
| 11 | 5203 | 5162 | 5182,5 | 26 | 28 | 27 | 100,50 | 100,55 | 100,52 |
| 14 | 5205 | 5164 | 5184,5 | 28 | 30 | 29 | 100,54 | 100,58 | 100,56 |

TABLEAU C.2 – Variation de la vitesse lors du mûrissement (Béton : 0,3 CP)

Prismes :0,3 CP-747-S-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4684 | 4692 | 4688 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4730 | 4715 | 4723 | 46 | 24 | 35 | 101,0 | 100,5 | 100,7 |
| 7 | 4768 | 4764 | 4766 | 85 | 72 | 78 | 101,8 | 101,5 | 101,7 |
| 11 | 4813 | 4821 | 4817 | 129 | 129 | 129 | 102,8 | 102,8 | 102,8 |
| 14 | 4831 | 4848 | 4839 | 147 | 156 | 152 | 103,1 | 103,3 | 103,2 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4730 | 4704 | 4717 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4887 | 4892 | 4889 | 157 | 187 | 172 | 103,3 | 104,0 | 103,6 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4670 | 4664 | 4667 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4902 | 4914 | 4908 | 232 | 250 | 241 | 105,0 | 105,4 | 105,2 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4695 | 4692 | 4693 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4768 | 4773 | 4771 | 74 | 82 | 78 | 101,6 | 101,7 | 101,7 |
| 7 | 4863 | 4859 | 4861 | 168 | 168 | 168 | 103,6 | 103,6 | 103,6 |
| 11 | 4928 | 4950 | 4939 | 233 | 259 | 246 | 105,0 | 105,5 | 105,2 |
| 14 | 4986 | 4973 | 4980 | 291 | 282 | 286 | 106,2 | 106,0 | 106,1 |

TABLEAU C.3 – Variation de l’allongement axial lors du mûrissement (Béton : 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-S-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,493 | 249,746 | 249,619 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,469 | 249,707 | 249,588 | -94 | -156 | -125 |
| 7 | 249,459 | 249,701 | 249,580 | -134 | -180 | -157 |
| 11 | 249,464 | 249,701 | 249,583 | -114 | -178 | -146 |
| 14 | 249,464 | 249,710 | 249,587 | -116 | -142 | -129 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,682 | 249,667 | 249,674 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,677 | 249,657 | 249,667 | -20 | -40 | -30 |
| 7 | 249,681 | 249,657 | 249,669 | -2 | -38 | -20 |
| 11 | 249,681 | 249,656 | 249,669 | -2 | -42 | -22 |
| 14 | 249,687 | 249,658 | 249,672 | 20 | -34 | -7 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 250,030 | 249,464 | 249,747 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 250,039 | 249,473 | 249,756 | 36 | 38 | 37 |
| 7 | 250,042 | 249,475 | 249,759 | 50 | 46 | 48 |
| 11 | 250,050 | 249,480 | 249,765 | 80 | 66 | 73 |
| 14 | 250,048 | 249,479 | 249,764 | 74 | 62 | 68 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 250,155 | 250,066 | 250,111 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 250,167 | 250,075 | 250,121 | 46 | 34 | 40 |
| 7 | 250,170 | 250,077 | 250,123 | 58 | 44 | 51 |
| 11 | 250,174 | 250,083 | 250,128 | 74 | 66 | 70 |
| 14 | 250,175 | 250,083 | 250,129 | 80 | 68 | 74 |

TABLEAU C.4 – Variation de la masse lors du mûrissement (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5105 | 5142 | 5123,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5105 | 5142 | 5123,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5105 | 5142 | 5123,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5105 | 5142 | 5123,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5105 | 5142 | 5123,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5061 | 5102 | 5081,5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5077 | 5118 | 5097,5 | 16 | 16 | 16 | 100,32 | 100,31 | 100,31 |
| 7 | 5081 | 5122 | 5101,5 | 20 | 20 | 20 | 100,40 | 100,39 | 100,39 |
| 11 | 5083 | 5124 | 5103,5 | 22 | 22 | 22 | 100,43 | 100,43 | 100,43 |
| 14 | 5084 | 5125 | 5104,5 | 23 | 23 | 23 | 100,45 | 100,45 | 100,45 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5102 | 5135 | 5118,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5116 | 5149 | 5132,5 | 14 | 14 | 14,0 | 100,27 | 100,27 | 100,27 |
| 7 | 5121 | 5153 | 5137,0 | 19 | 18 | 18,5 | 100,37 | 100,35 | 100,36 |
| 11 | 5122 | 5155 | 5138,5 | 20 | 20 | 20,0 | 100,39 | 100,39 | 100,39 |
| 14 | 5123 | 5155 | 5139,0 | 21 | 20 | 20,5 | 100,41 | 100,39 | 100,40 |

TABLEAU C.5 – Variation de la vitesse lors du mûrissement (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4599 | 4598 | 4598 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4711 | 4733 | 4722 | 111 | 135 | 123 | 102,4 | 102,9 | 102,7 |
| 7 | 4795 | 4829 | 4812 | 195 | 232 | 213 | 104,2 | 105,0 | 104,6 |
| 11 | 4866 | 4871 | 4869 | 267 | 274 | 270 | 105,8 | 105,9 | 105,9 |
| 14 | 4899 | 4892 | 4895 | 299 | 294 | 297 | 106,5 | 106,4 | 106,5 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4643 | 4668 | 4656 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4870 | 4851 | 4860 | 226 | 183 | 204 | 104,9 | 103,9 | 104,4 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4616 | 4613 | 4614 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4887 | 4885 | 4886 | 271 | 272 | 271 | 105,9 | 105,9 | 105,9 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4631 | 4643 | 4637 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4813 | 4788 | 4800 | 181 | 145 | 163 | 103,9 | 103,1 | 103,5 |
| 7 | 4909 | 4880 | 4894 | 278 | 236 | 257 | 106,0 | 105,1 | 105,5 |
| 11 | 4956 | 4917 | 4937 | 325 | 274 | 299 | 107,0 | 105,9 | 106,5 |
| 14 | 4980 | 4954 | 4967 | 349 | 311 | 330 | 107,5 | 106,7 | 107,1 |

TABLEAU C.6 – Variation de l’allongement axial lors du mûrissement (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,756 | 249,601 | 249,679 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,748 | 249,566 | 249,657 | -32 | -140 | -86 |
| 7 | 249,710 | 249,544 | 249,627 | -184 | -228 | -206 |
| 11 | 249,726 | 249,563 | 249,645 | -120 | -152 | -136 |
| 14 | 249,731 | 249,585 | 249,658 | -100 | -66 | -83 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,633 | 249,899 | 249,766 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,608 | 249,884 | 249,746 | -98 | -60 | -79 |
| 7 | 249,614 | 249,860 | 249,737 | -76 | -158 | -117 |
| 11 | 249,613 | 249,865 | 249,739 | -78 | -138 | -108 |
| 14 | 249,639 | 249,877 | 249,758 | 26 | -88 | -31 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 250,013 | 249,829 | 249,921 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 250,001 | 249,825 | 249,913 | -50 | -18 | -34 |
| 7 | 250,003 | 249,822 | 249,912 | -42 | -28 | -35 |
| 11 | 250,000 | 249,816 | 249,908 | -54 | -52 | -53 |
| 14 | 250,007 | 249,836 | 249,921 | -26 | 26 | 0 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,837 | 249,852 | 249,844 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,824 | 249,849 | 249,836 | -50 | -12 | -31 |
| 7 | 249,821 | 249,841 | 249,831 | -62 | -44 | -53 |
| 11 | 249,816 | 249,844 | 249,830 | -82 | -30 | -56 |
| 14 | 249,845 | 249,865 | 249,855 | 32 | 54 | 43 |

TABLEAU C.7 – Variation de la masse lors du mûrissement (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5214 | 5063 | 5138,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5214 | 5063 | 5138,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5214 | 5063 | 5138,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5214 | 5063 | 5138,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5214 | 5063 | 5138,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5039 | 5102 | 5070,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5077 | 5136 | 5106,5 | 38 | 34 | 36,0 | 100,75 | 100,67 | 100,71 |
| 7 | 5079 | 5139 | 5109,0 | 40 | 37 | 38,5 | 100,79 | 100,73 | 100,76 |
| 11 | 5083 | 5142 | 5112,5 | 44 | 40 | 42,0 | 100,87 | 100,78 | 100,83 |
| 14 | 5084 | 5144 | 5114,0 | 45 | 42 | 43,5 | 100,89 | 100,82 | 100,86 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5079 | 5170 | 5124,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5114 | 5200 | 5157,0 | 35 | 30 | 32,5 | 100,69 | 100,58 | 100,63 |
| 7 | 5117 | 5203 | 5160,0 | 38 | 33 | 35,5 | 100,75 | 100,64 | 100,69 |
| 11 | 5120 | 5206 | 5163,0 | 41 | 36 | 38,5 | 100,81 | 100,70 | 100,75 |
| 14 | 5122 | 5208 | 5165,0 | 43 | 38 | 40,5 | 100,85 | 100,74 | 100,79 |

TABLEAU C.8 – Variation de la vitesse lors du mûrissement (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4407 | 4360 | 4383 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4617 | 4611 | 4614 | 211 | 251 | 231 | 104,8 | 105,8 | 105,3 |
| 7 | 4695 | 4654 | 4675 | 288 | 294 | 291 | 106,5 | 106,7 | 106,6 |
| 11 | 4733 | 4707 | 4720 | 326 | 347 | 337 | 107,4 | 108,0 | 107,7 |
| 14 | 4747 | 4738 | 4743 | 341 | 378 | 359 | 107,7 | 108,7 | 108,2 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4422 | 4439 | 4430 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4715 | 4731 | 4723 | 293 | 293 | 293 | 106,6 | 106,6 | 106,6 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4365 | 4344 | 4355 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4821 | 4781 | 4801 | 455 | 438 | 447 | 110,4 | 110,1 | 110,3 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4387 | 4403 | 4395 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4637 | 4645 | 4641 | 250 | 242 | 246 | 105,7 | 105,5 | 105,6 |
| 7 | 4715 | 4744 | 4730 | 328 | 342 | 335 | 107,5 | 107,8 | 107,6 |
| 11 | 4795 | 4762 | 4778 | 407 | 359 | 383 | 109,3 | 108,2 | 108,7 |
| 14 | 4793 | 4791 | 4792 | 406 | 389 | 397 | 109,2 | 108,8 | 109,0 |

TABLEAU C.9 – Variation de l’allongement axial lors du mûrissement (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,735 | 249,821 | 249,778 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,729 | 249,815 | 249,772 | -26 | -22 | -24 |
| 7 | 249,729 | 249,809 | 249,769 | -26 | -46 | -36 |
| 11 | 249,725 | 249,810 | 249,767 | -42 | -44 | -43 |
| 14 | 249,725 | 249,810 | 249,768 | -40 | -42 | -41 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,197 | 249,730 | 249,464 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,194 | 249,738 | 249,466 | -12 | 32 | 10 |
| 7 | 249,191 | 249,736 | 249,464 | -24 | 24 | 0 |
| 11 | 249,192 | 249,736 | 249,464 | -22 | 22 | 0 |
| 14 | 249,191 | 249,726 | 249,458 | -26 | -18 | -22 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,483 | 249,928 | 249,705 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,491 | 249,934 | 249,712 | 30 | 24 | 27 |
| 7 | 249,495 | 249,935 | 249,715 | 48 | 28 | 38 |
| 11 | 249,496 | 249,939 | 249,717 | 50 | 46 | 48 |
| 14 | 249,493 | 249,940 | 249,717 | 40 | 50 | 45 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,691 | 249,722 | 249,706 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,694 | 249,724 | 249,709 | 14 | 10 | 12 |
| 7 | 249,697 | 249,732 | 249,714 | 24 | 40 | 32 |
| 11 | 249,705 | 249,731 | 249,718 | 56 | 38 | 47 |
| 14 | 249,696 | 249,732 | 249,714 | 22 | 42 | 32 |

TABLEAU C.10 – Variation de la masse lors du mûrissement (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5125 | 5207 | 5166 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5125 | 5207 | 5166 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5125 | 5207 | 5166 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5125 | 5207 | 5166 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5125 | 5207 | 5166 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5017 | 5113 | 5065 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 5017 | 5113 | 5065 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 7 | 5017 | 5113 | 5065 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 11 | 5017 | 5113 | 5065 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 5017 | 5113 | 5065 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5059 | 5014 | 5036,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5092 | 5044 | 5068,0 | 33 | 30 | 31,5 | 100,65 | 100,60 | 100,63 |
| 7 | 5096 | 5049 | 5072,5 | 37 | 35 | 36,0 | 100,73 | 100,70 | 100,71 |
| 11 | 5098 | 5050 | 5074,0 | 39 | 36 | 37,5 | 100,77 | 100,72 | 100,74 |
| 14 | 5100 | 5052 | 5076,0 | 41 | 38 | 39,5 | 100,81 | 100,76 | 100,78 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Mûrissement (jours) | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|------------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 5133 | 5010 | 5071,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | 5161 | 5037 | 5099,0 | 28 | 27 | 27,5 | 100,55 | 100,54 | 100,54 |
| 7 | 5165 | 5042 | 5103,5 | 32 | 32 | 32,0 | 100,62 | 100,64 | 100,63 |
| 11 | 5167 | 5043 | 5105,0 | 34 | 33 | 33,5 | 100,66 | 100,66 | 100,66 |
| 14 | 5168 | 5044 | 5106,0 | 35 | 34 | 34,5 | 100,68 | 100,68 | 100,68 |

TABLEAU C.11 – Variation de la vitesse lors du mûrissement (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4322 | 4320 | 4321 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4538 | 4510 | 4524 | 216 | 191 | 203 | 105,0 | 104,4 | 104,7 |
| 7 | 4681 | 4654 | 4667 | 358 | 335 | 346 | 108,3 | 107,7 | 108,0 |
| 11 | 4746 | 4689 | 4717 | 423 | 369 | 396 | 109,8 | 108,5 | 109,2 |
| 14 | 4728 | 4730 | 4729 | 406 | 410 | 408 | 109,4 | 109,5 | 109,4 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4364 | 4365 | 4365 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4739 | 4767 | 4753 | 375 | 401 | 388 | 108,6 | 109,2 | 108,9 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4271 | 4357 | 4314 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 4754 | 4773 | 4764 | 483 | 416 | 449 | 111,3 | 109,5 | 110,4 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Mûrissement (jours) | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 4310 | 4338 | 4324 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3 | 4574 | 4592 | 4583 | 263 | 253 | 258 | 106,1 | 105,8 | 106,0 |
| 7 | 4715 | 4720 | 4718 | 405 | 382 | 393 | 109,4 | 108,8 | 109,1 |
| 11 | 4773 | 4786 | 4780 | 463 | 448 | 455 | 110,7 | 110,3 | 110,5 |
| 14 | 4772 | 4793 | 4782 | 461 | 454 | 458 | 110,7 | 110,5 | 110,6 |

TABLEAU C.12 – Variation de l’allongement axial lors du mûrissement (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,607 | 250,211 | 249,909 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,602 | 250,206 | 249,904 | -18 | -22 | -20 |
| 7 | 249,595 | 250,197 | 249,896 | -46 | -56 | -51 |
| 11 | 249,599 | 250,201 | 249,900 | -32 | -40 | -36 |
| 14 | 249,600 | 250,195 | 249,897 | -28 | -64 | -46 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,835 | 249,847 | 249,841 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,830 | 249,859 | 249,844 | -22 | 46 | 12 |
| 7 | 249,826 | 249,855 | 249,840 | -36 | 30 | -3 |
| 11 | 249,820 | 249,848 | 249,834 | -62 | 2 | -30 |
| 14 | 249,820 | 249,838 | 249,829 | -60 | -36 | -48 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,894 | 249,466 | 249,680 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,882 | 249,484 | 249,683 | -48 | 74 | 13 |
| 7 | 249,891 | 249,481 | 249,686 | -10 | 62 | 26 |
| 11 | 249,899 | 249,482 | 249,690 | 20 | 64 | 42 |
| 14 | 249,899 | 249,479 | 249,689 | 20 | 52 | 36 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Mûrissement (jours) | Longueur (mm) | | | Allongement ($\mu\text{m/m}$) | | |
|------------------------|---------------|----------|---------|---------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 1 | 249,796 | 249,726 | 249,761 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 249,805 | 249,723 | 249,764 | 36 | -10 | 13 |
| 7 | 249,807 | 249,723 | 249,765 | 44 | -10 | 17 |
| 11 | 249,805 | 249,725 | 249,765 | 38 | -2 | 18 |
| 14 | 249,806 | 249,726 | 249,766 | 42 | 2 | 22 |

ANNEXE D : VARIATION DE LA MASSE, DE LA VITESSE ET DE L'ALLONGEMENT AXIAL LORS DES CYCLES DE GEL-DÉGEL DES BÉTONS DE LA SÉRIE I

Les tableaux D.1 à D.24 présentent les variations de la masse, de la vitesse et de l'allongement axial des bétons de la série I lors des cycles de gel-dégel.

Les prismes ont eu deux types d'enrobage de surface lors du gel : scellé et non scellé. L'enrobage scellé a consisté à placer des prismes préalablement emballés dans du papier d'aluminium autocollant dans des sacs en plastique. Les sacs ont été ensuite fermés de façon étanche à l'aide d'une reliure en plastique maintenu en place à l'aide de pinces métalliques. L'enrobage non scellé ne comportait aucun enrobage lors des cycles de gel-dégel.

Les mesures ont été effectuées à tous les 35 cycles environ. Les techniques de mesure et les traitements des résultats de mesure sont présentés au chapitre 4. Les noms de prismes expliqués au chapitre 4 ont été aussi utilisés pour les cycles de gel-dégel.

TABLEAU D.1 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-S-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 30 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 65 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 105 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 140 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 170 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 205 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 240 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 275 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 308 | 5261 | 5187 | 5224 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5151 | 5229 | 5190,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 30 | 5186 | 5261 | 5223,5 | 35 | 32 | 33,5 | 100,68 | 100,61 | 100,65 |
| 65 | 5247 | 5327 | 5287,0 | 96 | 98 | 97,0 | 101,86 | 101,87 | 101,87 |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 140 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.2 - Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5220 | 5199 | 5209,5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 30 | 5220 | 5199 | 5209,5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 65 | 5220 | 5199 | 5209,5 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 105 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 140 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 170 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 205 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 240 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 275 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |
| 308 | 5220 | 5203 | 5211,5 | 0 | 4 | 2 | 100,00 | 100,08 | 100,04 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5205 | 5164 | 5184,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 30 | 5207 | 5166 | 5186,5 | 2 | 2 | 2,0 | 100,04 | 100,04 | 100,04 |
| 65 | 5210 | 5168 | 5189,0 | 5 | 4 | 4,5 | 100,10 | 100,08 | 100,09 |
| 105 | 5215 | 5172 | 5193,5 | 10 | 8 | 9,0 | 100,19 | 100,15 | 100,17 |
| 140 | 5226 | 5181 | 5203,5 | 21 | 17 | 19,0 | 100,40 | 100,33 | 100,37 |
| 170 | 5239 | 5194 | 5216,5 | 34 | 30 | 32,0 | 100,65 | 100,58 | 100,62 |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.3 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-S-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4831 | 4848 | 4839 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 30 | 4806 | 4808 | 4807 | -25 | -40 | -32 | 99,5 | 99,2 | 99,3 |
| 65 | 4824 | 4826 | 4825 | -7 | -22 | -14 | 99,9 | 99,6 | 99,7 |
| 105 | 4829 | 4844 | 4837 | -2 | -3 | -3 | 100,0 | 99,9 | 99,9 |
| 140 | 4829 | 4848 | 4838 | -2 | 0 | -1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 170 | 4839 | 4846 | 4843 | 8 | -2 | 3 | 100,2 | 100,0 | 100,1 |
| 205 | 4833 | 4849 | 4841 | 2 | 2 | 2 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 240 | 4851 | 4866 | 4859 | 20 | 19 | 19 | 100,4 | 100,4 | 100,4 |
| 275 | 4851 | 4868 | 4859 | 20 | 20 | 20 | 100,4 | 100,4 | 100,4 |
| 308 | 4833 | 4841 | 4837 | 2 | -7 | -3 | 100,0 | 99,9 | 99,9 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4887 | 4892 | 4889 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 30 | 4447 | 4571 | 4509 | -439 | -321 | -380 | 91,0 | 93,4 | 92,2 |
| 65 | 2507 | 2738 | 2623 | -2379 | -2154 | -2266 | 51,3 | 56,0 | 53,6 |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 140 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.4 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4902 | 4914 | 4908 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 30 | 4924 | 4905 | 4915 | 22 | -9 | 7 | 100,5 | 99,8 | 100,1 |
| 65 | 4917 | 4926 | 4922 | 15 | 12 | 14 | 100,3 | 100,2 | 100,3 |
| 105 | 4942 | 4924 | 4933 | 40 | 10 | 25 | 100,8 | 100,2 | 100,5 |
| 140 | 4970 | 4966 | 4968 | 68 | 52 | 60 | 101,4 | 101,1 | 101,2 |
| 170 | 4970 | 4944 | 4957 | 68 | 29 | 49 | 101,4 | 100,6 | 101,0 |
| 205 | 4975 | 4965 | 4970 | 73 | 51 | 62 | 101,5 | 101,0 | 101,3 |
| 240 | 4965 | 4986 | 4975 | 63 | 72 | 67 | 101,3 | 101,5 | 101,4 |
| 275 | 4970 | 4988 | 4979 | 68 | 74 | 71 | 101,4 | 101,5 | 101,4 |
| 308 | 5000 | 4973 | 4987 | 98 | 59 | 79 | 102,0 | 101,2 | 101,6 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4986 | 4973 | 4980 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 30 | 4919 | 4954 | 4937 | -67 | -19 | -43 | 98,7 | 99,6 | 99,1 |
| 65 | 4924 | 4949 | 4937 | -61 | -25 | -43 | 98,8 | 99,5 | 99,1 |
| 105 | 4928 | 4942 | 4935 | -58 | -32 | -45 | 98,8 | 99,4 | 99,1 |
| 140 | 4657 | 4715 | 4686 | -328 | -258 | -293 | 93,4 | 94,8 | 94,1 |
| 170 | 3813 | 3948 | 3880 | -1173 | -1025 | -1099 | 76,5 | 79,4 | 77,9 |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.5 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,3 CP)**

Prismes : 0,3 CP-747-S-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 21,7 | 249,464 | 249,710 | 249,587 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 16,3 | 249,469 | 249,709 | 249,589 | 50 | 26 | 38 |
| 65 | 12,4 | 249,455 | 249,704 | 249,579 | 17 | 25 | 21 |
| 105 | 14,1 | 249,452 | 249,696 | 249,574 | -6 | -16 | -11 |
| 140 | 16,1 | 249,464 | 249,718 | 249,591 | 31 | 61 | 46 |
| 170 | 13,7 | 249,459 | 249,705 | 249,582 | 24 | 22 | 23 |
| 205 | 22,1 | 249,471 | 249,713 | 249,592 | 28 | 8 | 18 |
| 240 | 16,1 | 249,468 | 249,709 | 249,589 | 49 | 27 | 38 |
| 275 | 17,3 | 249,467 | 249,707 | 249,587 | 38 | 12 | 25 |
| 308 | 16,1 | 249,465 | 249,715 | 249,590 | 35 | 49 | 42 |

Prismes : 0,3 CP-747-S-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 21,7 | 249,687 | 249,658 | 249,672 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 16,3 | 249,801 | 249,765 | 249,783 | 486 | 456 | 471 |
| 65 | 13,5 | 251,003 | 250,997 | 251,000 | 5318 | 5408 | 5363 |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - |
| 140 | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.6 - Variation de l'allongement axial lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Prismes : 0,3 CP-747-N-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 17,6 | 250,048 | 249,479 | 249,764 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 16,3 | 250,043 | 249,482 | 249,762 | -15 | 17 | 1 |
| 65 | 12,4 | 250,023 | 249,482 | 249,752 | -73 | 39 | -17 |
| 105 | 14,1 | 250,035 | 249,488 | 249,762 | -33 | 55 | 11 |
| 140 | 16,1 | 250,048 | 249,492 | 249,770 | 6 | 60 | 33 |
| 170 | 13,7 | 250,038 | 249,484 | 249,761 | -21 | 41 | 10 |
| 205 | 22,1 | 250,049 | 249,497 | 249,773 | -21 | 47 | 13 |
| 240 | 16,1 | 250,050 | 249,494 | 249,772 | 16 | 66 | 41 |
| 275 | 17,3 | 250,049 | 249,496 | 249,772 | 4 | 68 | 36 |
| 308 | 16,1 | 250,049 | 249,497 | 249,773 | 10 | 78 | 44 |

Prismes : 0,3 CP-747-N-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 17,6 | 250,175 | 250,083 | 250,129 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 16,3 | 250,184 | 250,092 | 250,138 | 41 | 43 | 42 |
| 65 | 13,5 | 250,191 | 250,094 | 250,142 | 87 | 65 | 76 |
| 105 | 15,3 | 250,205 | 250,101 | 250,153 | 131 | 83 | 107 |
| 140 | 15,9 | 250,349 | 250,182 | 250,266 | 705 | 405 | 555 |
| 170 | 14,7 | 250,732 | 250,521 | 250,626 | 2242 | 1765 | 2004 |
| 205 | - | - | - | - | - | - | - |
| 240 | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.7 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 55 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 90 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 135 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 160 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 195 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 230 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 270 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 305 | 5098 | 5115 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5069 | 5105 | 5087,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 20 | 5083 | 5120 | 5101,5 | 14 | 15 | 14,5 | 100,28 | 100,29 | 100,29 |
| 55 | 5106 | 5139 | 5122,5 | 37 | 34 | 35,5 | 100,73 | 100,67 | 100,70 |
| 90 | 5141 | 5173 | 5157,0 | 72 | 68 | 70,0 | 101,42 | 101,33 | 101,38 |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 160 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 195 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 230 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.8 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 55 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 90 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 135 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 160 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 195 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 230 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 270 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 305 | 5114 | 5153 | 5133,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5123 | 5155 | 5139,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 20 | 5124 | 5156 | 5140,0 | 1 | 1 | 1,0 | 100,02 | 100,02 | 100,02 |
| 55 | 5125 | 5158 | 5141,5 | 2 | 3 | 2,5 | 100,04 | 100,06 | 100,05 |
| 90 | 5129 | 5163 | 5146,0 | 6 | 8 | 7,0 | 100,12 | 100,16 | 100,14 |
| 135 | 5137 | 5169 | 5153,0 | 14 | 14 | 14,0 | 100,27 | 100,27 | 100,27 |
| 160 | 5145 | 5177 | 5161,0 | 22 | 22 | 22,0 | 100,43 | 100,43 | 100,43 |
| 195 | 5153 | 5188 | 5170,5 | 30 | 33 | 31,5 | 100,59 | 100,64 | 100,61 |
| 230 | 5165 | 5204 | 5184,5 | 42 | 49 | 45,5 | 100,82 | 100,95 | 100,89 |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.9 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4899 | 4892 | 4895 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 4780 | 4808 | 4794 | -119 | -84 | -101 | 97,6 | 98,3 | 97,9 |
| 55 | 4839 | 4833 | 4836 | -59 | -59 | -59 | 98,8 | 98,8 | 98,8 |
| 90 | 4866 | 4851 | 4859 | -32 | -41 | -37 | 99,3 | 99,2 | 99,3 |
| 135 | 4883 | 4848 | 4865 | -15 | -44 | -30 | 99,7 | 99,1 | 99,4 |
| 160 | 4885 | 4885 | 4885 | -14 | -7 | -10 | 99,7 | 99,9 | 99,8 |
| 195 | 4848 | 4824 | 4836 | -51 | -67 | -59 | 99,0 | 98,6 | 98,8 |
| 230 | 4853 | 4864 | 4859 | -46 | -27 | -37 | 99,1 | 99,4 | 99,3 |
| 270 | 4803 | 4809 | 4806 | -96 | -82 | -89 | 98,0 | 98,3 | 98,2 |
| 305 | 4798 | 4844 | 4821 | -101 | -47 | -74 | 97,9 | 99,0 | 98,5 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4870 | 4851 | 4860 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 4834 | 4778 | 4806 | -35 | -73 | -54 | 99,3 | 98,5 | 98,9 |
| 55 | 4657 | 4690 | 4674 | -212 | -161 | -187 | 95,6 | 96,7 | 96,2 |
| 90 | 3207 | 3613 | 3410 | -1662 | -1238 | -1450 | 65,9 | 74,5 | 70,2 |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 160 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 195 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 230 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.10 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 SF)

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4887 | 4885 | 4886 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 4809 | 4785 | 4797 | -77 | -100 | -89 | 98,4 | 97,9 | 98,2 |
| 55 | 4870 | 4861 | 4865 | -17 | -24 | -20 | 99,7 | 99,5 | 99,6 |
| 90 | 4914 | 4885 | 4899 | 27 | 0 | 14 | 100,6 | 100,0 | 100,3 |
| 135 | 4942 | 4933 | 4937 | 55 | 48 | 52 | 101,1 | 101,0 | 101,1 |
| 160 | 4916 | 4899 | 4907 | 29 | 14 | 21 | 100,6 | 100,3 | 100,4 |
| 195 | 4863 | 4851 | 4857 | -24 | -34 | -29 | 99,5 | 99,3 | 99,4 |
| 230 | 4930 | 4868 | 4899 | 43 | -17 | 13 | 100,9 | 99,7 | 100,3 |
| 270 | 4890 | 4881 | 4886 | 3 | -3 | 0 | 100,1 | 99,9 | 100,0 |
| 305 | 4871 | 4897 | 4884 | -15 | 12 | -2 | 99,7 | 100,2 | 100,0 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4980 | 4954 | 4967 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 20 | 4881 | 4885 | 4883 | -99 | -69 | -84 | 98,0 | 98,6 | 98,3 |
| 55 | 4921 | 4897 | 4909 | -60 | -57 | -58 | 98,8 | 98,8 | 98,8 |
| 90 | 4928 | 4764 | 4846 | -53 | -190 | -122 | 98,9 | 96,2 | 97,5 |
| 135 | 4728 | 4709 | 4719 | -252 | -245 | -249 | 94,9 | 95,1 | 95,0 |
| 160 | 4633 | 4605 | 4619 | -348 | -349 | -348 | 93,0 | 93,0 | 93,0 |
| 195 | 4439 | 4444 | 4442 | -542 | -510 | -526 | 89,1 | 89,7 | 89,4 |
| 230 | 3668 | 3429 | 3548 | -1313 | -1525 | -1419 | 73,6 | 69,2 | 71,4 |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.11 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,3 SF)**

Prismes : 0,3 SF-539-S-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 23,7 | 249,730 | 249,566 | 249,648 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 19,3 | 249,740 | 249,554 | 249,647 | 64 | -22 | 21 |
| 55 | 15,8 | 249,716 | 249,566 | 249,641 | -15 | 43 | 14 |
| 90 | 18,4 | 249,710 | 249,548 | 249,629 | -53 | -43 | -48 |
| 135 | 15,0 | 249,718 | 249,539 | 249,628 | -2 | -58 | -30 |
| 160 | 18,0 | 249,711 | 249,532 | 249,622 | -45 | -103 | -74 |
| 195 | 15,2 | 249,712 | 249,542 | 249,627 | -25 | -49 | -37 |
| 230 | 19,0 | 249,709 | 249,559 | 249,634 | -58 | -2 | -30 |
| 270 | 17,2 | 249,714 | 249,548 | 249,631 | -28 | -36 | -32 |
| 305 | 16,6 | 249,715 | 249,578 | 249,646 | -23 | 89 | 33 |

Prismes : 0,3 SF-539-S-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 23,7 | 249,639 | 249,877 | 249,758 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 19,6 | 249,608 | 249,853 | 249,730 | -104 | -73 | -89 |
| 55 | 16,2 | 249,691 | 249,891 | 249,791 | 250 | 97 | 173 |
| 90 | 17,6 | 250,339 | 250,433 | 250,386 | 2838 | 2259 | 2548 |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - |
| 160 | - | - | - | - | - | - | - |
| 195 | - | - | - | - | - | - | - |
| 230 | - | - | - | - | - | - | - |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.12 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,3 SF)**

Prismes : 0,3 SF-539-N-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 19,3 | 250,007 | 249,836 | 249,921 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 19,3 | 250,000 | 249,814 | 249,907 | -26 | -86 | -56 |
| 55 | 15,8 | 249,983 | 249,811 | 249,897 | -75 | -79 | -77 |
| 90 | 18,4 | 249,988 | 249,817 | 249,902 | -71 | -69 | -70 |
| 135 | 15,0 | 249,982 | 249,811 | 249,897 | -74 | -74 | -74 |
| 160 | 18,0 | 249,991 | 249,816 | 249,903 | -57 | -73 | -65 |
| 195 | 15,2 | 249,984 | 249,809 | 249,896 | -69 | -86 | -77 |
| 230 | 19,0 | 250,000 | 249,821 | 249,910 | -26 | -56 | -41 |
| 270 | 17,2 | 249,989 | 249,814 | 249,902 | -58 | -75 | -66 |
| 305 | 16,6 | 249,988 | 249,815 | 249,901 | -59 | -69 | -64 |

Prismes : 0,3 SF-539-N-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 19,3 | 249,845 | 249,865 | 249,855 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 19,6 | 249,826 | 249,851 | 249,839 | -76 | -58 | -67 |
| 55 | 16,2 | 249,825 | 249,850 | 249,837 | -63 | -43 | -53 |
| 90 | 17,6 | 249,834 | 249,858 | 249,846 | -33 | -19 | -26 |
| 135 | 15,4 | 249,900 | 249,917 | 249,908 | 242 | 228 | 235 |
| 160 | 17,9 | 249,962 | 249,996 | 249,979 | 476 | 532 | 504 |
| 195 | 15,8 | 250,040 | 250,150 | 250,095 | 802 | 1158 | 980 |
| 230 | 13,8 | 250,424 | 250,485 | 250,454 | 2348 | 2510 | 2429 |
| 270 | - | - | - | - | - | - | - |
| 305 | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.13 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 24 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 48 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 83 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 148 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 183 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 218 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 253 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 288 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 308 | 5202 | 5011 | 5106,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5179 | 5029 | 5104 | 0 | 0 | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 24 | 5237 | 5077 | 5157 | 58 | 48 | 53 | 101,12 | 100,95 | 101,04 |
| 48 | 5256 | 5096 | 5176 | 77 | 67 | 72 | 101,49 | 101,33 | 101,41 |
| 83 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.14 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 24 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 48 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 83 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 148 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 183 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 218 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 253 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 288 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 308 | 5110 | 5170 | 5140 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5122 | 5208 | 5165,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 24 | 5124 | 5211 | 5167,5 | 2 | 3 | 2,5 | 100,04 | 100,06 | 100,05 |
| 48 | 5132 | 5219 | 5175,5 | 10 | 11 | 10,5 | 100,20 | 100,21 | 100,20 |
| 83 | 5149 | 5250 | 5199,5 | 27 | 42 | 34,5 | 100,53 | 100,81 | 100,67 |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.15 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4747 | 4738 | 4743 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 24 | 4727 | 4727 | 4727 | -21 | -11 | -16 | 99,6 | 99,8 | 99,7 |
| 48 | 4765 | 4738 | 4751 | 18 | 0 | 9 | 100,4 | 100,0 | 100,2 |
| 83 | 4754 | 4752 | 4753 | 6 | 14 | 10 | 100,1 | 100,3 | 100,2 |
| 148 | 4719 | 4735 | 4727 | -29 | -3 | -16 | 99,4 | 99,9 | 99,7 |
| 183 | 4754 | 4755 | 4755 | 6 | 18 | 12 | 100,1 | 100,4 | 100,3 |
| 218 | 4746 | 4759 | 4752 | -2 | 21 | 10 | 100,0 | 100,4 | 100,2 |
| 253 | 4754 | 4746 | 4750 | 6 | 8 | 7 | 100,1 | 100,2 | 100,2 |
| 288 | 4777 | 4752 | 4764 | 29 | 14 | 22 | 100,6 | 100,3 | 100,5 |
| 308 | 4746 | 4752 | 4749 | -2 | 14 | 6 | 100,0 | 100,3 | 100,1 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4715 | 4731 | 4723 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 24 | 4400 | 4393 | 4396 | -316 | -338 | -327 | 93,3 | 92,8 | 93,1 |
| 48 | 3982 | 3820 | 3901 | -734 | -911 | -823 | 84,4 | 80,7 | 82,6 |
| 83 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.16 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 CP)

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-V ₀) (m/s) | | | Variation (V/V ₀) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|-------------------------------------|----------|---------|-----------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4821 | 4781 | 4801 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 24 | 4799 | 4804 | 4802 | -21 | 23 | 1 | 99,6 | 100,5 | 100,0 |
| 48 | 4818 | 4829 | 4823 | -3 | 48 | 22 | 99,9 | 101,0 | 100,5 |
| 83 | 4833 | 4826 | 4829 | 12 | 45 | 28 | 100,2 | 100,9 | 100,6 |
| 148 | 4801 | 4804 | 4803 | -20 | 23 | 2 | 99,6 | 100,5 | 100,0 |
| 183 | 4801 | 4816 | 4809 | -20 | 35 | 7 | 99,6 | 100,7 | 100,2 |
| 218 | 4821 | 4851 | 4836 | 0 | 70 | 35 | 100,0 | 101,5 | 100,7 |
| 253 | 4818 | 4849 | 4833 | -3 | 68 | 32 | 99,9 | 101,4 | 100,7 |
| 288 | 4806 | 4836 | 4821 | -15 | 55 | 20 | 99,7 | 101,1 | 100,4 |
| 308 | 4809 | 4836 | 4823 | -12 | 55 | 21 | 99,8 | 101,1 | 100,4 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-V ₀) (m/s) | | | Variation (V/V ₀) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|-------------------------------------|----------|---------|-----------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4793 | 4791 | 4792 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 24 | 4749 | 4749 | 4749 | -44 | -42 | -43 | 99,1 | 99,1 | 99,1 |
| 48 | 4673 | 4662 | 4667 | -120 | -129 | -125 | 97,5 | 97,3 | 97,4 |
| 83 | 3986 | 4042 | 4014 | -807 | -750 | -778 | 83,2 | 84,4 | 83,8 |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.17 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,4 CP)**

Prismes : 0,4 CP-817-S-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 21,4 | 249,725 | 249,810 | 249,768 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 13,3 | 249,719 | 249,794 | 249,756 | 21 | -22 | 0 |
| 48 | 11,6 | 249,713 | 249,784 | 249,748 | 4 | -50 | -23 |
| 83 | 11,6 | 249,713 | 249,788 | 249,750 | 4 | -34 | -15 |
| 148 | 13,8 | 249,724 | 249,794 | 249,759 | 38 | -24 | 7 |
| 183 | 12,5 | 249,716 | 249,789 | 249,753 | 13 | -35 | -11 |
| 218 | 11,9 | 249,715 | 249,787 | 249,751 | 12 | -40 | -14 |
| 253 | 13,5 | 249,717 | 249,795 | 249,756 | 9 | -17 | -4 |
| 288 | 14,2 | 249,720 | 249,795 | 249,757 | 18 | -20 | -1 |
| 308 | 17,3 | 249,730 | 249,795 | 249,763 | 43 | -37 | 3 |

Prismes : 0,4 CP-817-S-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 21,4 | 249,191 | 249,726 | 249,458 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 13,3 | 249,382 | 249,898 | 249,640 | 811 | 733 | 772 |
| 48 | 11,6 | 249,803 | 250,298 | 250,050 | 2510 | 2346 | 2428 |
| 83 | - | - | - | - | - | - | - |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.18 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,4 CP)**

Prismes : 0,4 CP-817-N-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 19,6 | 249,493 | 249,940 | 249,717 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 13,3 | 249,487 | 249,936 | 249,711 | 9 | 19 | 14 |
| 48 | 11,6 | 249,485 | 249,932 | 249,709 | 12 | 12 | 12 |
| 83 | 11,6 | 249,488 | 249,938 | 249,713 | 24 | 34 | 29 |
| 148 | 13,8 | 249,494 | 249,949 | 249,721 | 36 | 66 | 51 |
| 183 | 12,5 | 249,496 | 249,945 | 249,720 | 49 | 57 | 53 |
| 218 | 11,9 | 249,488 | 249,934 | 249,711 | 20 | 16 | 18 |
| 253 | 13,5 | 249,489 | 249,944 | 249,716 | 18 | 48 | 33 |
| 288 | 14,2 | 249,499 | 249,940 | 249,719 | 54 | 28 | 41 |
| 308 | 17,3 | 249,510 | 249,950 | 249,730 | 79 | 53 | 66 |

Prismes : 0,4 CP-817-N-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 19,6 | 249,696 | 249,732 | 249,714 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 13,3 | 249,705 | 249,733 | 249,719 | 69 | 37 | 53 |
| 48 | 11,6 | 249,742 | 249,772 | 249,757 | 228 | 202 | 215 |
| 83 | 11,6 | 250,121 | 250,248 | 250,184 | 1746 | 2108 | 1927 |
| 148 | - | - | - | - | - | - | - |
| 183 | - | - | - | - | - | - | - |
| 218 | - | - | - | - | - | - | - |
| 253 | - | - | - | - | - | - | - |
| 288 | - | - | - | - | - | - | - |
| 308 | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.19 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 35 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 70 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 105 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 135 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 170 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 200 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 245 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 275 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 310 | 5125 | 5208 | 5166,5 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5017 | 5113 | 5065,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 5104 | 5203 | 5153,5 | 87 | 90 | 88,5 | 101,73 | 101,76 | 101,75 |
| 70 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.20 – Variation de la masse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 35 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 70 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 105 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 135 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 170 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 200 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 245 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 275 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 310 | 5125 | 5081 | 5103 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Cycles de gel-dégel | Masse de prisme (g) | | | Variation de masse (g) | | | Variation de masse (%) | | |
|---------------------|---------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 5168 | 5044 | 5106,0 | 0 | 0 | 0,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 5189 | 5065 | 5127,0 | 21 | 21 | 21,0 | 100,41 | 100,42 | 100,41 |
| 70 | 5178 | 5054 | 5116,0 | 10 | 10 | 10,0 | 100,19 | 100,20 | 100,20 |
| 105 | 5170 | 5045 | 5107,5 | 2 | 1 | 1,5 | 100,04 | 100,02 | 100,03 |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.21 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4728 | 4730 | 4729 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 35 | 4728 | 4693 | 4711 | 0 | -36 | -18 | 100,0 | 99,2 | 99,6 |
| 70 | 4707 | 4668 | 4688 | -21 | -62 | -41 | 99,6 | 98,7 | 99,1 |
| 105 | 4693 | 4674 | 4684 | -35 | -55 | -45 | 99,3 | 98,8 | 99,0 |
| 135 | 4727 | 4687 | 4707 | -2 | -43 | -22 | 100,0 | 99,1 | 99,5 |
| 170 | 4767 | 4693 | 4730 | 39 | -36 | 1 | 100,8 | 99,2 | 100,0 |
| 200 | 4701 | 4684 | 4692 | -27 | -46 | -36 | 99,4 | 99,0 | 99,2 |
| 245 | 4747 | 4693 | 4720 | 19 | -36 | -9 | 100,4 | 99,2 | 99,8 |
| 275 | 4772 | 4701 | 4736 | 44 | -29 | 7 | 100,9 | 99,4 | 100,2 |
| 310 | 4757 | 4717 | 4737 | 29 | -13 | 8 | 100,6 | 99,7 | 100,2 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-Vo) (m/s) | | | Variation (V/Vo) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4739 | 4767 | 4753 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 35 | 2338 | 2235 | 2287 | -2401 | -2532 | -2467 | 49,3 | 46,9 | 48,1 |
| 70 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU D.22 – Variation de la vitesse lors des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 SF)

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-V ₀) (m/s) | | | Variation (V/V ₀) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|-------------------------------------|----------|---------|-----------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4754 | 4773 | 4764 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 35 | 4739 | 4764 | 4751 | -14 | -10 | -12 | 99,7 | 99,8 | 99,7 |
| 70 | 4707 | 4747 | 4727 | -46 | -26 | -36 | 99,0 | 99,5 | 99,2 |
| 105 | 4711 | 4749 | 4730 | -43 | -24 | -34 | 99,1 | 99,5 | 99,3 |
| 135 | 4760 | 4767 | 4764 | 6 | -7 | 0 | 100,1 | 99,9 | 100,0 |
| 170 | 4749 | 4747 | 4748 | -5 | -26 | -15 | 99,9 | 99,5 | 99,7 |
| 200 | 4747 | 4775 | 4761 | -6 | 2 | -2 | 99,9 | 100,0 | 99,9 |
| 245 | 4754 | 4799 | 4777 | 0 | 26 | 13 | 100,0 | 100,5 | 100,3 |
| 275 | 4751 | 4816 | 4783 | -3 | 43 | 20 | 99,9 | 100,9 | 100,4 |
| 310 | 4795 | 4790 | 4792 | 41 | 16 | 29 | 100,9 | 100,3 | 100,6 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Cycles de gel-dégel | Vitesse (m/s) | | | Variation (V-V ₀) (m/s) | | | Variation (V/V ₀) (%) | | |
|---------------------|---------------|----------|---------|-------------------------------------|----------|---------|-----------------------------------|----------|---------|
| | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 4772 | 4793 | 4782 | 0 | 0 | 0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 35 | 4575 | 4586 | 4580 | -196 | -207 | -202 | 95,9 | 95,7 | 95,8 |
| 70 | 3598 | 3637 | 3618 | -1174 | -1156 | -1165 | 75,4 | 75,9 | 75,6 |
| 105 | 3063 | 2937 | 3000 | -1709 | -1856 | -1782 | 64,2 | 61,3 | 62,7 |
| 135 | 2797 | 2590 | 2693 | -1975 | -2203 | -2089 | 58,6 | 54,0 | 56,3 |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.23 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,4 SF)**

Prismes : 0,4 SF-976-S-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 23,0 | 249,600 | 250,195 | 249,897 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 16,7 | 249,591 | 250,192 | 249,891 | -1 | 21 | 10 |
| 70 | 15,6 | 249,587 | 250,194 | 249,890 | -11 | 35 | 12 |
| 105 | 18,9 | 249,596 | 250,193 | 249,895 | 9 | 15 | 12 |
| 135 | 18,0 | 249,590 | 250,191 | 249,890 | -11 | 10 | -1 |
| 170 | 18,0 | 249,583 | 250,186 | 249,884 | -39 | -10 | -25 |
| 200 | 19,3 | 249,597 | 250,192 | 249,894 | 8 | 8 | 8 |
| 245 | 18,7 | 249,587 | 250,192 | 249,889 | -26 | 10 | -8 |
| 275 | 19,0 | 249,592 | 250,196 | 249,894 | -8 | 26 | 9 |
| 310 | 19,0 | 249,589 | 250,191 | 249,890 | -20 | 4 | -8 |

Prismes : 0,4 SF-976-S-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 23,0 | 249,816 | 249,839 | 249,828 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 15,0 | 251,038 | 251,029 | 251,034 | 4936 | 4807 | 4871 |
| 70 | - | - | - | - | - | - | - |
| 105 | - | - | - | - | - | - | - |
| 135 | - | - | - | - | - | - | - |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - |

**TABLEAU D.24 – Variation de l’allongement axial lors des cycles de gel-dégel
(Béton 0,4 SF)**

Prismes : 0,4 SF-976-N-S

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 17,4 | 249,906 | 249,479 | 249,692 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 16,7 | 249,902 | 249,481 | 249,692 | -12 | 14 | 1 |
| 70 | 15,6 | 249,907 | 249,490 | 249,699 | 14 | 56 | 35 |
| 105 | 18,9 | 249,914 | 249,492 | 249,703 | 22 | 44 | 33 |
| 135 | 18,0 | 249,909 | 249,485 | 249,697 | 9 | 23 | 16 |
| 170 | 18,0 | 249,908 | 249,476 | 249,692 | 5 | -15 | -5 |
| 200 | 19,3 | 249,912 | 249,480 | 249,696 | 14 | -4 | 5 |
| 245 | 18,7 | 249,910 | 249,478 | 249,694 | 7 | -9 | -1 |
| 275 | 19,0 | 249,913 | 249,485 | 249,699 | 17 | 15 | 16 |
| 310 | 19,0 | 249,909 | 249,482 | 249,695 | 3 | 3 | 3 |

Prismes : 0,4 SF-976-N-N

| Cycles de gel-dégel | Température (°C) | Longueur (mm) | | | Allongement (µm/m) | | |
|---------------------|------------------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne | Prisme 1 | Prisme 2 | Moyenne |
| 0 | 17,4 | 249,806 | 249,726 | 249,766 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 15,0 | 249,845 | 249,770 | 249,807 | 167 | 189 | 178 |
| 70 | 15,6 | 250,262 | 250,178 | 250,220 | 1835 | 1820 | 1828 |
| 105 | 18,9 | 250,566 | 250,494 | 250,530 | 3034 | 3065 | 3050 |
| 135 | 18,0 | 250,805 | 250,738 | 250,771 | 3994 | 4049 | 4021 |
| 170 | - | - | - | - | - | - | - |
| 200 | - | - | - | - | - | - | - |
| 245 | - | - | - | - | - | - | - |
| 275 | - | - | - | - | - | - | - |
| 310 | - | - | - | - | - | - | - |

ANNEXE E : VARIATION DE LA MASSE DES TÉMOINS (BÉTONS DE LA SÉRIE I)

Les tableaux E.1 à E.8 présentent les variations de la masse des prismes témoins lors du temps correspondant aux 300 cycles de gel-dégel.

Les prismes témoins ont d'abord subi un mûrissement scellé ou non scellé, puis, au lieu d'être soumis au gel, ils ont été conservés soit dans l'eau, soit dans un état scellé dans une chambre à température et humidité contrôlées.

Pour faciliter l'analyse, nous avons utilisé les même noms de prismes que ceux des prismes de gel-dégel en ajoutant une lettre T en avant du nom.

TABLEAU E.1 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,3 CP)**Prisme : T 0,3 CP-747-S-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5236 | 0 | 100 |
| 30 | 5236 | 0 | 100 |
| 65 | 5236 | 0 | 100 |
| 105 | 5236 | 0 | 100 |
| 140 | 5236 | 0 | 100 |
| 170 | 5236 | 0 | 100 |
| 205 | 5236 | 0 | 100 |
| 240 | 5236 | 0 | 100 |
| 275 | 5236 | 0 | 100 |
| 308 | 5236 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,3 CP-747-S-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5081 | 0 | 100,00 |
| 30 | 5101 | 20 | 100,39 |
| 65 | 5105 | 24 | 100,47 |
| 105 | 5109 | 28 | 100,55 |
| 140 | 5111 | 30 | 100,59 |
| 170 | 5112 | 31 | 100,61 |
| 205 | 5114 | 33 | 100,65 |
| 240 | 5115 | 34 | 100,67 |
| 275 | 5116 | 35 | 100,69 |
| 308 | 5116 | 35 | 100,69 |

TABLEAU E.2 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,3 CP)**Prisme : T 0,3 CP-747-N-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5256 | 0 | 100 |
| 30 | 5256 | 0 | 100 |
| 65 | 5256 | 0 | 100 |
| 105 | 5256 | 0 | 100 |
| 140 | 5256 | 0 | 100 |
| 170 | 5256 | 0 | 100 |
| 205 | 5256 | 0 | 100 |
| 240 | 5256 | 0 | 100 |
| 275 | 5256 | 0 | 100 |
| 308 | 5256 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,3 CP-747-N-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5152 | 0 | 100,00 |
| 30 | 5155 | 3 | 100,06 |
| 65 | 5157 | 5 | 100,10 |
| 105 | 5159 | 7 | 100,14 |
| 140 | 5160 | 8 | 100,16 |
| 170 | 5161 | 9 | 100,17 |
| 205 | 5162 | 10 | 100,19 |
| 240 | 5163 | 11 | 100,21 |
| 275 | 5164 | 12 | 100,23 |
| 308 | 5164 | 12 | 100,23 |

TABLEAU E.3 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,3 SF)**Prisme : T 0,3 SF-539-S-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5118 | 0 | 100 |
| 20 | 5118 | 0 | 100 |
| 55 | 5118 | 0 | 100 |
| 90 | 5118 | 0 | 100 |
| 135 | 5118 | 0 | 100 |
| 160 | 5118 | 0 | 100 |
| 195 | 5118 | 0 | 100 |
| 230 | 5118 | 0 | 100 |
| 270 | 5118 | 0 | 100 |
| 305 | 5118 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,3 SF-539-S-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5101 | 0 | 100,00 |
| 20 | 5116 | 15 | 100,29 |
| 55 | 5118 | 17 | 100,33 |
| 90 | 5120 | 19 | 100,37 |
| 135 | 5121 | 20 | 100,39 |
| 160 | 5122 | 21 | 100,41 |
| 195 | 5122 | 21 | 100,41 |
| 230 | 5123 | 22 | 100,43 |
| 270 | 5124 | 23 | 100,45 |
| 305 | 5125 | 24 | 100,47 |

TABLEAU E.4 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,3 SF)**Prisme : T 0,3 SF-539-N-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5119 | 0 | 100 |
| 20 | 5119 | 0 | 100 |
| 55 | 5119 | 0 | 100 |
| 90 | 5119 | 0 | 100 |
| 135 | 5119 | 0 | 100 |
| 160 | 5119 | 0 | 100 |
| 195 | 5119 | 0 | 100 |
| 230 | 5119 | 0 | 100 |
| 270 | 5119 | 0 | 100 |
| 305 | 5119 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,3 SF-539-N-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5125 | 0 | 100,00 |
| 20 | 5125 | 0 | 100,00 |
| 55 | 5126 | 1 | 100,02 |
| 90 | 5128 | 3 | 100,06 |
| 135 | 5128 | 3 | 100,06 |
| 160 | 5129 | 4 | 100,08 |
| 195 | 5129 | 4 | 100,08 |
| 230 | 5130 | 5 | 100,10 |
| 270 | 5131 | 6 | 100,12 |
| 305 | 5131 | 6 | 100,12 |

TABLEAU E.5 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,4 CP)**Prisme : T 0,4 CP-817-S-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5109 | 0 | 100 |
| 24 | 5109 | 0 | 100 |
| 48 | 5109 | 0 | 100 |
| 83 | 5109 | 0 | 100 |
| 148 | 5109 | 0 | 100 |
| 183 | 5109 | 0 | 100 |
| 218 | 5109 | 0 | 100 |
| 253 | 5109 | 0 | 100 |
| 288 | 5109 | 0 | 100 |
| 308 | 5109 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,4 CP-817-S-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5117 | 0 | 100,00 |
| 24 | 5143 | 26 | 100,51 |
| 48 | 5146 | 29 | 100,57 |
| 83 | 5149 | 32 | 100,63 |
| 148 | 5152 | 35 | 100,68 |
| 183 | 5153 | 36 | 100,70 |
| 218 | 5154 | 37 | 100,72 |
| 253 | 5154 | 37 | 100,72 |
| 288 | 5155 | 38 | 100,74 |
| 308 | 5156 | 39 | 100,76 |

TABLEAU E.6 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,4 CP)

Prisme : T 0,4 CP-817-N-S

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|
| 0 | 5060 | 0 | 100 |
| 24 | 5060 | 0 | 100 |
| 48 | 5060 | 0 | 100 |
| 83 | 5060 | 0 | 100 |
| 148 | 5060 | 0 | 100 |
| 183 | 5060 | 0 | 100 |
| 218 | 5060 | 0 | 100 |
| 253 | 5060 | 0 | 100 |
| 288 | 5060 | 0 | 100 |
| 308 | 5060 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,4 CP-817-N-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|
| 0 | 5091 | 0 | 100,00 |
| 24 | 5093 | 2 | 100,04 |
| 48 | 5095 | 4 | 100,08 |
| 83 | 5097 | 6 | 100,12 |
| 148 | 5099 | 8 | 100,16 |
| 183 | 5100 | 9 | 100,18 |
| 218 | 5100 | 9 | 100,18 |
| 253 | 5101 | 10 | 100,20 |
| 288 | 5102 | 11 | 100,22 |
| 308 | 5103 | 12 | 100,24 |

TABLEAU E.7 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,4 SF)

Prisme : T 0,4 SF-976-S-S

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|
| 0 | 5070 | 0 | 100 |
| 35 | 5070 | 0 | 100 |
| 70 | 5070 | 0 | 100 |
| 105 | 5070 | 0 | 100 |
| 135 | 5070 | 0 | 100 |
| 170 | 5070 | 0 | 100 |
| 200 | 5070 | 0 | 100 |
| 245 | 5070 | 0 | 100 |
| 275 | 5070 | 0 | 100 |
| 310 | 5070 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,4 SF-976-S-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|---------------------------------|----------------------------|---|---|
| 0 | 5037 | 0 | 100,00 |
| 35 | 5060 | 23 | 100,46 |
| 70 | 5062 | 25 | 100,50 |
| 105 | 5064 | 27 | 100,54 |
| 135 | 5065 | 28 | 100,56 |
| 170 | 5065 | 28 | 100,56 |
| 200 | 5066 | 29 | 100,58 |
| 245 | 5067 | 30 | 100,60 |
| 275 | 5067 | 30 | 100,60 |
| 310 | 5067 | 30 | 100,60 |

TABLEAU E.8 – Variation de la masse des prismes témoins (Béton 0,4 SF)**Prisme : T 0,4 SF-976-N-S**

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5152 | 0 | 100 |
| 35 | 5152 | 0 | 100 |
| 70 | 5152 | 0 | 100 |
| 105 | 5152 | 0 | 100 |
| 135 | 5152 | 0 | 100 |
| 170 | 5152 | 0 | 100 |
| 200 | 5152 | 0 | 100 |
| 245 | 5152 | 0 | 100 |
| 275 | 5152 | 0 | 100 |
| 310 | 5152 | 0 | 100 |

Prisme : T 0,4 SF-976-N-N

| Cycles de gel-dégel équivalents | Masse de prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (g) | Variation de masse du prisme témoin (%) |
|--|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 5291 | 0 | 100,00 |
| 35 | 5293 | 2 | 100,04 |
| 70 | 5294 | 3 | 100,06 |
| 105 | 5295 | 4 | 100,08 |
| 135 | 5296 | 5 | 100,09 |
| 170 | 5296 | 5 | 100,09 |
| 200 | 5296 | 5 | 100,09 |
| 245 | 5297 | 6 | 100,11 |
| 275 | 5297 | 6 | 100,11 |
| 310 | 5297 | 6 | 100,11 |

ANNEXE F : DEGRÉ DE SATURATION DES BÉTONS DE LA SÉRIE I

Les tableaux F.1 à F.6 présentent les degrés de saturation des bétons de la série I à la fin du mûrissement et à la fin des cycles de gel-dégel.

La procédure du prélèvement des échantillons dans les prismes de gel-dégel est expliquée au paragraphe 4.3.6. L'essai de saturation a été effectué conformément à la norme ASTM C 1202 – 94 : *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Le degré de saturation a été calculé à partir de la masse humide, de la masse saturée superficiellement sèche et de la masse sèche (Paragraphe 5.4.1).

TABLEAU F.1 – Degré de saturation à la fin du mûrissement (Bétons : 0,3 CP et 0,3 SF)

Béton : 0,3 CP

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | 262,51 | 263,89 | 252,16 | 159,50 | 0,10 | 2,53 | 0,95 | 0,92 | 0,47 | 90 |
| | 2 | Scellé | 223,32 | 224,28 | 214,00 | 136,22 | 0,09 | 2,55 | 0,80 | 0,78 | 0,40 | 93 |
| | 3 | Scellé | 246,91 | 249,09 | 237,22 | 151,13 | 0,10 | 2,54 | 0,89 | 0,87 | 0,44 | 82 |
| | 4 | Scellé | 322,69 | 324,81 | 310,70 | 196,71 | 0,13 | 2,54 | 1,17 | 1,13 | 0,58 | 86 |
| 2 | 1 | Eau | 297,31 | 297,59 | 284,40 | 180,23 | 0,12 | 2,54 | 1,07 | 1,04 | 0,53 | 102 |
| | 2 | Eau | 217,32 | 217,72 | 207,92 | 132,04 | 0,09 | 2,54 | 0,78 | 0,76 | 0,39 | 100 |
| | 3 | Eau | 300,49 | 300,88 | 287,14 | 182,78 | 0,12 | 2,55 | 1,08 | 1,05 | 0,53 | 101 |
| | 4 | Eau | 284,90 | 285,42 | 272,22 | 173,03 | 0,11 | 2,54 | 1,02 | 1,00 | 0,51 | 100 |

Béton : 0,3 SF

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | 302,81 | 304,93 | 290,10 | 183,05 | 0,12 | 2,50 | 1,09 | 1,07 | 0,79 | 89 |
| | 2 | Scellé | 302,79 | 304,90 | 290,19 | 183,22 | 0,12 | 2,51 | 1,06 | 1,05 | 0,77 | 89 |
| | 3 | Scellé | 297,52 | 299,21 | 284,92 | 179,93 | 0,12 | 2,51 | 1,05 | 1,03 | 0,76 | 92 |
| | 4 | Scellé | 310,18 | 312,47 | 297,89 | 188,06 | 0,12 | 2,51 | 1,09 | 1,08 | 0,79 | 87 |
| 2 | 1 | Eau | 301,22 | 302,23 | 287,40 | 181,93 | 0,12 | 2,51 | 1,05 | 1,04 | 0,77 | 98 |
| | 2 | Eau | 241,88 | 242,76 | 231,04 | 146,57 | 0,09 | 2,52 | 0,85 | 0,83 | 0,62 | 97 |
| | 3 | Eau | 231,71 | 232,45 | 221,39 | 140,20 | 0,09 | 2,52 | 0,81 | 0,80 | 0,59 | 98 |
| | 4 | Eau | 190,21 | 190,90 | 181,33 | 114,44 | 0,07 | 2,50 | 0,67 | 0,65 | 0,48 | 97 |

TABLEAU F.2 – Degré de saturation à la fin du mûrissement (Bétons : 0,4 CP et 0,4 SF)

Béton : 0,4 CP

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | 272,71 | 274,83 | 261,25 | 165,60 | 0,11 | 2,52 | 1,00 | 0,97 | 0,63 | 86 |
| | 2 | Scellé | 257,09 | 259,44 | 246,25 | 155,88 | 0,10 | 2,51 | 0,95 | 0,92 | 0,60 | 84 |
| | 3 | Scellé | 254,72 | 256,81 | 243,74 | 154,32 | 0,10 | 2,51 | 0,94 | 0,91 | 0,59 | 86 |
| | 4 | Scellé | 231,40 | 233,78 | 221,31 | 140,10 | 0,09 | 2,50 | 0,86 | 0,83 | 0,54 | 82 |
| 2 | 1 | Eau | 230,63 | 230,90 | 219,29 | 138,59 | 0,09 | 2,50 | 0,85 | 0,82 | 0,53 | 103 |
| | 2 | Eau | 240,98 | 241,21 | 228,50 | 143,72 | 0,10 | 2,47 | 0,89 | 0,87 | 0,56 | 103 |
| | 3 | Eau | 266,80 | 267,27 | 254,04 | 159,88 | 0,11 | 2,49 | 0,99 | 0,95 | 0,62 | 101 |
| | 4 | Eau | 276,64 | 277,30 | 263,11 | 166,12 | 0,11 | 2,49 | 1,02 | 0,99 | 0,64 | 100 |

Béton : 0,4 SF

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | 242,71 | 244,77 | 231,06 | 145,46 | 0,10 | 2,46 | 0,90 | 0,89 | 0,32 | 85 |
| | 2 | Scellé | 237,53 | 238,83 | 226,69 | 142,41 | 0,10 | 2,48 | 0,87 | 0,86 | 0,31 | 90 |
| | 3 | Scellé | 239,51 | 241,62 | 229,03 | 144,18 | 0,10 | 2,48 | 0,88 | 0,87 | 0,32 | 83 |
| | 4 | Scellé | 269,18 | 271,67 | 257,12 | 161,56 | 0,11 | 2,47 | 1,00 | 0,98 | 0,36 | 83 |
| 2 | 1 | Eau | 212,63 | 212,77 | 201,43 | 126,85 | 0,09 | 2,48 | 0,78 | 0,80 | 0,28 | 101 |
| | 2 | Eau | 211,01 | 211,32 | 200,03 | 126,32 | 0,09 | 2,49 | 0,77 | 0,76 | 0,28 | 100 |
| | 3 | Eau | 229,52 | 229,74 | 217,59 | 136,93 | 0,09 | 2,48 | 0,84 | 0,83 | 0,30 | 101 |
| | 4 | Eau | 221,55 | 221,48 | 210,30 | 132,81 | 0,09 | 2,50 | 0,80 | 0,79 | 0,29 | 104 |

TABLEAU F.3 – Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 CP)

Béton : 0,3 CP

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | Gel-dégel | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|-----------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | Scellé | 246,80 | 248,40 | 237,45 | 150,80 | 0,10 | 2,55 | 0,89 | 0,86 | 0,44 | 87 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 212,90 | 214,30 | 204,95 | 130,10 | 0,08 | 2,55 | 0,77 | 0,75 | 0,38 | 86 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 223,23 | 225,70 | 213,30 | 133,64 | 0,09 | 2,45 | 0,84 | 0,82 | 0,41 | 80 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 275,23 | 276,71 | 262,41 | 165,24 | 0,11 | 2,48 | 1,02 | 0,99 | 0,50 | 92 |
| 2 | 1 | Scellé | Scellé | 277,17 | 279,45 | 263,98 | 165,77 | 0,11 | 2,46 | 1,04 | 1,01 | 0,51 | 86 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 235,68 | 237,36 | 224,60 | 141,12 | 0,10 | 2,47 | 0,88 | 0,85 | 0,43 | 88 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 283,65 | 285,55 | 270,19 | 170,12 | 0,12 | 2,47 | 1,05 | 1,02 | 0,52 | 89 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 266,65 | 268,30 | 254,57 | 159,86 | 0,11 | 2,47 | 0,99 | 0,96 | 0,49 | 90 |
| 3 | 1 | Eau | Scellé | 230,90 | 231,25 | 220,25 | 140,10 | 0,09 | 2,54 | 0,83 | 0,81 | 0,41 | 101 |
| | 2 | Eau | Scellé | 274,00 | 274,75 | 262,15 | 166,80 | 0,11 | 2,55 | 0,98 | 0,96 | 0,49 | 97 |
| | 3 | Eau | Scellé | 230,61 | 231,02 | 218,92 | 137,01 | 0,09 | 2,46 | 0,86 | 0,83 | 0,42 | 100 |
| | 4 | Eau | Scellé | 302,10 | 303,28 | 287,97 | 180,00 | 0,12 | 2,46 | 1,12 | 1,09 | 0,55 | 95 |
| 4 | 1 | Eau | Scellé | 260,48 | 260,99 | 247,16 | 155,63 | 0,11 | 2,48 | 0,96 | 0,93 | 0,47 | 100 |
| | 2 | Eau | Scellé | 263,27 | 263,77 | 250,04 | 157,69 | 0,11 | 2,49 | 0,97 | 0,94 | 0,48 | 100 |
| | 3 | Eau | Scellé | 349,45 | 349,78 | 333,55 | 208,54 | 0,14 | 2,48 | 1,29 | 1,25 | 0,64 | 102 |
| | 4 | Eau | Scellé | 285,32 | 285,88 | 271,58 | 169,90 | 0,12 | 2,46 | 1,06 | 1,03 | 0,52 | 100 |

TABLEAU F.4 – Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (Béton 0,3 SF)

Béton : 0,3 SF

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | Gel-dégel | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|-----------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | Scellé | 273,91 | 275,91 | 263,39 | 165,00 | 0,11 | 2,49 | 0,99 | 0,98 | 0,72 | 87 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 278,59 | 280,03 | 268,01 | 168,20 | 0,11 | 2,50 | 1,00 | 0,98 | 0,73 | 92 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 209,70 | 211,52 | 202,00 | 127,31 | 0,08 | 2,51 | 0,75 | 0,74 | 0,55 | 83 |
| 2 | 1 | Scellé | Scellé | 201,52 | 203,49 | 193,62 | 122,59 | 0,08 | 2,52 | 0,72 | 0,71 | 0,53 | 82 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 236,00 | 237,68 | 226,60 | 142,33 | 0,10 | 2,49 | 0,85 | 0,84 | 0,62 | 88 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 235,28 | 236,92 | 226,30 | 142,54 | 0,09 | 2,51 | 0,84 | 0,83 | 0,61 | 88 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 189,01 | 190,21 | 181,17 | 114,67 | 0,08 | 2,52 | 0,68 | 0,67 | 0,49 | 90 |
| 3 | 1 | Eau | Scellé | 297,35 | 298,17 | 285,24 | 178,52 | 0,12 | 2,49 | 1,07 | 1,05 | 0,78 | 100 |
| | 2 | Eau | Scellé | 264,84 | 265,71 | 254,10 | 160,11 | 0,11 | 2,52 | 0,95 | 0,93 | 0,69 | 98 |
| | 3 | Eau | Scellé | 180,31 | 181,13 | 172,47 | 108,88 | 0,07 | 2,51 | 0,65 | 0,64 | 0,47 | 95 |
| 4 | 1 | Eau | Scellé | 278,60 | 279,50 | 267,04 | 167,10 | 0,11 | 2,49 | 1,01 | 0,99 | 0,73 | 98 |
| | 2 | Eau | Scellé | 203,49 | 204,31 | 195,21 | 123,52 | 0,08 | 2,53 | 0,72 | 0,71 | 0,53 | 96 |
| | 3 | Eau | Scellé | 195,03 | 195,79 | 186,60 | 117,47 | 0,08 | 2,50 | 0,70 | 0,69 | 0,51 | 97 |
| | 4 | Eau | Scellé | 292,28 | 292,90 | 280,78 | 176,21 | 0,12 | 2,51 | 1,04 | 1,03 | 0,76 | 101 |

TABLEAU F.5 – Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 CP)

Béton : 0,4 CP

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | Gel-dégel | M humide (g) | M _{SSS} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{SSS} (l) | d _{SSS} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|-----------|--------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | Scellé | 304,92 | 306,81 | 291,31 | 183,56 | 0,12 | 2,49 | 1,13 | 1,10 | 0,71 | 91 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 265,57 | 267,69 | 253,70 | 160,16 | 0,11 | 2,49 | 0,99 | 0,96 | 0,62 | 87 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 252,48 | 253,47 | 240,81 | 152,20 | 0,10 | 2,50 | 0,93 | 0,90 | 0,58 | 96 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 215,20 | 216,55 | 205,11 | 129,82 | 0,09 | 2,50 | 0,80 | 0,77 | 0,50 | 91 |
| 2 | 1 | Scellé | Scellé | 299,64 | 302,20 | 286,21 | 179,91 | 0,12 | 2,47 | 1,12 | 1,09 | 0,70 | 86 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 270,79 | 273,55 | 258,94 | 163,15 | 0,11 | 2,48 | 1,01 | 0,98 | 0,63 | 82 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 232,22 | 234,49 | 222,06 | 139,02 | 0,10 | 2,46 | 0,88 | 0,85 | 0,55 | 83 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 273,38 | 275,11 | 261,54 | 165,07 | 0,11 | 2,50 | 1,01 | 0,98 | 0,63 | 90 |
| 3 | 1 | Eau | Scellé | 239,03 | 239,56 | 227,33 | 143,50 | 0,10 | 2,49 | 0,88 | 0,85 | 0,55 | 100 |
| | 2 | Eau | Scellé | 264,56 | 264,92 | 252,14 | 159,05 | 0,11 | 2,50 | 0,97 | 0,94 | 0,61 | 102 |
| | 3 | Eau | Scellé | 241,24 | 242,04 | 229,32 | 144,16 | 0,10 | 2,47 | 0,90 | 0,87 | 0,56 | 98 |
| | 4 | Eau | Scellé | 266,82 | 267,33 | 253,60 | 159,82 | 0,11 | 2,49 | 0,99 | 0,96 | 0,62 | 101 |
| 4 | 1 | Eau | Scellé | 283,82 | 284,44 | 270,37 | 170,87 | 0,11 | 2,50 | 1,04 | 1,01 | 0,65 | 100 |
| | 2 | Eau | Scellé | 282,81 | 283,39 | 269,13 | 169,42 | 0,11 | 2,49 | 1,05 | 1,01 | 0,66 | 101 |
| | 3 | Eau | Scellé | 289,03 | 289,40 | 275,13 | 172,86 | 0,12 | 2,48 | 1,07 | 1,04 | 0,67 | 103 |
| | 4 | Eau | Scellé | 230,35 | 230,89 | 219,55 | 138,81 | 0,09 | 2,51 | 0,85 | 0,82 | 0,53 | 100 |

TABLEAU F.6 – Degré de saturation à la fin des cycles de gel-dégel (Béton 0,4 SF)

Béton : 0,4 SF

| Prisme | Échantillon | Mûrissement | Gel-dégel | M humide (g) | M _{ss} (g) | M sèche (g) | M dans l'eau (g) | V _{ss} (l) d _{ss} | M eau (sable) (g) | M eau (pierre) (g) | M eau (bulles d'air) (g) | Degré de saturation (%) |
|--------|-------------|-------------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1 | Scellé | Scellé | 291,02 | 292,67 | 277,11 | 174,42 | 0,12 | 2,48 | 1,06 | 0,38 | 90 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 293,99 | 295,64 | 280,17 | 176,72 | 0,12 | 2,49 | 1,06 | 0,39 | 90 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 279,82 | 281,97 | 267,33 | 168,44 | 0,11 | 2,48 | 1,01 | 0,37 | 85 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 256,57 | 258,30 | 244,66 | 154,02 | 0,10 | 2,48 | 0,93 | 0,34 | 88 |
| 2 | 1 | Scellé | Scellé | 295,65 | 297,96 | 282,35 | 177,38 | 0,12 | 2,47 | 1,08 | 0,39 | 85 |
| | 2 | Scellé | Scellé | 298,52 | 300,42 | 284,28 | 178,65 | 0,12 | 2,47 | 1,10 | 0,40 | 89 |
| | 3 | Scellé | Scellé | 310,78 | 313,51 | 296,17 | 186,72 | 0,13 | 2,47 | 1,13 | 0,41 | 84 |
| | 4 | Scellé | Scellé | 339,87 | 341,52 | 324,22 | 204,28 | 0,14 | 2,49 | 1,23 | 0,45 | 92 |
| 3 | 1 | Eau | Scellé | 283,97 | 284,56 | 268,72 | 168,89 | 0,12 | 2,46 | 1,03 | 0,38 | 98 |
| | 2 | Eau | Scellé | 237,26 | 237,96 | 224,92 | 142,13 | 0,10 | 2,48 | 0,86 | 0,31 | 96 |
| | 3 | Eau | Scellé | 295,78 | 296,31 | 280,37 | 176,35 | 0,12 | 2,47 | 1,07 | 0,39 | 99 |
| | 4 | Eau | Scellé | 277,20 | 277,51 | 262,81 | 165,80 | 0,11 | 2,48 | 1,00 | 0,36 | 100 |
| 4 | 1 | Eau | Scellé | 343,33 | 343,89 | 325,26 | 205,19 | 0,14 | 2,48 | 1,24 | 0,45 | 99 |
| | 2 | Eau | Scellé | 290,31 | 290,74 | 275,39 | 173,46 | 0,12 | 2,48 | 1,05 | 0,38 | 100 |
| | 3 | Eau | Scellé | 299,88 | 300,14 | 284,30 | 178,97 | 0,12 | 2,48 | 1,10 | 0,39 | 101 |
| | 4 | Eau | Scellé | 272,48 | 272,84 | 258,19 | 163,00 | 0,11 | 2,48 | 1,00 | 0,36 | 100 |

ANNEXE G : HUMIDITÉ RELATIVE INTERNE DES BÉTONS DE LA SÉRIE I

Les tableaux G.1 et G.2 présentent les humidités relatives internes des bétons de la série I à la fin du mûrissement et à la fin des cycles de gel-dégel

L'humidité relative interne a été mesurée à l'aide d'une sonde Novasina ms1. Cet appareil mesure simultanément l'humidité relative et la température à l'intérieur du béton. Les procédures de mesure dans les prismes scellés et non scellés sont expliquées au paragraphe 4.3.7.

TABLEAU G.1 – Humidité relative interne à la fin du mûrissement

BÉTON : 0,3 CP

| Prisme | Mûrissement | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | 22,5 | 94,6 | 94,6 | 22,8 | 95,6 | 95,7 | 95 |
| 2 | Eau | 24,4 | 97,6 | 97,8 | 24,5 | 97,9 | 98,1 | 98 |

BÉTON : 0,3 SF

| Prisme | Mûrissement | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | 24,2 | 93,3 | 93,5 | 24,1 | 93,9 | 94,1 | 94 |
| 2 | Eau | 22,1 | 92,8 | 92,8 | 22,2 | 94,4 | 94,4 | 94 |

BÉTON : 0,4 CP

| Prisme | Mûrissement | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | 21,4 | 94,3 | 94,3 | 21,3 | 96,3 | 96,2 | 95 |
| 2 | Eau | 21,5 | 96,9 | 96,9 | 21,3 | 97,9 | 97,8 | 97 |

BÉTON : 0,4 SF

| Prisme | Mûrissement | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | 23,5 | 91,5 | 91,6 | 23,3 | 94,3 | 94,4 | 93 |
| 2 | Eau | 20,8 | 90,9 | 90,8 | 21,0 | 93,0 | 92,9 | 92 |

TABLEAU G.2 – Humidité relative interne à la fin des cycles de gel-dégel

BÉTON : 0,3 CP

| Prisme | Mûrissement | Gel dégel | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|-----------|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | Scellé | 23,7 | 94,2 | 94,3 | - | - | - | 95 |
| 2 | Scellé | Scellé | - | - | - | 23,8 | 96,1 | 96,2 | |
| 3 | Eau | Scellé | 23,7 | 97,1 | 97,2 | - | - | - | 98 |
| 4 | Eau | Scellé | - | - | - | 23,7 | 97,8 | 97,9 | |

BÉTON : 0,3 SF

| Prisme | Mûrissement | Gel dégel | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|-----------|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | Scellé | 21,4 | 91,7 | 91,7 | - | - | - | 92 |
| 2 | Scellé | Scellé | - | - | - | 22,8 | 92,4 | 92,5 | |
| 3 | Eau | Scellé | 21,5 | 92,5 | 92,5 | - | - | - | 93 |
| 4 | Eau | Scellé | - | - | - | 23,0 | 94,3 | 94,4 | |

BÉTON : 0,4 CP

| Prisme | Mûrissement | Gel dégel | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|-----------|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | Scellé | 23,4 | 92,4 | 92,5 | - | - | - | 95 |
| 2 | Scellé | Scellé | - | - | - | 23,2 | 96,6 | 96,7 | |
| 3 | Eau | Scellé | 23,2 | 98,0 | 98,1 | - | - | - | 98 |
| 4 | Eau | Scellé | - | - | - | 22,5 | 96,8 | 96,8 | |

BÉTON : 0,4 SF

| Prisme | Mûrissement | Gel dégel | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R. à 22°C) (%) |
|--------|-------------|-----------|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22°C | |
| 1 | Scellé | Scellé | 23,7 | 92,1 | 92,2 | - | - | - | 93 |
| 2 | Scellé | Scellé | - | - | - | 24,1 | 93,3 | 93,5 | |
| 3 | Eau | Scellé | 23,8 | 93,6 | 93,7 | - | - | - | 93 |
| 4 | Eau | Scellé | - | - | - | 24,0 | 92,8 | 93,0 | |

ANNEXE H : HUMIDITÉ RELATIVE INTERNE DES BÉTONS DE LA SÉRIE II

Le tableau H.1 présente les humidités relatives internes des bétons de la série II. Les bétons de la série II ont été utilisés pour fabriquer 2 blocs de 240 x 420 x 540 mm. Dans chaque bloc, les mesures ont été effectuées après 3, 7, 14, 28, 91 et 350 jours d'immersion complète sous l'eau. À chaque échéance, nous avons effectué 2 mesures à 50 mm et 2 mesures à 75 mm de profondeur. La procédure de mesure est expliquée au paragraphe 4.3.7.

TABLEAU H.1 – Humidité relative interne dans les blocs

BÉTON : 0,3 CP bloc

| Temps (jours) | Profondeur 50 mm | | | | | | | Profondeur 75 mm | | | | | | |
|---------------|------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R.% à 22 °C) (%) | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R.% à 22 °C) (%) |
| | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | |
| 3 | 23,1 | 96,9 | 97,0 | 23,1 | 97,7 | 97,8 | 97 | 22,7 | 94,4 | 94,5 | 22,6 | 95,7 | 95,7 | 95 |
| 7 | 21,3 | 90,2 | 90,1 | 21,2 | 91,0 | 90,9 | 91 | 21,4 | 88,3 | 88,3 | 21,3 | 89,0 | 88,9 | 89 |
| 14 | 22,7 | 90,3 | 90,4 | 22,7 | 90,2 | 90,3 | 90 | 22,6 | 88,3 | 88,3 | 22,8 | 89,1 | 89,2 | 89 |
| 28 | 20,4 | 89,8 | 89,7 | 20,8 | 89,5 | 89,4 | 90 | 20,8 | 88,7 | 88,6 | 20,7 | 89,1 | 89,0 | 89 |
| 91 | 18,1 | 88,8 | 88,5 | 17,8 | 89,2 | 88,9 | 89 | 17,7 | 89,0 | 88,7 | 17,5 | 89,2 | 88,8 | 89 |
| 350 | 20,5 | 88,6 | 88,5 | 20,2 | 88,9 | 88,8 | 89 | 20,6 | 88,4 | 88,3 | 20,5 | 88,7 | 88,6 | 88 |

BÉTON : 0,3 SF bloc

| Temps (jours) | Profondeur 50 mm | | | | | | | Profondeur 75 mm | | | | | | |
|---------------|------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R.% à 22 °C) (%) | Mesure 1 | | | Mesure 2 | | | Moyenne (H.R.% à 22 °C) (%) |
| | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | Température (°C) | Humidité relative (%) | Humidité relative à 22 °C | |
| 3 | 16,5 | 93,3 | 92,9 | 16,4 | 93,0 | 92,6 | 93 | 16,8 | 93,4 | 93,0 | 16,7 | 92,3 | 91,9 | 92 |
| 7 | 19,7 | 91,5 | 91,3 | 19,5 | 92,1 | 91,9 | 92 | 19,7 | 91,5 | 91,3 | 19,4 | 91,6 | 91,4 | 91 |
| 14 | 22,9 | 89,5 | 89,6 | 23,2 | 88,5 | 88,6 | 89 | 23,1 | 88,8 | 88,9 | 22,9 | 88,1 | 88,2 | 89 |
| 28 | 21,3 | 87,2 | 87,1 | 21,2 | 89,5 | 89,4 | 88 | 21,1 | 87,2 | 87,1 | 21,0 | 89,6 | 89,5 | 88 |
| 91 | 17,2 | 88,2 | 87,8 | 17,6 | 88,6 | 88,2 | 88 | 16,9 | 88,1 | 87,7 | 17,2 | 88,7 | 88,3 | 88 |
| 350 | 20,2 | 88,1 | 88,0 | 20,4 | 87,9 | 87,8 | 88 | 21,3 | 87,9 | 87,8 | 21,4 | 87,8 | 87,8 | 88 |