



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UN AGENT
D'EXPANSION INTERNE ET D'UN AGENT
RÉDUCTEUR DE RETRAIT SUR LES
VARIATIONS VOLUMIQUES LIBRES ET
RESTREINTES D'UN BÉTON

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées

Spécialité : génie civil

Marione E. AISSI

RÉSUMÉ

La durabilité des bétons est grandement affectée par la fissuration due au retrait (endogène et retrait empêché) et elle nécessite donc, une attention particulière. Le retrait empêché du béton engendre des contraintes de traction, responsables de la formation de microfissures voire des fissures traversantes qui permettent la pénétration des agents agressifs et une augmentation de la perméabilité. Pour maximiser la durabilité des bétons, il est essentiel d'éviter la formation des fissures dans les ouvrages en service.

L'objectif global de la recherche est de développer une approche de formulation des bétons à retrait compensé pour éviter la formation de fissures. Cette approche de formulation est basée sur l'utilisation combinée d'un agent d'expansion interne et d'un agent réducteur de retrait.

Ce projet de recherche a pour but d'étudier l'influence d'un agent d'expansion interne et d'un agent réducteur de retrait sur les variations volumiques libres et restreintes du béton. Trois méthodes (ASTM C878; ASTM C157; Capteurs à cordes vibrantes) sont utilisées avec différents pourcentages en agent d'expansion interne (0%, 3%, 6%, 10%) et 2% d'agent réducteur de retrait (ARR) pour évaluer les variations volumiques du béton.

Cette étude est menée en deux phases pour analyser les variations volumiques libres (ASTM C157; Capteurs à cordes vibrantes) et restreintes (ASTM C878) du béton ainsi que l'influence de ces deux adjuvants combinés sur le retrait. La première phase consiste à étudier les variations volumiques libres et restreintes du béton avec l'agent d'expansion interne (*Conex*) et son influence sur le retrait (retrait total et retrait de séchage). La deuxième phase consiste à étudier l'influence de l'agent réducteur de retrait (ARR) sur les variations volumiques libres et restreintes, sur le retrait de séchage du béton contenant l'agent d'expansion interne (*Conex*). Un total de 16 formulations de béton de 25 MPa sans air entraîné a été étudié en laboratoire.

L'analyse des bétons formulés avec différents pourcentages en agent d'expansion montre que les expansions libres et restreintes augmentent en fonction du dosage en *Conex*. L'expansion initiale créée (0 - 7 jours) par le *Conex* produit un retrait total faible par rapport au béton sans *Conex* et la diminution du retrait total est fonction de l'augmentation du dosage en *Conex*.

L'ajout de l'agent réducteur de retrait (ARR) produit une diminution du retrait de séchage de 40% à 7 jours et de 30% à 224 jours. Le retrait total diminue de 72% à 7 jours et 43% à 224 jours.

Les données expérimentales montrent qu'en plus de la diminution du retrait, on peut produire un béton à retrait compensé avec un dosage optimal de 3% *Conex* + 2% ARR. La formulation d'un béton à faible retrait par l'utilisation du *Conex* et ARR permet de réduire les risques de fissurations, d'améliorer la qualité du béton et de contrecarrer le retrait empêché.

Les investigations menées dans ce mémoire permettent d'enrichir les connaissances sur les différents adjuvants utilisés (*Conex* et ARR), leurs influences sur le béton, principalement la diminution du retrait de séchage et d'évaluer un pourcentage optimal pour un béton sans retrait, donc plus durable.

REMERCIEMENTS

Je voudrais dans un premier temps, remercier mes parents Mr et Mme AISSI Georges pour m'avoir soutenu, aidé, guidé et montré que mes études sont ma priorité dans la vie. Merci à mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements, leurs précieux conseils et leur soutien moral.

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de maîtrise, le Pr Richard Gagné ing. Ph.D, pour m'avoir encadré, dirigé, suivi et écouté tout au long de cette maîtrise. Merci de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet de recherche très enrichissant.

À tous les techniciens du groupe béton, je tiens à les remercier pour leur précieuse aide lors des travaux au laboratoire. Merci en particulier à Rajko Vojnovic pour son assistance et son aide pour la fabrication de mes bétons.

Un grand merci à tous les amis du groupe béton pour les conseils, les échanges, le soutien, les encouragements et cette belle expérience de groupe et d'équipe.

Enfin, merci à Mr Hounnibo Kevin Dimitri C.C. pour son assistance, son aide et ses conseils.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. LES VARIATIONS VOLUMIQUES DU BÉTON.....	2
2.1 Mécanisme de base.....	2
2.1.1 Le retrait chimique et endogène.....	2
2.1.1.1 Mécanismes physiques.....	5
2.1.1.2 Paramètres d'influences.....	6
- E/C.....	6
- La Finesse du ciment.....	6
- Ajouts minéraux.....	7
2.1.2 Le retrait de séchage.....	8
2.1.2.1 Mécanismes physiques.....	8
2.1.2.2 Paramètres d'influences.....	9
- L'humidité relative.....	9
- E/C.....	9
- Ajouts cimentaires.....	10
- Le mûrissement.....	11
- Gros granulats.....	11
2.1.2.3 Méthode de mesure du retrait de séchage (ASTM C157).....	11
2.1.3 Le retrait plastique.....	13
2.1.4 Expansion chimique interne au moyen d'agents expansifs et ciments expansifs.....	14
2.1.4.1 Les mécanismes d'expansion.....	14
2.1.4.2 Évolution typique de l'expansion d'un ciment expansif.....	17
2.1.4.3 Évolution typique de l'expansion obtenue avec un agent d'expansion interne à base de CaO.....	18

2.1.4.4	Méthode de mesure de l'expansion restreinte au jeune âge (ASTM C878).....	19
2.1.4.5	Méthode de mesure de l'expansion libre au jeune âge (Corde vibrante).....	22
2.2	Le ciment expansif de type K.....	23
2.2.1	Composition, réaction chimique d'expansion.....	23
2.2.2	Courbes typiques d'expansion.....	23
2.2.3	Vitesse d'expansion.....	24
2.2.4	Niveaux d'expansions atteints.....	25
2.2.5	Influence du dosage.....	25
2.3	L'agent d'expansion interne de type G.....	27
2.3.1	Composition, réaction chimique d'expansion.....	27
2.3.2	Courbes d'expansion typiques par différents types de béton.....	29
2.3.3	Influence de l'agent d'expansion sur les autres propriétés du béton.....	34
2.4	Les agents réducteurs de retrait.....	34
2.4.1	Principaux types.....	34
2.4.2	Nature et composition chimique.....	34
2.4.3	Mode d'action d'un ARR.....	36
2.4.4	Influence sur le retrait de séchage.....	39
2.4.5	Influence du dosage.....	40
2.4.6	Influence sur l'expansion.....	41
2.5	Exemples pratiques.....	42
2.5.1	Réparation du tablier du Pont de Cosmos par un resurfacement adhérent.....	42
2.5.2	Cas du resurfacement adhérent du tablier du Passage inférieur de Girouard à Montréal.....	47
2.6	La fissuration due au retrait empêché.....	51

2.6.1	Mécanisme de fissuration.....	51
2.6.2	Le rôle du retrait de séchage.....	52
2.6.3	Le rôle de l'expansion interne.....	53
2.6.3.1	Précontrainte chimique.....	53
2.6.3.2	Restriction de l'expansion interne.....	53
a)	Restriction externe.....	54
b)	Restriction interne.....	54
3.	BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS.....	56
3.1	Présentation de la problématique.....	56
3.2	Objectif du projet.....	56
3.3	Description du programme expérimental.....	58
4.	MATÉRIAUX ET PROCÉDURE.....	60
4.1	Matériaux.....	60
4.1.1	Eau de gâchage.....	60
4.1.2	Ciment.....	60
4.1.3	Granulats fins.....	60
4.1.4	Gros granulats.....	61
4.1.5	<i>Conex</i>	62
4.1.6	Agent réducteur de retrait (ARR).....	64
4.1.7	Réducteur d'eau.....	64
4.2	Procédure de malaxage.....	64
4.3	Mélange du béton.....	66
4.3.1	Caractéristiques de formulation.....	66
4.4	Procédure des essais.....	69
4.4.1	Affaissement.....	69

4.4.2	Mesure de la teneur en air.....	69
4.4.3	Mesure de la masse volumique.....	69
4.4.4	Confection et cure des éprouvettes de béton destinées aux essais de compression.....	70
4.4.5	Mesure de la résistance en compression.....	71
4.4.6	Mesure de l'expansion restreinte au jeune âge (ASTM C878).....	71
4.4.7	Mesure du retrait de séchage.....	72
4.4.8	Mesure de l'expansion libre et du retrait de séchage à l'aide des capteurs à cordes vibrante.....	73
5.	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	75
5.1	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur les propriétés du béton.....	75
5.2	Influence du <i>Conex</i> sur les variations volumiques libres et restreintes.....	78
5.3	Influence du <i>Conex</i> +2% ARR sur les variations volumiques libres et restreintes.....	83
6.	ANALYSE ET DISCUSSION.....	90
6.1	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur l'expansion libre des bétons.....	90
6.2	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur l'expansion restreinte des bétons.....	91
6.3	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur l'expansion libre et restreinte des bétons.....	91
6.4	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage.....	92
6.4.1	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage selon la procédure ASTM C157.....	92
6.4.2	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage à partir des données obtenues avec les capteurs à corde vibrante.....	97
6.4.3	Étude comparative des différentes méthodes pour la mesure du retrait de séchage.....	101
6.5	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait total du béton.....	103
6.5.1	Influence du <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait total par l'utilisation des	

capteurs à corde vibrante.....	103
6.5.2 Étude comparative des différentes méthodes pour la mesure du retrait total.....	106
7. CONCLUSION.....	109
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	111

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Changement du volume de la pâte fraîche et durcie causé par le retrait chimique et endogène [Kosmatka et al, 2011].....	2
Figure 2.2	Relation entre le retrait endogène et le retrait chimique de la pâte de ciment à jeune âge [Hammer, 1999].....	4
Figure 2.3	Influence du rapport E/C sur le retrait endogène de la pâte [Tazawa et coll., 1995].....	6
Figure 2.4	Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène d'une pâte.....	7
Figure 2.5	Influence de la fumée de silice (0-10-20%) sur le retrait endogène de la pâte (E/C=0,40 et E/C=0,23) [Tazawa et coll., 1995].....	7
Figure 2.6	Relation entre la teneur en eau totale et le retrait de séchage [Kosmatka et al, 2011].....	10
Figure 2.7	Retrait de séchage des bétons contenant des cendres volantes comparativement à un mélange témoin [Gebler et Klieger, 1986].....	11
Figure 2.8	Dispositif de mise en place pour la confection des échantillons.....	12
Figure 2.9	Retrait de séchage typique d'un béton de 25 MPa sans air entrainé fait selon la procédure ASTM C157.....	13
Figure 2.10	Fissuration due au retrait plastique [Kosmatka et al, 2011].....	14
Figure 2.11	Micrographie ESEM d'une pâte contenant 3% d'agent d'expansion (CaO) après 2 h de cure [Maltese et al, 2005].....	15
Figure 2.12	Observation par analyse au microscope électronique de mortier expansif à 28 jours [Ribério et al, 1995].....	15
Figure 2.13	Présentation de l'expansion du CaO en fonction du temps [Lessard et Gagné, 2009].....	16
Figure 2.14	Représentation schématique des variations de longueur du BO et du BRC.....	18
Figure 2.15	Comportement d'un béton à retrait compensé contenant différents dosages en agent d'expansion conservé dans l'eau de chaux pendant 3 jours [Blais, 2010].....	19
Figure 2.16	Comportement d'un béton à retrait compensé contenant différents dosages	

	en agent d'expansion conservé dans l'eau de chaux pendant 7 jours [Blais, 2010].....	19
Figure 2.17	Assemblage de la cage de restriction [ASTM C878].....	20
Figure 2.18	Mesure des échantillons au comparateur.....	21
Figure 2.19	Expansion restreinte mesurée sur des éprouvettes de béton suivant la procédure ASTM C 878 avec du CaO et du CSA [Colleparidi, 2008].....	22
Figure 2.20	Mise en place d'une jauge de déformation à corde vibrante.....	23
Figure 2.21	L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K par un mûrissement humide de 12h, 3 et 7 jours [Bissonnette et al. 2008].....	24
Figure 2.22	L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K suivant différent type de mûrissement [Bissonnette et al. 2008].....	24
Figure 2.23	L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K suivant différentes périodes de mûrissement [Bissonnette et al. 2008].....	25
Figure 2.24	Expansion de mortier contenant du ciment expansif [Ribeiro, 1995].....	27
Figure 2.25	L'expansion causée par l'hydratation de la chaux (2%) dans les pâtes de ciment [Deng et al, 1995].....	29
Figure 2.26	Influence du <i>Conex</i> sur l'expansion et le retrait des bétons ordinaires sans air entrainé [Gagné, 2011].....	30
Figure 2.27	Évolution de la déformation des bétons en fonction du temps.....	31
Figure 2.28	Courbe d'expansion du <i>Conex</i> dans un béton compacté au rouleau en fonction du temps [Lessard et Gagné, 2009].....	32
Figure 2.29	Déformation isotherme des bétons avec différents pourcentages en <i>Conex</i> [Gagné, 2014].....	33
Figure 2.30	Interactions des molécules de surfactants avec un solvant polaire [Rajabipour et coll., 2007].....	35
Figure 2.31	Effet de la concentration de l'ARR sur la tension de surface d'une solution aqueuse [Ai et Young, 1997].....	36
Figure 2.32	La tension de surface en fonction de la concentration ARR en solution dans l'eau ou synthétique poreux (0.35 KOH + 0.05 NaOH.) [Weiss et al, 2008].....	37

Figure 2.33	Contributions HR de la loi de Raoult (l'effet concentrations ioniques) et la loi de Kelvin (consommation d'eau) [Weiss et al, 2008].....	39
Figure 2.34	Retrait mesuré pour des échantillons de pâte : (a) sans ARR et (b) avec ARR [Weiss et al, 2008].....	40
Figure 2.35	Influence de l'agent réducteur de retrait sur le retrait de séchage.....	40
Figure 2.36	Micrographie ESEM avec 3% ARR après 2 h de cure [Maltese et al, 2005].....	41
Figure 2.37	Micrographie ESEM avec 3 % d'agent d'expansion et 3 % ARR après 2 h de cure [Maltese et al, 2005].....	42
Figure 2.38	Le Pont du Cosmos.....	43
Figure 2.39	Section typique du Pont de Cosmos.....	43
Figure 2.40	Localisation des resurfaçages du pont du Cosmos dans la 1 ^{ère} travée sud (vue en plan).....	44
Figure 2.41	Schéma du tablier avant et après le resurfaçage du pont du Cosmos.....	45
Figure 2.42	Évolution de la fissuration des resurfaçages du pont du Cosmos.....	47
Figure 2.43	Le passage inférieur Girouard vu de l'avenue Girouard en direction Sud.....	47
Figure 2.44	Localisation et dimensions des resurfaçages du passage inférieur Girouard.....	48
Figure 2.45	Schéma du tablier avant et après le resurfaçage du passage inférieur Girouard.....	49
Figure 2.46	Expansion et retrait des bétons lors du resurfaçage du passage de Girouard [Gagné et al, 2008].....	50
Figure 2.47	Relevé de la fissuration après 7 mois de service.....	50
Figure 2.48	Évolution de la déformation in situ du passage de Girouard [Gagné et al, 2008].....	51
Figure 2.49	Mécanisme de fissuration de la dalle due au retrait empêché par la contrainte de traction [Gagné, 2013].....	52

Figure 2.50	Mécanisme de formation du retrait de séchage [Gagné, 2013].....	53
Figure 3.1	Organigramme du programme expérimental.....	59
Figure 4.1	Courbe granulométrique du sable.....	61
Figure 4.2	Courbe granulométrique de la pierre 5-14 mm.....	62
Figure 4.3	Sphère de Cendre volante et chaux vive dans le <i>Conex</i> observé au MEB [Fattahi, 2014].....	63
Figure 4.4	Malaxeur de capacité 80 kg.....	65
Figure 4.5	Aéromètre de type pressiométrique.....	69
Figure 4.6	Cylindres remplis de béton pour les essais en compression.....	70
Figure 4.7	Appareil pour la mesure de la résistance à la compression.....	70
Figure 4.8	Confection des échantillons pour la norme ASTM C878 (a) et ASTM C157(b).....	71
Figure 4.9	Coffrage et échantillons pour la mesure de l'expansion restreinte.....	72
Figure 4.10	Coffrage et échantillons pour la mesure du retrait.....	73
Figure 4.11	Raccordement des échantillons à la centrale d'acquisition de données pour la mesure de l'expansion libre.....	74
Figure 5.1	Affaissement du béton contenant du <i>Conex</i> et de l'ARR.....	75
Figure 5.2	Pourcentage d'air du béton contenant du <i>Conex</i> et de l'ARR.....	76
Figure 5.3	Résistance à la compression à 7 jours d'un béton contenant du <i>Conex</i> et de l'ARR.....	77
Figure 5.4	Résistance à la compression à 28 jours d'un béton contenant du <i>Conex</i> et de l'ARR.....	77
Figure 5.5	Évolution de l'expansion et du retrait en fonction du dosage en <i>Conex</i> des bétons selon la procédure ASTM C157.....	78
Figure 5.6	Évolution de la masse en fonction du dosage en <i>Conex</i> des bétons selon la procédure ASTM C157.....	79
Figure 5.7	Évolution de l'expansion et du retrait libre des bétons avec <i>Conex</i>	

	mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante.....	80
Figure 5.8	Évolution de l'expansion libre des bétons avec <i>Conex</i> mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante pendant 7 jours.....	81
Figure 5.9	Influence du dosage en <i>Conex</i> sur l'expansion restreinte des bétons selon la procédure ASTM C878.....	86
Figure 5.10	Évolution de la masse en fonction du dosage en <i>Conex</i> des bétons selon la procédure ASTM C878.....	83
Figure 5.11	Évolution de l'expansion et du retrait des bétons avec <i>Conex</i> et ARR selon la procédure ASTM C157.....	84
Figure 5.12	Évolution de la masse en fonction du dosage en <i>Conex</i> et ARR selon la procédure ASTM C157.....	85
Figure 5.13	Évolution de l'expansion et du retrait libres des bétons avec <i>Conex</i> et ARR mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante.....	86
Figure 5.14	Évolution de l'expansion libre des bétons avec <i>Conex</i> et l'ARR mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante pendant 7 jours.....	87
Figure 5.15	Influence du dosage en <i>Conex</i> et l'ARR sur l'expansion restreinte des bétons selon la procédure ASTM C878.....	88
Figure 5.16	Évolution de la masse en fonction du dosage en <i>Conex</i> et l'ARR selon la procédure ASTM C878.....	89
Figure 6.1	Expansion libre avec et sans ARR mesurée à l'aide des capteurs à corde vibrante.....	90
Figure 6.2	Expansion restreinte avec et sans ARR selon la procédure ASTM C878...	91
Figure 6.3	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur les expansions libres et restreintes.....	92
Figure 6.4	Influence du dosage en <i>Conex</i> sans ARR sur le retrait de séchage des bétons.....	93
Figure 6.5	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage.....	94
Figure 6.6	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage à 7 jours.....	95
Figure 6.7	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage	

	à 224 jours.....	96
Figure 6.8	Influence de 6% <i>Conex</i> avec ou sans ARR sur le retrait de séchage.....	96
Figure 6.9	Influence de l'ARR sur la diminution du retrait de séchage des bétons avec et sans <i>Conex</i> (Mesure ASTM C157).....	97
Figure 6.10	Influence du dosage en <i>Conex</i> sans ARR sur le retrait de séchage des bétons.....	98
Figure 6.11	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage des bétons.....	98
Figure 6.12	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage à 7 jours.....	99
Figure 6.13	Influence du dosage en <i>Conex</i> et de l'ARR sur le retrait de séchage à 224 jours.....	100
Figure 6.14	Influence de 6% <i>Conex</i> avec ou sans ARR sur le retrait de séchage.....	100
Figure 6.15	Influence de l'ARR sur la diminution du retrait de séchage des bétons avec et sans <i>Conex</i> (Mesure avec les capteurs à corde vibrante.....)	101
Figure 6.16	Comparaison entre le retrait de séchage mesuré selon la procédure ASTM C157 et le retrait de séchage mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante (bétons sans ARR).....	102
Figure 6.17	Comparaison entre le retrait de séchage mesuré selon la procédure ASTM C157 et le retrait de séchage mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante (bétons avec ARR).....	103
Figure 6.18	Évolution du retrait total avec et sans ARR en fonction du dosage en <i>Conex</i> mesuré à l'aide de capteurs à corde vibrante.....	104
Figure 6.19	Retrait total avec et sans ARR à 7 jours de séchage.....	105
Figure 6.20	Retrait total avec et sans ARR à 224 jours de séchage.....	106
Figure 6.21	Influence de l'ARR sur la diminution du retrait total des bétons avec et sans <i>Conex</i>	106
Figure 6.22	Étude comparative des deux méthodes utilisées par la mesure du retrait total sans ARR en un nuage de points.....	107

Figure 6.23 Étude comparative des deux méthodes utilisées par la mesure
du retrait total avec ARR en un nuage de points..... 108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Distribution granulométrique du sable.....	60
Tableau 4.2	Composition chimique du <i>Conex</i> [Fattahi, 2015].....	63
Tableau 4.3	Formulations et propriétés des bétons avec et sans <i>Conex</i>	67
Tableau 4.4	Formulation et propriétés des bétons avec et sans <i>Conex</i> + ARR.....	68

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 2.1	Équation de la formation d'étringite.....	23
Équation 2.2	Équation stœchiométrique pour la formation d'étringite.....	26
Équation 2.3	Équation de l'ettringite utilisé dans le dosage du ciment expansif.....	27
Équation 2.4	Réaction chimique d'expansion de la chaux.....	28
Équation 2.5	Formulation chimique d'un agent réducteur de retrait.....	36
Équation 2.6	Équation de Young- Laplace.....	38
Équation 2.7	Équation de Kelvin.....	39

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Association canadienne de normalisation
ARR	Agent Réducteur de Retrait
E/C	Rapport Eau/Ciment
E/L	Rapport Eau/liant
f^c	Résistance à la compression
kg	Kilogramme
kg/m^3	Kilogramme par mètre cube
MPa	Mégapascal
$\mu\text{m/m}$	Micromètre par mètre
mm	Millimètre
m^3	Mètre cube
MPa/s	Mégapascal par seconde
mL/m^3	Millilitre par mètre cube
aff	Affaissement
C	CaO
A	Al ₂ O ₃
S	SO ₃

1. INTRODUCTION

Au Québec, le béton est particulièrement utilisé dans les infrastructures (bâtiments, autoroutes, voies de circulation, ponts, viaducs) et ouvrages d'art du réseau routier. Ce réseau construit dans les années 1960 et 1970 présente aujourd'hui des signes de vieillissement nécessitant d'importants travaux d'entretien et de réparation. La réparation des ouvrages endommagés nécessite de grandes interventions et investissements coûteux, d'où l'importance d'utiliser des techniques et des matériaux plus performants afin d'assurer la pérennité des ouvrages.

L'étude de la durabilité constitue un élément particulier et essentiel dans le domaine de la conception et de la construction. Cette durabilité peut être largement affectée par une fissuration précoce, liée à des déformations empêchées d'origine thermiques ou hydriques, ou par les sollicitations thermiques subies au cours de l'hydratation [Zreiki, 2009]. Les États dépensent des milliers de dollars dans la réparation des infrastructures affectées par la fissuration sans compter des frais supplémentaires qui s'ajoutent chaque année. De nombreuses recherches ont été réalisées pour préserver la durée de vie des ouvrages.

Ces recherches visent principalement à améliorer la qualité et la formulation des bétons. Bien qu'une bonne formulation permette d'améliorer la durée de vie des ouvrages, la conception des structures, le choix des matériaux, les propriétés à l'état frais du béton et les techniques de mise en œuvre jouent aussi un rôle prépondérant dans la durabilité. La compréhension et l'amélioration de la qualité du béton par l'utilisation d'agents d'expansion et de réducteur de retrait relèvent d'une priorité de protection contre le retrait et la fissuration du béton pour la durabilité des infrastructures.

Cette option s'avère beaucoup moins coûteuse et permet d'éviter la remise en état des ouvrages parfois trop coûteuse. Cette nouvelle mesure de protection des ouvrages en béton permet de contrôler l'amplitude des déformations et des contraintes induites par le retrait qui provoque des fissurations parfois majeures dans les structures.

Ce projet de recherche met en évidence les meilleures performances d'un béton durable, en diminuant ou en éliminant les contraintes de tractions provoquées par le retrait par l'ajout d'un adjuvant réducteur de retrait et/ou par l'utilisation d'un agent expansif qui engendre une expansion initiale afin de compenser les déformations (et contraintes) dues au retrait.

2. LES VARIATIONS VOLUMIQUES DU BÉTON

2.1 Mécanismes de base

2.1.1 Le retrait chimique et endogène

Le béton est un matériau qui peut subir des changements volumiques dus à des variations de température et d'humidité ou en raison de réactions chimiques internes avant ou après la prise. L'hydratation du ciment avec l'eau se fait par un ensemble de réactions chimiques qui engendrent une variation de volume au sein de la pâte de ciment durcie (le retrait chimique). Le changement volumétrique du béton (diminution de volume) peut aussi résulter de l'assèchement de la porosité capillaire dû à l'hydratation du ciment ou par l'évaporation de l'eau à l'extérieur de la masse du béton, c a d dans le milieu environnant.

Des variations volumiques à jeune âge jusqu'à 7 jours peuvent entraîner la fissuration du béton durci, particulièrement dans le cas des bétons ayant un faible rapport eau/liant. Ce phénomène résulte du retrait endogène engendré par le retrait chimique de la pâte de ciment qui s'hydrate.

Le retrait chimique est la diminution du volume absolu des solides et des liquides de la pâte lors de l'hydratation du ciment [Kosmatka et al, 2011]. Le volume absolu des produits d'hydratation est inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment anhydre. Le retrait chimique se poursuit tant que progresse l'hydratation du ciment. Cette continuité de l'hydratation engendre la formation d'interfaces gaz-liquide dans la porosité capillaire. L'intensité de la variation volumétrique due au retrait chimique peut être estimée à partir de la densité des cristaux des phases hydratées. Le retrait chimique est le mécanisme fondamental à la base de la formation du retrait endogène (Figure 2.1).

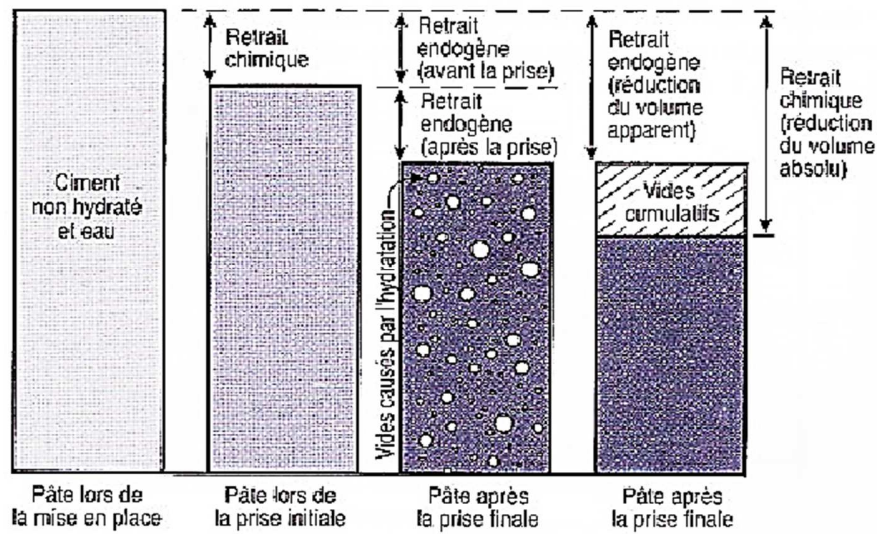


Figure 2.1 - Changement du volume de la pâte fraîche et durcie causé par le retrait chimique et endogène [Kosmatka et al, 2011]

Le retrait endogène est un phénomène se produisant majoritairement à jeune âge du béton et qui influence les variations volumiques et la fissuration du béton. Le retrait endogène est la diminution du volume externe apparent d'une pâte de ciment, d'un mortier ou d'un béton engendrée par l'hydratation du ciment. La diminution du volume externe apparent engendrée par le retrait endogène est bien inférieure à la diminution du volume absolu engendrée par le retrait chimique en raison de la rigidité de la structure de la pâte de ciment durcie (Figure 2.2).

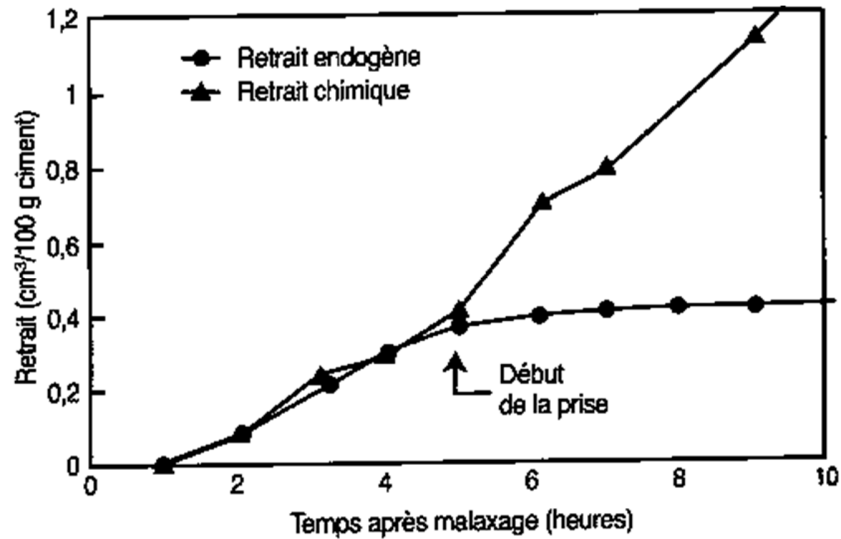


Figure 2.2 - Relation entre le retrait endogène et le retrait chimique de la pâte de ciment à jeune âge [Hammer, 1999]

Pour un volume donné d'eau et de ciment, l'hydratation du ciment forme un volume d'hydrates inférieur d'environ 8 à 12% à celui des constituants [Buil, 1979; Le Chatelier, 1900]. Ce phénomène est connu sous le nom de « contraction Le Chatelier ». Cette contraction se produit librement jusqu'à ce que le durcissement du squelette d'hydrates s'oppose à la diminution de volume qui résulte de l'hydratation. Cela crée une dépression dans l'eau interstitielle des pores capillaires qui provoque un changement de phase liquide-vapeur et conduit ainsi à une autodessiccation de la matrice cimentaire [Hua, 1992].

Le processus d'hydratation continue et fait apparaître un réseau gazeux connecté dans les pores. Le réseau gazeux avec la phase liquide crée de façon simultanée l'interface liquide/gaz entraînant l'apparition de tensions capillaires. Celles-ci doivent être équilibrées par une contraction de la matrice cimentaire qui se traduit à l'échelle macroscopique appelé retrait endogène. Plus le diamètre des pores est petit, plus les tensions capillaires sont importantes selon la loi de Laplace appliquée à un pore cylindrique, ce qui conduit à une autodessiccation et donc à un retrait endogène plus important.

Il est bien observé que le retrait endogène ne peut se développer qu'en absence d'apport d'eau externe où l'hydratation du béton consomme l'eau des pores capillaires qui entraîne

l'autodessiccation de la pâte et une diminution uniforme du volume [Copeland et Bragg, 1995]. Le retrait endogène augmente lorsque le rapport eau/liant diminue c.à.d. inférieur à 0,42 [Holt, 2001] et lorsque la proportion volumique de la pâte augmente. Les bétons à haut performances de par leurs porosités capillaires fines développent un retrait endogène de cinétique plus rapide et d'amplitude plus élevée que celui des bétons ordinaires [Kosmatka et al, 2011]. Le retrait est compris entre 200-400 $\mu\text{m}/\text{m}$ et peut atteindre la moitié de son retrait de séchage à cause de leur faible rapport eau/liant (0,30).

2.1.1.1 Mécanismes physiques

Le retrait endogène d'origine physique est une conséquence de l'autodessiccation qui se produit lorsque le matériau n'a aucun échange avec l'environnement. Cette autodessiccation de la pâte de ciment est un phénomène en principe homogène, intrinsèque au matériau qui ne génère donc pas de gradient de déformation au sein du matériau. Comme mécanismes physiques, nous avons:

- Le mécanisme de dépression capillaire s'explique par la formation de ménisques à l'interface liquide-gaz au niveau de la porosité capillaire composée de plusieurs familles de vides qui se différencient de quelques millimètres et de quelques dizaines d'Ångström (Å). Les forces de tensions qui s'exercent sur les parois des capillaires au niveau de ces ménisques deviennent de plus en plus élevées et font contracter le volume apparent de la pâte de ciment hydraté par diminution de l'humidité relative interne. Cette autodessiccation augmente la dépression capillaire qui est compensée par la compression de la phase solide de la pâte qui engendre le retrait.

- Le mécanisme de variation de tension superficielle se traduit par une variation dimensionnelle due à l'eau absorbée sur le squelette solide. Lorsque dans la pâte de ciment il n'y a pas d'absorption d'eau sur les surfaces solides, ceci provoque des tensions superficielles du squelette solide qui entraînent le retrait.

- La variation de pression disjonctive est un mécanisme d'autodessiccation lié à l'interaction entre deux surfaces solides recouvertes des molécules d'eau absorbées. La pression disjonctive est fonction de l'humidité relative de la pâte. Lorsqu'elle diminue, la pression disjonctive diminue et les surfaces solides s'approchent en développant le retrait.

2.1.1.2 Paramètres d'influences

Le retrait endogène est affecté par :

- *Le rapport E/C* : Le retrait endogène (Figure 2.3) augmente rapidement avec la diminution du rapport E/C. Cette augmentation s'explique par la porosité capillaire du béton qui est très fine due à une faible quantité d'eau. Cette porosité capillaire fine force la formation de ménisques très courbés et engendre très tôt de fortes dépressions capillaires [Tazawa et coll., 1995].

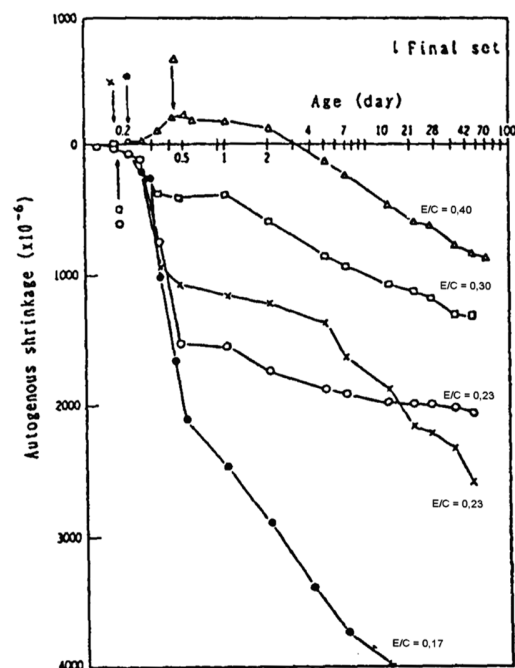


Figure 2.3 - Influence du rapport E/C sur le retrait endogène de la pâte [Tazawa et coll, 1995]

- *La finesse du ciment* : Elle influence significativement l'évolution du retrait endogène (Figure 2.4) ainsi que par sa composition minéralogique. Plus le ciment est fin, plus il développe un retrait endogène important qui débute plutôt [Tazawa et coll., 1995].

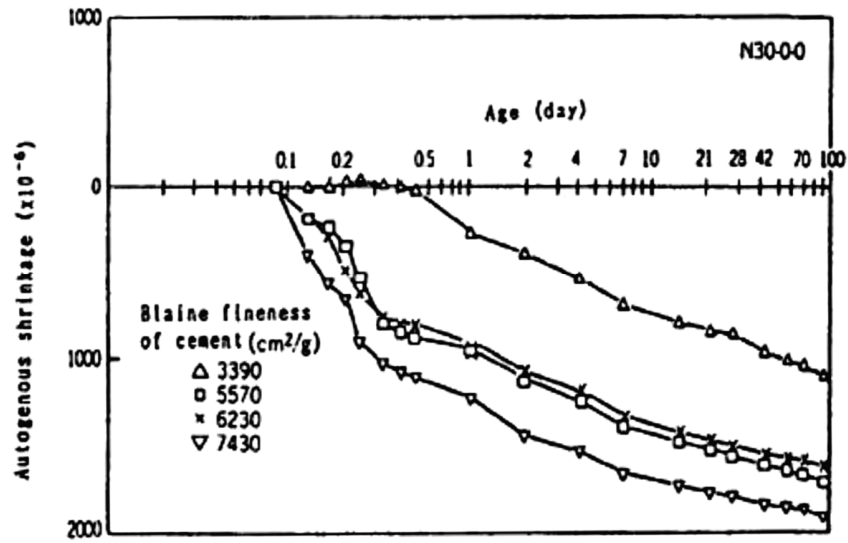


Figure 2.4 - Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène d'une pâte (E/C=0,30) [Tazawa et coll, 1995]

- *Les ajouts minéraux* : Les ajouts minéraux comme la fumée de silice ou les laitiers de hauts fourneaux provoquent une augmentation du retrait endogène. La fumée de silice (Figure 2.5) provoque un raffinement des pores qui engendre des dépressions capillaires plus importantes [Tazawa et coll., 1995].

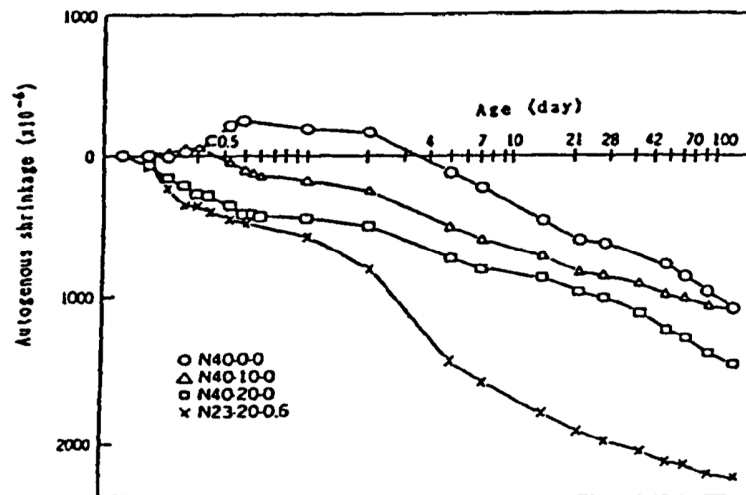


Figure 2.5 - Influence de la fumée de silice (0-10-20%) sur le retrait endogène de la pâte (E/C=0,40 et E/C=0,23) [Tazawa et coll., 1995]

2.1.2 Le retrait de séchage

Les changements volumiques subis par la pâte de ciment ont plusieurs origines dont les principales sont les changements de température, la formation de glace ou de produits expansifs et le retrait. Le changement de volume dû à l'assèchement progressif de certaines catégories de pores par abaissement graduel du taux d'humidité est appelé retrait de séchage. Le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation qui se développe à la surface du béton par évaporation d'eau interne du béton [Aïtcin et coll, 1997].

2.1.2.1 Mécanismes physiques

Le retrait de séchage est une diminution du volume de la pâte provoquée par une réorganisation de l'eau dans la porosité capillaire [Gagné, 2013]. D'après Hansen [1987], il n'existe pas de théorie unifiée pour expliquer le retrait de séchage dans l'ensemble du domaine d'humidité relative. Même si plusieurs mécanismes ont été proposés, leur combinaison dans le processus global est encore mal connue. Son mécanisme d'action semble s'expliquer avec le niveau d'humidité relative dans l'espace poreux. Pour une humidité inférieure à 40%, on fait appel à la variation de l'énergie superficielle pour expliquer le retrait alors que pour une humidité comprise entre 40% et 100%, on se réfère plutôt à une variation de dépression capillaire et à l'action de la pression de disjonction entre les feuillets de C-S-H [Baroghel-Bouny, 1998]. Toutefois, pour une humidité relativement moyenne annuelle de l'ordre de 70%, la théorie des dépressions capillaires est suffisante pour expliquer le retrait de séchage des bétons en conditions d'exposition extérieures. Lorsque le transport de l'eau se fait principalement sous forme de vapeur par un processus de diffusion depuis les pores capillaires, on peut expliquer le retrait de séchage de la façon suivante : la pression du liquide décroît progressivement en s'évaporant pour que l'eau liquide et la vapeur d'eau restent en équilibre, suite à une diminution de la pression de vapeur par diffusion vers le milieu extérieur. Tout ceci est à une échelle des pores capillaires [Coussy, 1995; Coussy et coll., 1998].

La coexistence d'une phase liquide et d'une phase vapeur génère des tensions à leur interface mettant en compression la matrice cimentaire. Le degré de saturation du béton diminue, les tensions capillaires augmentent. Ce processus se traduit au niveau macroscopique par une déformation qui constitue le retrait de séchage et qui est globalement corrélée de façon linéaire à la perte de masse de l'échantillon suivant des

pentés différentes selon le domaine d'humidité considéré dans le matériau [Baroghel-Bouny, 1998; Coussy et coll., 1998]

2.1.2.2 Paramètres d'influences

- *L'humidité relative* : Elle joue un rôle prépondérant dans le changement de volume du béton causant le retrait de séchage. La diminution de l'humidité entraîne le retrait du béton. L'étude d'Ulm et coll [1999] montre que la fissuration est directement corrélée à la perte en eau engendrée par le séchage dans la structure. La diffusivité et la quantité d'eau libre accessible au séchage sont les propriétés qui gouvernent respectivement la cinétique et l'amplitude de la fissuration due au séchage.

- *Le rapport E/C* : Le retrait de séchage diminue significativement avec la diminution du rapport E/C. Le retrait de séchage est réduit en maintenant la quantité d'eau (Figure 2.6) aussi basse que possible, par diminution du volume de la pâte ou par augmentation du volume des gros granulats. Les facteurs comme l'affaissement élevé, les températures excessivement hautes du béton frais, la forte teneur en granulats fins augmentent les besoins en eau de la pâte de ciment.

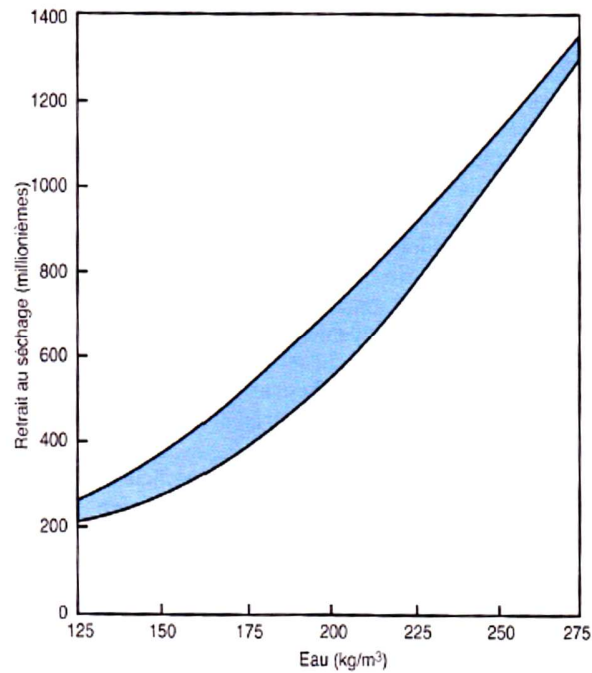


Figure 2.6 - Relation entre la teneur en eau totale et le retrait de séchage [Kosmatka et al, 2011]

- *Les ajouts minéraux* : L'utilisation d'ajouts minéraux à des dosages normaux dans le béton a peu d'effet sur le retrait de séchage [Kosmatka et al, 2011]. Ils présentent un retrait de séchage similaire au béton contenant que du ciment portland. L'utilisation des cendres volantes (25%) de classe C et F (Figure 2.7) comme ajouts minéraux dans le béton, présente un retrait de séchage ne dépassant pas 0,01% par rapport au témoin.

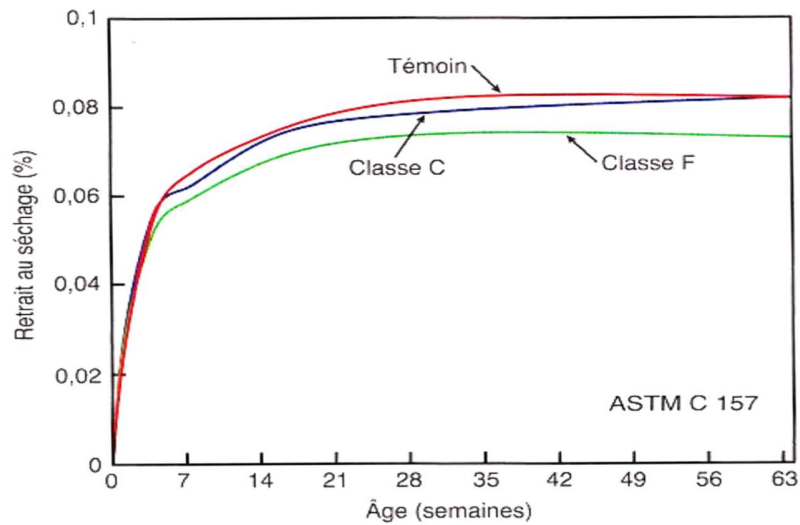


Figure 2.7 - Retrait de séchage des bétons contenant des cendres volantes comparativement à un mélange témoin [Gebler et Klieger, 1986]

- *Le mûrissement* : Le mûrissement protège le béton contre le retrait de séchage. Il diminue considérablement le retrait de séchage suivant la durée et le type de mûrissement en influençant sur sa vitesse de développement. Les membranes de mûrissement, les enduits retiennent l'humidité à l'intérieur du béton et retardent ainsi pendant de longues périodes le retrait de séchage. Le mûrissement à la vapeur ainsi que de faibles températures de cure diminuent aussi le retrait de séchage.

- *Les gros granulats* : Les gros granulats, selon leur type restreignent le retrait de la pâte de ciment hydratée. Les granulats rigides sont difficiles à comprimer et entravent le retrait de la pâte de ciment. Les granulats contenant des quantités excessives d'argiles entraînent de forts retraits tandis que le quartz, granite, le feldspath, le calcaire et la dolomite donnent des bétons à faible retrait de séchage.

2.1.2.3 Méthode de mesure du retrait de séchage (ASTM C157)

Cette méthode d'essai couvre la détermination des changements de longueur des échantillons exposés à des conditions contrôlées de température et d'humidité. L'éprouvette est un prisme de section carrée de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur totale d'environ 284 mm [11,2 po]. Trois échantillons ayant les mêmes dimensions

doivent être préparés pour chaque essai pour limiter l'influence des variations de longueurs des divers échantillons.

La préparation des échantillons consiste à insérer des plots vissés au centre de plaques d'extrémité (Figure 2.8). Les plaques (2 par moule) sont placées aux deux extrémités à l'intérieur du moule et le béton est versé entre ces plaques (Figure 2.8). Les échantillons confectionnés sont conservés dans l'eau saturée de chaux pendant 7 jours, pour ensuite être mis au séchage dans une chambre où la température et l'humidité sont contrôlées (23°C; 50%). Des mesures prises à l'aide d'un comparateur au temps initial (après démoulage) et à différents âges permettront de calculer la variation de longueur des spécimens.



Figure 2.8 - Dispositif de mise en place pour la confection des échantillons

La figure 2.9 présente une courbe type de retrait d'un béton de 25 MPa. Le démoulage des échantillons est fait à 24 heures et la première mesure de référence est prise à cet instant. Le béton est conservé dans l'eau pendant 6 jours puis mis au séchage (50% humidité relative). À 7 jours la variation de l'allongement est de 29 $\mu\text{m}/\text{m}$ due à une faible expansion du béton par une faible absorption d'eau. Le retrait commence dès le début du séchage avec une déformation qui atteint -467 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 48 jours.

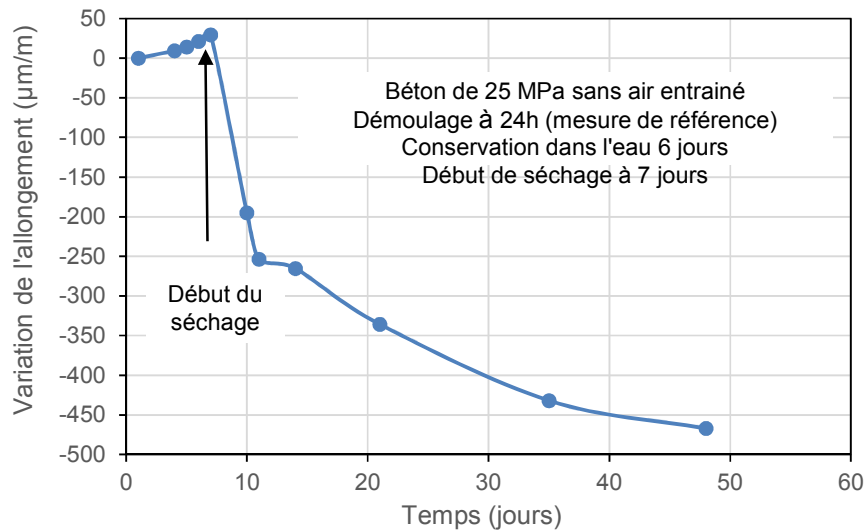


Figure 2.9 - Retrait de séchage typique d'un béton de 25 MPa sans air entrainé fait selon la procédure ASTM C157

2.1.3 Le retrait plastique

Le retrait plastique caractérise le changement de volume se produisant avant le durcissement, lorsque le béton est encore à l'état frais (pendant la prise initiale). Il résulte principalement d'une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui peut faire fissurer la surface externe (Figure 2.10). Le retrait plastique est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques.

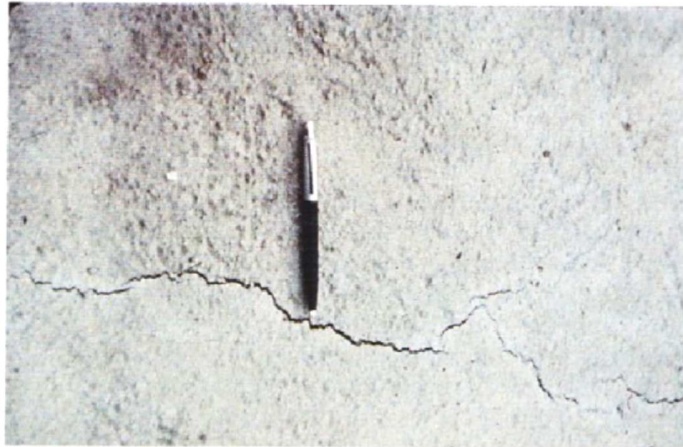


Figure 2.10 - Fissuration due au retrait plastique [Kosmatka et al, 2011]

2.1.4 Expansion chimique interne au moyen d'agents expansifs et ciment expansifs

2.1.4.1 Les mécanismes d'expansion

Les agents expansifs sont des produits spéciaux qui créent une expansion dans le béton par la réaction de composantes chimiques spécifiques. L'expansion produite par les réactions se fait sur une période de temps donné dans le béton convenablement renforcé, de sorte que l'expansion produit une contrainte de traction dans l'armature métallique et une précontrainte chimiques dans le béton. Le béton précontraint chimiquement, produit par cette expansion, ne peut se faire que si le processus d'expansion est développé après l'accroissement de la résistance en compression du béton, et par conséquent, après que la liaison acier-béton commence à se développer. Cela signifie que toute action expansive survenant trop tôt dans un béton plastique déformable ne produit pas une contrainte de compression avantageuse dans le béton durci. D'autre part, une expansion se produisant à un âge avancé doit être nécessairement accompagnée d'une période de durcissement prolongée. La production de l'expansion se fait pendant le mûrissement par réaction des composants chimiques avec l'eau en formant des produits expansifs comme de l'hydroxyde calcium (CaOH_2) (Figure 2.11) ou de l'étringite ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CSH}_{32}$) (Figure 2.12) [Colleparidi et al, 2005]. L'expansion est créée par les réactions, de sorte que la précontrainte chimique produite élimine les tensions provoquées par le retrait. L'expansion développée par les agents d'expansion dans le béton peut annuler partiellement ou complètement le retrait du béton.

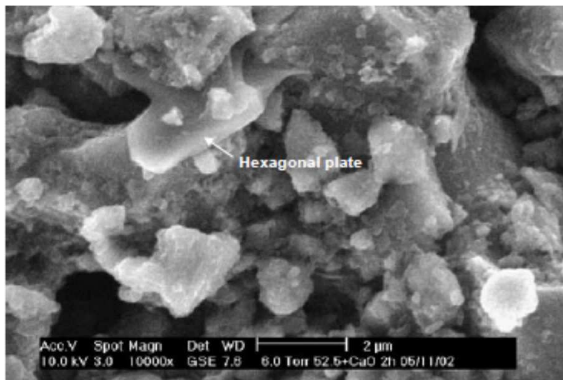


Figure 2.11- Micrographie ESEM d'une pâte contenant 3% d'agent d'expansion (CaO) 2 h de cure [Maltese et al, 2005]

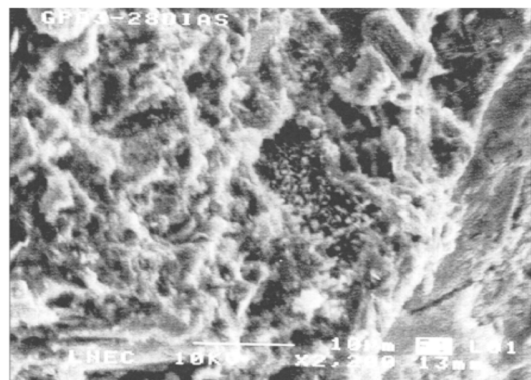


Figure 2.12 - Observation par analyse au microscope électronique de mortier après expansion à 28 jours [Ribério et al, 1995]

Un ciment expansif est un mélange de ciment Portland et d'agent d'expansif qui crée de l'expansion par augmentation du volume de la pâte. Le ciment expansif est utilisé pour compenser la diminution de volume de la pâte de ciment due au retrait, permettant ainsi de minimiser les fissures [ACI 223-98]. Dans certains cas, des procédures spéciales sont nécessaires pour assurer une hydratation adéquate au bon moment. Les ciments expansifs sont utilisés pour atteindre les mêmes objectifs que l'utilisation d'agents expansifs dans le béton [ACI 223-98]. De même, les proportions du mélange doivent assurer une expansion adéquate pour compenser le retrait de séchage interne.

L'utilisation d'agents expansifs, tels que les oxydes de métaux alcalino-terreux (calcium et le magnésium) dans le béton, est une méthode permettant de contrôler les retraits. Il existe aujourd'hui différents types d'agents d'expansion utilisés dans le béton pour contrecarrer le retrait.

L'agent d'expansion de types G, à base de CaO est un ajout en poudre qui est utilisé pour réduire et compenser le retrait du béton à base de ciment Portland. Il produit un système cristallin de plaquettes d'hydroxyde de calcium, comme spécifié dans la norme ACI 223 [Euclid Chemical Company, 1998]. Son mécanisme d'action n'est pas basé sur la réduction de la tension de surface dans les pores du béton comme les réducteurs de retrait, mais sur la formation d'une composante expansive. Le CaO réagit avec l'eau présente dans le béton (principalement dans les 24 premières heures) pour former du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandite) qui provoque l'expansion contrôlée du béton après la prise du

béton et durant son durcissement. L'expansion du CaO évolue en fonction du temps et du mûrissement (Figure 2.13).

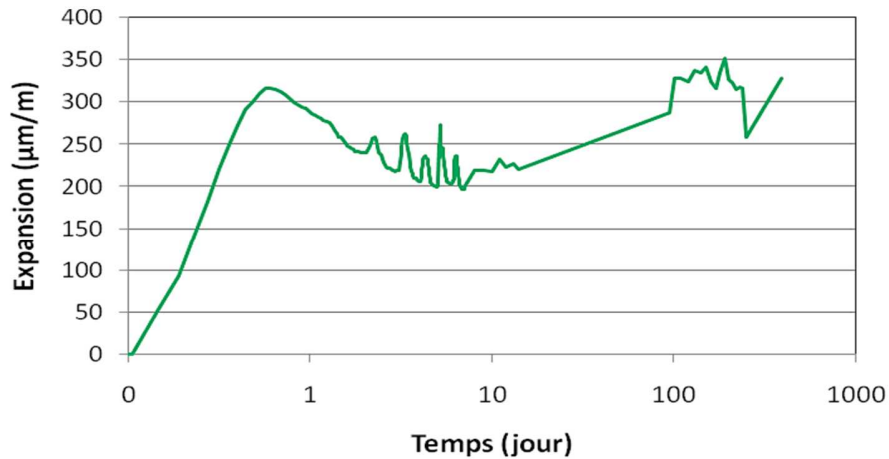


Figure 2.13 - Présentation de l'expansion du CaO en fonction du temps, dans un tablier de pont en service [Lessard et Gagné, 2009]

L'oxyde de magnésium (MgO), crée l'expansion dans le béton pour contrecarrer le retrait [Chatterji, 1995]. L'expansion est plus importante lorsque les échantillons sont immergés. Le volume molaire produit pendant l'hydratation donne une augmentation volumique d'environ 117%. Des mesures d'expansion de barres de pâte et de mortier immergés dans l'eau ont montré que 4 à 5 % de MgO est nécessaire pour provoquer une expansion efficace. Différents auteurs ont montré que pour un contenu donné de MgO, l'expansion augmente fortement avec l'augmentation de la taille des particules de MgO [Chatterji, 1995]. Cette augmentation de la taille des particules (entre 15 - 30 µm et 30 - 60 µm) s'explique par l'hydratation rapide des petites particules de MgO. Il est également observé que le taux d'expansion de MgO est supérieur dans les barres de pâte pures comparativement à l'expansion des barres de mortier réalisées avec les mêmes ciments. [Chatterji, 1995]

Le développement des ciments expansifs a débuté en Russie et en France. Lossier [1946] a mélangé un agent expansif et un stabilisateur au ciment Portland. L'agent expansif était alors un mélange de gypse, de bauxite et de craie qui formait du sulfate de calcium et de l'aluminate de calcium (principalement le C_5A_3). Ces composés réagissent dès le contact avec l'eau pour former du sulfo-aluminate de calcium hydraté, ou éttringite ($C_3AS_3H_{32}$)

accompagné d'une expansion de la pâte de ciment. Le ciment expansif de type K a été mis au point aux États-Unis par Alexander Klein qui a introduit du sulfo-aluminate de calcium anhydre (C_4A_3S) et de l'oxyde de calcium (CaO) non combiné à un ciment Portland. Au Japon, on a produit un ciment expansif à partir d'oxyde de calcium spécialement traité pour produire de la chaux libre expansive. Ce ciment est appelé ciment de type O.

Les trois types de ciments expansifs reconnus par ACI 223R-93 [ACI 223-93, 1994] et par ASTM C 845-90 sont regroupés comme suit:

- Le ciment expansif de type K contenant un mélange du ciment portland et d'anhydride sulfate de trialuminate tétracalcique C_4A_3S (où $C = CaO$, $A = Al_2O_3$, $S = SO_3$). Ce type de ciment est le plus utilisé dans l'industrie.
- Le ciment expansif M est un mélange de ciment Portland et d'aluminate de calcium (CA et $C_{12}A_7$).
- Le ciment expansif S est un mélange de ciment Portland et d'aluminate tricalcique (C_3A).

2.1.4.2 Évolution typique de l'expansion d'un ciment expansif

La figure 2.14 présente l'évolution typique de l'expansion d'un béton à retrait compensé fabriqué avec un ciment expansif de type K [ACI 223-93]. L'essentiel de la réaction d'expansion se produit dans les premiers jours suite à la fabrication du béton.

Des expériences ont montré que l'expansion d'un béton mûri par immersion dans l'eau est plus efficace que celle d'un béton mûri à l'humidité pendant les mêmes périodes [Blais, 2010]. Pour ce type de mûrissement, l'expansion est développée de sorte que la déformation atteint un niveau comparable au retrait pour parvenir à compenser les effets convenablement. Pendant les premiers jours après la prise du béton, la déformation initiale génère une précontrainte de compression dans le béton. Le béton se trouvant ainsi dans un milieu confiné ou en situation de retrait restreint, peut ainsi compenser ou avoir un bilan de déformations nul (Figure 2.14), ce qui éliminerait les risques de fissuration grâce à l'effet de précontrainte généré par l'expansion initiale du matériau.

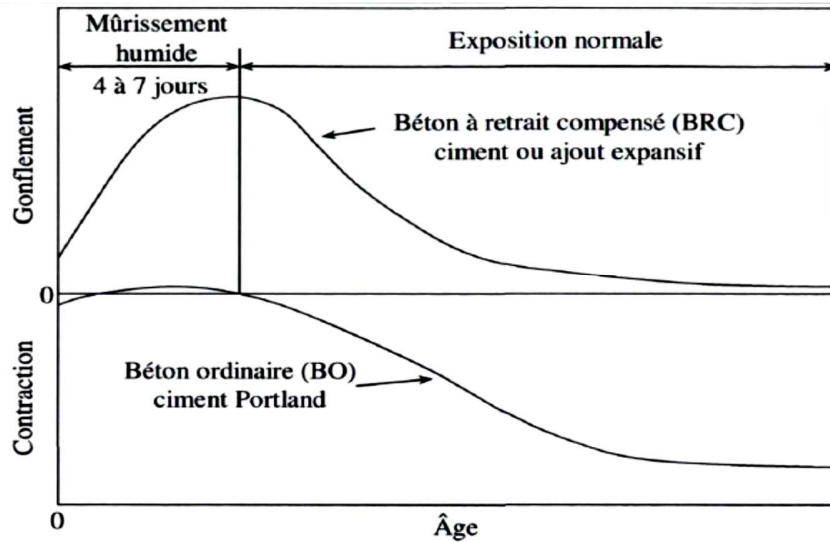


Figure 2.14 - Représentation schématique des variations de longueur du BO et du BRC [ACI 223-93, 1994]

2.1.4.3 Évolution typique de l'expansion obtenue avec un agent d'expansion interne à base de CaO

Les courbes des figures 2.15 et 2.16 montrent l'évolution des déformations axiales dans le temps pour les dosages de 5 et 10 % en agent expansif (CaO). Les premières mesures des échantillons sont prises à 12 h (10%) et 24h (5 et 10%). L'expansion évolue avec le dosage en agent expansif. Ainsi, plus le dosage est élevé, plus l'expansion est importante. L'expansion mesurée à la fin du mûrissement humide (3 et 7 jours) est généralement de 3 à 4 fois supérieure pour le dosage de 10% par rapport au dosage de 5%. L'influence du dosage en agent expansif est donc très marquée. [Blais, 2010]

Les dosages typiques recommandés pour l'agent d'expansion de type G sont entre 3 à 6 % par poids de ciment pour la réduction du retrait.

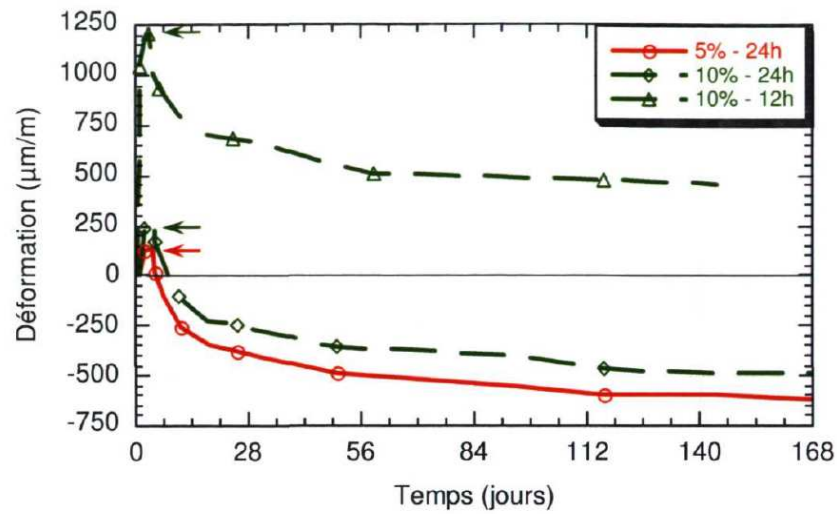


Figure 2.15 - Comportement d'un béton à retrait compensé contenant différents dosages en agent d'expansion conservé dans l'eau de chaux pendant 3 jours [Blais, 2010]

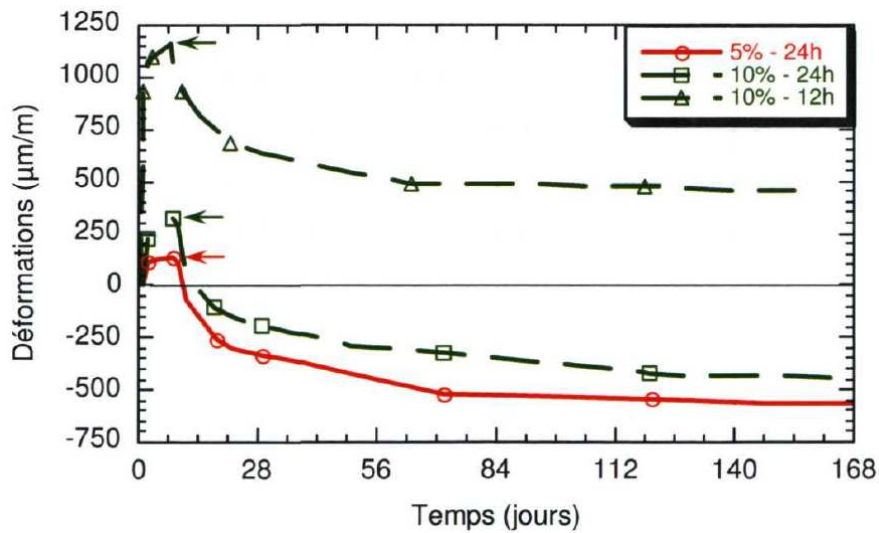


Figure 2.16 - Comportement d'un béton à retrait compensé contenant différents dosages en agent d'expansion conservé dans l'eau de chaux pendant 7 jours [Blais, 2010]

2.1.4.4 Méthode de mesure de l'expansion restreinte au jeune âge (ASTM C878)

Cette méthode d'essai permet de mesurer l'expansion restreinte (Figure 2.17) du béton contenant un agent d'expansion interne. Elle peut également être adaptée pour étudier les effets sur l'expansion de la teneur en ciment et des proportions de mélange qui diffèrent

de la procédure normalisée prescrite par la présente méthode d'essai. L'éprouvette est un prisme de section carré de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur de jauge de 250 mm (B) [10 po] et une longueur totale (A) (y compris la longueur des écrous de tige et le bouchon) d'environ 290 mm [11,5 po]. La préparation des éprouvettes consiste à assembler la cage de restriction qui est ensuite placée dans le moule. L'assemblage consiste à insérer une tige en acier (ordinaire ou galvanisé) reliant des plaques en acier, soutenues par des écrous hexagonaux, comme indiqué sur la figure 2.17. Les écrous hexagonaux en acier inoxydable doivent être fermement installés sur chaque extrémité pour retenir la tige à l'aide d'un adhésif approprié pour empêcher le desserrement lors de la prise des mesures au comparateur.

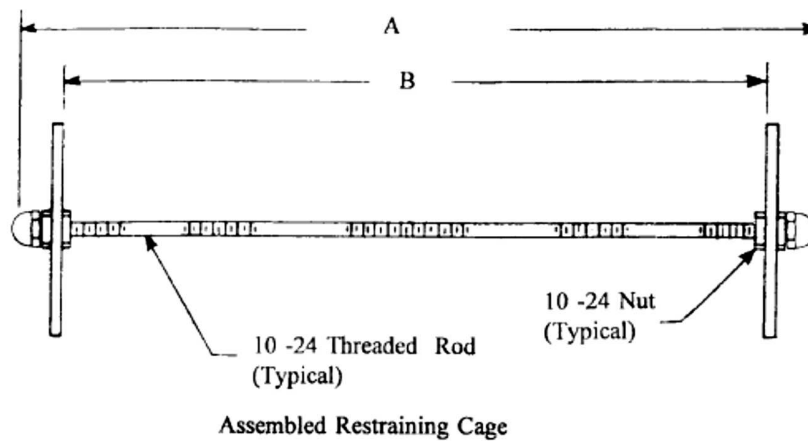


Figure 2.17 - Assemblage de la cage de restriction [ASTM C878]

Les échantillons confectionnés sont placés dans l'eau saturée de chaux pendant 7 jours pour favoriser l'expansion du béton. Des mesures prises au comparateur (Figure 2.18) à un temps initial (après démoulage) et ensuite à différents âges permettront de calculer la variation de longueur des spécimens.



Figure 2.18 - Mesure des échantillons au comparateur

L'expansion typique mesurée selon la méthode ASTM C 878 est présentée sur la figure 2.19. Les éprouvettes sont démoulées entre 6 à 8 heures après le contact eau - ciment. Les échantillons sont maintenus dans une eau saturée de chaux pendant 7 jours. On note que l'expansion se produit en moins de 2 jours dans le béton fabriqué avec la chaux (CaO) et 7 jours dans le béton avec le sulfo-aluminate de calcium (CSA). Les courbes en pointillés présentent la variation de longueur mesurée suite à une conservation dans l'air (HR = 65%) après 2 jours de mûrissement [Collepari, 2008].

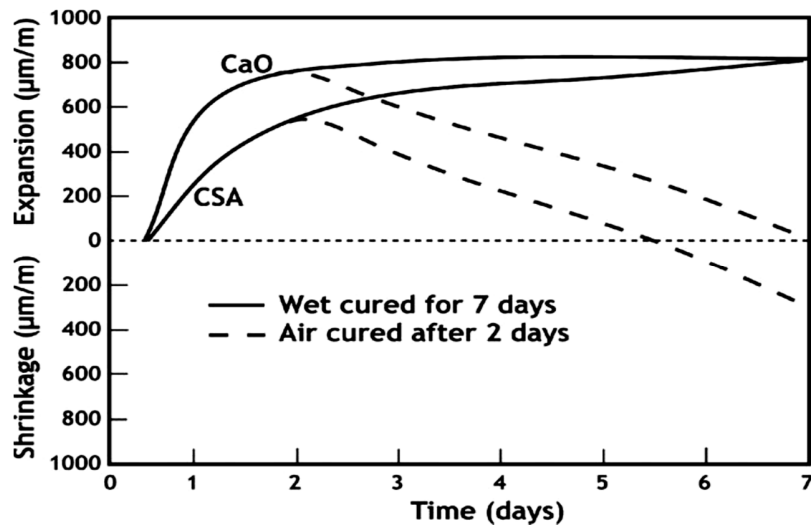


Figure 2.19 - Expansion restreinte mesurée sur des éprouvettes de béton suivant la procédure ASTM C 878 avec du CaO et du CSA [Collepari, 2008]

2.1.4.5 Méthode de mesure de l'expansion libre au jeune âge (Capteur de déformation à corde vibrante)

Cette méthode d'essai permet la mesure des changements de longueur d'éprouvettes de bétons exposés à des conditions contrôlées de température et d'humidité. Elle est utilisée pour mesurer le potentiel d'expansion libre ou la contraction libre du béton. Le suivi des variations volumétriques du béton est obtenu à l'aide d'une jauge de déformation à corde vibrante noyée dans le béton (Figure 2.20). La lecture des mesures de la corde vibrante s'effectue à l'aide d'une centrale d'acquisition de données. La corde vibrante est installée avant la mise en place du béton frais dans des éprouvettes prismatiques de section carré de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur de 300 mm [11,8 po]. Les mesures sont automatiquement enregistrées par l'appareil à un rythme d'une lecture à toutes les heures.

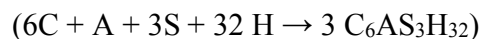
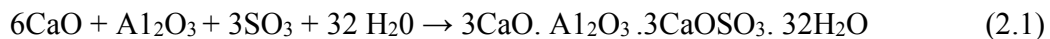


Figure 2.20 - Mise en place d'une jauge de déformation à corde vibrante

2.2 Le ciment expansif de type K

2.2.1 Composition, réaction chimique d'expansion

Le ciment expansif de type K permet de produire un béton à retrait compensé en utilisant des matériaux traditionnels tels que des agents d'expansion déjà mélangés au ciment portland. Le ciment expansif de type K est composé de sulfate de trialuminate tétracalcique anhydre C_4A_3S (où $C = CaO$, $A = Al_2O_3$, $S = SO_3$) et de ciment portland. Son expansion est provoquée par la formation d'étringite selon la réaction suivante:



La réaction d'expansion du ciment de type K nécessite un important apport d'eau pendant les premiers jours de mûrissement.

2.2.2 Courbes typiques d'expansion

La figure 2.21 montre l'expansion d'échantillons de béton contenant du ciment de type K. Les éprouvettes sont d'abord conservées à l'humidité (12h, 3 et 7 jours) puis elles ont été exposées à 50 % d'humidité relative et à une température de 23°C. Aucune expansion n'est observée pour un mûrissement humide de 12h. L'expansion initiale ne se produit que si la durée de mûrissement humide est d'un minimum de 3 jours. Un mûrissement

humide de 7 jours donne des expansions très similaires à celles obtenues avec un mûrissement humide de 3 jours.

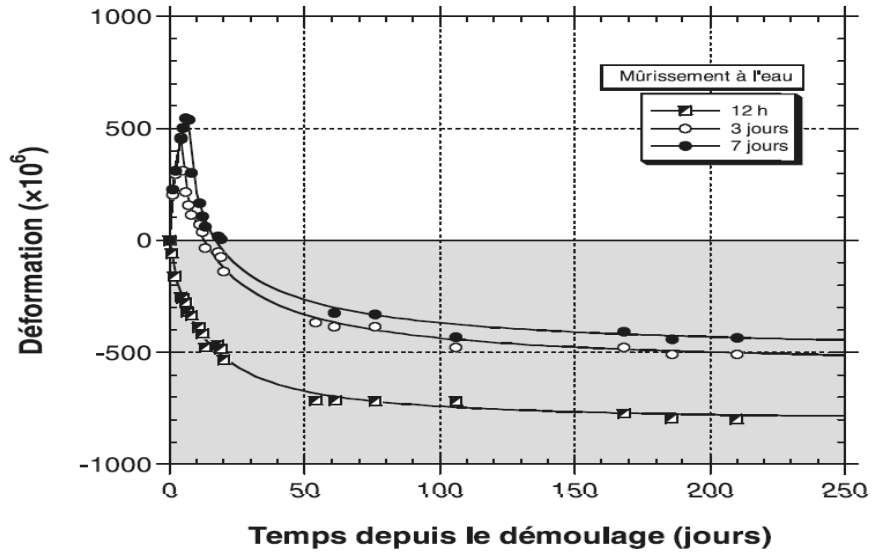


Figure 2.21 - L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K selon un mûrissement humide de 12h, 3 et 7 jours [Bissonnette et al. 2008]

2.2.3 Amplitude de l'expansion

La vitesse d'expansion varie en fonction du type de mûrissement (Figure 2.22). L'expansion des bétons conservés dans l'eau pendant 7 jours est environ 2 fois plus importante que celle mesurée sur des bétons conservés à 100% d'humidité relative.

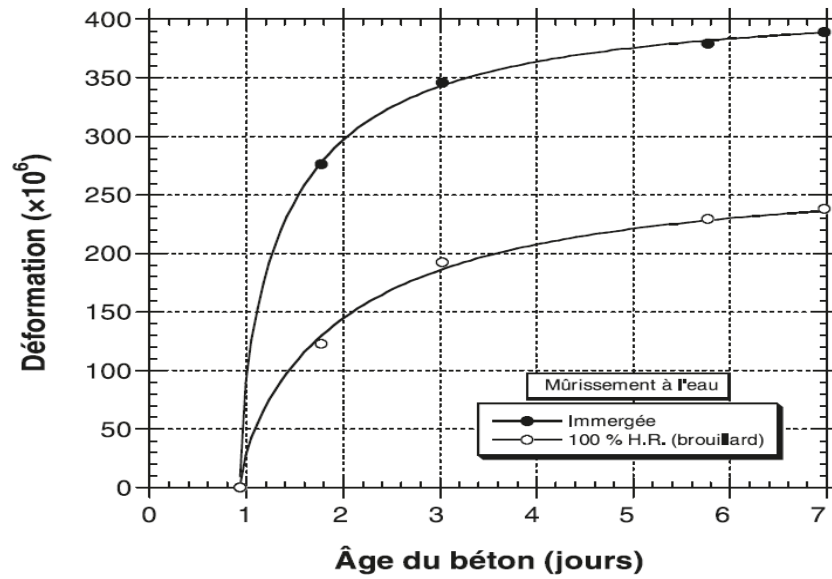


Figure 2.22 - L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K suivant différent type de mûrissement [Bissonnette et al. 2008]

2.2.4 Période de mûrissement

Le niveau d'expansion atteint varie en fonction du temps de mûrissement (Figure 2.23). Le niveau d'expansion développé par les bétons (Figure 2.23) évolue en fonction de la période de mûrissement. Pour un mûrissement prolongé de 28 jours, le niveau d'expansion atteint environ $1000 \times 10^6 \mu\text{m/m}$ (le plus élevé).

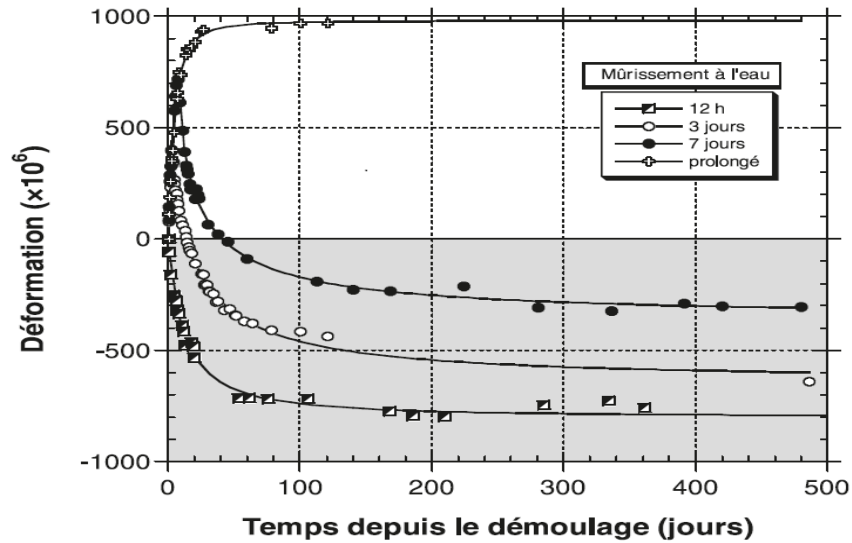
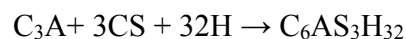


Figure 2.23 - L'expansion des échantillons de béton contenant du ciment de type K suivant différentes périodes de mûrissement [Bissonnette et al. 2008]

2.2.5 Influence du dosage

Les agents expansifs dans le ciment de type K sont dosés par le fabricant de façon à ce que l'expansion se termine d'elle-même par l'épuisement des composantes expansives. Au cours des années, les dosages ont été spécialement étudiés afin d'avoir juste ce qu'il faut pour que l'expansion compense le retrait et pour éviter qu'elle puisse se poursuivre ou reprendre dans le temps.

Selon Cohen [1993], le pourcentage de chaque composant dans le mélange du ciment expansif est calculé selon des quantités stœchiométriques du sulfate de calcium (CS) nécessaires pour réagir avec l'aluminate. L'équation stœchiométrique pour la formation d'étringite est établie à partir des aluminates fournis par le kaolin (silicate d'aluminium, AS_2) et également en prenant en considération les aluminates fournis par le ciment Portland ordinaire (C_3A). La réaction est approximativement la suivante :



L'équation (2.3.) ci-dessous est basée sur les réactions ci-dessus (2.2) et est utilisée dans le dosage de ciments expansifs :

$$R = \frac{Ax + By}{136 \left[\frac{3Cz}{222} + \frac{3Dx}{270.2} \right]} \quad (2.3)$$

Avec R : ampleur de la réaction de l'étringite = $\frac{CS \text{ fourni}}{CS \text{ requis}}$

Ou le pourcentage de la réactivité de l'agent d'expansion est contrôlé au moyen des sulfates;

A = CS contenu en masse de ciment Portland ordinaire

B = CS contenu en masse de gypse

C = AS₂ contenu en masse de kaolin

D = teneur en C₃A en masse de ciment Portland

x = teneur en ciment Portland (en masse de mélange de ciment expansif)

y = teneur en gypse (en masse de mélange de ciment expansif)

z = teneur en kaolin (en masse de mélange de ciment expansif)

Selon divers dosages du ciment expansif, l'expansion évolue suivant la valeur R (ampleur de la réaction de l'étringite) tel qu'illustré à la figure 2.24

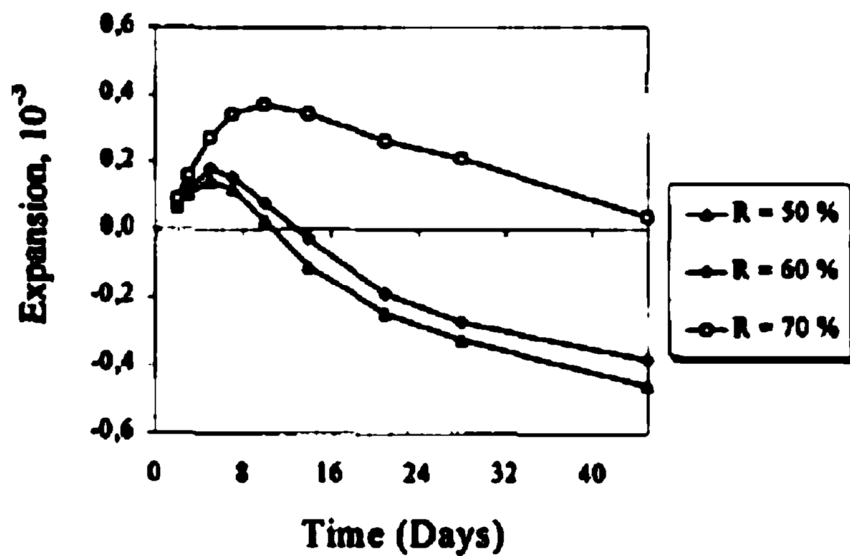


Figure 2.24 - Expansion de mortier contenant du ciment expansif [Ribeiro, 1995]

2.3 L'agent d'expansion interne de type G

2.3.1 Composition, réaction chimique d'expansion

L'agent d'expansion de type G est une composante expansive à base de CaO, qui produit un système cristallin de plaquettes d'hydroxyde de calcium, comme spécifié dans la norme ACI 223 [Euclid Chemical Company, 1998]. Le CaO réagit avec l'eau pour former la portlandite responsable de l'expansion. La réaction chimique d'expansion se produit selon l'équation suivante :



L'hydratation de la chaux est causée par la cristallisation des cristaux de Ca(OH)_2 formés. La concentration en ions OH^- dans des solutions de pores capillaires déclenche l'expansion et les cristaux produits engendrent une pression de cristallisation. Le développement de l'expansion peut engendrer une précontrainte interne lorsque l'expansion se produit dans une pâte de ciment confinée (expansion restreinte) [Deng et al, 1995].

Chatterji [1966], Johansen et al, [1993] ont aussi suggéré qu'en milieu confiné, une force expansive était engendrée suite à la croissance des cristaux de Ca(OH)_2 . La chaux hydratée forme des microcristaux colloïdaux de Ca(OH)_2 qui croissent ensuite en cristaux plus gros. Au cours de ce processus de croissance, une expansion se développe dans la pâte de ciment, ce qui provoque l'expansion.

Il existe deux principales hypothèses quant à l'origine de la force motrice d'expansion: la pression de cristallisation et la pression de gonflement.

- La pression de gonflement est provoquée par la répulsion des particules inter absorbées entre les molécules d'eau. Elle dépend de la capacité des particules à absorber l'eau. Une forte absorption d'eau peut fournir une pression de gonflement élevée.
- La force expansive est la pression de cristallisation qui est suscitée par la croissance limitée des cristaux de Ca(OH)_2 . Le développement de la pression de cristallisation relève de la sursaturation de la solution des pores de Ca(OH)_2 et de la contrainte. Une sursaturation élevée et une grande contrainte stimuleront une pression de cristallisation élevée. Toutefois, une grande expansion peut correspondre à une grande pression de cristallisation ou à une petite contrainte [Deng et al, 1995].

La figure 2.25 présente l'expansion causée par l'hydratation de 2% de chaux libre incorporée dans une pâte de ciment Portland (OPC), une pâte de ciment Portland blanc (WC), dans une pâte avec 30% de laitier de haut fourneau (OPC-BFS) et avec 30% de cendre volante (OPC-PFA). Toutes ces pâtes ont été conservées à la température ambiante et 100% d'humidité relative.

Les courbes montrent que l'expansion est plus importante dans la pâte de ciment Portland (OPC) que dans la pâte de ciment Portland blanc (WC). Le remplacement de 30% du ciment Portland par le laitier de haut fourneau ou par la cendre volante peut réduire l'expansibilité de la chaux. À cet égard, la cendre volante (PFA) diminue moins l'expansion que le laitier de haut fourneau (BFS).

Globalement, les ajouts cimentaires tels que les laitiers de haut fourneau et la cendre volante n'empêchent pas complètement l'expansion interne mais ils peuvent la diminuer significativement [Deng et al, 1995].

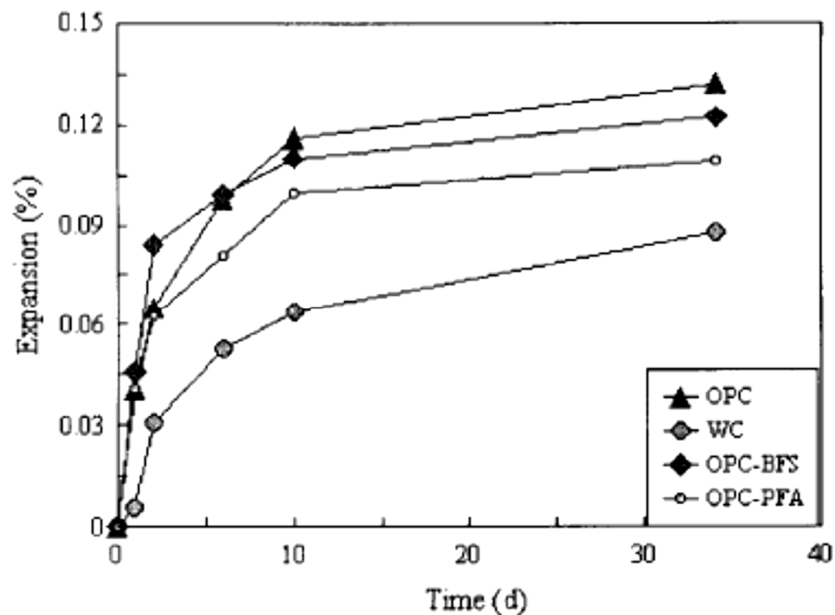


Figure 2.25 - L'expansion causée par l'hydratation de la chaux (2%) dans les pâtes de ciment [Deng et al, 1995]

2.3.2 Courbes d'expansion typiques pour différents types de béton

La figure 2.26 présente l'influence d'un agent d'expansion de type G sur l'expansion et le retrait d'un béton ordinaire sans air entrainé de 25 MPa fabriqué en usine et prélevé dans

un camion malaxeur. Les déformations isothermes ont été mesurées à l'aide de capteurs à corde vibrante. Pour mieux évaluer l'influence de l'agent d'expansion, des échantillons ont été prélevés au début, au milieu et à la fin du déchargement du camion. D'autres échantillons ont été prélevés d'un autre béton sans agent d'expansion à titre de béton de référence (Figure 2.26).

Les éprouvettes de béton contenant 6% d'agent d'expansion présentent toutes un comportement très similaire, ce qui confirme que l'expansion du béton n'est pas fonction du temps de prélèvement des échantillons et que la technique de mesure (capteur à corde vibrante) est précise. À 7 jours, le béton sans agent d'expansion présente une faible expansion de moins de 100 $\mu\text{m/m}$. Au même âge, les bétons avec 6% d'agent d'expansion montrent une expansion d'environ 250 $\mu\text{m/m}$. L'expansion initiale créée par l'agent d'expansion a contribué à diminuer significativement le retrait total à 48 jours.

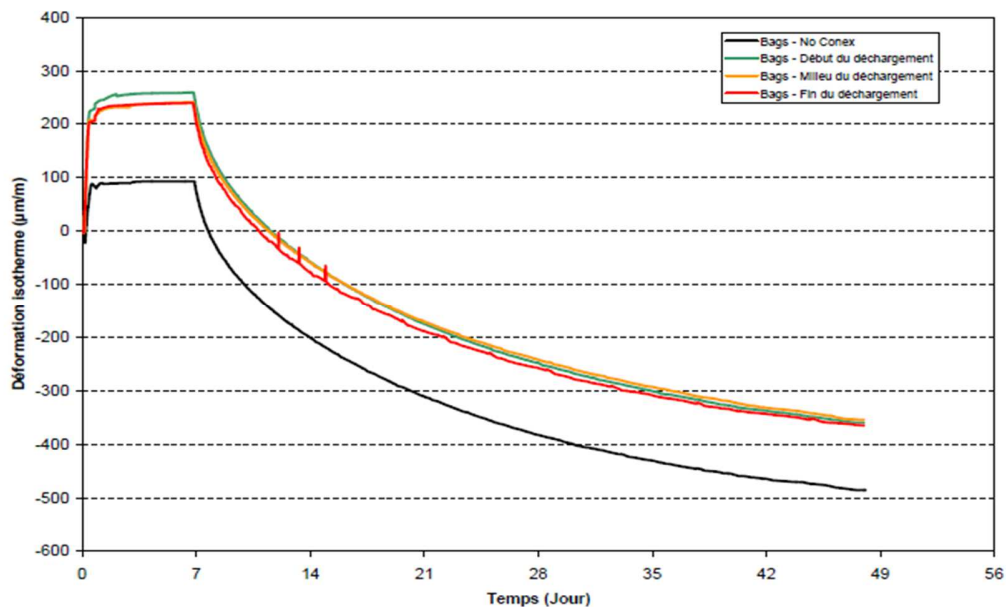


Figure 2.26 - Influence du *Conex* sur l'expansion et le retrait des bétons ordinaires sans air entrainé [Gagné, 2011]

L'influence de l'agent sur l'expansion et les retraits d'un béton à haute performance a été étudiée à partir d'un béton avec fumée de silice fabriqué avec un rapport E/L de 0,30 et avec un ciment portland à haute résistance initiale [Gagné, 2011].

Trois dosages en agent d'expansion ont été utilisés : 0%, 3% et 6%. La figure 2.27 présente les déformations isothermes obtenues.

À l'âge de 7 jours, le béton de référence a subi un retrait endogène qui atteint $-80 \mu\text{m/m}$ (Figure 2.27). La phase de séchage qui débute ensuite produit un retrait de séchage de $287 \mu\text{m/m}$ à l'âge de 224 jours. La déformation totale à 224 jours atteint $-367 \mu\text{m/m}$.

À l'âge de 7 jours, le béton avec 3% d'agent d'expansion (Figure 2.27) montre une expansion qui atteint environ $50 \mu\text{m/m}$. L'utilisation de 3% d'agent d'expansion permet donc d'annuler complètement le retrait endogène. La phase de séchage engendre un retrait de séchage d'environ $283 \mu\text{m/m}$ à 224 jours. La déformation totale est alors de $-241 \mu\text{m/m}$. Ce qui est significativement plus faible que celle du béton de référence ($367 \mu\text{m/m}$).

À l'âge de 7 jours, le béton avec 6% d'agent d'expansion (Figure 2.27) montre une expansion qui atteint environ $250 \mu\text{m/m}$. Le retrait de séchage qui s'amorce ensuite produit une contraction de $280 \mu\text{m/m}$ et la déformation totale à 224 jours n'est que $-30 \mu\text{m/m}$.

Globalement, les résultats montrent qu'un dosage en agent d'expansion d'environ 3% permet d'annuler la totalité du retrait endogène à 7 jours d'un BHP avec fumée de silice. Un dosage en agent d'expansion plus élevé (6%) engendre une expansion nette à 7 jours. Cette expansion initiale contribue à diminuer très fortement le retrait total à 224 jours.

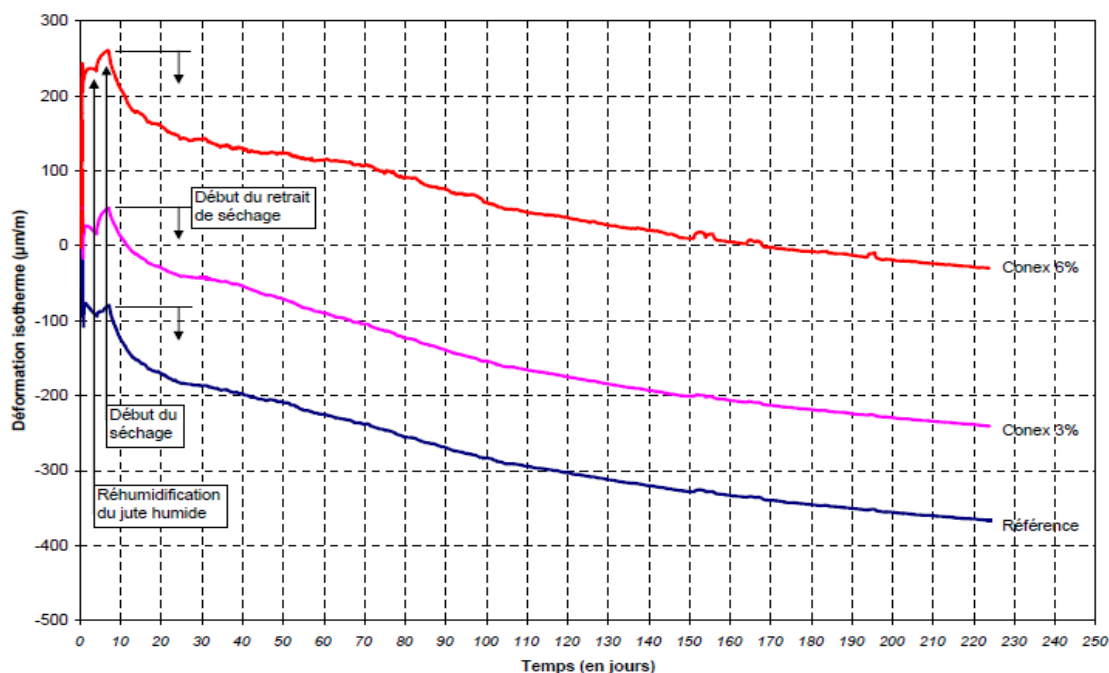


Figure 2.27 - Évolution de la déformation des bétons en fonction du temps [Gagné, 2011]

La figure 2.28 présente les courbes d'expansion d'un béton compacté au rouleau (BCR) contenant 0%, 6% et 8% d'agent d'expansion de type G. Les BCR sont fabriqués avec $E/L = 0,32$. Après 7 jours de mûrissement scellé, les BCR sans agent d'expansion présentent une expansion faible d'environ $25 \mu\text{m/m}$. Avec 6% d'agent d'expansion on note une expansion d'environ $120 \mu\text{m/m}$ et environ $230 \mu\text{m/m}$ pour 8%. Il est observé ici que le taux d'expansion dépend du dosage en agent d'expansion et du temps de mûrissement. L'expansion est nettement plus rapide pendant le premier jour de conservation dans le moule.

Les courbes de la figure 2.28 montrent que l'expansion initiale permet de diminuer très significativement le retrait total après 90 jours. Par exemple le BCR de référence montre un retrait total à 90 jours de -100 à $-150 \mu\text{m/m}$. Après 90 jours le BCR avec 8% d'agent d'expansion possède plutôt une expansion finale d'environ $75 \mu\text{m/m}$.

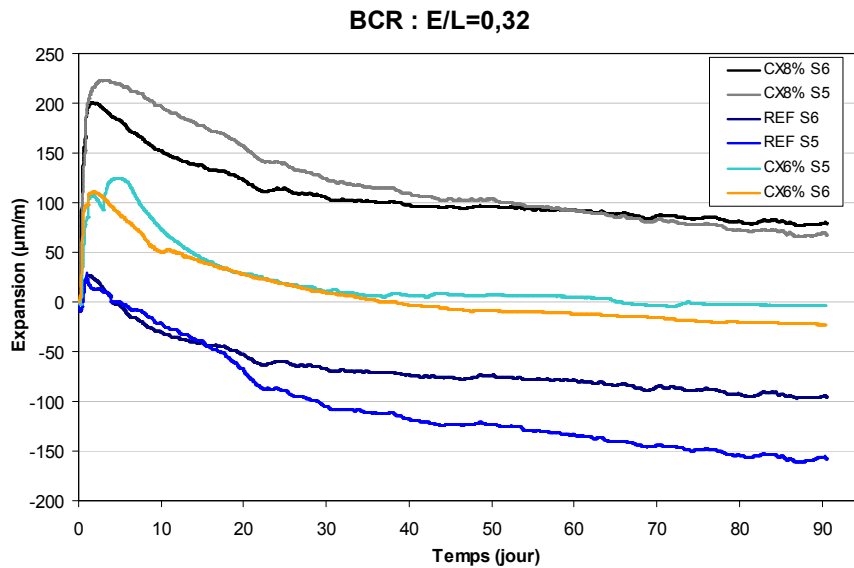


Figure 2.28 - Courbe d'expansion d'un agent d'expansion dans un béton compacté au rouleau en fonction du temps [Lessard et Gagné, 2009]

La figure 2.29 présente l'évolution des déformations de trois bétons avec et sans agent d'expansion sans air entrainé de 25 MPa. Les deux bétons avec agent d'expansion (3% et 6%) contiennent aussi 2% d'adjuvant réducteur de retrait. Un troisième béton de référence ne contient ni agent d'expansion ni adjuvant réducteur de retrait.

Durant la cure humide de 14 jours, le béton sans agent d'expansion subit une faible expansion d'environ 100 µm/m. Cette expansion caractéristique du mûrissement humide, est due à une faible absorption d'eau. Le retrait commence dès le début du séchage et la déformation atteint -383 µm/m à 28 jours pour se stabiliser à environ -564 µm/m à 91 jours.

Dans le cas du béton avec 3% d'agent d'expansion, on observe une faible expansion d'environ 120 µm/m durant le mûrissement humide de 14 jours. L'ajout de 3% d'agent d'expansion produit une expansion relativement faible. Le retrait commence dès le début du séchage et la déformation atteint -189 µm/m à 28 jours, environ -439 µm/m à 91 jours et environ -538 µm/m à 6 mois.

Le dernier béton avec 6% d'agent d'expansion subit une expansion initiale d'environ 200 µm/m. L'ajout de 6% d'agent d'expansion produit une expansion initiale plus importante.

Le retrait commence dès le début du séchage et la déformation atteint $-78 \mu\text{m/m}$ à 28 jours, environ $-290 \mu\text{m/m}$ à 91 jours et environ $-370 \mu\text{m/m}$ à 6 mois.

Globalement, ces résultats montrent que l'utilisation combinée d'agent d'expansion et d'un agent réducteur de retrait produit une expansion au jeune âge dont l'intensité dépend du dosage de l'agent expansif.

La comparaison des courbes de retrait au séchage montre que le retrait de séchage des bétons avec adjuvant réducteur de retrait est plus faible et plus lent que celui du béton de référence. Après 6 mois environ, la déformation totale du béton avec 6% d'agent d'expansion et 2% d'adjuvant réducteur de retrait est approximativement 30% plus faible que celle du béton de référence.

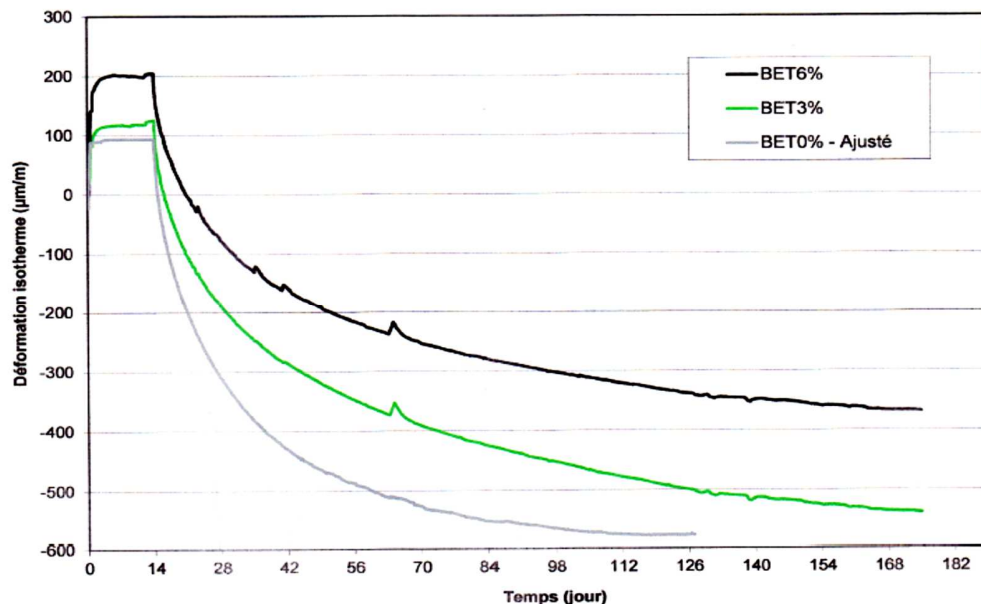


Figure 2.29 - Déformation isotherme des bétons avec différents pourcentages en agent d'expansion [Gagné, 2014]

2.3.3 Influence de l'agent d'expansion sur les autres propriétés du béton

❖ Béton frais :

L'utilisation d'un agent d'expansion de type G n'affecte pas significativement les propriétés du béton frais [Lessard et Gagné, 2009]. Plusieurs projets de construction ont

montré que la teneur en air, l'affaissement et le temps de prise ne sont pas modifiés par l'utilisation d'un agent d'expansion de type G [Lessard et Gagné, 2009].

❖ Béton durci :

L'utilisation d'un agent d'expansion de type G a relativement peu d'effet sur les propriétés mécaniques des bétons. Lessard et Gagné [2009] mentionnent que l'utilisation de ce type d'agent d'expansion en ajout au liant ne diminue pas la résistance à la compression. Dans le cas des BHP, ils ont même obtenu une augmentation de 9% de la résistance à la compression. [Lessard et Gagné, 2009]

De plus, les bétons avec agent d'expansion de type G possèdent une bonne résistance aux cycles de gel/dégel et à l'écaillage en autant qu'un réseau d'air adéquat présent est dans le béton [Euclid Chemical Company, 1998; Gagné et coll, 2009].

2.4 Les agents réducteurs de retrait

2.4.1 Principaux types

L'utilisation des agents réducteurs de retrait (ARR), débutée dans les années 80-90, est toujours en progression et en développement de nos jours. Différents types d'agents réducteurs de retrait sont aujourd'hui sur le marché comme EclipseTM, TetraguardTM et PerstopTM. Ce sont des produits utilisés comme adjuvant liquide ou en poudre dans le béton frais [Apaya, 2011].

D'autres types comme le lignosulfonate de sodium (SLS), le sodium naphthalène sulfoné formaldéhyde (SNF) et le sodium mélamine-formaldéhyde sulfoné (SMF) sont aussi utilisés dans le béton [Fu et al, 1995]. La différence entre ces 3 types d'agents réducteurs se base sur leur action sur l'expansion créée par les agents d'expansion. Yan FU et al, [1995] ont montré que le SLS et le SMF réduisent de manière significative le développement de l'expansion tandis que le SNF provoque une augmentation de l'expansion des échantillons de ciment expansif compactés. Pour les échantillons de ciment expansif, le SLS présente une expansion élevée tandis que le SNF et SMF présentent des expansions beaucoup plus faibles.

2.4.2 Nature et composition chimique

Les nouvelles classes d'adjuvants chimiques développées permettent de contrôler le retrait visant à réduire le risque de fissuration précoce dans des structures en béton ou matériaux à base de ciment. Ces adjuvants, communément appelés agent réducteur de retrait ou ARR, appartiennent généralement à une classe de matières organiques chimiques tensioactifs. Les agents réducteurs de retraits (ARR) sont de plus en plus préconisés comme une méthodologie de réduction du retrait. Différentes études ont montré une réduction du retrait de séchage [Shoya et coll., 1989; Nmai et coll., 1998] et d'autres ont plutôt évalué l'influence sur l'évaporation, le retrait plastique et l'autodessiccation au jeune âge [Bentz et coll., 2001; Sant et coll., 2007].

Les agents réducteurs de retrait sont des composés non ioniques hydrophile (polaire) ou tête hydrophile et hydrophobe (non polaire) ou queue hydrophobique (Figure 2.30) [Evans et coll., 1999]. Leur composition chimique est décrite par la formule chimique suivante :



AO : oxyde d'alkylene comportant 2 à 4 atomes de carbone

R₁, R₂ : choix entre les groupes hydrogène, alkyle, hydroxyle, phényle, cycloalkyle

n : nombre entier indiquant le degré de la polymérisation [US 4547223, 1985; Tomita, 1992]

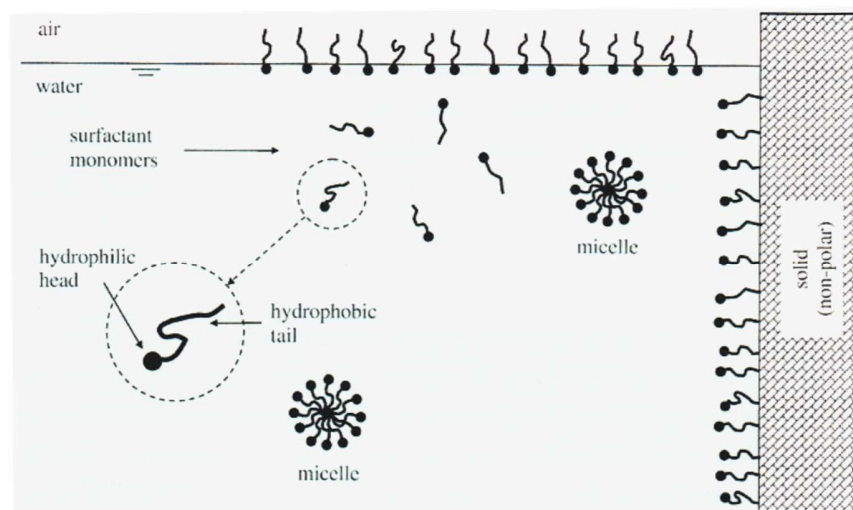


Figure 2.30 - Interactions des molécules de surfactants avec un solvant polaire [Rajabipour et coll. 2007]

2.4.3 Mode d'action d'un ARR

L'utilisation d'un agent réducteur de retrait (ARR) permet de réduire la tension de surface de la solution interstitielle, ce qui diminue la dépression dans les pores capillaires. L'ARR réduit le gradient des déformations endogènes pendant la période de cure et le gradient majoritairement dû au retrait de séchage après la cure [Seigneur, 2000].

La capacité des ARR à réduire la tension superficielle est liée à leurs propriétés moléculaires. Une fois dissout dans l'eau (la solution interstitielle), les molécules de l'ARR se regroupent sur les interfaces non-polaires, tels que les interfaces air/eau ou air/huile (Figure 2.31). Leur adsorption au niveau d'interfaces provoque une diminution de l'énergie interfaciale. En tant que telle, l'addition de l'ARR conduit à une réduction de la tension superficielle de l'interface eau-air. Il existe naturellement une limite de saturation pour le nombre de molécules tensioactives qui peuvent être adsorbées sur une interface. [Apaya, 2011].

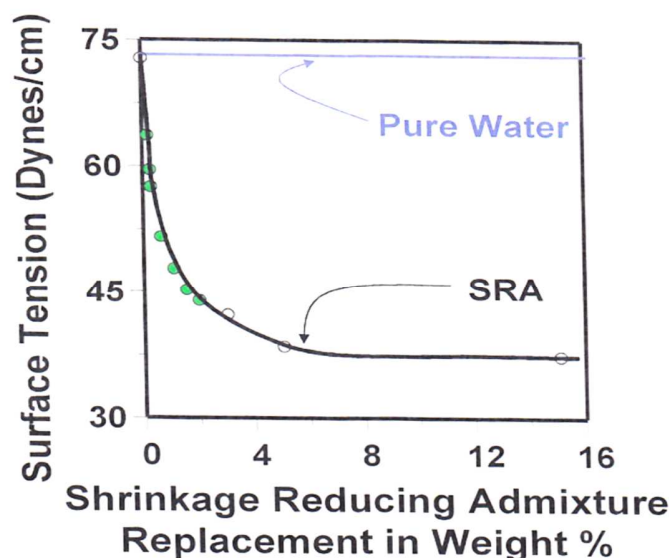


Figure 2.31 - Effet de la concentration de l'ARR sur la tension de surface d'une solution aqueuse [Ai et Young, 1997]

Certaines études ont montré une diminution du retrait libre du béton de l'ordre de 30% à 50 % [Shah et coll. 1992]. Nmai et al, [1998] montrent des réductions de retraits aussi élevées que 50% à 60% à 28 jours et 40% à 50% après 12 semaines pour les mélanges avec ARR. Gettu et al, [2002] ont observé que le retrait à long terme était réduit de 50% - 60% en présence de l'ARR. Weiss et coll., [1999] ont signalé que l'ARR semble réduire

une plus grande proportion de souche autogène (qui tient compte à la fois du retrait endogène et l'expansion mesurés à partir d'échantillons de pâte, de mortier ou de béton dans des conditions fermées à température constante) à un âge précoce. Bentz et al. [2001] ont suggéré que cette diminution de retrait à jeune âge de l'ARR peut être due à la limite de réduction de l'humidité relative interne des mélanges en situation d'autodessiccation.

La tension de surface du liquide interstitiel affecte la perte d'humidité, la tension capillaire et la pression de disjonction [Young, 1986]. Pour obtenir une compréhension plus fondamentale de la façon dont l'ARR réduit le retrait, plusieurs chercheurs ont utilisé la relation de Young- Laplace :

$$\sigma_{cap} = \frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r} \quad (2.6)$$

(σ_{cap} , MPa [psi]) : la contrainte capillaire qui se développe dans le système

(γ : N / m [lbf / ft]) : tension superficielle du fluide de pore,

(θ) : l'angle de contact entre le fluide dans les pores et solides

(r , m [po]) : le rayon des ménisques liquide-vapeur

L'agent réducteur de retrait réduit la dépression capillaire et le retrait de séchage en raison de la tension de surface inférieure de la solution interstitielle dans la porosité capillaire. La figure 2.32, présente la réduction de la tension superficielle de l'eau d'une solution de pore synthétique suite à l'ajout d'un maximum de 15% d'ARR.

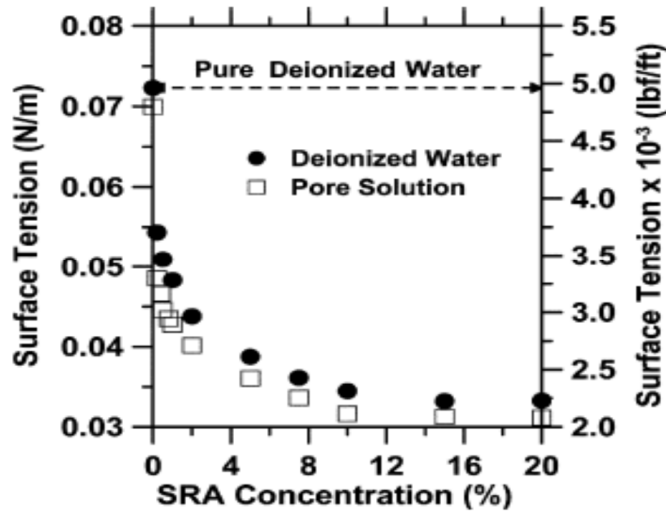


Figure 2.32 - La tension de surface en fonction de la concentration ARR en solution dans l'eau ou solution de pores synthétiques (0,35 KOH + 0,05 NaOH.) [Weiss et al, 2008]

La pression capillaire peut être reliée à l'humidité relative (pression partielle de vapeur dans les pores) qui se développe dans la microstructure en utilisant les équations de Kelvin [Lura et al; 2003]. Il a également été supposé que la structure des pores est similaire avec ou sans ARR et que r , le rayon de Kelvin, correspond au plus grand pore qui reste rempli d'une solution de pore. En vertu de ces hypothèses, la réduction de la rétraction de l'échantillon scellé contenant l'ARR semble se produire parce que les systèmes ARR auraient une humidité relative interne légèrement supérieure [Shah et al; 1992].

Elle peut être déduite directement de l'équation de Kelvin :

$$RH = \exp\left(\frac{\sigma_{cap} V_w}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{2\gamma \cos\theta V_w}{rRT}\right) \quad (2.7)$$

V_w : le volume molaire du fluide de pore (supposé égal au volume molaire de l'eau, $18,02 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$)

R : la constante des gaz parfaits [$8,314 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$]

T : la température absolue (Kelvin)

L'équation (2.7) fournit une relation entre l'humidité relative intérieure et à la fois, la pression capillaire (σ_{cap}) et la tension de surface (γ).

La diminution de l'humidité relative dans un échantillon scellé résulte en partie de la consommation d'eau par l'hydratation, qui vide progressivement des petits pores dans la pâte de ciment. La dissolution des ions dans la solution interstitielle contribue aussi à la diminution de l'humidité relative [Weiss et al, 2008].

Pour un niveau donné d'humidité relative, le rayon de Kelvin diminue ainsi que la tension superficielle pour les mélanges avec 5% ARR (Figure 2.33). Ceci s'explique par la perte d'eau des petits pores du mélange.

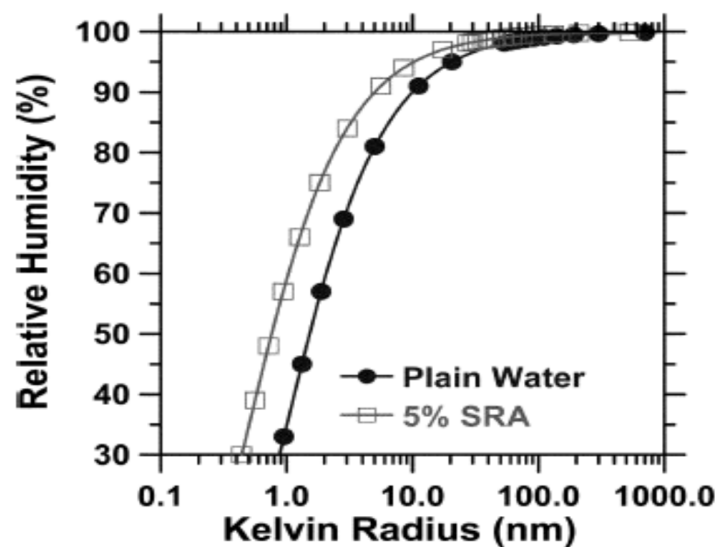


Figure 2.33 - Contributions HR de la loi de Raoult (l'effet concentrations ioniques) et la loi de Kelvin (consommation d'eau) [Weiss et al, 2008].

2.4.4 Influence sur le retrait de séchage

Plusieurs études ont souligné que l'ARR, étant essentiellement un agent tensioactif non-ionique, pouvait réduire la tension de surface de la solution interstitielle [Cerulli et al, 2011]. La figure 2.34 montre l'influence de l'ARR sur le retrait de séchage des échantillons conservés à différentes HR. Par des humidités élevées (95% et 91%), le retrait qui se développe dans les échantillons avec 5% d'ARR est inférieur d'environ 240 $\mu\text{m/m}$, à celui des échantillons ne contenant pas d'ARR. Les échantillons avec 5% d'ARR conservés à faible HR (70%, 50%, et 30 %) montrent une diminution de retrait beaucoup plus importante (1300 $\mu\text{m/m}$ et 1800 $\mu\text{m/m}$). Ces résultats montrent clairement

que l'ARR est plus efficace pour la réduction de retrait lorsque l'humidité relative est inférieure à 70%.

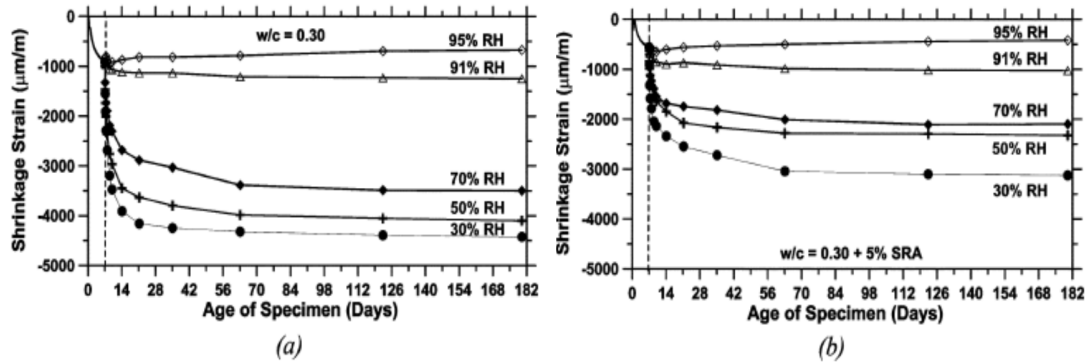


Figure 2.34 - Retrait mesuré pour des échantillons de pâte : (a) sans ARR et (b) avec ARR [Weiss et al, 2008]

D'autres études sur des mortiers avec agent réducteur de retrait présentent des retraits de séchage faibles par rapport aux mortiers sans agent réducteur de retrait (figure 2.35). Pour le meilleur produit commercial, la réduction du retrait mesurée est d'environ 40% par rapport au mortier de référence.

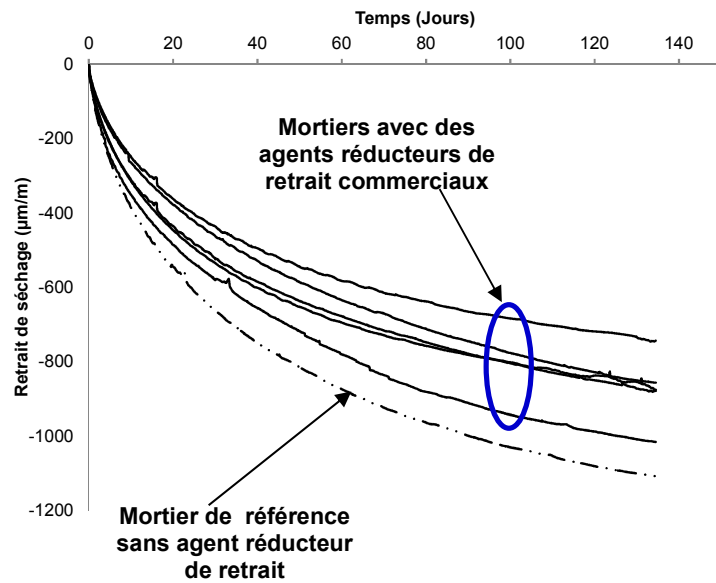


Figure 2.35 - Influence de l'agent réducteur de retrait sur le retrait de séchage [Gagné, 2013]

2.4.5 Influence du dosage

La diminution du retrait est fonction du dosage de l'agent réducteur de retrait. Elle dépend aussi du type ou de la composition du mélange. L'agent réducteur de retrait diminue le retrait endogène de l'ordre de 30% - 40%. L'effet de l'agent réducteur de retrait est déjà mesurable avec des dosages faibles de 4ml/kg de la masse de ciment [Aouad, 1998]. Les dosages typiques suggérés de 1 à 2% par les producteurs de ces adjuvants permettent d'éviter les effets secondaires indésirables (le ralentissement de l'hydratation et du développement des résistances mécaniques).

L'ajout de l'ARR engendre un changement de morphologie de certains hydrates dans la pâte de ciment (Figure 2.36). On observe de longues aiguilles prismatiques dans la microstructure. Ces longues aiguilles prismatiques bien formées pourraient être des cristaux d'étringite ou de la chaux éteinte [Maltese et al, 2005].

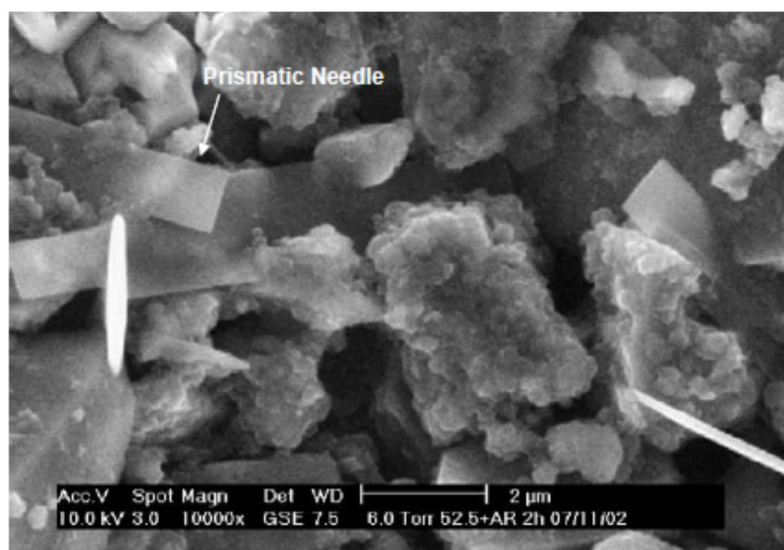


Figure 2.36 - Micrographie ESEM avec 3% ARR après 2 h de cure [Maltese et al, 2005]

2.4.6 Influence sur l'expansion

L'agent réducteur de retrait (ARR), étant une molécule organique hydrophobe, il réduit la permittivité de l'eau, et donc diminue la capacité de l'eau pour dissoudre les sels [Huheey, 1983]. Par conséquent, il peut réduire la solubilité de l'hydroxyde de calcium

dans l'eau, qui est déjà basse, favorisant ainsi un mécanisme d'expansion interne. La figure 2.37 montre la formation de longues aiguilles prismatiques bien formées qui pourraient être des cristaux d'étringite ou de la chaux hydratée en raison du fait qu'une telle formation cristalline a été plus prononcée avec l'utilisation d'agent d'expansion (ce qui est une autre source de chaux hydratée) [Maltese et al, 2005].

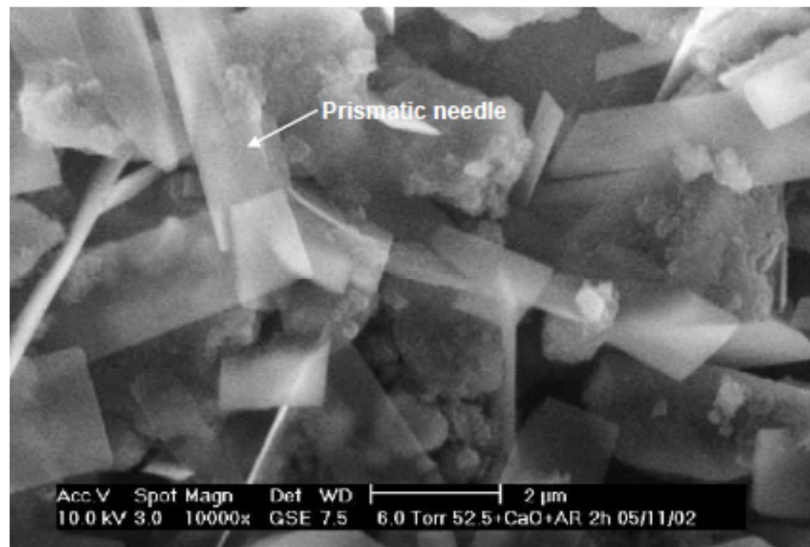


Figure 2.37 - Micrographie ESEM avec 3 % d'agent d'expansion et 3 % ARR après 2 h de cure [Maltese et al, 2005]

2.5 Exemples pratiques

L'efficacité des agents d'expansion interne, des ciments expansifs et des agents réducteurs de retrait a été testée dans des projets de recherche et sur des dalles d'essais réalisés dans des ouvrages réels. Différents projets sont présentés dans les paragraphes qui suivent afin de montrer l'importance de leur utilisation et l'impact positif sur la diminution du retrait et par conséquent sur l'élimination des fissures.

2.5.1 Réparation d'un tablier du Pont de Cosmos par un resurfaçage adhérent [Gagné et Morin, 2005]

La planche d'essais du pont de Cosmos (automne 2002; figure 2.38) a été réalisée dans le but de valider certaines conclusions et recommandations dégagées lors d'une étude en

laboratoire sur la performance des resurfaçages adhérents utilisés pour réparer les dalles structurales en béton armé. Une partie du tablier du pont de Cosmos a été réparée avec six types de bétons de resurfaçage renforcés de fibres : un BHP, deux bétons ordinaires, deux bétons à retrait compensé, un béton avec un agent réducteur de retrait. Tous les resurfaçages (9,2 m x 2,5 m) ont une épaisseur de 80 mm. Tous les bétons ont fait l'objet d'une caractérisation complète (propriétés mécaniques, durabilité au gel et à l'écaillage, retrait).



Figure 2.38 - Le Pont du Cosmos

- Travaux de resurfaçage

La structure est constituée d'un tablier continu reposant sur deux culées et six piles. Le tablier a une longueur de 205 m et une largeur de 9,2 m. La structure est constituée d'une poutre caisson (Figure 2.39) en acier de 1,6 m de hauteur et de 4,7 m de largeur. Cette poutre continue supporte un tablier en béton armé de 220 mm d'épaisseur. Chacun des six resurfaçages de la planche d'essai a été fabriqué avec un béton de réparation différent.

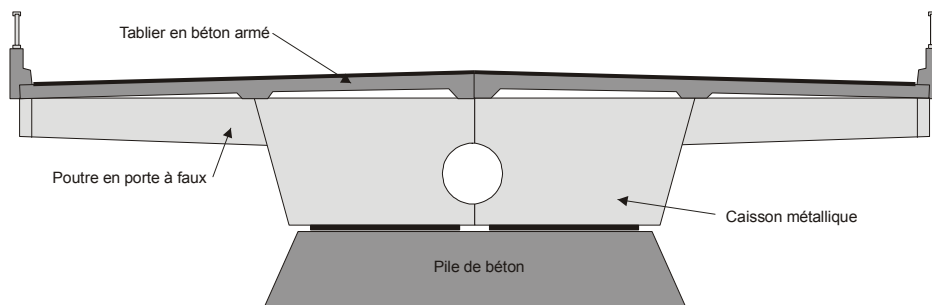


Figure 2.39 - Section typique du Pont de Cosmos

La planche d'essai est localisée dans la première travée de l'extrémité sud du pont (Figure 2.40). Elle comporte six resurfaçages minces formant des bandes de 2,5 m de largeur et de 9,2 m de longueur orientées transversalement par rapport à l'axe principal du tablier. Les 6 bandes sont disposées côte à côte. Chaque bande a une épaisseur moyenne de 80 mm. Parmi les six (6) différents resurfaçages effectués, deux bandes ont été réalisées avec du béton à retrait compensé fabriqué avec un ciment expansif de type K et un agent d'expansion de type G. L'utilisation du béton à retrait compensé s'inscrit surtout dans la réduction du retrait protégeant ainsi le béton de la fissuration. Ces travaux visent aussi à vérifier la performance en service de resurfaçage fabriqué avec différents types de bétons renforcés de fibres. Les bandes 3 et 5 ont été fabriquées avec un ciment expansif de type K et un agent d'expansion de type G dont les caractéristiques se présentent comme suit :

- La bande 3 (Figure 2.40) a été fabriquée avec un béton à retrait compensé (BRC-1) renforcé de 37,6 kg/m³ de fibres métalliques. Le béton contient 376 kg/m³ de ciment expansif de type K pour un affaissement de 160 mm, une teneur en air de 8,0% et une résistance en compression de 43,6 MPa satisfait l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours.

- La bande 5 (Figure 2.40) a été fabriquée avec un béton à retrait compensé (BRC-2) renforcé de 41,6 kg/m³ de fibres métalliques. Le béton contient 375 kg/m³ de ciment Type 10 et 23,9 kg/m³ d'agent expansif de type G. Le béton livré au chantier avait un affaissement de 140 mm et une teneur en air de 7,8 % pour une résistance en compression de 40,6 MPa satisfait l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours.

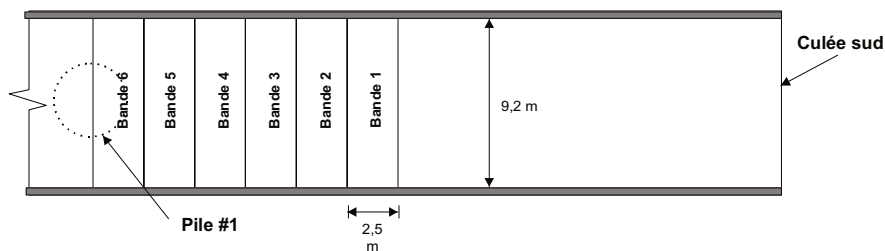


Figure 2.40 - Localisation des resurfaçages du pont du Cosmos dans la 1^{ière} travée sud (vue en plan)

Les caractéristiques des autres bandes se présentent comme suit :

- La bande 4 (Figure 2.40) a été fabriquée avec un BHP renforcé de 32,9 kg/m³ fibres métalliques. Le mélange contient 375 kg/m³ de ciment 10 SF, du superplastifiant à base de polycarboxylate présentant à l'usine une teneur en air de 9% qui a fortement augmenté pour atteindre 18 % lors du transport au chantier. Il est observé une masse volumique très faible (1890 kg/m³), un affaissement très élevé de 220 mm et une résistance en compression de 25,2 MPa très faible pour ce type béton et qui est aussi inférieure à l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours. Le béton malgré tout a été accepté et mis en place car on a jugé que cette faible performance mécanique ne compromettrait pas l'intégrité structurale de la réparation.

- La bande 1 (Figure 2.40) a été fabriquée avec un béton ordinaire renforcé de 42,1 kg/m³ de fibres métalliques (BO-1). Le béton contient 423 kg/m³ de ciment 10 SF. Le béton livré au chantier avait un affaissement de 170 mm et une teneur en air de 3,8 % inférieur à l'exigence minimale de 5%. Le BO-1 possède une résistance en compression la plus élevée (79 MPa à 28 jours) due à un rapport E/L faible (0,38) avec fumée de silice.

- La bande 6 (Figure 2. 40) a été fabriquée avec un béton ordinaire renforcé de 5,2 kg/m³ de fibres synthétiques (BO-2). Le béton livré au chantier avait un affaissement de 170 mm et un très fort volume d'air de 17% dû au transport avec une masse volumique très faible (1950 kg/m³). Le BO-2 possède une résistance en compression qui satisfait tout juste l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours.

- La bande 2 (Figure 2. 40) a été fabriquée avec un béton ordinaire renforcé de 4,0 kg/m³ de fibres synthétiques (BO-Éclipse). Le béton livré au chantier avait un affaissement de 130 mm et un très fort volume d'air de 18% dû au transport avec une masse volumique très faible (1860 kg/m³). Le BO-Eclipse possède la plus faible résistance en compression à 28 jours (15 MPa) qui a été accepté car il a été jugé qu'elle ne compromettrait pas l'intégrité structurale de la réparation.

La figure 2.41 illustre la configuration de la dalle avant et après le resurfaçage. Les travaux ont permis de remplacer l'enrobé bitumineux et les 15 premiers millimètres de béton à la surface de la dalle par 80 mm de béton de réparation (le béton y constituant désormais la surface de roulement).

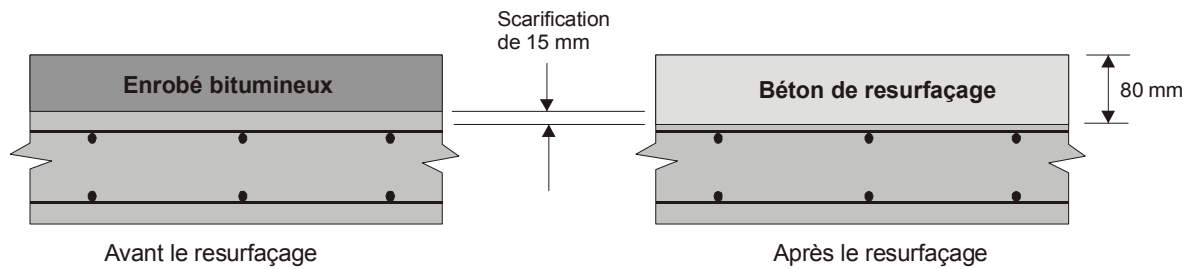


Figure 2.41 - Schéma du tablier avant et après le resurfaçage du pont du Cosmos

Après 3 ans de mise en service du pont du Cosmos, une inspection visuelle a révélé qu'aucune fissure n'a été décelée dans les resurfaçages BRC-1, BRC-2. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de bétons à retrait compensé contribue effectivement à diminuer les risques de fissuration dus au retrait empêché. Des sondages au marteau n'ont montré aucun signe de décollement des resurfaçages de la planche d'essais du pont du Cosmos. Des mesures d'adhérence (3 essais par resurfaçage) ont montré que les contraintes de cohésion moyennes de tous les resurfaçages sont comprises entre 1,1 MPa (BRC-2) et 1,7 MPa (BRC-1). En 2009 même après 7 ans de services du pont de Cosmos, aucune fissure n'a été observée dans les resurfaçages en béton à retrait compensé.

La figure 2.42 présente l'évolution de la fissuration des resurfaçages en fonction du temps. La densité de fissuration est exprimée en mètre linéaire de fissure par m² de surface. Le resurfaçage contenant l'ARR (BO-Éclipse) est relativement peu fissuré. Le resurfaçage comporte 19 fissures ayant une ouverture maximale de 0,5 mm et une ouverture moyenne de 0,3 mm. L'utilisation d'un agent réducteur de retrait, combiné à un renforcement par des fibres synthétiques semble donc contribuer à diminuer les risques de fissuration.

Le resurfaçage BO-1 est le plus fissuré. L'ouverture maximale de fissuration est de 1,25 mm et l'ouverture moyenne est de 0,4 mm. La plus forte densité de fissures est probablement due à la grande rigidité de ce type de béton qui tend à augmenter l'intensité des contraintes de traction engendrées par le retrait empêché.

Le resurfaçage BHP comporte plusieurs fissures. L'ouverture maximale de fissuration est de 1,5 mm et l'ouverture moyenne est de 0,5 mm. Ces résultats montrent que le BHP fissure moins que le béton ordinaire. Cette meilleure performance découle probablement des caractéristiques inhabituelles du BHP utilisé dans ce projet. La très forte teneur en air

fait en sorte que ce béton possède les caractéristiques mécaniques d'un béton ordinaire. C'est probablement la faible rigidité de ce béton qui a permis de limiter les contraintes dues au retrait empêché et la fissuration qui peut en découler.

Le resurfaçage BO-2 compte 33 fissures ayant une ouverture maximale de 1 mm et une ouverture moyenne de 0,5 mm. Le patron de fissuration de ce resurfaçage est presque similaire à celui du BHP. Comme dans le cas du BHP, le faible niveau de fissuration découle probablement du très fort contenu en air qui diminue la rigidité du béton et limite les risques de fissuration dus au retrait empêché.

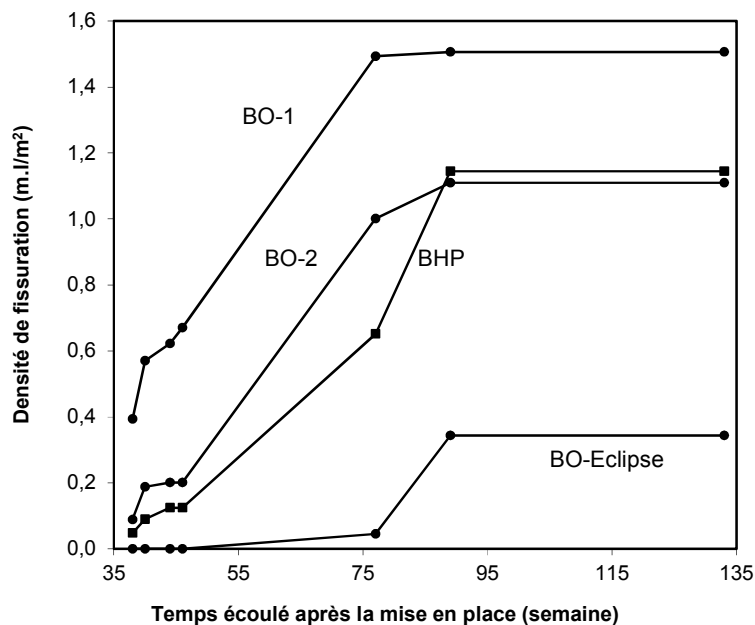


Figure 2.42 - Évolution de la fissuration des resurfaçages du pont du Cosmos

2.5.2 Cas du resurfaçage adhérent du tablier du Passage inférieur de Girouard à Montréal

Le resurfaçage du tablier du passage inférieur Girouard (Figure 2.43) a été réalisé en 2005 dans le cadre d'un contrat de réparation qui incluait les murs de soutènement, les poteaux, les chevêtres, les trottoirs, les bandes médianes, la dalle, les parapets et les gardes corps.

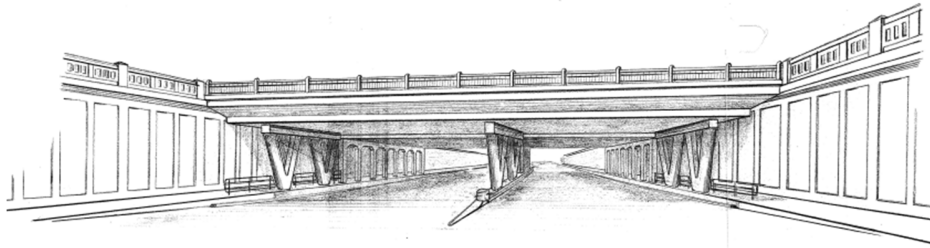


Figure 2.43 - Le passage inférieur Girouard vu de l'avenue Girouard en direction Sud

Dans le cadre de travaux de réparation, les deux voies de circulation du tablier en béton armé (24 m x 9 m) ont été réparées avec deux types de resurfaçages adhérents ancrés mécaniquement. Un béton fibré à retrait compensé (BRC) avec agent expansif de type G a été utilisé pour la première voie de circulation et un béton fibré contenant un agent réducteur de retrait (BRR) a été utilisé pour la seconde. Chaque resurfaçage mesure approximativement 24 m de longueur et 4,5 m de largeur (Figure 2.44). Avant les travaux, une campagne de carottages avait montré la présence de délaminations au niveau du rang supérieur des armatures. Le béton du tablier était fortement contaminé par les ions chlore (jusqu'à 440 ppm au niveau des barres d'armature supérieures).

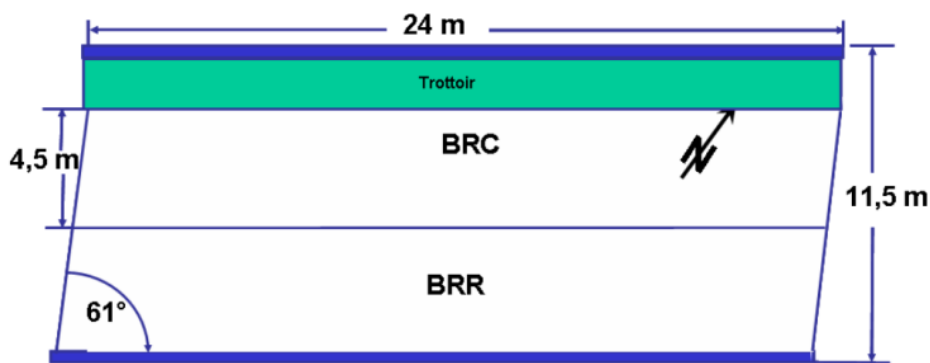


Figure 2.44 - Localisation et dimensions des resurfaçages du passage inférieur Girouard

Le béton à retrait compensé (BRC) est renforcé de 40,0 kg/m³ de fibres métalliques. Le béton contient 406 kg/m³ de ciment Type GU et 24 kg/m³ d'agent expansif de type G et possède un affaissement de 180 mm, une teneur en air (11 % au départ de l'usine) comprise entre 7,8 % et 8 % au chantier sans un signe de ségrégation lors de la mise en place. La résistance en compression de 35,3 MPa satisfait l'exigence minimale de 35

MPa à 28 jours. Le facteur de durabilité de 106 % indique une excellente résistance à la fissuration interne due aux cycles de gel-dégel. La résistance à l'écaillage satisfait l'exigence de la norme NQ 2621-900.

Le béton avec agent réducteur de retrait (BRR) est renforcé de $4,6 \text{ kg/m}^3$ de fibres synthétiques. Le béton a été fabriqué avec 380 kg/m^3 de ciment GUBSF. Le béton livré au chantier avait un affaissement compris entre 150 et 170 mm et un volume d'air variant de 7,4 à 9 %. La résistance en compression de 38,7 MPa satisfait l'exigence minimale de 35 MPa à 28 jours. Le facteur de durabilité de 104 % indique une excellente résistance à la fissuration interne due aux cycles de gel-dégel.

Les travaux ont permis de remplacer l'enrobé bitumineux (Figure 2.45) et les 25 premiers millimètres de béton à la surface de la dalle par une épaisseur variable de béton de réparation (le béton y constituant désormais la surface de roulement).

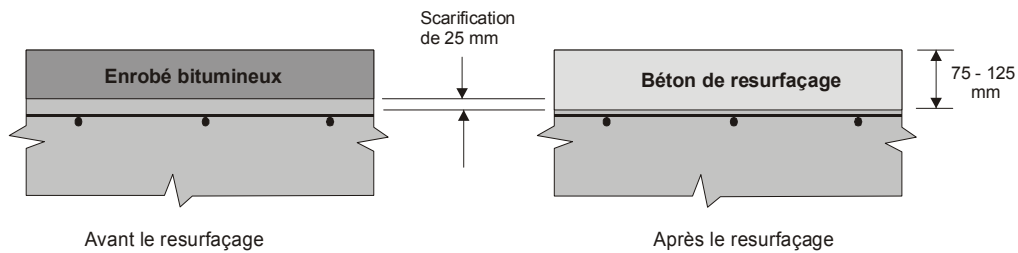


Figure 2.45 - Schéma du tablier avant et après le resurfaçage du passage inférieur Girouard.

La figure 2.46 présente l'expansion et le retrait des échantillons de bétons prélevés et étudiés en laboratoire. Le démoulage est fait à 6h et la première mesure est prise à cet instant. L'expansion interne s'est produite au cours des 48 premières heures dans l'eau et atteint $550 \mu\text{m/m}$ à 7 jours pour les échantillons de béton contenant l'agent d'expansion (G-ECA). La phase de séchage qui débute ensuite produit un retrait de séchage de $500 \mu\text{m/m}$ à 4 mois. Ces résultats suggèrent que l'expansion initiale est suffisamment élevée pour compenser la majeure partie du retrait endogène et de séchage qui se produisent au cours des premiers mois de séchage.

Dans le cas des échantillons de béton contenant l'agent réducteur de retrait (G-SRC), l'expansion initiale de $100 \mu\text{m/m}$ résulterait de l'absorption de l'eau et de l'hydratation pendant 28 jours de conservation dans l'eau. La courbe indique que l'expansion initiale

est trop faible pour compenser tout le retrait de séchage développé pendant les 3 mois suivants.

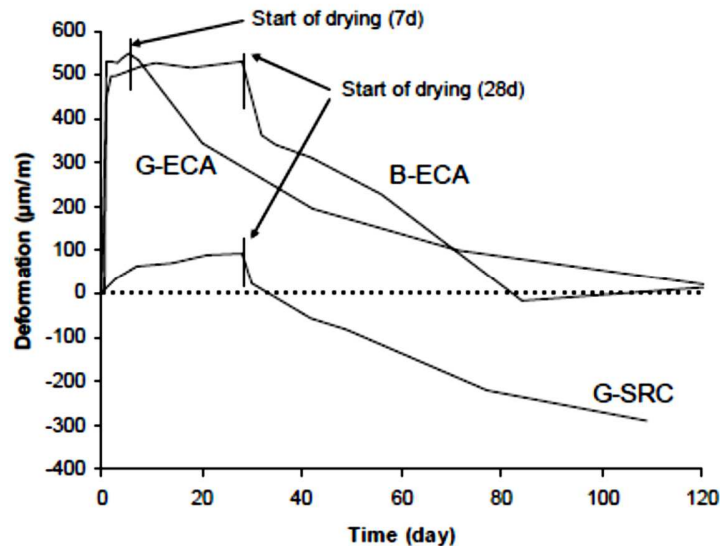


Figure 2.46 - Expansion et retrait des bétons lors du resurfaçage du passage de Girouard [Gagné et al, 2008]

Deux (2) mois après sa mise en service, aucune fissure n'a été observée sur la surface des deux types de resurfaçages. Une autre inspection après quelques mois montre que le resurfaçage de la voie Sud avec agent réducteur de fissures comporte cinq fissures (figure 2.47) dont l'ouverture est de moins d'un millimètre. Ces fissures sont probablement dues à la mise en tension du resurfaçage sous l'effet du retrait empêché.

Contrairement au resurfaçage de la voie Sud, le cas du resurfaçage de la voie Nord (agent d'expansion de type G) ne présente aucune fissure visible à l'œil nu. L'ouverture du joint de construction central, sous l'effet de la rotation des deux appuis centraux, n'a pas engendré la fissuration franche du béton de resurfaçage. L'absence de fissure résulte probablement de la très bonne ténacité du béton qui assure inévitablement la bonne durabilité de l'ouvrage

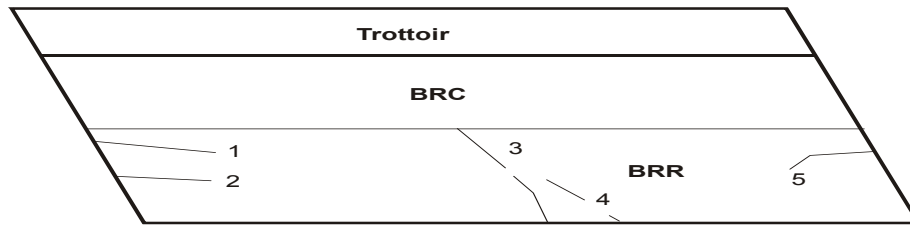


Figure 2.47 - Relevé de la fissuration après 7 mois de service

La figure 2.48 présente l'évolution des déformations in situ mesurées pendant plus de 2 ans. Ces courbes ont été enregistrées à l'aide d'une jauge de déformation à corde vibrante placée verticalement entre l'ancien et le nouveau béton. La courbe G-SRC indique que l'expansion mesurée verticalement dans le béton avec agent réducteur de retrait varie de -100 à 100 $\mu\text{m}/\text{m}$. L'expansion initiale dans le béton avec agent d'expansion de type G atteint 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ dès la première journée et reste constante jusqu'à plus de 2 ans. Ces résultats montrent une absence de fissurations dans le resurfaçage avec l'agent d'expansion qui est probablement sous compression (horizontalement) en raison de l'expansion interne produite initialement.

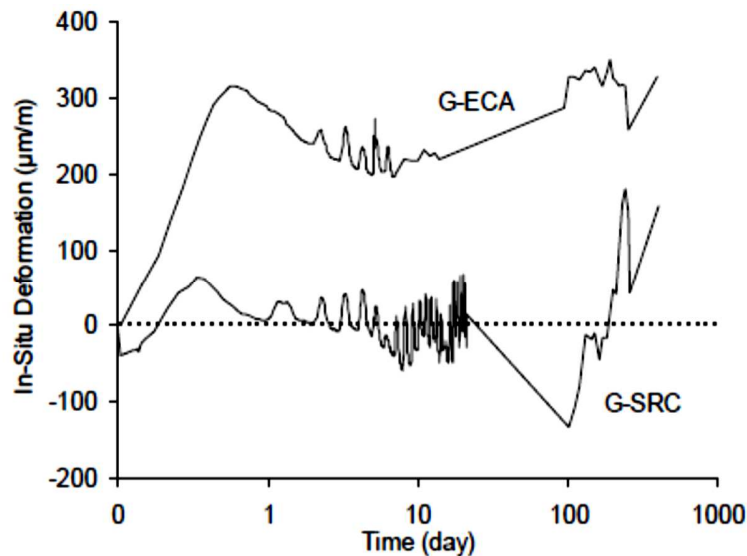


Figure 248 - Évolution de la déformation in situ du passage de Girouard [Gagné et al, 2008]

2.6 La fissuration due au retrait empêché

2.6.1 Mécanisme de fissuration

La fissuration du béton ou des dalles sur sol s'explique surtout par le mécanisme du retrait empêché puisque le retrait qui se fait librement engendre très peu ou pas de contrainte interne. Quant au retrait empêché, les conséquences sont inévitables dans le béton. Pendant le durcissement, le béton développe du retrait et lorsqu'il est empêché par le sol support ou un ancien béton existant, on observe une friction du sol support qui engendre un effort interne de traction. Par épuisement de la capacité en traction de la dalle, on observe la fissuration (Figure 2.49) de cette dernière. Dans le cas d'un élément massif, la restriction peut être engendrée par le cœur de l'élément et entraîner la fissuration. La contrainte de traction (Figure 2.49) engendrée par le retrait empêché entraîne la fissuration.

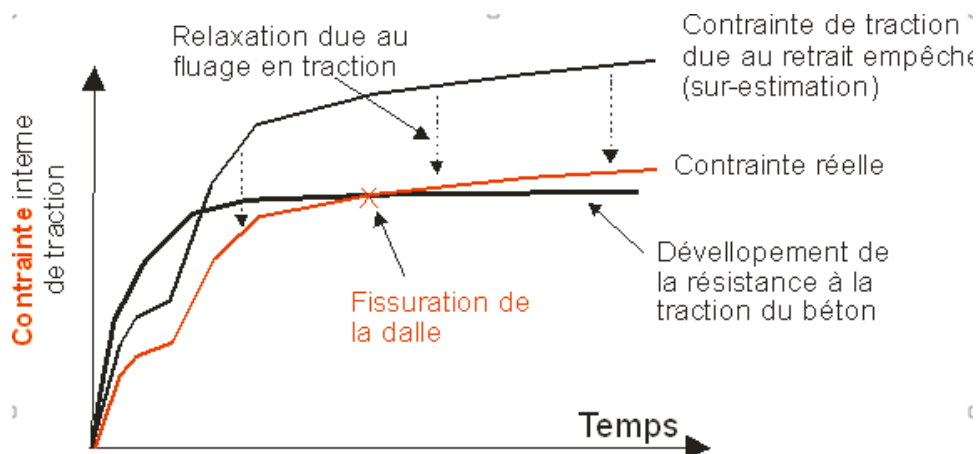


Figure 2.49 - Mécanisme de fissuration de la dalle due au retrait empêché par la contrainte de traction [Gagné, 2013]

2.6.2 Le rôle du retrait de séchage

Le retrait de séchage dans la fissuration des dalles sur sol s'explique par l'évaporation de l'eau dans les pores capillaires, qui engendre la formation des ménisques. Les ménisques entraînent une « dépression capillaire » par contraction de la pâte de ciment durcie. Les mécanismes fondamentaux du retrait de séchage de la pâte de ciment ou du béton sont associés à la diffusion de l'eau des pores capillaires et de l'eau adsorbée vers l'extérieur.

L'évaporation d'eau (Figure 2.50) des plus gros pores capillaires engendre peu de retrait (N°1). Des pores capillaires intermédiaires, elle engendre plus de retrait (N°2) et des petits pores capillaires beaucoup plus de retrait (N°3). L'évaporation de l'eau entraîne l'assèchement du béton qui se fissure. Il est possible de contrôler le retrait de séchage en utilisant de la fumée de silice, en diminuant le rapport E/C et en prévoyant un bon et long mûrissement. L'utilisation d'agent d'expansion et d'adjuvant réducteur de retrait est une approche prometteuse pour diminuer et contrôler les effets du retrait de séchage.

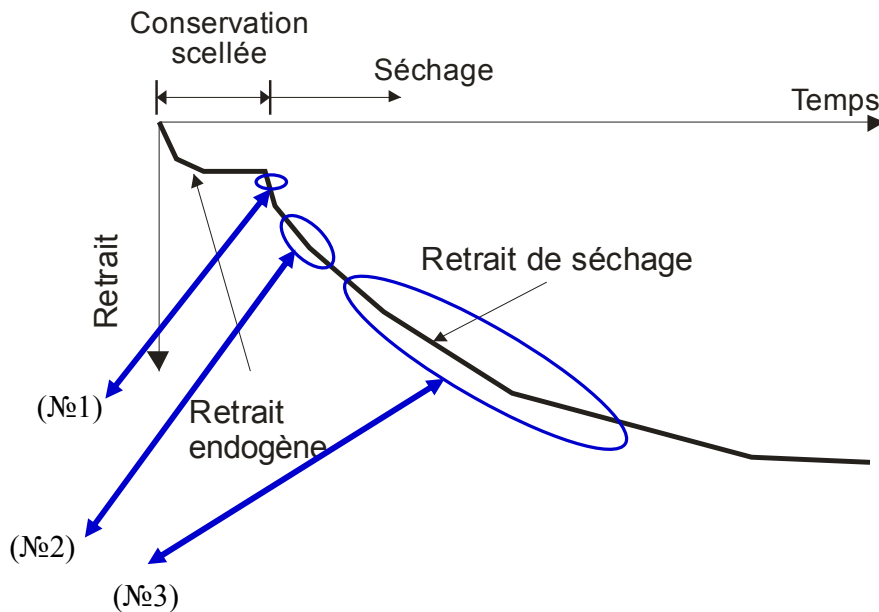


Figure 2.50 - Mécanisme de formation du retrait de séchage [Gagné, 2013]

2.6.3 Le rôle de l'expansion interne

2.6.3.1 Précontrainte chimique

Le contrôle de la fissuration due au retrait empêché par l'utilisation d'agent d'expansion est accompli par le développement d'une expansion interne au jeune âge. Ceci s'explique par une augmentation du volume du béton ou de la pâte aidant à contrôler la fissuration en milieu confiné ou en situation de retrait restreint. Dans un tel milieu, l'expansion interne engendre une précontrainte de compression durant les premiers jours suivant la mise en place du béton. Cette précontrainte interne de compression est très favorable pour

empêcher le retrait. Lorsque l'expansion initiale est importante, elle peut annuler ou complètement éliminer les contraintes de traction engendrées par le retrait empêché.

2.6.3.2 Restriction de l'expansion interne

L'expansion interne créée par les agents d'expansion peut être restreinte selon deux mécanismes :

a) Restriction externe

La restriction externe se fait par exemple par utilisation d'appuis rigides aux extrémités d'une dalle sur sol pour restreindre l'expansion et créer une compression dans le béton [Gagné, 2013].

b) Restriction interne

La restriction interne consiste à utiliser des armatures placées à l'intérieur du béton pour restreindre l'expansion. Le béton se trouvant dans un milieu confiné, on observe la traction dans l'armature ou dans les fibres métalliques et la compression qui se crée dans le béton [Gagné, 2013].

3. BUT DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS

3.1 Présentation de la problématique

Le contrôle de la fissuration est un paramètre clé de la durabilité et de la performance des structures en béton. La fissuration est notamment un critère de performance très important dans le cas des dalles sur sol. Les planchers en béton et les dalles sur sol comportent habituellement des joints qui permettent de localiser l'ouverture des fissures de retrait et de les contrôler. Malgré toutes les précautions prises, des fissures aléatoires peuvent se former entre les joints de retrait. Dans ce contexte, l'utilisation d'un agent d'expansion interne et d'un agent réducteur de retrait sont des approches prometteuses pour diminuer le risque de fissuration ou pour espacer davantage les joints de contrôle.

Il n'existe pas d'étude systématique et détaillée sur l'influence d'un agent d'expansion interne de type G, sur les propriétés d'un béton de 25 MPa typiquement utilisé pour construire des dalles sur sol. De plus il n'y a que très peu de résultats disponibles sur l'utilisation combinée d'un agent d'expansion interne de type G et d'un adjuvant réducteur de retrait. Pour pouvoir utiliser un agent d'expansion interne et un agent réducteur de retrait de manière optimale, il faut comprendre l'influence du dosage de l'agent d'expansion interne sur les variations volumiques libres et restreintes du béton. Il faut aussi comprendre quels sont les effets de l'ajout d'un agent réducteur de retrait sur la performance de l'agent d'expansion interne.

3.2 Objectif du projet

L'objectif du projet vise à étudier et mieux comprendre l'influence d'un agent d'expansion interne de type G et d'un adjuvant réducteur de retrait sur l'expansion initiale et le retrait de séchage d'un béton de 25 MPa de résistance nominale, dont la formulation est typique de celle utilisée pour construire les dalles sur sol. Le béton choisi pour cette étude ne contient pas d'adjuvant entraîneur d'air.

On vise à mesurer l'influence de l'agent d'expansion et de l'adjuvant réducteur de retrait sur les propriétés du béton frais, notamment l'affaissement et le volume d'air

naturellement contenu dans le béton. Le projet vise aussi à déterminer l'influence de ces deux adjuvants sur la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours.

Le cœur de l'étude consiste à mesurer l'influence de l'agent d'expansion interne et d'un adjuvant réducteur de retrait sur les variations volumiques libres et restreintes du béton. Les variations volumiques comprennent :

- L'expansion libre lors d'un mûrissement humide de 7 jours. Cette expansion sera mesurée à l'aide de capteurs de déformation à corde vibrante noyés dans des prismes de béton.
- L'expansion restreinte lors d'un mûrissement humide de 7 jours. Cette expansion sera mesurée à l'aide de la procédure d'essai normalisée ASTM C878.
- Le retrait de séchage libre se développant lors d'une conservation à 23°C et 50% d'humidité relative. Le retrait de séchage sera mesuré à l'aide de capteurs à corde vibrante et aussi à l'aide de la procédure d'essai normalisée ASTM C157.

L'agent d'expansion utilisé pour ce projet est le *Conex* commercialisé par la compagnie Adjuvants Euclid Canada. C'est un agent d'expansion de type G. Ce produit est couramment utilisé pour contrôler la fissuration des éléments en béton, notamment des planchers et dalles sur sol.

L'adjuvant réducteur de retrait est ``Eucon ARR floor`` qui est aussi commercialisé par la compagnie Adjuvants Euclid Canada. Il est spécifiquement formulé pour diminuer le retrait des bétons utilisés pour construire des planchers et des dalles sur sol.

On étudiera d'abord l'influence de l'agent d'expansion seul sur les variations volumiques libres et restreintes. Le dosage de l'agent d'expansion choisi, représente 0%, 3%, 6%, et 10% par rapport à la masse du ciment. Ces dosages sont dans la plage usuelle recommandée pour les dalles sur sol. L'étape suivante consistera à ajouter l'agent réducteur de retrait à chacune des formulations contenant un dosage variable d'agent d'expansion. Dans tous les cas, l'agent réducteur de retrait sera utilisé selon un dosage de 2% par rapport à la masse de ciment.

Un des objectifs secondaires de ce projet sera de comparer la mesure du retrait de séchage à l'aide de la procédure normalisée ASTM C157 avec celle qui utilise des capteurs de déformation à corde vibrante.

3.3 Description du programme expérimental

Le programme expérimental repose essentiellement sur l'étude des propriétés d'un béton de 25 MPa de résistance nominale. Tous les bétons ont été formulés en utilisant un rapport E/C de 0,72. Il comporte deux volets principaux :

- Le premier regroupe des bétons contenant des dosages variables en *Conex* choisis entre 0%, 3%, 6% et 10%. La plage d'affaissement de ces bétons est de 80 ± 20 mm (figure 3.1).
- Le deuxième volet du programme expérimental regroupe des bétons contenant tous 2% d'agent réducteur de retrait. Ces bétons contiennent des dosages en *Conex* choisis parmi 0%, 3%, 6% et 10% (figure 3.1). La plage d'affaissement de ces bétons est de 150 ± 50 mm.

Pour tous les bétons, on mesurera l'affaissement, le volume d'air et la masse volumique du béton frais. La résistance à la compression sera mesurée à 7 et 28 jours.

Chaque formulation des volets 1 et 2 sera soumise à des mesures de variations volumiques libres et restreintes (figure 3.1). L'expansion et le retrait libres seront mesurés à l'aide de capteurs à corde vibrante. La procédure ASTM C157 sera utilisée pour mesurer le retrait de séchage. L'expansion restreinte sera mesurée à l'aide de la procédure ASTM C878 (figure 3.1).

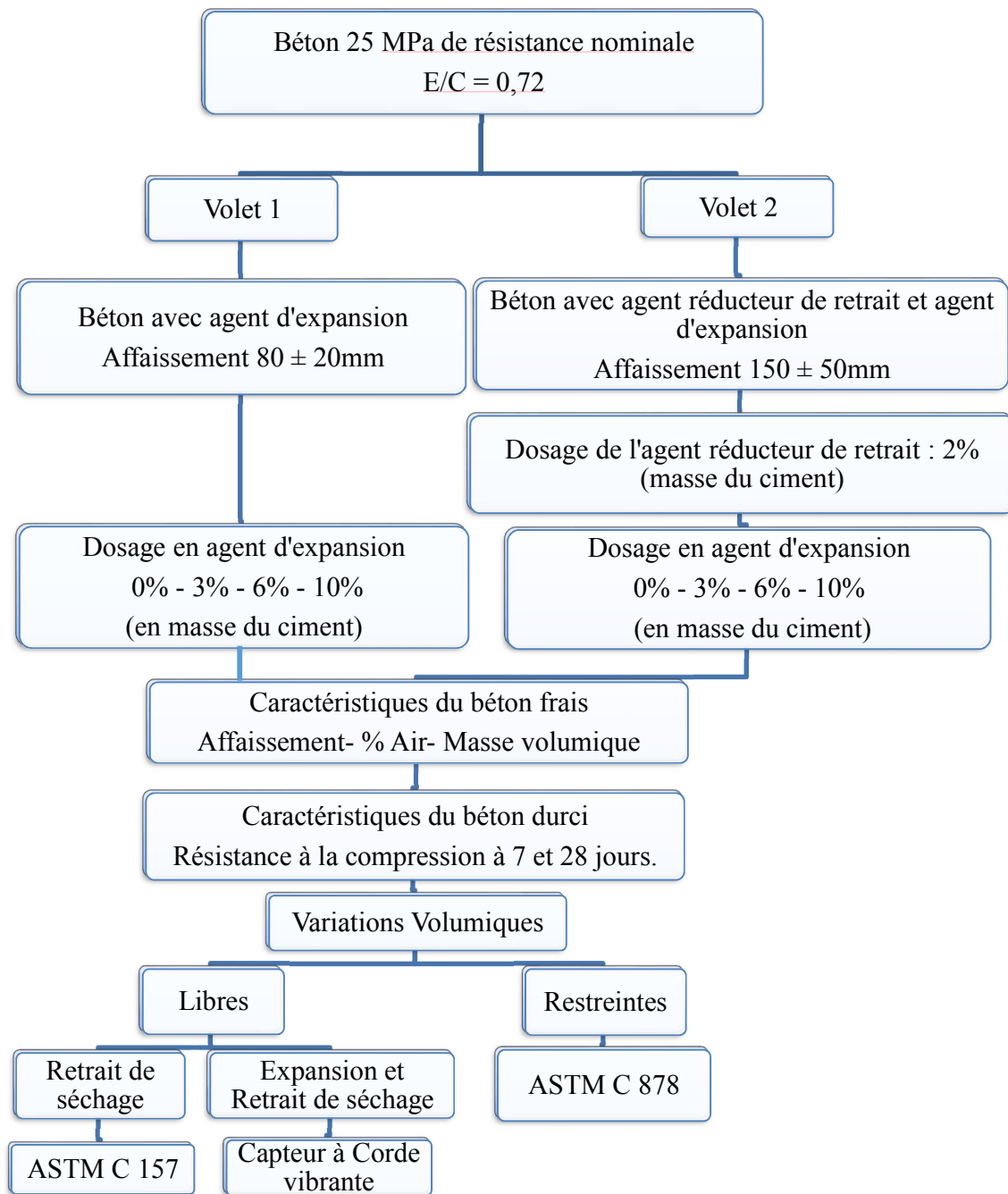


Figure 3.1 - Organigramme du programme expérimental

4. MATÉRIAUX, MÉLANGES ET PROCÉDURE

4.1 Matériaux

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans ce projet de recherche sont détaillées dans les paragraphes suivants.

4.1.1 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection du mélange est de l'eau potable qui provient du réseau de la ville de Sherbrooke.

4.1.2 Ciment

Le ciment utilisé est de type Portland GU (utilisation générale) produit par la compagnie Holcim. Sa densité est de 3,14. La composition minéralogique de Bogue est la suivante : $C_3S = 61\%$, $C_2S = 12\%$, $C_3A = 7,2\%$, $C_4AF = 8,1\%$.

4.1.3 Granulat fin

Le sable provient de l'entreprise Béton de l'Estrie à Rock Forest. Le sable a un module de finesse de 2,69. La composition granulométrique est présentée dans le tableau 4.1 et la courbe granulométrique est présentée sur la figure 4.1. Il est conforme aux spécifications de la norme CSA A23.1

Tableau 4.1 Distribution granulométrique du sable

Tamis (mm)	Passant (%)
10	100
5	99
2,5	84
1,25	67
0,630	47
0,315	24
0,160	8
0,080	3

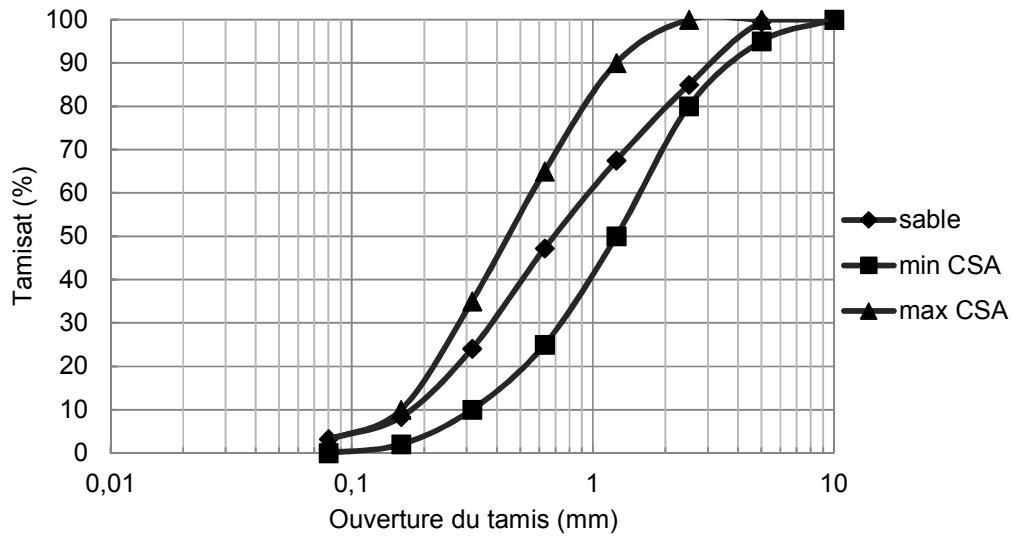


Figure 4.1 - Courbe granulométrique du sable

4.1.4 Gros granulats

Le granulat 5-14 mm provient de la carrière Saint Dominique à Saint-Hyacinthe. Sa granulométrie est présentée sur la figure 4.2. L'absorption moyenne de cette pierre est de 0,55%. Puisque ce taux d'absorption est faible, les gâchées subséquentes ne tiendront pas compte de cette absorption lors de la correction de l'eau de gâchage. Seule l'absorption du sable sera prise en compte.

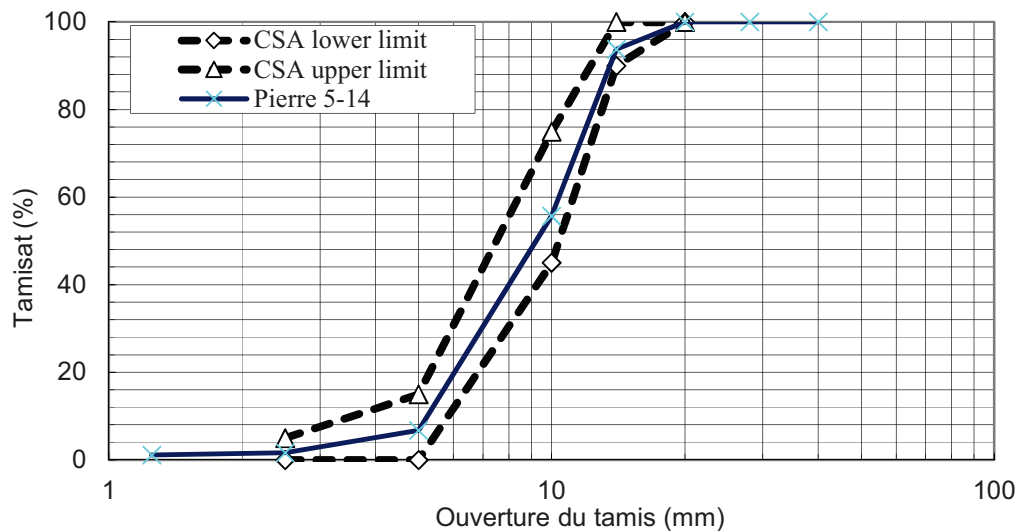


Figure 4.2 - Courbe granulométrique de la pierre 5-14 mm

4.1.5 *Conex*

Le *Conex* est un adjuvant en poudre utilisé pour réduire et compenser le retrait du béton à base de ciment Portland. Son mécanisme d'action consiste à former une composante expansive. Le *Conex* est une fine poudre beige conçue pour être mélangée avec le béton. Selon la fiche technique du fabricant :

- ◆ L'utilisation de cet adjuvant n'engendre pas une perte d'affaissement, et il peut être utilisé de pair avec d'autres adjuvants Euclid.
- ◆ Il ne modifie pas les résistances mécaniques.
- ◆ Il est compatible avec la majorité des ciments Portland.
- ◆ Le *Conex* n'affecte pas la teneur en air, le temps de prise ou d'autres caractéristiques du béton frais.
- ◆ Les résistances aux cycles de gel/dégel et à l'écaillage dû au sel de déverglage ne sont pas affectées si un réseau de bulles d'air adéquat est présent.

Le dosage en *Conex* est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Il est utilisé en remplacement d'un égal volume de sable.

Des essais en laboratoire montrent que le *Conex* est composé principalement de 58% de chaux vive, combinée à de la cendre volante de classe F et du ciment portland [Fattahi,

2015]. La densité relative varie entre 3,13 à 3,16 et la composition chimique est présentée dans le tableau 4.2

Tableau 4.2 Composition chimique du *Conex* [Fattahi, 2015]

Constitution	Proportion (%)
CaO	60,17
Ca(OH) ₂	9,10
CaCO ₃	1,37
SiO ₂	13,43
TiO ₂	0,41
Al ₂ O ₃	5,81
Fe ₂ O ₃	2,13
Mn ₃ O ₄	0,02
MgO	2,00
Na ₂ O	0,43
K ₂ O	0,20
P ₂ O ₅	0,48
SO ₃	0,59
Autres	3,86
	100,00

La figure 4.3 présente une image du *Conex* observé au microscope électronique à balayage (MEB). On observe les sphères de cendres volantes, de CaO et des particules de ciment.

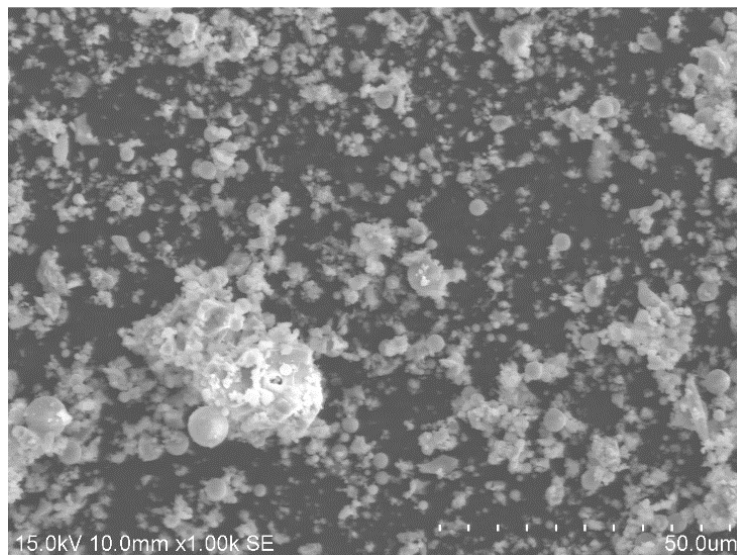


Figure 4.3 - Sphère de Cendre volante et chaux vive dans le *Conex* observé au MEB [Fattahi, 2015].

4.1.6 Agent réducteur de retrait

L'agent réducteur de retrait, *EUCON ARR Floor* de la compagnie Euclid Canada est un adjuvant liquide ajouté lors de la formulation du béton pour diminuer la tension de surface de l'eau contenue dans les pores capillaires qui intervient dans les phénomènes de retrait de dessiccation et d'autodessiccation. Le dosage de l'agent réducteur de retrait est exprimé en pourcentage de la masse de ciment. Les bétons qui en contiennent ont été dosés à 2% d'*EUCON ARR Floor*. Cet adjuvant est principalement constitué d'eau, c'est pourquoi, tout le volume liquide de l'adjuvant est pris en compte dans la masse d'eau de la gâchée et dans le calcul du rapport Eau/Ciment.

4.1.7 Réducteur d'eau

L'agent réducteur d'eau EUCON WR a été utilisé dans tous les mélanges de bétons. EUCON WR est une solution de sel d'acide lignosulfonique modifié complètement exempt de ions de chlorure. Il s'agit d'un adjuvant réducteur d'eau à prise normale pour le béton. Il confère une meilleure plasticité et cohésion au béton frais ainsi qu'une excellente durabilité. De plus, il réduit le retrait et la perméabilité du béton durci. [Euclid Chemical Company, 1998]

4.2 Procédure de malaxage

La procédure de malaxage utilisée pour la confection d'une gâchée de béton est présentée dans les lignes suivantes. Avant le malaxage, l'humidité du granulat fin a été prise en compte dans la correction de l'eau de gâchage tandis que celle des gros granulats a été jugé négligeable. Le malaxage a été effectué dans un malaxeur de laboratoire de capacité 80 kg (figure 4.4).



Figure 4.4 - Malaxeur de capacité 80 kg

Période de chargement

- 1) Chargement du sable
- 2) Malaxage de 30 secondes puis mesure de la teneur en eau
- 3) Chargement du gros granulat
- 4) Ajout de 50% de l'eau de gâchage
- 5) Malaxage de 30 secondes
- 6) Ajout du ciment
- 7) Ajout du *Conex*

Malaxage initial (remettre le chronomètre à zéro)

- 1) Malaxage de 30 secondes
- 2) Ajout du réducteur d'eau avec les 50% d'eau restant
- 3) Ajout de l'ARR après 30 secondes de malaxage
- 3) Arrêt du malaxage à 4 minutes
- 4) Période de repos de 4 à 5 minutes

Malaxage final

- Malaxage de 5 à 8 minutes
- Simulation du transport en malaxant le béton à une vitesse de 1 rpm
- Caractérisation du béton frais et/ou échantillonnage

- Repartir le malaxeur pendant une période de 30 secondes à une vitesse de 13,5 rpm avant d'effectuer la caractérisation du béton frais et/ou l'échantillonnage.

Quatre séries de bétons comprenant chacune quatre différents types de formulations ont été fabriqués pour faire les essais. Pour chaque type de béton formulé, trois échantillons ont été confectionnés pour les essais suivant chaque norme. Dans le cas de l'utilisation de la corde vibrante, un seul échantillon est confectionné par corde vibrante utilisée. Pour les essais en compression, trois échantillons de bétons (cylindres standard 100 mm x 200 mm) sont confectionnés pour évaluer la résistance à 7 et 28 jours.

4.3 Mélange du béton

Le béton formulé avec ou sans agent d'expansion et avec ou sans agent réducteur de retrait présente différentes propriétés à l'état frais et durci. Ces bétons sont identifiés de la façon suivante :

- Sans agent réducteur de retrait ARR

25-0C : Béton de 25 MPa avec 0% *Conex*

25-3C : Béton de 25 MPa avec 3% *Conex*

25-6C : Béton de 25 MPa avec 6% *Conex*

25-10C : Béton de 25 MPa avec 10% *Conex*

- Avec agent réducteur de retrait ARR

25-0C+ARR : Béton de 25 MPa avec 0% *Conex* + 2% ARR

25-3C+ARR : Béton de 25 MPa avec 3% *Conex* +2% ARR

25-6C+ARR : Béton de 25 MPa avec 6% *Conex* +2% ARR

25-10C+ARR : Béton de 25 MPa avec 10% *Conex* +2% ARR

4.3.1 Caractéristiques de formulation

Les tableaux 4.3 et 4.4 présentent les principales caractéristiques de formulation et les propriétés des différents bétons formulés.

Pour les essais en laboratoire, deux séries de bétons ont été formulés. La première série de béton nommé (A) a permis de faire les essais pour les normes ASTM C878 et ASTM C157. La deuxième série de béton nommée (B) a permis de faire les essais par l'utilisation des capteurs à corde vibrante.

Tableau 4.3 Formulations et propriétés des bétons avec et sans *Conex*

Bétons 25 MPa avec et sans <i>Conex</i>								
	25-OC-A	25-OC-B	25-3C-A	25-3C-B	25-6C-A	25-6C-B	25-10C-A	25-10C-B
Eau (kg/m ³)	191	192	193	189	193	194	196	195
Ciment (kg/m ³)	266	267	268	263	268	269	272	271
Sable (kg/m ³)	948	953	948	928	932	937	919	913
Pierre (kg/m ³)	947	952	955	935	956	960	970	964
Eucon WR (ml/100kg)	257	257	257	253	257	258	257	258
<i>Conex</i> (kg/m ³)	0	0	8	8	16	16	27	27
ARR (L/m ³)	0	0	0	0	0	0	0	0
E/C	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Aff. (mm)	100	100	100	90	80	70	100	85
Air (%)	2,5	2,9	2,3	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3
Masse Vol (kg/m ³)	2355	2365	2370	2325	2365	2375	2385	2370
fc 7d (MPa)	20,2	24	26,2	24	25,4	28	25,6	25
Écart type	(1,63)	(0,42)	(1,22)	(0,08)	(0,76)	(0,25)	(0,67)	(1,2)
fc 28d (MPa)	29,2	28,2	29,8	28,9	31,9	32,3	31,5	31,3
Écart type	(0,49)	(0,25)	(0,91)	(1,08)	(0,53)	(0,66)	(1,15)	(0,61)

Tableau 4.4 Formulation et propriétés des bétons avec et sans *Conex* + ARR

Bétons 25 MPa avec et sans <i>Conex</i> + ARR							
	25-OC ARR-	25-3C-ARR-	25-3C-ARR-	25-6C-ARR-	25-6C-ARR-	25-10C-ARR-	25-10C-ARR-
	A	A	B	A	B	A	B
Eau (kg/m ³)	188	188	188	189	187	191	191
Ciment (kg/m ³)	269	269	269	270	268	273	273
Sable (kg/m ³)	959	949	950	941	933	921	924
Pierre (kg/m ³)	958	957	957	964	956	972	972
Eucon WR (ml/100kg)	258	258	258	259	258	257	257
Conex (kg/m ³)	0	8	8	16	16	27	27
ARR (L/m ³)	5	5	5	5	5	5	5
E/C	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Aff. (mm)	190	170	100	180	160	160	160
Air (%)	2,7	2,5	2,7	2,7	1,8	2,5	1,8
Masse Vol (kg/m ³)	2380	2375	2375	2385	2365	2390	2393
fc 7d (MPa)	21,3	21,9	21,9	23,2	20,3	25,3	22
Écart type	(2,36)	(0,82)	(0,81)	(0,42)	(0,85)	(0,5)	(0,59)
fc 28d (MPa)	25,7	25,7	25,7	26,3	25	28,4	27,5
Écart type	(0,71)	(0,91)	(0,91)	(0,90)	(1,14)	(3,06)	(0,82)

4.4 Procédure des essais

4.4.1 Affaissement

L'essai d'affaissement a été fait suivant la norme CSA A23.2-5C.

4.4.2 Mesure de la teneur en air et de la masse volumique

La teneur en air a été mesurée avec la procédure normalisée CSA A23.2-4C (figure 4.5).

La masse volumique a été mesurée avec la procédure normalisée CSA A23.2-6C.



Figure 4.5 - Aéromètre de type pressiométrique

4.4.3 Confection et cure des éprouvettes de béton destinées aux essais de compression

La confection des éprouvettes de béton a été faite suivant la norme CSA A23.2-2C. Une fois terminé, l'évaporation ou le gain d'humidité est empêché en recouvrant les éprouvettes immédiatement après la finition (Figure 4.6). Les échantillons (cylindres 100×200mm) sont démoulés entre $23 \pm \frac{1}{2}$ h. Durant ce temps, les cylindres sont maintenus à des températures de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Une fois le démoulage fait, les échantillons sont conservés dans une chambre humide à 23°C et 100% d'humidité relative.



Figure 4.6 - Cylindres remplis de béton pour les essais en compression

4.4.4 Mesure de la résistance à la compression

Les essais de compression (figure 4.7) des cylindres de béton ont été effectués conformément à la norme CSA A23.2-9C. Les cylindres atteignent le point de rupture après l'application d'une charge uniaxiale. Le chargement se fait à un taux de 0,15 à 0,35 MPa/s. La résistance à la compression des échantillons a été faite à 7 et 28 jours.



Figure 4.7 - Appareil pour la mesure de la résistance à la compression

4.4.5 Confection et cure des éprouvettes de béton destinées aux essais de l'expansion libre et restreinte

Dans le cadre de ce projet de recherche, des moules rectangulaires ont été utilisés pour confectionner des échantillons pour les essais ASTM C878 [Figure 4.8 (a)] et ASTM C157 [Figure 4.8 (b)]. Les moules sont remplis en deux couches de volume égal pilonnées de 27 coups chacune. Elles sont ensuite recouvertes après la finition pour éviter l'évaporation ou le gain d'humidité. Pour les essais de la norme ASTM C878, le démoulage se fait 6 h après leur confection tandis que pour la norme ASTM C157 le démoulage se fait $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ h.



(a)

(b)

Figure 4.8 - Confection des échantillons pour la norme ASTM C878 (a) et ASTM C157(b)

4.4.6 Mesure de l'expansion restreinte au jeune âge (ASTM C878)

La figure 4.9 présente un moule typique pour la mesure de l'expansion restreinte. Le béton frais est versé dans le moule métallique où est déjà placée une tige filetée en acier (6 mm de diamètre, 280 mm de longueur). Avec les deux plaques métalliques aux extrémités, on démoule l'échantillon et on mesure la longueur de la tige d'acier. Le spécimen est ensuite immergé dans l'eau saturée de chaux afin de favoriser le processus expansif. La modification de la longueur de la barre d'acier est alors enregistrée en fonction du temps de durcissement.

L'éprouvette est un prisme de section carrée de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur de jauge de 250 mm [10 po] et une longueur totale (y compris la longueur des écrous de

tige et le bouton) d'environ 290 mm [11,5 po]. Le béton est placé dans le moule en deux couches d'épaisseur égales. Pour chaque couche, le béton est consolidé par piquage. Après la mise en place du béton, les prismes sont recouverts avec un polyéthylène pour empêcher la perte ou le gain d'humidité. Les prismes sont démoulés à l'âge de 6 h. Une première mesure de longueur est prise immédiatement après le démoulage. Les prismes sont ensuite conservés dans l'eau saturée de chaux pendant 7 jours ou une mesure de longueur est prise chaque jour.



Figure 4.9 - Coffrage et échantillons pour la mesure de l'expansion restreinte

4.4.7 Mesure du retrait de séchage (ASTM C157)

L'éprouvette est un prisme de section carrée de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur totale d'environ 284 mm [11,2 po] (figure 4.10). Trois échantillons ayant les mêmes dimensions sont préparés pour chaque test. On place le béton dans le moule en deux couches d'égale épaisseur. Pour chaque couche, le béton est consolidé par piquage. Les prismes sont recouverts avec un polyéthylène pour empêcher la perte ou le gain de l'humidité. Les prismes sont démoulés à l'âge de $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ h (figure 4.10). Immédiatement après démoulage, les prismes sont immergés dans de l'eau saturée de chaux pendant 30 minutes. La mesure de longueur initiale est prise immédiatement après la conservation dans l'eau de 30 minutes.

Les éprouvettes sont ensuite conservées dans de l'eau saturée de chaux pendant 7 jours. Au terme du mûrissement, les éprouvettes sont conservées dans une chambre de 23°C et 50% d'humidité relative. Les mesures de longueur de chaque spécimen sont prises au comparateur à différents âges de 4, 7, 14, 28 jours et 8, 16, 32, 64 semaines.



Figure 4.10 - Coffrage et échantillons pour la mesure du retrait

4.4.8 Mesure de l'expansion libre et du retrait de séchage à l'aide des capteurs à corde vibrante

La corde vibrante est utilisée pour mesurer la contraction libre du béton. Elle a permis de recueillir de façon automatique les variations volumétriques libres du béton.

L'éprouvette est un prisme de section carrée de 75 mm [3 po] de côté avec une longueur totale d'environ 300 mm. Le béton est placé dans le moule en deux couches d'épaisseur égales. Pour chaque couche, le béton est consolidé par piquage. Les échantillons sont ensuite placés dans des sacs en plastiques étanches. Immédiatement après le démoulage à $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ h, les échantillons sont placés dans plusieurs couches de jute humide pendant 7 jours de mûrissement. Au terme du mûrissement, les éprouvettes sont conservées dans une chambre où l'humidité et la température sont contrôlées à $23 \pm 1^\circ\text{C}$ et 50% d'humidité relative.

Les déformations isothermes du béton sont mesurées à l'aide d'une jauge de déformation à corde vibrante noyée dans le béton. La jauge de déformation à corde vibrante se compose de deux disques d'extrémité reliés par un tube qui protège une fine corde d'acier. L'ensemble est scellé par un double joint torique. Les disques d'extrémités assurent le transfert des déformations du béton à la corde. Un électroaimant est fixé à la partie centrale de l'appareil. Les déformations qui se développent dans le béton changent la tension mécanique de la corde et du coup, sa fréquence de résonance, laquelle est lue par l'électroaimant. La lecture des mesures s'effectue (chaque 1 heure) à l'aide d'une centrale d'acquisition de données raccordée (figure 4.11) à la corde vibrante (de la

compagnie ROCTEST) qui est installée juste avant la mise en place du béton frais dans les éprouvettes.



Figure 4.11 - Raccordement des échantillons à la centrale d'acquisition de données pour la mesure de l'expansion libre

5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente, les principaux résultats obtenus sur le béton lors des essais au laboratoire. Ces résultats sont présentés sous formes de figures, suivis de quelques commentaires. Dans cette partie, l'étude de l'influence du *Conex* et de l'agent réducteur de retrait (ARR) est présentée.

5.1 Influence du *Conex* et de l'ARR sur les propriétés frais et durcis du béton

La figure 5.1 présente l'affaissement des bétons avec et sans agent réducteur de retrait en fonction du dosage en *Conex*. Les résultats indiquent que le dosage en *Conex* n'a pas d'effet sur l'affaissement. En effet, l'affaissement ne varie pas de plus de 20 mm pour un dosage en *Conex* compris entre 0% et 10%. Pour un dosage en *Conex* donné, l'agent réducteur de retrait engendre systématiquement une augmentation importante de l'affaissement de 40 à 80 mm. Cette augmentation se produit même si l'apport d'eau due à l'ajout de l'agent réducteur de retrait est pris en compte.

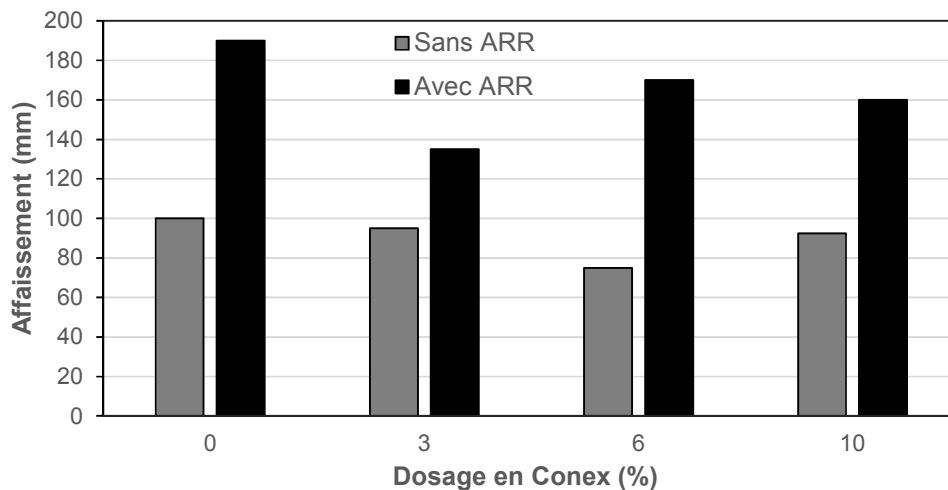


Figure 5.1 - Affaissement du béton contenant du *Conex* et de l'ARR

La figure 5.2 présente la teneur en air des bétons avec et sans agent réducteur de retrait en fonction du dosage en *Conex*. Les résultats montrent que le *Conex* et l'agent réducteur de retrait ont une faible influence sur le volume d'air. Lorsque le dosage en *Conex* augmente

de 0% à 10%, la teneur en air diminue très légèrement, passant de 2,7 à 2,3%. Pour un dosage en *Conex* donné, l'ajout de l'agent réducteur de retrait a tendance à diminuer très légèrement le volume d'air de moins de 0,5%.

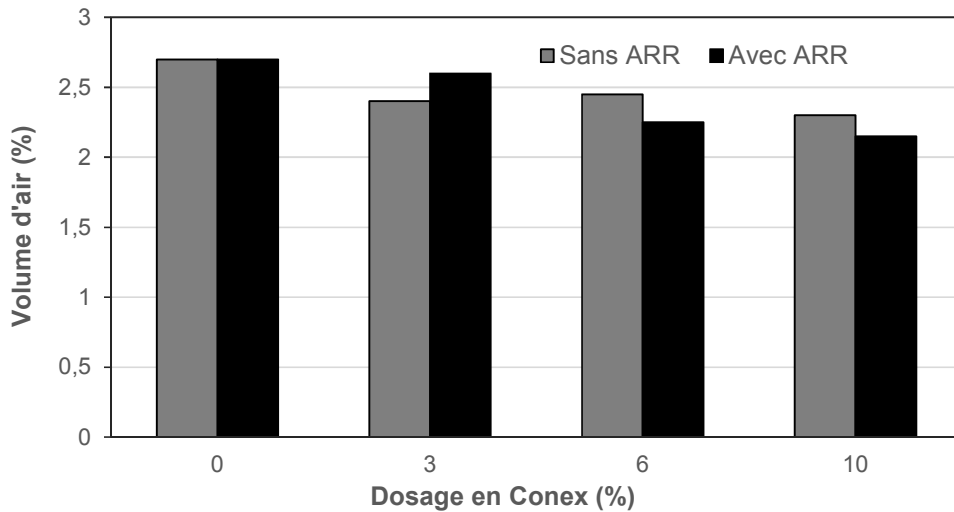


Figure 5.2 - Pourcentage d'air du béton contenant du *Conex* et de l'ARR

La figure 5.3 présente la résistance à la compression à 7 jours des bétons contenant du *Conex* et l'agent réducteur de retrait. Les résultats de la figure 5.3 montrent que le *Conex* produit une légère augmentation de la résistance à la compression. En moyenne, l'ajout de 3%, 6% à 10% de *Conex* a produit une augmentation de 3 à 5 MPa de la résistance à la compression à 7 jours (15 à 20%).

Pour un dosage en *Conex* donné, l'ajout de l'agent réducteur de retrait produit systématiquement une légère diminution de la résistance à 7 jours. La perte de la résistance est comprise entre 1 et 5 MPa soit de 5 à 18% de la résistance du béton sans agent réducteur de retrait.

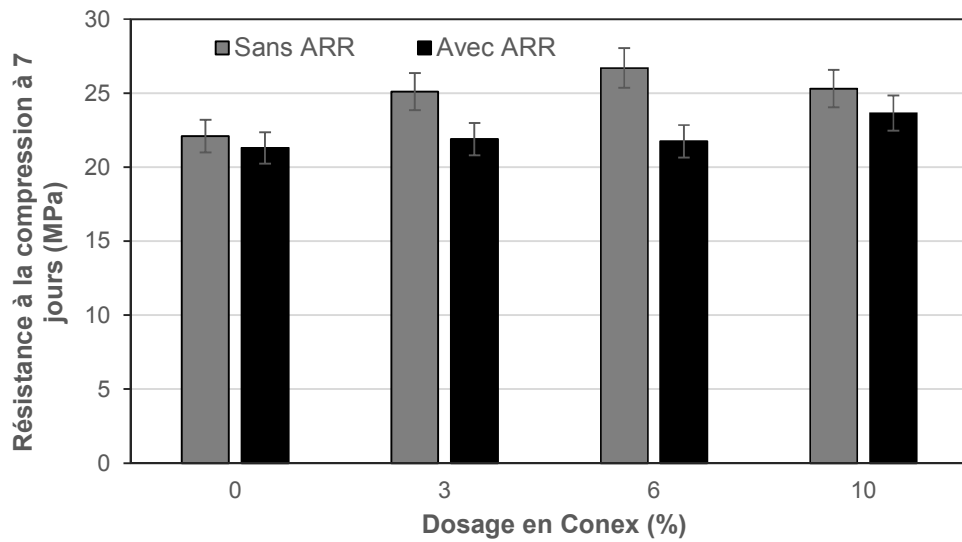


Figure 5.3 - Résistance à la compression à 7 jours d'un béton contenant du *Conex* et de l'ARR

La figure 5.4 présente la résistance à la compression à 28 jours des bétons contenant le *Conex* et l'agent réducteur de retrait. À 28 jours, on observe les mêmes tendances qu'à 7 jours. Le *Conex* produit une légère augmentation de la résistance (3 à 5 MPa) et l'agent réducteur de retrait produit une baisse de la résistance d'environ 15% en moyenne.

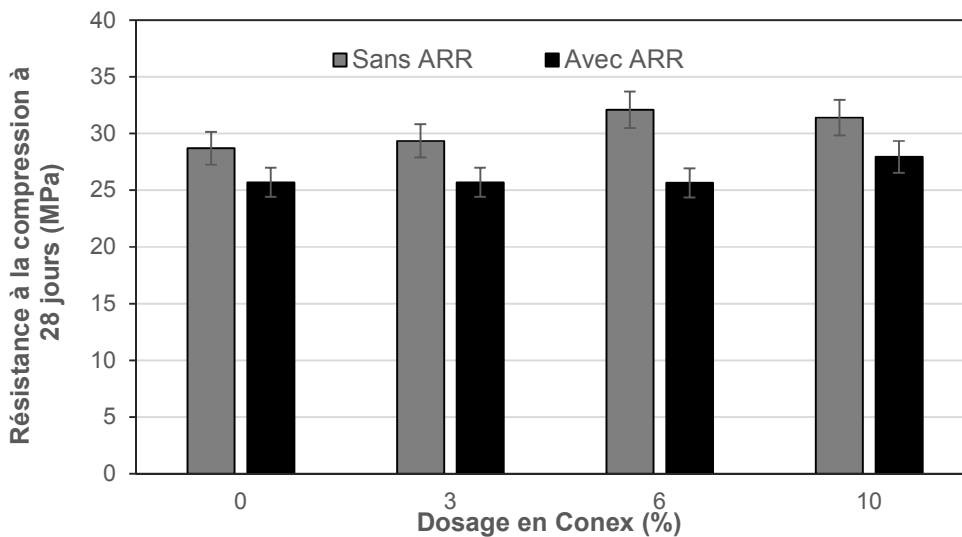


Figure 5.4 - Résistance à la compression à 28 jours d'un béton contenant du *Conex* et de l'ARR

5.2 Influence du *Conex* sur les variations volumiques libres et restreintes

La figure 5.5 présente l'expansion et le retrait total mesurés selon la procédure ASTM C157 avec différents pourcentages en *Conex*. Les courbes présentent une phase d'expansion durant le mûrissement humide, suivie d'une phase de retrait lors du séchage qui débute après 7 jours de mûrissement à l'eau. L'expansion initiale de tous les bétons est relativement faible ($< 100 \mu\text{m/m}$), quel que soit le dosage en *Conex*. Ces faibles expansions découlent du fait que, par cette méthode d'essai, la première mesure de longueur a été prise 24h après le contact eau – ciment. Une fraction importante de l'expansion initiale n'a donc pas pu être prise en compte. Les courbes de la figure 5.5 montrent néanmoins que l'augmentation du dosage en *Conex* produit quand même une légère augmentation de l'expansion initiale entre 0 et 7 jours.

Les courbes correspondant à la phase de séchage sont très similaires. Le décalage entre les courbes correspond approximativement au décalage initial engendré par l'expansion initiale. Seul le béton sans *Conex* présente un retrait de séchage un peu plus important. Le retrait de séchage sera analysé en détails plus tard.

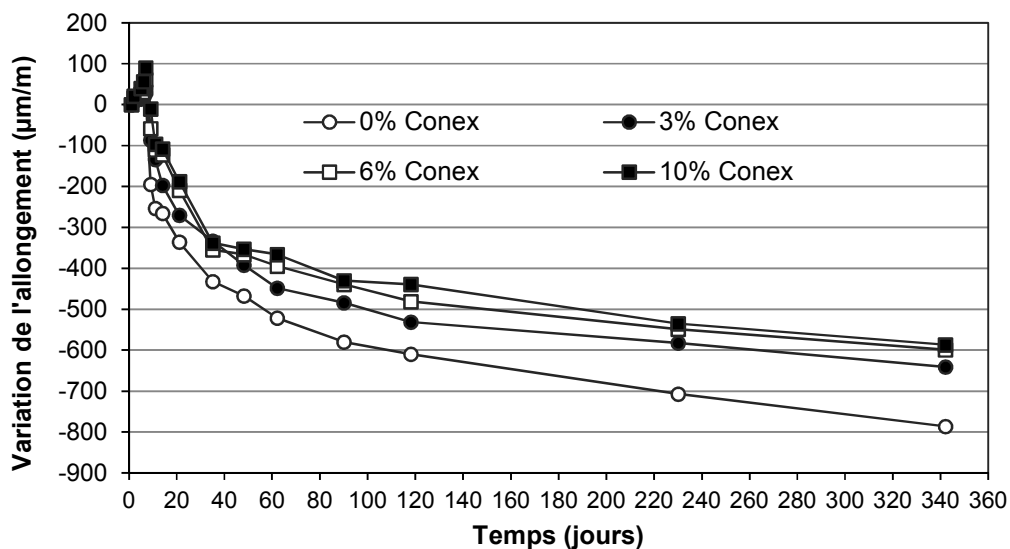


Figure 5.5 - Évolution de l'expansion et du retrait en fonction du dosage en *Conex* des bétons selon la procédure ASTM C157

La figure 5.6 présente l'évolution de la masse en fonction du dosage en *Conex*, des échantillons testés selon la procédure ASTM C157. Toutes les courbes sont très

similaires. Il y a d'abord un gain de masse entre 0 et 7 jours, ce gain découle de l'absorption d'eau durant le mûrissement humide. Le séchage engendre une perte de masse. Les courbes, toutes très similaires, suggèrent que le dosage en *Conex* n'a pas d'effet important sur la masse, et donc sur le séchage des bétons testés.

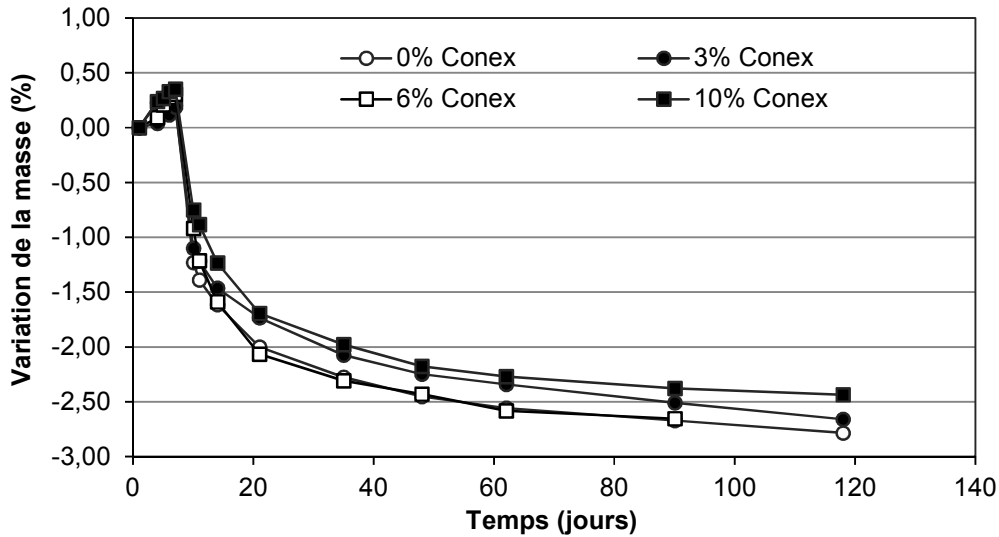


Figure 5.6 - Évolution de la masse en fonction du dosage en *Conex* des bétons selon la procédure ASTM C157

La figure 5.7 présente l'expansion libre et le retrait total du béton mesurés par la corde vibrante avec différents pourcentages en *Conex*. Le béton de référence présente une expansion d'environ 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 7 jours de mûrissement et un retrait total de -535 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 280 jours. Avec 3% et 6% de *Conex*, on observe des expansions respectives de 210 $\mu\text{m}/\text{m}$ et 274 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 7 jours et un retrait total de -475 $\mu\text{m}/\text{m}$ et -287 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 280 jours. Une grande expansion s'observe à 10% de *Conex* avec 535 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 7 jours pour un retrait total de -93 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 280 jours.

Globalement, les résultats montrent que l'expansion initiale augmente avec le dosage en *Conex*. De plus, l'augmentation du dosage en *Conex* engendre une diminution du retrait total. L'effet du *Conex* sur le retrait total découle essentiellement de son effet sur l'intensité de l'expansion initiale.

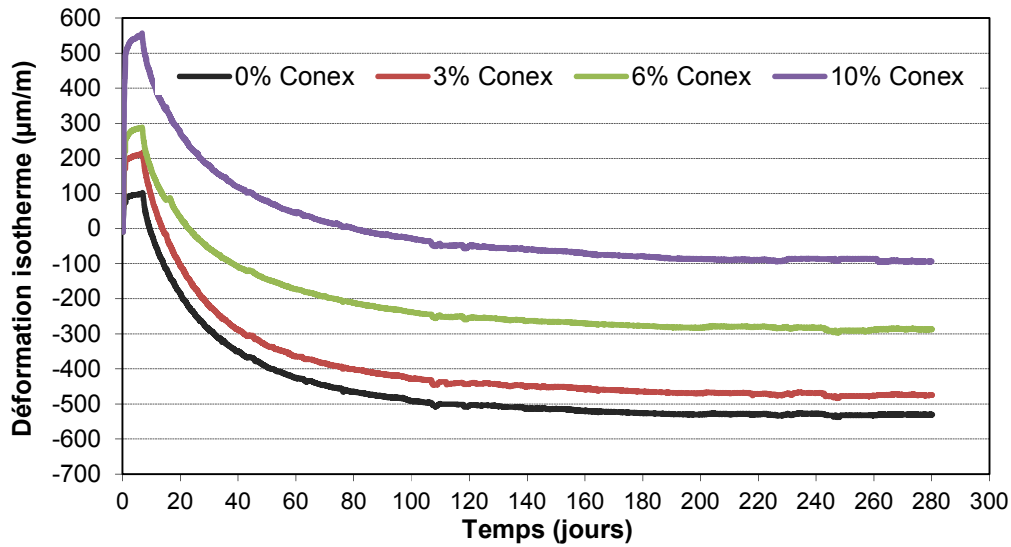


Figure 5.7 - Évolution de l'expansion et du retrait libre des bétons avec *Conex* mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante

Les courbes de la figure 5.8 présentent l'expansion libre des bétons en fonction du dosage en *Conex*. Cette figure permet de mieux apprécier la cinétique d'expansion durant les 7 jours de mûrissement humide. On remarque que, dans tous les cas, plus de 90% de l'expansion initiale est accomplie en 24 heures. De plus l'expansion s'amorce après environ 6 heures suivant le contact eau-ciment. Toutes les courbes présentent un saut à environ 24 ± 3 heures. Ce saut correspond à l'instant du démoulage. Il suggère que le moule restreint légèrement l'expansion initiale. Celle-ci progresse subitement dès que le moule est retiré. Après le démoulage, l'expansion progresse très légèrement entre 1 à 6 jours de conservation humide. Cette expansion durant le mûrissement humide correspond à moins de 10% de l'expansion totale à 7 jours.

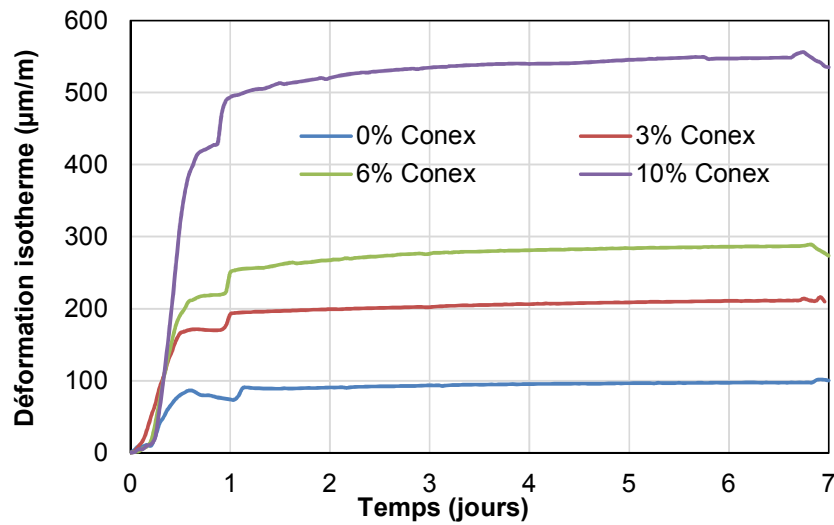


Figure 5.8 - Évolution de l'expansion libre des bétons avec *Conex* mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante pendant 7 jours

La figure 5.9 présente les courbes d'expansion restreinte des bétons mesurés selon la procédure ASTM C878 avec différents dosages en *Conex*. Globalement, la cinétique de l'expansion restreinte est similaire à celle de l'expansion libre. Après 24 heures, la majorité (> 70%) de l'expansion est accomplie. Il y a cependant une légère progression de l'expansion entre 1 et 3 jours, ce qui ne s'est pas produit dans le cas de l'expansion libre. Pour un dosage en *Conex* donné, l'expansion restreinte à 7 jours est légèrement plus faible (50 µm/m) que l'expansion libre. Une comparaison plus détaillée des expansions libres et restreintes sera réalisée au chapitre 6.

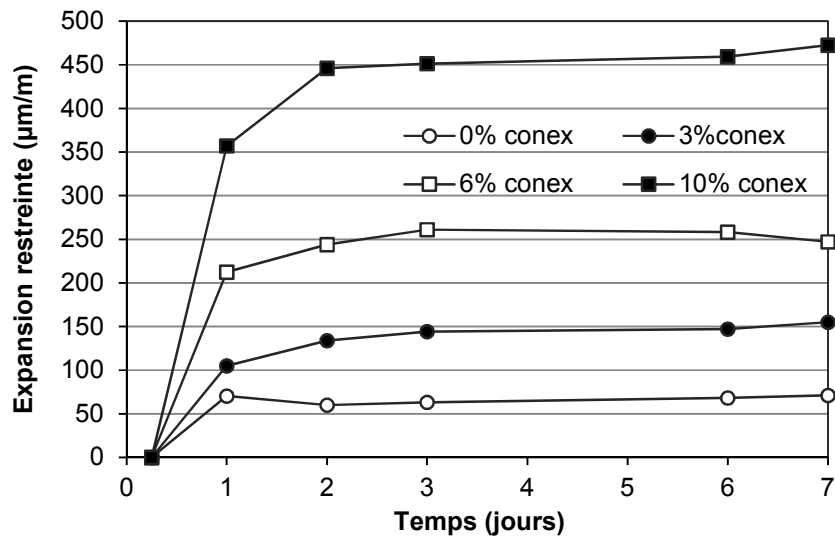


Figure 5.9 - Influence du dosage en *Conex* sur l'expansion restreinte des bétons selon la procédure ASTM C878

La figure 5.10 présente l'influence du *Conex* sur le gain de masse des éprouvettes utilisées pour mesurer l'expansion restreinte. Les courbes indiquent un gain rapide d'eau durant les 3 premiers jours. Durant cette période, plus de 85% de l'eau totale est absorbée. Les résultats montrent que la quantité d'eau absorbée à 7 jours augmente avec le dosage en *Conex*. Ces résultats suggèrent que l'expansion interne pourrait engendrer une succion capillaire et ainsi une plus forte absorption d'eau lors du mûrissement des bétons avec *Conex*.

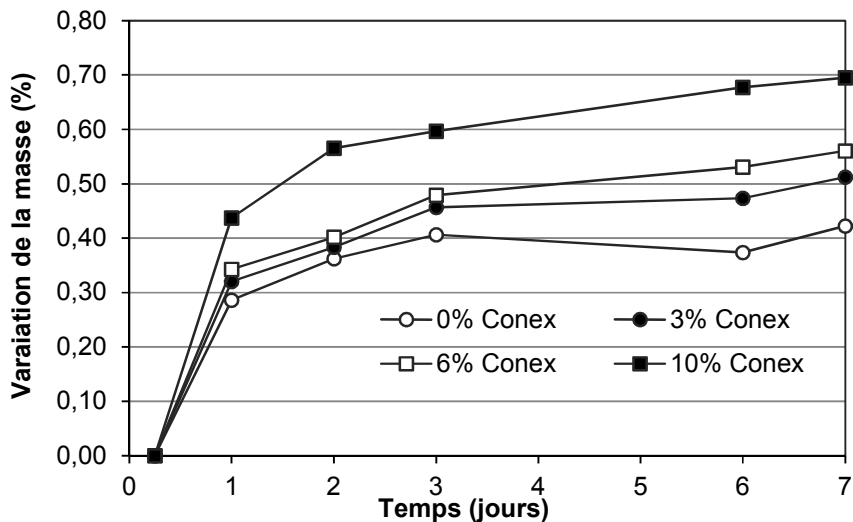


Figure 5.10 - Évolution de la masse en fonction du dosage en *Conex* des bétons selon la procédure ASTM C878

5.3 Influence du *Conex* et de l'ARR sur les variations volumiques libres et restreintes

La figure 5.11 présente l'expansion et le retrait total des bétons contenant des dosages variables en *Conex* et 2% d'agent réducteur de retrait. Ces courbes ont été obtenues avec la procédure ASTM C157. Toutes les courbes présentent une phase d'expansion durant le mûrissement humide (7 jours), suivie d'une phase de retrait lors du séchage. Globalement, ces courbes sont similaires à celles de la figure 5.5, ce qui montre que l'ajout d'un agent réducteur de retrait ne modifie pas significativement la cinétique de l'expansion initiale et du retrait total. Avec la procédure ASTM C157, on constate à ce niveau que les expansions initiales sont toujours faibles ($< 100 \mu\text{m/m}$) quel que soit le dosage en *Conex*. Ce qui confirme à nouveau que cette procédure n'est pas bien adaptée pour caractériser l'expansion des bétons avec agent d'expansion interne.

La forme des courbes durant la phase de séchage est très similaire quel que soit le dosage en *Conex*. Il y a cependant un décalage entre les courbes qui varie en fonction du dosage en *Conex*. Ce décalage découle principalement de l'intensité variable de l'expansion initiale.

L'utilisation de 2% d'agent réducteur de retrait diminue le retrait total. Par exemple à 120 jours, le retrait total des bétons sans agent réducteur de retrait est compris entre 400-600 $\mu\text{m/m}$ (figure 5.5) alors qu'il est compris entre 300-400 $\mu\text{m/m}$ en présence d'agent réducteur de retrait. Une analyse plus détaillée de l'influence de l'agent réducteur de retrait sera présentée au chapitre 6.

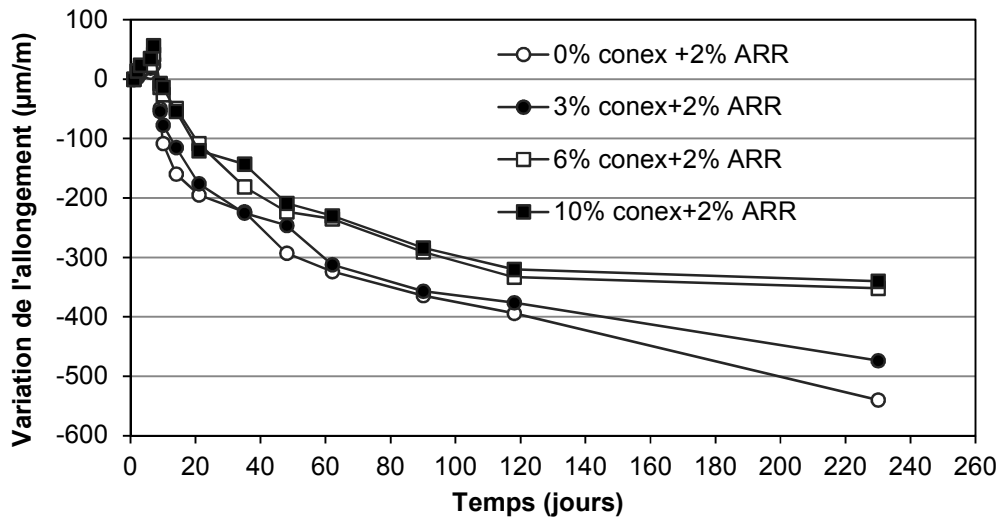


Figure 5.11 - Évolution de l'expansion et du retrait des bétons avec *Conex* et de l'ARR selon la procédure ASTM C157

La figure 5.12 présente les courbes d'évolution de la masse des bétons contenant l'agent réducteur de retrait et des dosages variables en *Conex*. Toutes les courbes sont très semblables. Elles débutent par une légère augmentation de la masse (0,5%) lors du mûrissement. Le début du séchage (7 jours) engendre ensuite une perte de masse qui atteint approximativement 3% à 120 jours. Globalement les résultats confirment que le *Conex* et l'agent réducteur de retrait ne modifient pas la cinétique d'absorption d'eau et du séchage.

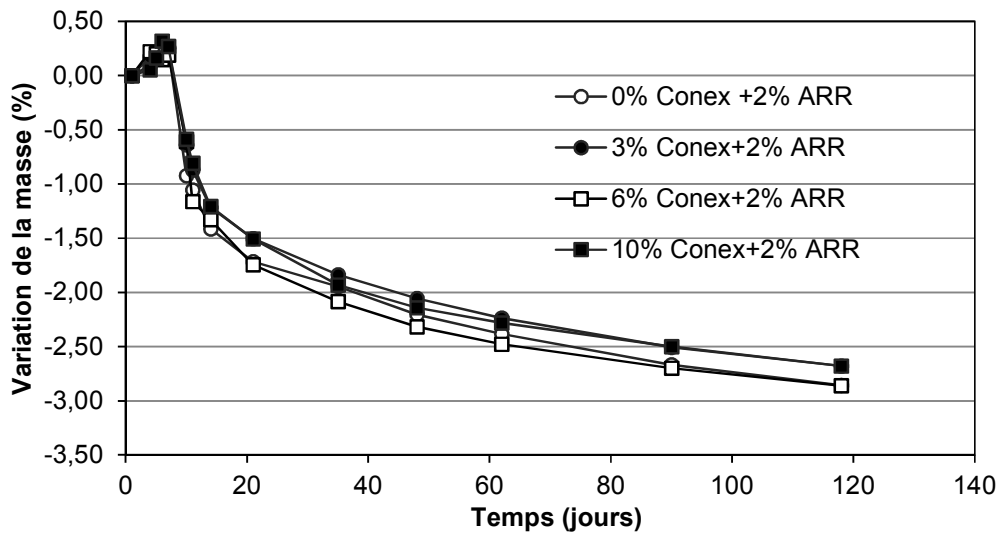


Figure 5.12 - Évolution de la masse en fonction du dosage en *Conex* et de l'ARR selon la procédure ASTM C157

La figure 5.13 présente les courbes d'expansion et de retrait des bétons avec agent réducteur de retrait, contenant des dosages variables de *Conex*. Le béton de référence présente une expansion d'environ $64 \mu\text{m/m}$ à 7 jours de mûrissement et un retrait total de $-376 \mu\text{m/m}$ à 260 jours. Avec 3% et 6% de *Conex*, on observe des expansions respectives de $121 \mu\text{m/m}$ et $254 \mu\text{m/m}$ à 7 jour et un retrait total de $-293 \mu\text{m/m}$ et $-203 \mu\text{m/m}$ à 260 jours. Une grande expansion s'observe à 10% de *Conex*, soit $472 \mu\text{m/m}$ à 7 jours et un retrait total de $-24 \mu\text{m/m}$ à 260 jours. Globalement, l'utilisation d'un agent réducteur de retrait a relativement peu d'effet sur la cinétique d'expansion et de retrait des bétons avec *Conex*. En effet, les courbes obtenues avec un agent réducteur de retrait (figure 5.13) sont similaires à celles obtenues sans agent réducteur de retrait (figure 5.7). L'intensité de l'expansion initiale augmente avec le dosage en *Conex*. Cette expansion initiale affecte directement le retrait total à 250 jours, car durant la période de séchage, le décalage entre les courbes est constant et correspond essentiellement à la différence d'expansion à 7 jours.

La comparaison des courbes de la figure 5.7 (sans agent réducteur de retrait) et celles de la figure 5.13 (avec agent réducteur de retrait) montre que cet adjuvant contribue à diminuer le retrait total à 250 jours. Pour un dosage en *Conex* donné, le retrait total à 250 jours des bétons avec agent réducteur de retrait est plus faible d'environ $100 \mu\text{m/m}$.

Ces résultats montrent que la combinaison du *Conex* et de l'ARR produit une expansion au jeune âge dont l'intensité dépend du dosage en *Conex* avec un retrait plus faible que le béton de référence (plus de 90% plus faible avec 10% de *Conex*).

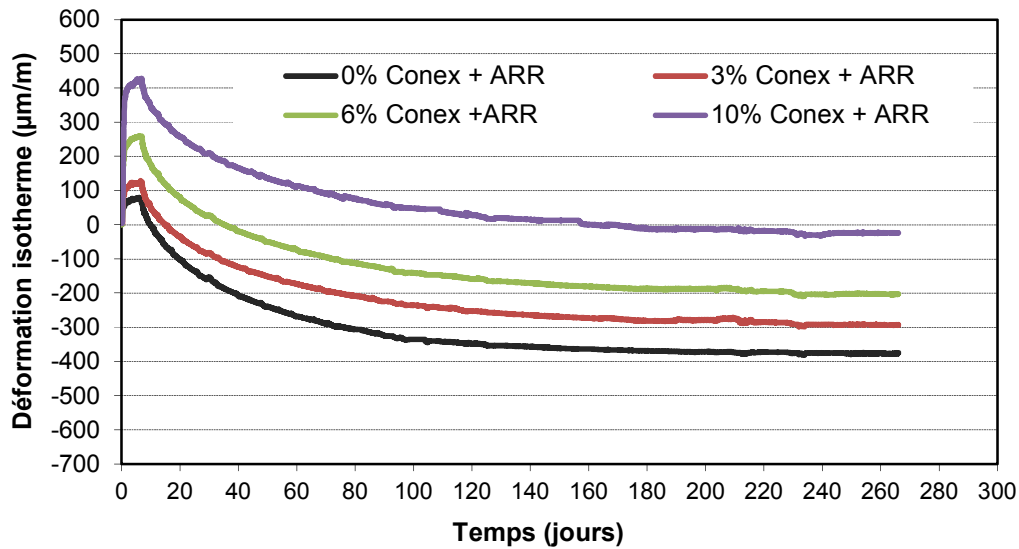


Figure 5.13 - Évolution de l'expansion et du retrait libres des bétons avec *Conex* et de l'ARR mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante

La figure 5.14 permet de mieux apprécier la cinétique d'expansion des bétons avec *Conex* et agent réducteur de retrait. Dans tous les cas, plus de 90% de l'expansion est produite entre 0 et 24 heures. Celle-ci s'amorce environ 6 heures après le contact eau-ciment. Comme dans le cas des bétons sans agent réducteur de retrait (figure 5.8), les courbes présentent un léger saut qui correspond à l'instant de démoulage. Après le démoulage à 24 heures \pm 3 heures, l'expansion progresse encore mais bien plus lentement entre 1 et 6 jours. Après 24 heures, l'expansion supplémentaire se présente moins de 10% de l'expansion totale à 7 jours.

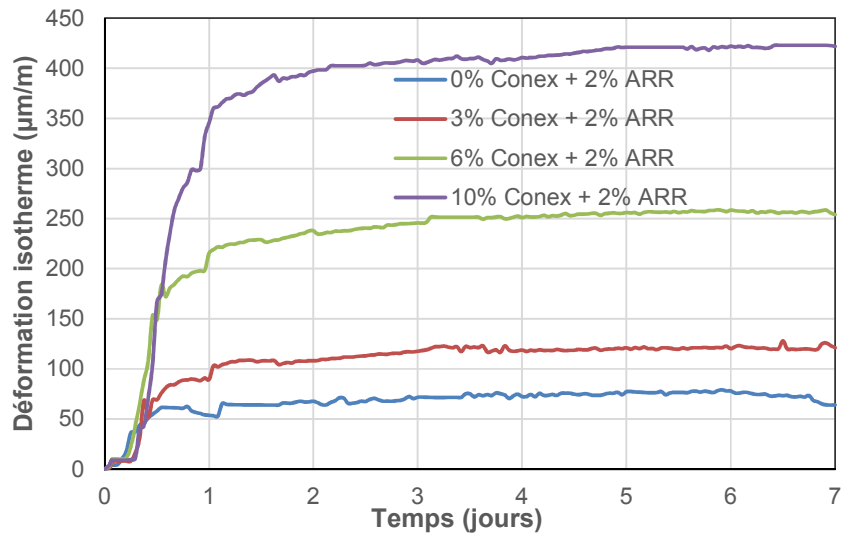


Figure 5.14 - Évolution de l'expansion libre des bétons avec *Conex* et de l'ARR mesurés à l'aide des capteurs à corde vibrante pendant 7 jours

La figure 5.15 présente les courbes d'expansion restreinte des bétons avec agent réducteur de retrait et ayant différents dosages en *Conex*. La cinétique d'expansion en condition de restriction est similaire à celle de l'expansion libre. La presque totalité de l'expansion restreinte se produit avant 24 heures. En présence de l'adjuvant réducteur de retrait, il n'y a pas d'expansion résiduelle après 24 heures. Ce comportement est différent de celui déjà observé dans le cas des bétons sans agent réducteur de retrait (figure 5.9) pour lesquels une expansion additionnelle de 50 à 100 $\mu\text{m/m}$ s'est produite entre 1 et 3 jours.

Dans le cas des bétons avec agent réducteur de retrait, il n'y a pas de différence marquée entre les expansions libres (figure 5.8) et les expansions en condition de restriction (figure 5.15)

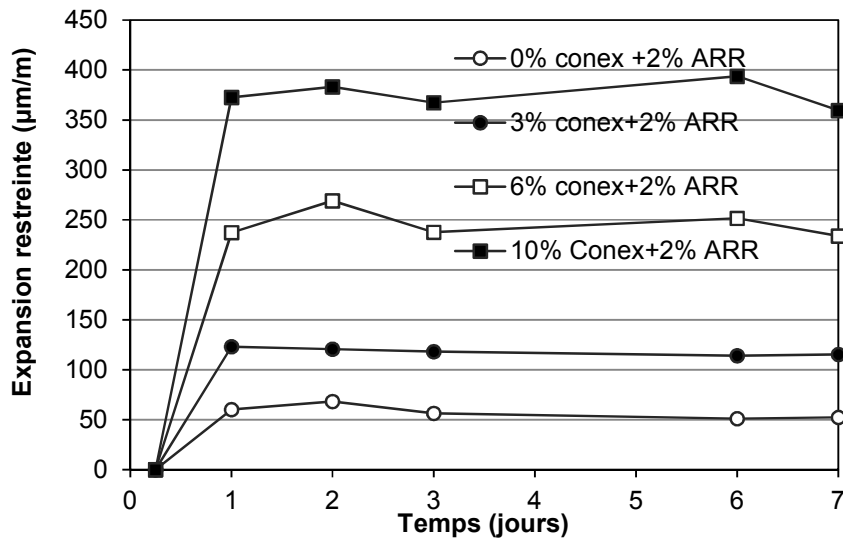


Figure 5.15 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur l'expansion restreinte des bétons selon la procédure ASTM C878

Les courbes de la variation de la masse des bétons avec agent réducteur de retrait et *Conex* sont présentées sur la figure 5.16. L'allure des courbes est très similaire à celle obtenue sans agent réducteur de retrait (figure 5.10). Les bétons absorbent la majorité de l'eau durant les 3 premiers jours. L'absorption d'eau augmente avec le dosage en *Conex*. En présence de l'adjuvant réducteur de retrait et pour un dosage en *Conex* donné, l'absorption est plus faible d'environ 0,2% comparativement aux valeurs obtenues sans agent réducteur de retrait (figure 5.10).

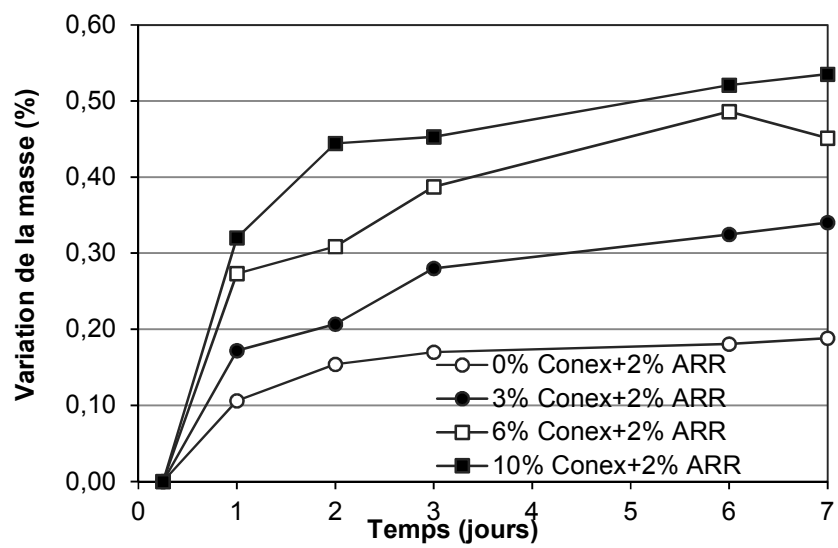


Figure 5.16 - Évolution de la masse en fonction du dosage en *Conex* et de l'ARR selon la procédure ASTM C878

6. ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, les résultats obtenus lors des essais au laboratoire seront analysés. On étudiera l'influence du *Conex* et de l'ARR sur l'expansion libre et restreinte des bétons, sur le retrait de séchage et le retrait total selon la procédure ASTM C157 et par la corde vibrante.

6.1 Influence du *Conex* et de l'ARR sur l'expansion libre des bétons

La figure 6.1 présente l'expansion libre avec et sans ARR des bétons à 7 jours. Dans le cas des bétons sans ARR, on observe que plus le dosage en *Conex* augmente, plus l'expansion est importante. Elle varie de 100 $\mu\text{m/m}$ à 535 $\mu\text{m/m}$. L'ajout de l'agent réducteur de retrait provoque une légère diminution de l'expansion. La diminution de l'expansion est comprise entre 20 μm et 113 μm . Le fait que les deux courbes soient approximativement parallèles suggère que l'effet de l'ARR sur la diminution de l'expansion est à peu près le même quel que soit le dosage en *Conex*.

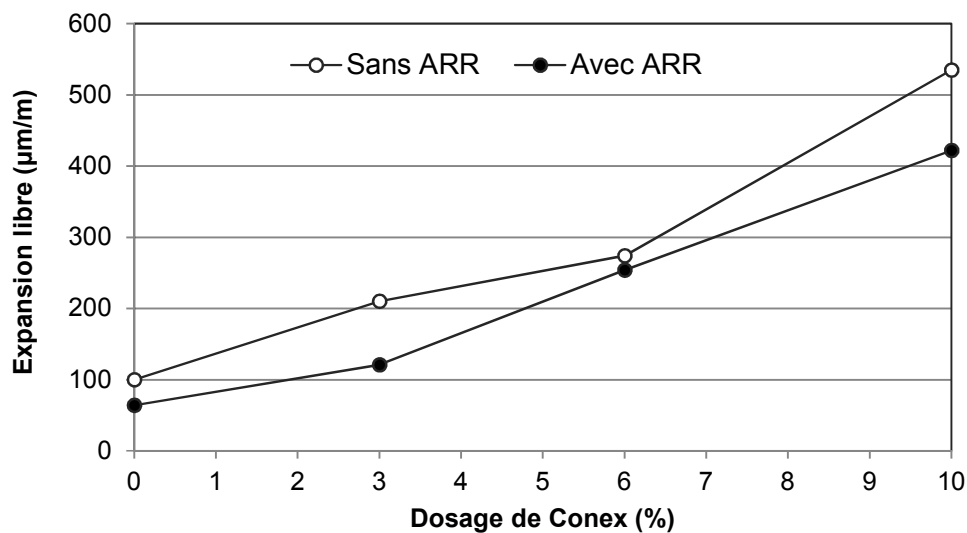


Figure 6.1 - Expansion libre avec et sans ARR mesurée à l'aide des capteurs à corde vibrante

6.2 Influence du *Conex* et de l'ARR sur l'expansion restreinte des bétons

La figure 6.2 présente l'expansion restreinte des bétons avec et sans ARR. Dans le cas des bétons sans ARR, on observe à nouveau, que plus le dosage en *Conex* augmente, plus l'expansion restreinte est importante. Elle varie de 71 $\mu\text{m/m}$ à 472 $\mu\text{m/m}$. L'ajout de l'agent réducteur de retrait provoque à nouveau une légère diminution de l'expansion restreinte qui varie d'environ 13 μm à 112 μm . Les courbes de la figure 6.2 montrent que la diminution de l'expansion restreinte due à l'ARR n'est globalement pas proportionnelle à l'expansion ou au dosage en *Conex*.

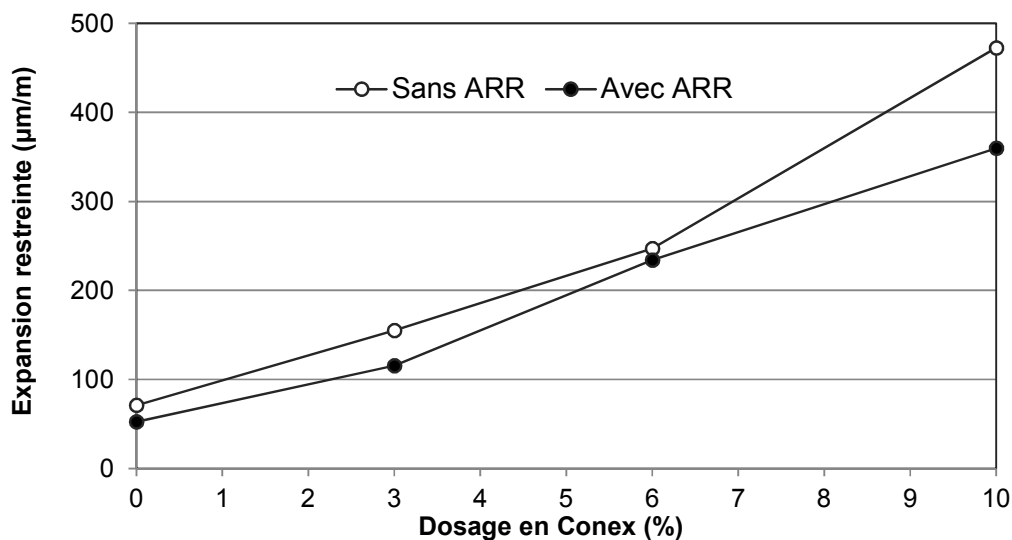


Figure 6.2 - Expansion restreinte avec et sans ARR selon la procédure ASTM C878

6.3 Influence du *Conex* et de l'ARR sur les expansions libres et restreintes des bétons

La figure 6.3 résume tous les résultats d'expansion libre et restreinte des bétons de cette étude.

Pour un dosage en *Conex* donné, les expansions libres et restreintes les plus importantes sont obtenues sans ARR. L'ajout de 2% d'ARR diminue systématiquement les expansions libres et restreintes. La figure 6.3 montre une tendance quasi systématique de l'influence de l'ARR et de la restriction sur les expansions des bétons avec ou sans

Conex. En effet, pour un dosage en *Conex* donné, l'expansion libre sans ARR est la plus importante. On mesure ensuite une légère diminution de l'expansion avec la condition restreinte sans ARR. La condition d'expansion libre avec ARR occupe la troisième place. Les expansions les plus faibles sont finalement obtenues avec la condition restreinte avec ARR. Globalement on remarque que l'ajout d'une restriction interne et d'ARR diminuent les expansions. L'effet de ces deux variables semble approximativement de même intensité sur la diminution des expansions.

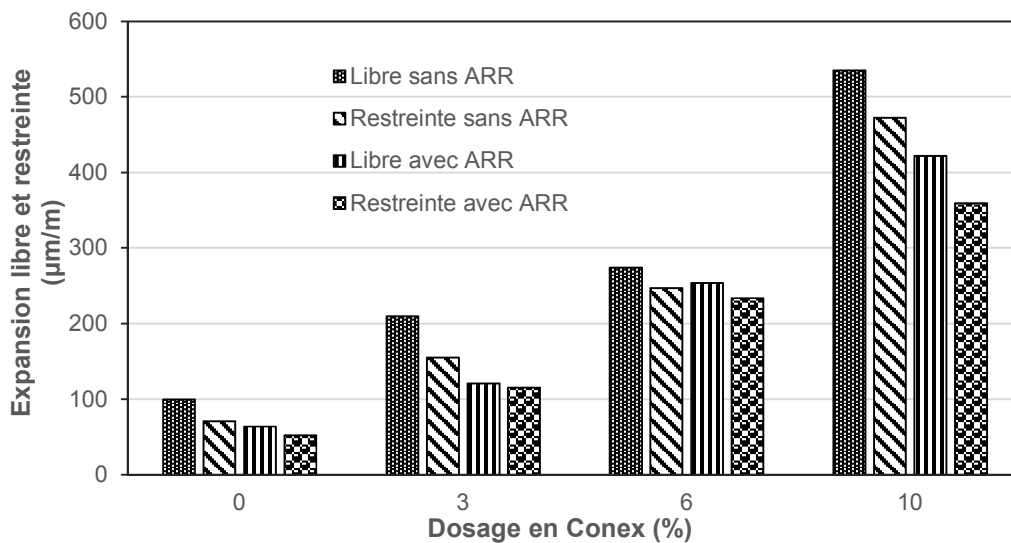


Figure 6.3 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur les expansions libres et restreintes

6.4 Influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage

6.4.1 Influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage selon la procédure ASTM C157

Le retrait de séchage correspond à la variation de longueur qui débute à la fin du mûrissement humide à 7 jours. Pour pouvoir mieux analyser les effets du *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage, des courbes de retraits de séchage ont été calculées en attribuant une déformation nulle (0 µm) à l'instant de la première mesure, immédiatement à la fin du mûrissement humide. Selon cette approche, la déformation qui survient par la suite est donc associée au retrait de séchage. Les courbes ainsi obtenues ont toutes pour

origine le point (d, 7d), ce qui facilite leur comparaison au niveau de la cinétique et de l'intensité du retrait.

La figure 6.4 montre l'influence du *Conex* sur la cinétique du retrait de séchage à 1 an. La cinétique est globalement très similaire pour tous les bétons. Cependant, le retrait de séchage à 1 an du béton de référence est légèrement supérieur à celui des bétons avec *Conex*. Globalement, ces résultats suggèrent que l'ajout du *Conex* pourrait diminuer légèrement l'intensité du retrait de séchage. Mais la diminution du retrait n'est pas proportionnelle au dosage en *Conex*.

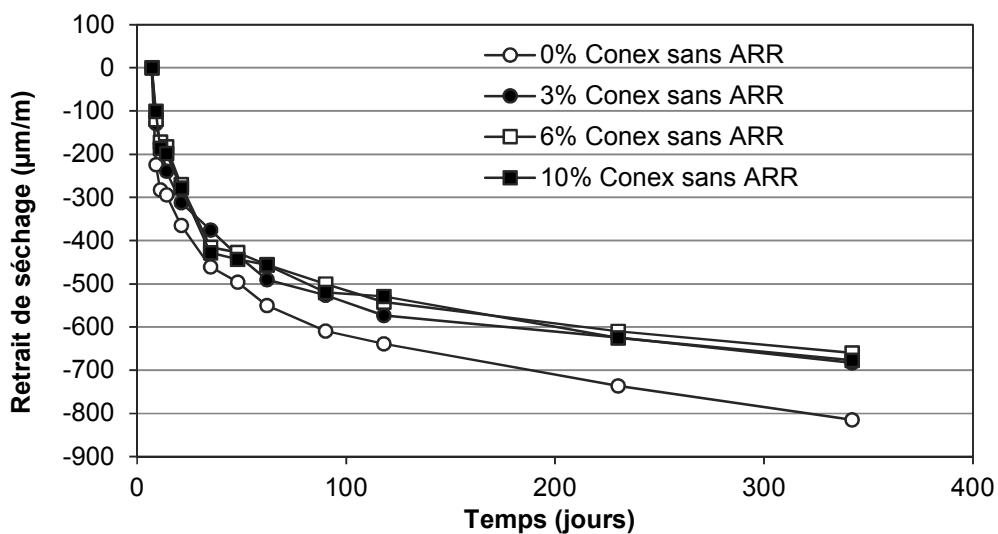


Figure 6.4 - Influence du dosage en *Conex* sans ARR sur le retrait de séchage des bétons

La figure 6.5 présente les courbes de retrait des bétons avec l'agent réducteur de retrait. Les courbes montrent que la cinétique du retrait de séchage est très similaire pour tous les bétons durant les 120 premiers jours de séchage.

Après 224 jours de séchage, on remarque que le béton de référence sans *Conex* possède le plus fort retrait de séchage. Ces courbes montrent à nouveau qu'en présence de l'ARR, l'utilisation du *Conex* tend à diminuer le retrait de séchage. La réduction est d'environ 50 $\mu\text{m/m}$ pour le dosage de 3% et de 150 $\mu\text{m/m}$ pour les dosages 6% et 10% de *Conex*.

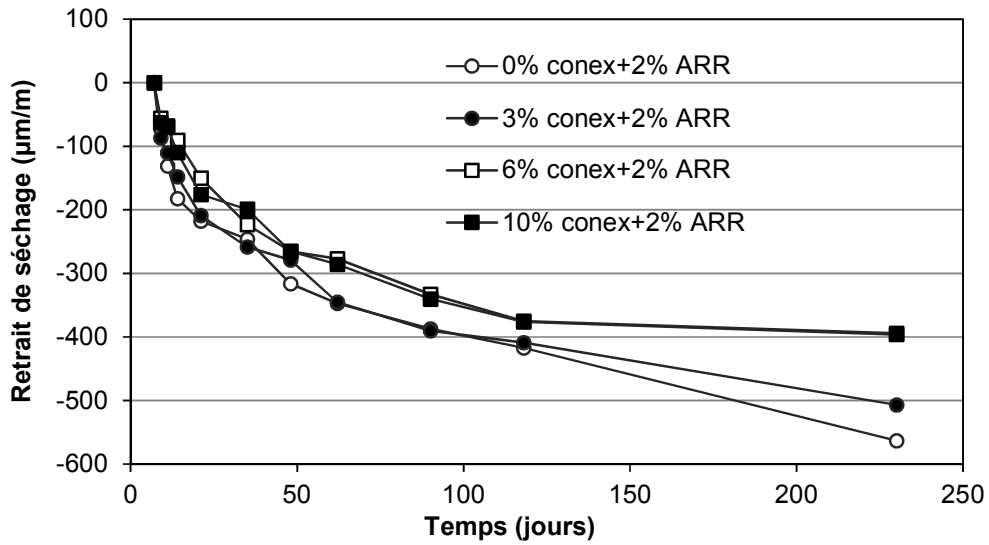


Figure 6.5 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage

Le *Conex* et l'ARR influencent le retrait de séchage de manière différente en fonction de la durée de séchage. Les figures 6.6 et 6.7 résument les effets du *Conex* et du ARR sur l'intensité du retrait de séchage au jeune âge (7 jours, figures 6.6) et à plus long terme (224 jours, figures 6.7).

Après 7 jours de séchages, les dosages en *Conex* de 3%, 6%, 10% produisent une diminution moyenne de retrait d'environ 100 µm/m, soit une diminution de 30%. Un plus fort dosage en *Conex* ne produit pas nécessairement un plus faible retrait de séchage. L'ajout de 2% d'ARR engendre une diminution supplémentaire du retrait de séchage. Pour un dosage en *Conex* donné, la diminution moyenne due à l'ARR est d'environ 40% à 7 jours. Globalement, par rapport au béton de référence sans *Conex* et sans ARR, l'utilisation de 2% d'ARR avec 6% ou 10% *Conex* diminue le retrait de séchage à 7 jours de plus de 60%.

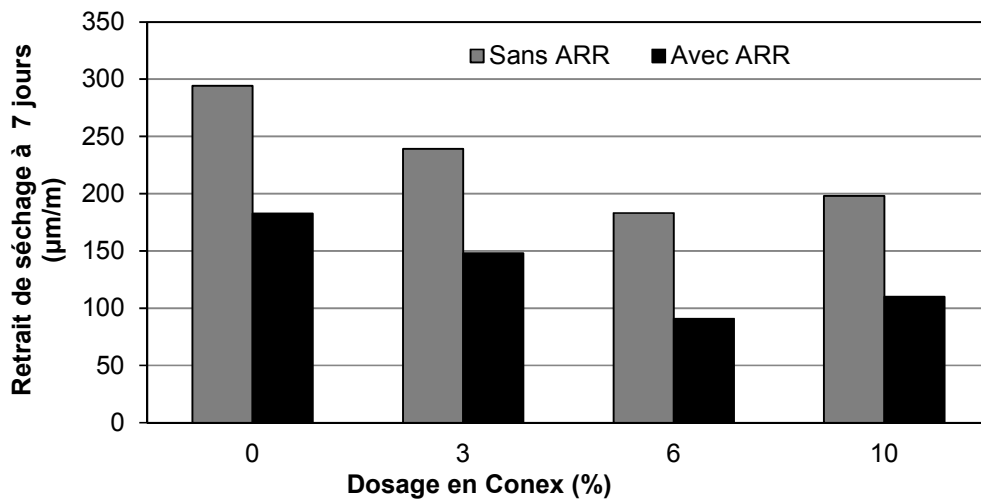


Figure 6.6 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage à 7 jours

Après 224 jours (figure 6.7) de séchages, on remarque à nouveau la même tendance à l'effet que l'ajout de *Conex* et l'ajout de l'ARR engendrent séparément une diminution du retrait de séchage. Cependant à 224 jours de séchage, la diminution relative est plus faible que la diminution mesurée à 7 jours. L'ajout de 3%, 6%, 10% de *Conex* diminue le retrait d'environ 100 µm/m soit environ 15% du retrait du béton de référence (sans *Conex*). L'ajout de l'ARR dans les bétons avec 6% et 10% *Conex* produit une diminution moyenne du retrait d'environ 200 µm/m, soit environ 33% du retrait du béton de référence (sans *Conex* ni ARR).

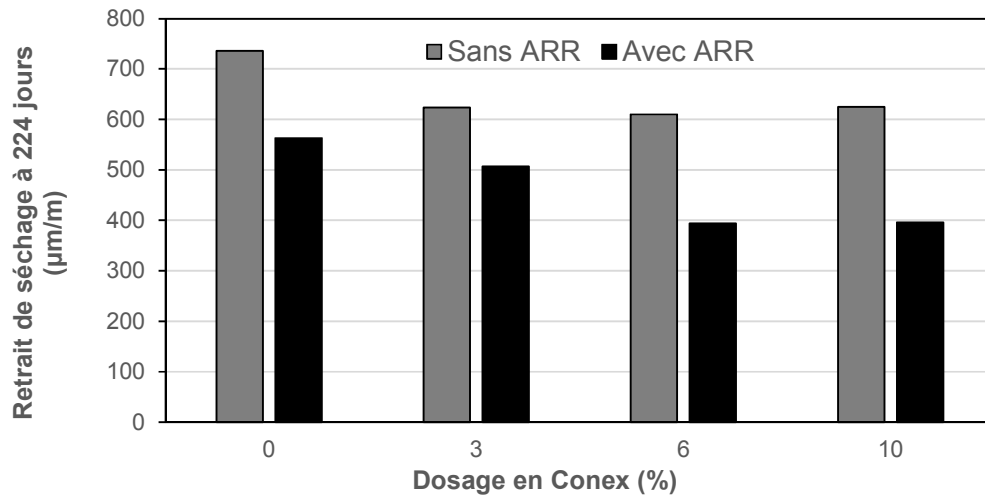


Figure 6.7 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage à 224 jours

Au niveau de la diminution du retrait de séchage, c'est l'utilisation de l'ARR qui est l'approche la plus efficace. La figure 6.8 permet de mettre en évidence l'effet de l'ARR sur le retrait de séchage d'un béton avec 6% *Conex*. L'effet de l'ARR apparaît dès les premiers jours de séchage ou la pente de la courbe de retrait est nettement plus faible lors des 2 premiers jours de séchage. Par la suite l'écart augmente plus lentement. Après 224 jours de séchage, la diminution du retrait due à l'ARR est d'environ 200 µm/m, soit environ 33% du retrait de séchage du béton sans ARR (figure 6.8)

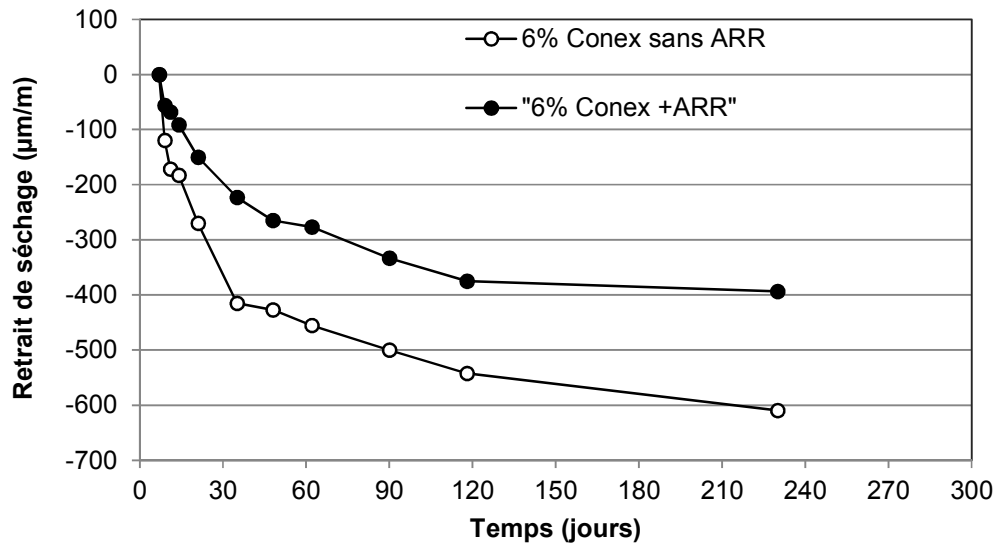


Figure 6.8 - Influence de 6% *Conex* avec ou sans ARR sur le retrait de séchage

La figure 6.9 présente l'influence de l'ARR sur la réduction du retrait de séchage. La réduction du retrait est exprimée en pourcentage du retrait de séchage d'un béton sans ARR. Chaque point sur la figure 6.9 est la moyenne des réductions calculées pour tous les dosages en *Conex* (0%, 3%, 6%, 10%). On remarque une tendance assez nette quant à l'effet de l'ARR sur la réduction du retrait en fonction de la durée du séchage. Au jeune âge (7 jours de séchage), l'ARR (2%) engendre une diminution de plus de 40% du retrait de séchage. A plus long terme la diminution est d'environ 30%.

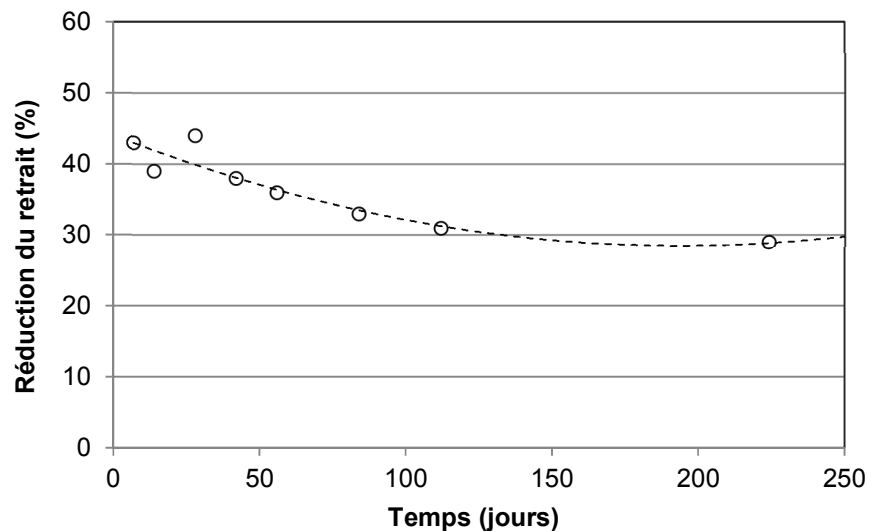


Figure 6.9 - Influence de l'ARR sur la diminution du retrait de séchage des bétons avec et sans *Conex* (Mesure ASTM C157)

6.4.2 Influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage à partir des données obtenus avec les capteurs à corde vibrante

Les capteurs à corde vibrante ont été utilisés pour mesurer et calculer le retrait de séchage des bétons. La figure 6.10 présente les courbes de retrait de séchage des bétons avec et sans ARR. Globalement, les courbes sont très similaires et proches les unes des autres. On ne peut pas dégager une tendance nette à propos de l'effet du *Conex* sur le retrait de séchage. Ces résultats diffèrent de ceux qui ont été obtenus avec l'essai ASTM. En effet avec l'essai ASTM, le retrait de séchage des bétons avec *Conex* était légèrement inférieur à celui du béton de référence, ce qui n'apparaît pas dans le cas du retrait de séchage mesuré avec la corde vibrante.

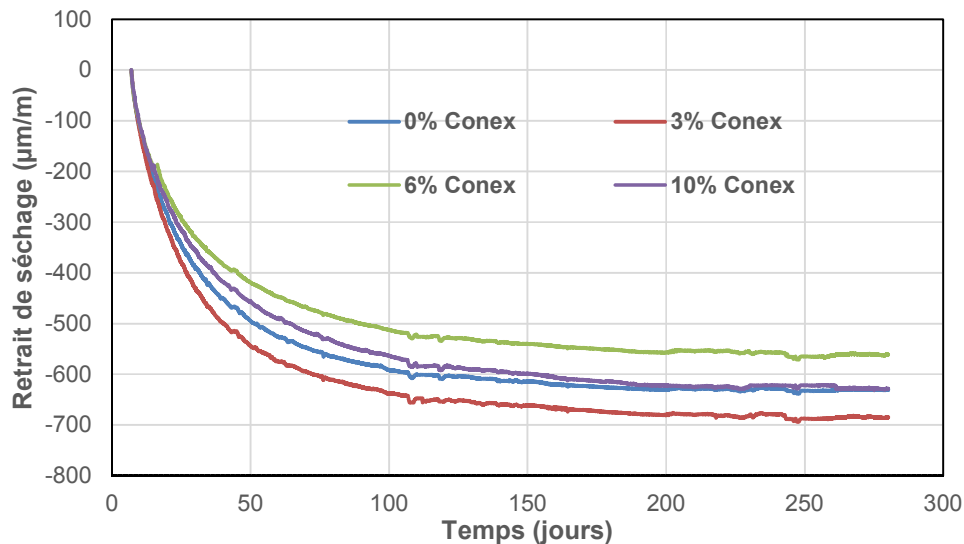


Figure 6.10 - Influence du dosage en *Conex* sans ARR sur le retrait de séchage des bétons

Les courbes de retrait de séchage des bétons avec *Conex* et l'ARR sont présentées à la figure 6.11. De nouveau, on constate que toutes les courbes sont très proches les unes des autres, ce qui suggère que le dosage en *Conex* n'a pas d'influence sur la cinétique et l'intensité du retrait de séchage. On constate cependant que l'ajout de l'ARR diminue l'intensité du séchage qui atteint environ 450 $\mu\text{m/m}$ dans le cas des bétons avec ARR et qui était d'environ 650 $\mu\text{m/m}$ en l'absence d'ARR (figure 6.10).

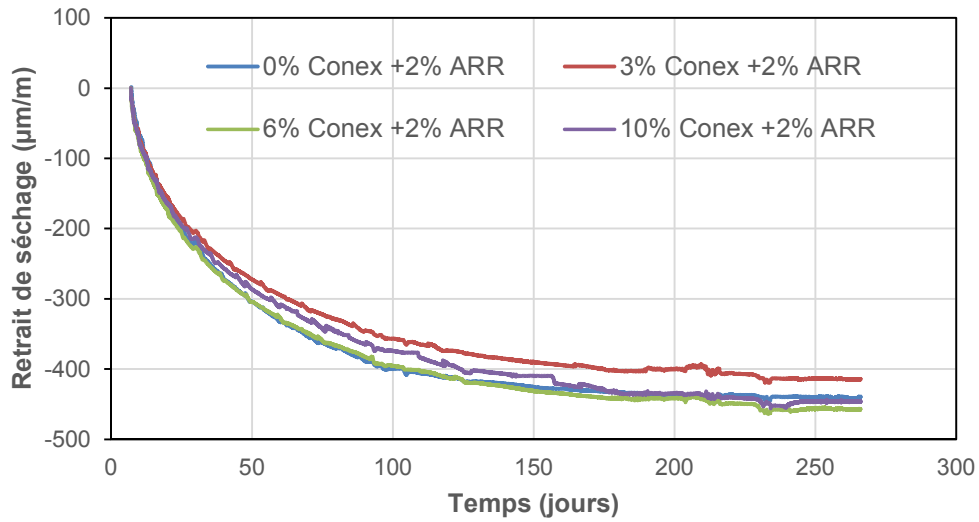


Figure 6.11 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage des bétons

La figure 6.12 montre l'effet de l'ARR sur le retrait de séchage à 7 jours, mesuré à l'aide des capteurs à cordes vibrantes. On constate clairement que l'ajout de 2% d'ARR diminue fortement le retrait de séchage à 7 jours. Cet effet a aussi été constaté à partir des mesures obtenues avec l'essai ASTM C157 (figure 6.6). Il n'est pas possible d'établir une tendance nette sur l'effet du dosage en *Conex*, sur le retrait de séchage à 7 jours des bétons avec ARR.

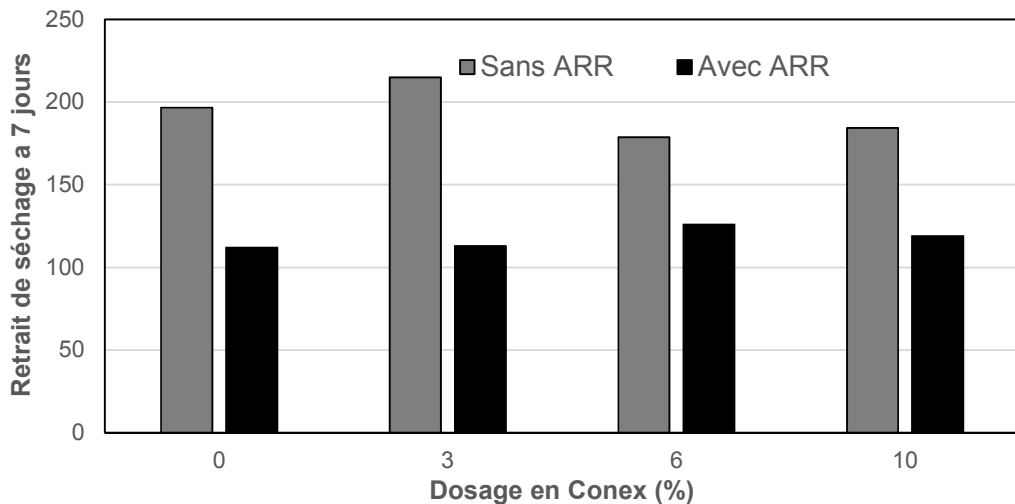


Figure 6.12 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage à 7 jours

La figure 6.13 montre l'influence de l'ARR sur le retrait de séchage à 224 jours, mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante. Bien évidemment le retrait à 224 jours est plus important que le retrait à 7 jours (figure 6.12). On constate de nouveau qu'il n'y a pas d'effet important du dosage en *Conex* et que l'ajout de l'ARR diminue systématiquement le retrait de séchage pour un dosage en *Conex* donné.

Globalement ces résultats concordent bien avec ceux déjà obtenus avec la procédure ASTM C157 par la mesure du retrait de séchage.

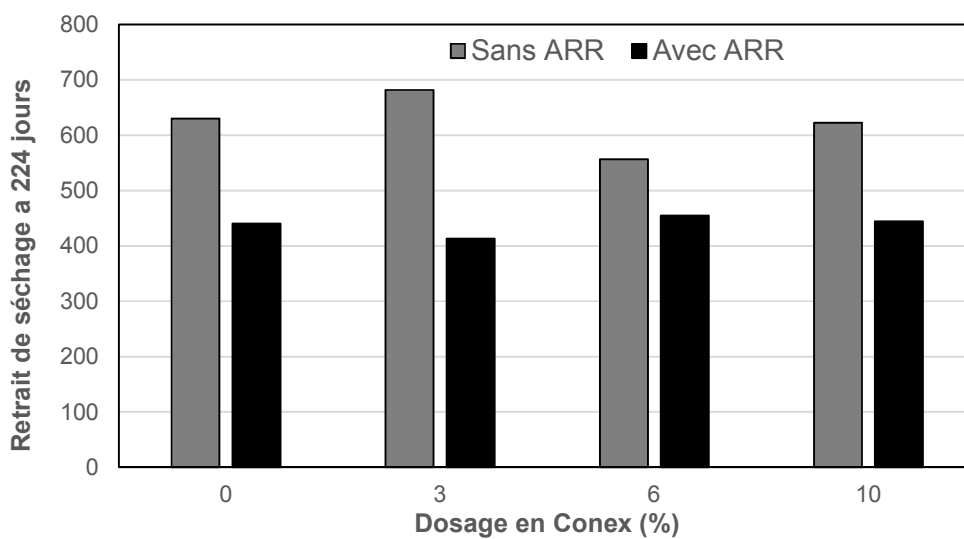


Figure 6.13 - Influence du dosage en *Conex* et de l'ARR sur le retrait de séchage à 224 jours

La figure 6.14 présente un exemple du développement du retrait de séchage de deux bétons contenant 6% de *Conex* et fabriqué avec et sans ARR. Le béton avec ARR développe un retrait de séchage nettement plus faible. On remarque que l'écart se développe principalement durant les 100 premiers jours de séchage. Ce résultat suggère que l'ARR agit principalement durant la première phase du développement du retrait de séchage.

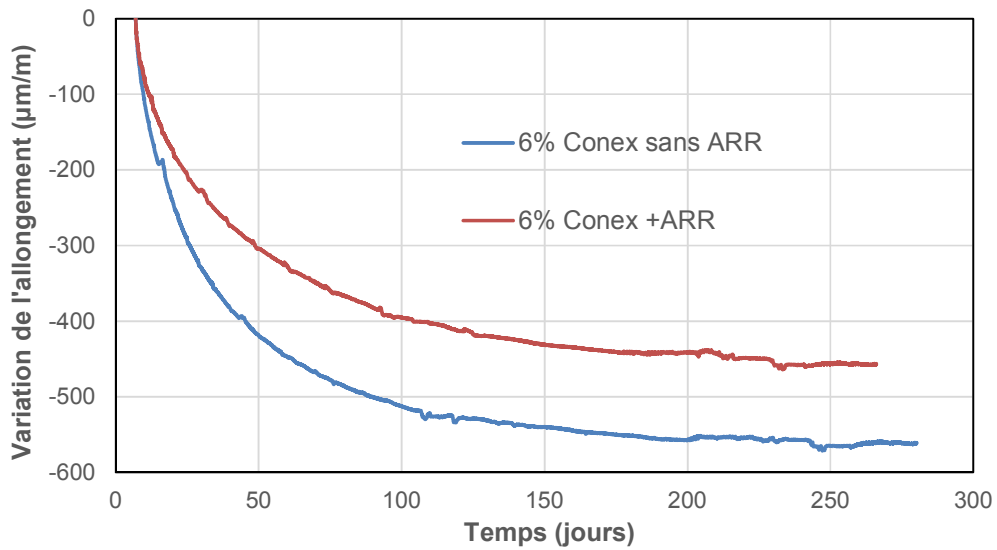


Figure 6.14 - Influence de 6% *Conex* avec ou sans ARR sur le retrait de séchage

Les mesures avec les capteurs à corde vibrante ont été utilisées pour évaluer l'influence de l'ARR sur la diminution du retrait de séchage à différents âges (figure 6.15). On remarque que l'efficacité de l'ARR est plus importante au jeune âge (7 à 28 jours) qu'à un âge plus avancé. En effet, entre 7 et 28 jours de séchages, l'ARR peut diminuer le retrait d'environ 40%, alors que la diminution est d'environ 30% à 224 jours de séchage. Ces résultats obtenus avec les capteurs à corde vibrante sont très similaires avec ceux obtenus avec les mesures ASTM C157 (figure 6.9)

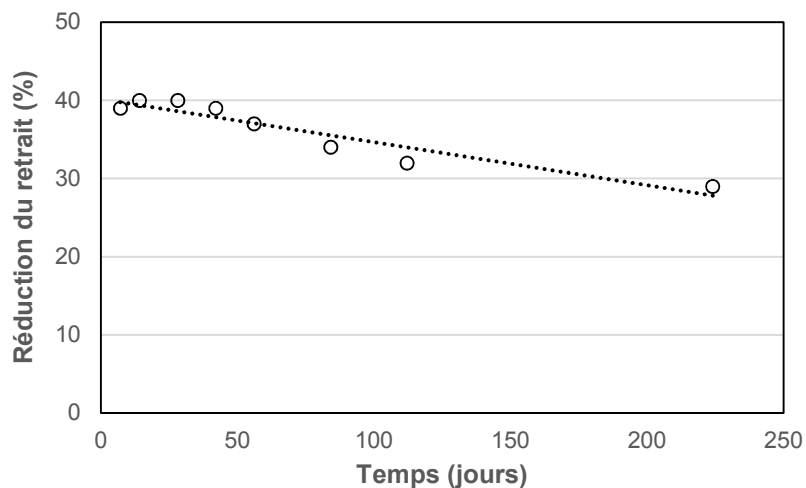


Figure 6.15 - Influence de l'ARR sur la diminution du retrait de séchage des bétons avec et sans *Conex* (Mesure avec les capteurs à corde vibrante)

6.4.3 Étude comparative des différentes méthodes pour la mesure du retrait de séchage

Le retrait de séchage a été mesuré en utilisant la procédure ASTM C157 et utilisant des capteurs à corde vibrante noyés dans les éprouvettes de bétons. Les figures 6.16 et 6.17 permettent de comparer le retrait de séchage mesuré selon ces deux procédures avec tous les bétons. La figure 6.16 présente la comparaison pour les bétons sans ARR et la figure 6.17 présente la comparaison pour les bétons avec ARR. Chaque point sur ces figures correspond à une échéance de mesure selon la procédure ASTM C 157 (axe x). Pour cette même échéance de mesure, on a calculé le retrait de séchage obtenu avec les capteurs à corde vibrante (axe y). La droite apparaissant sur les deux figures est la ligne d'égalité qui indiquerait une correspondance parfaite entre les deux approches de mesure. On a aussi indiqué sur chacune des figures la pente de la droite de corrélation et le coefficient de corrélation (R^2) obtenu.

Dans le cas des bétons sans ARR (figure 6.16), on remarque une légère dispersion des points autour de la ligne d'égalité. La pente de la droite de régression est de 0.99, ce qui indique que les deux méthodes de mesure de retrait de séchage donnent des résultats pratiquement identiques. Il ne semble donc pas y avoir de biais expérimental entre ces deux approches. On remarque aussi que la précision des deux méthodes est approximativement la même. En effet, la dispersion moyenne par rapport à la ligne d'égalité est approximativement la même dans la direction x et la direction y. Des résultats très similaires sont obtenus avec les bétons avec ARR. On constate à nouveau que les points sont bien alignés autour de la droite d'égalité. La pente de la droite de régression est de 0.97, ce qui indique qu'il n'y a pas de biais expérimental important entre ces deux méthodes.

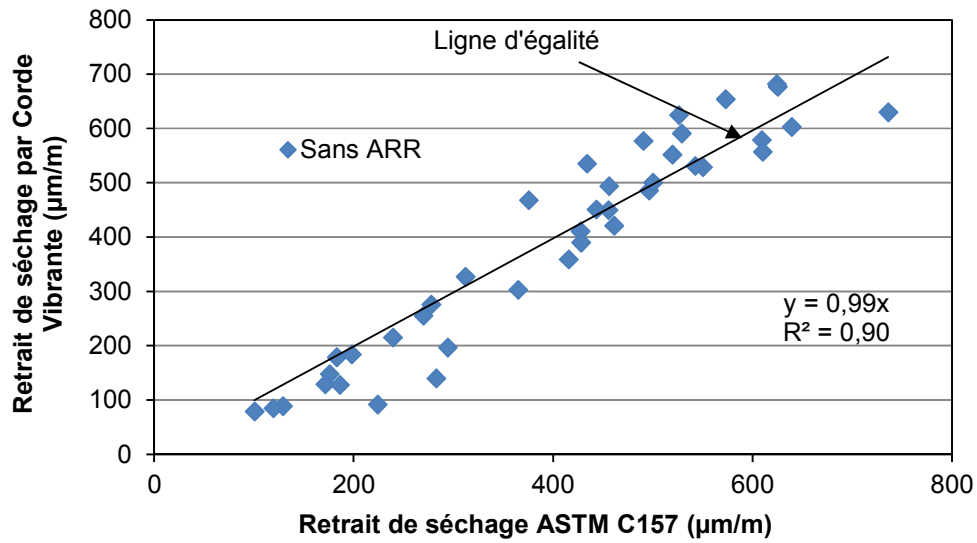


Figure 6.16 - Comparaison entre le retrait de séchage mesuré selon la procédure ASTM C157 et le retrait de séchage mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante (bétons sans ARR)

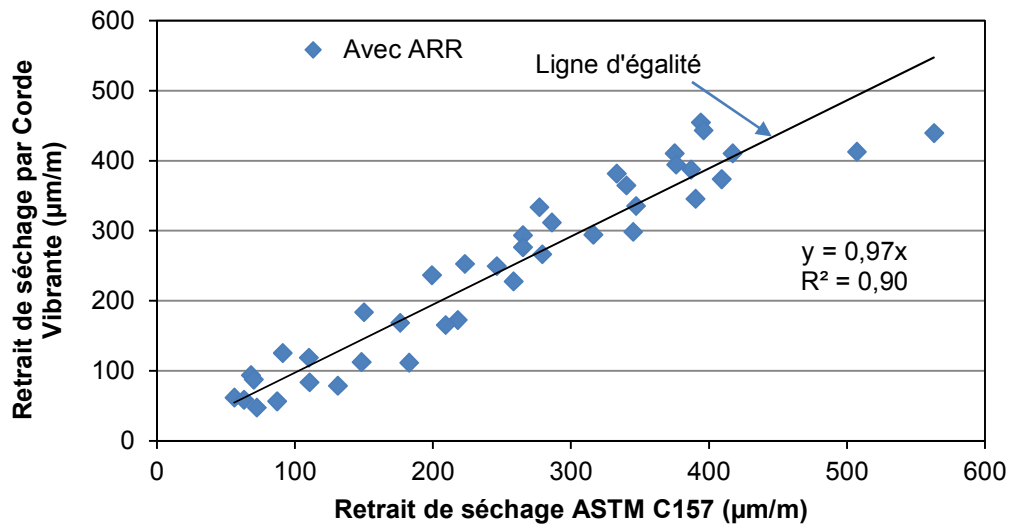


Figure 6.17 - Comparaison entre le retrait de séchage mesuré selon la procédure ASTM C157 et le retrait de séchage mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante (bétons avec ARR)

6.5 Influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait total du béton

6.5.1 Influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait total par l'utilisation des capteurs à corde vibrante

Le retrait total est le type de retrait qui est le plus directement relié aux risques de fissurations. Plus le retrait total est faible, plus le risque de fissuration diminue. Le retrait total est calculé en additionnant l'expansion à 7 jours aux mesures du retrait de séchage.

La figure 6.18 présente l'influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait total à 90 jours des bétons. Les courbes montrent que pour un dosage en *Conex* donné, l'ARR diminue systématiquement le retrait total à 90 jours.

La diminution est comprise entre 75 $\mu\text{m/m}$ et 180 $\mu\text{m/m}$ dépendant du dosage en *Conex*. Cette diminution correspond à une réduction du retrait total comprise entre 35% et 45% dépendant du dosage en *Conex*.

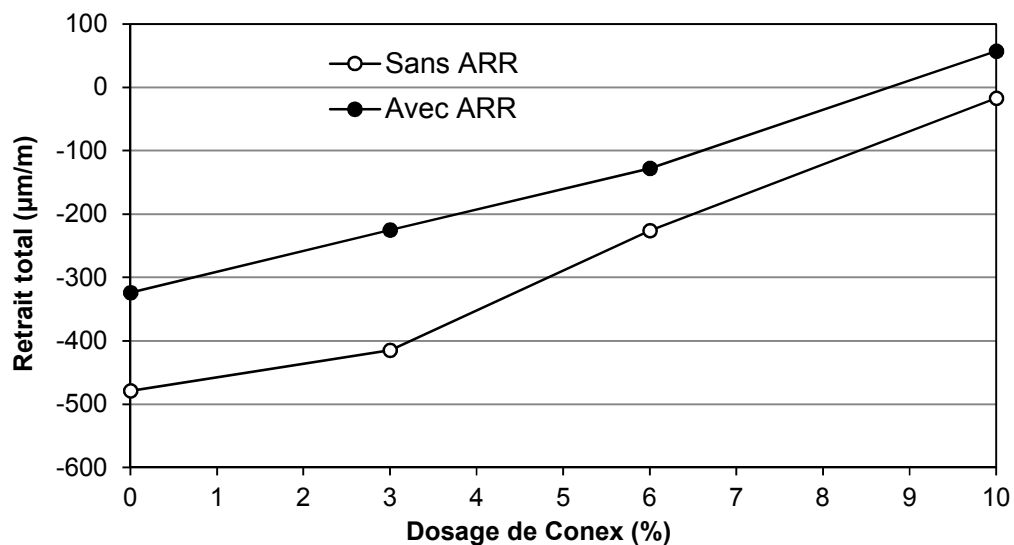


Figure 6.18 - Évolution du retrait total avec et sans ARR en fonction du dosage en *Conex* mesuré à l'aide de capteurs à corde vibrante

Le retrait total au jeune âge influence le risque de fissuration au jeune âge. En pratique, la fissuration due au retrait empêché s'amorce parfois assez rapidement après le début du séchage. Pour évaluer l'influence du *Conex* et de l'ARR sur le risque de fissuration au jeune âge, on a représenté le retrait total après 7 jours de séchage en fonction du dosage

en *Conex* et de l'ARR (figure 6.19). Les résultats de la figure 6.19 montrent qu'en l'absence du *Conex* il y a déjà un retrait total de 100 $\mu\text{m/m}$ (sans ARR) et 50 $\mu\text{m/m}$ (avec ARR) même après seulement 7 jours de séchage. Pour un dosage en *Conex* de 3%, le retrait total est nul (avec et sans ARR). Après 7 jours de séchage, l'utilisation de 6% et 10% *Conex* ne produit pas de retrait total, mais plutôt une expansion qui atteint plus de 80 $\mu\text{m/m}$ avec 10% de *Conex*.

Globalement ces résultats montrent que l'utilisation de 3%, 6% et 10% de *Conex* contribue à diminuer très significativement le risque de fissuration au jeune âge (7 jours de séchage). En effet, dans ces conditions, le retrait total est soit annulé (3 % *Conex*) ou encore remplacé par une expansion pour les dosages en *Conex* de 6% et 10%.

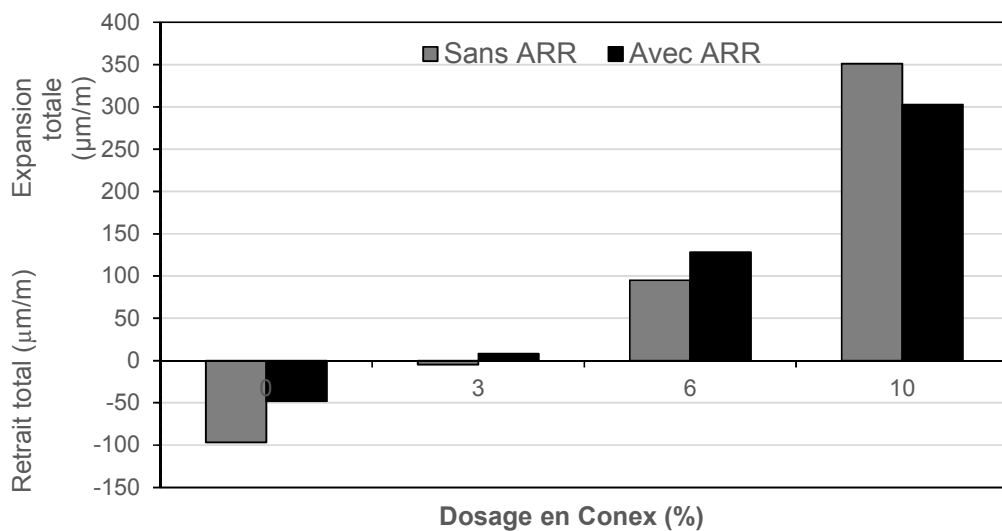


Figure 6.19 - Retrait total avec et sans ARR à 7 jours de séchage

La figure 6.20 présente l'influence du *Conex* et de l'ARR sur le retrait total à plus long terme (224 jours de séchage). On remarque que sans *Conex* le retrait total est important ($> 500 \mu\text{m/m}$) ce qui est caractéristique du retrait d'un béton de 25 MPa. Le risque de fissuration dû au retrait empêché est alors très important. L'ajout de l'ARR diminue le retrait total d'environ 30%.

Les bétons contenant du *Conex* ont un retrait total à 224 jours plus faibles, et l'intensité de ce retrait diminue lorsque le dosage en *Conex* augmente. Dans le cas du dosage du

10% *Conex*, le retrait total devient très faible ($<100 \mu\text{m/m}$) ce qui diminue très significativement le risque de fissuration à long terme.

Pour un dosage en *Conex* donné, on remarque clairement que l'ajout de l'ARR contribue à diminuer davantage le retrait total à long terme. Il est intéressant de noter que l'utilisation de 3% *Conex* et 2% ARR donne un retrait total équivalent à l'utilisation seule de 6% de *Conex* (environ $300 \mu\text{m/m}$).

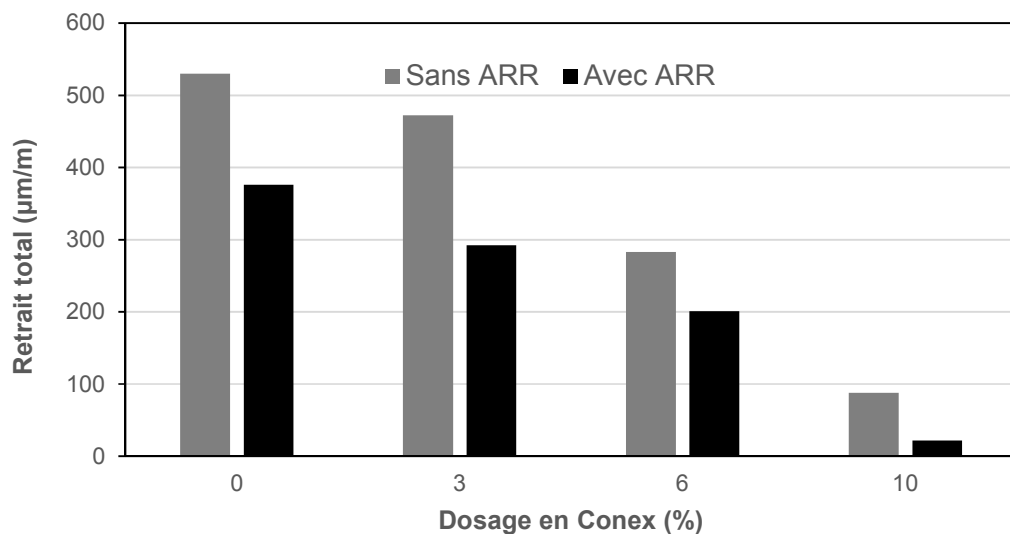


Figure 6.20 - Retrait total avec et sans ARR à 224 jours de séchage

La figure 6.21 montre l'influence du ARR sur la diminution du retrait total des bétons avec et sans *Conex* après 224 jours de séchage. Pour une durée de séchage donné, on indique la diminution moyenne du retrait total pour tous les dosages en *Conex* (0%, 3%, 6% et 10%). L'influence de l'ARR est plus importante au jeune âge. Après 28 jours de séchage, les résultats montrent que l'ARR contribue à diminuer le retrait total d'environ 40%.

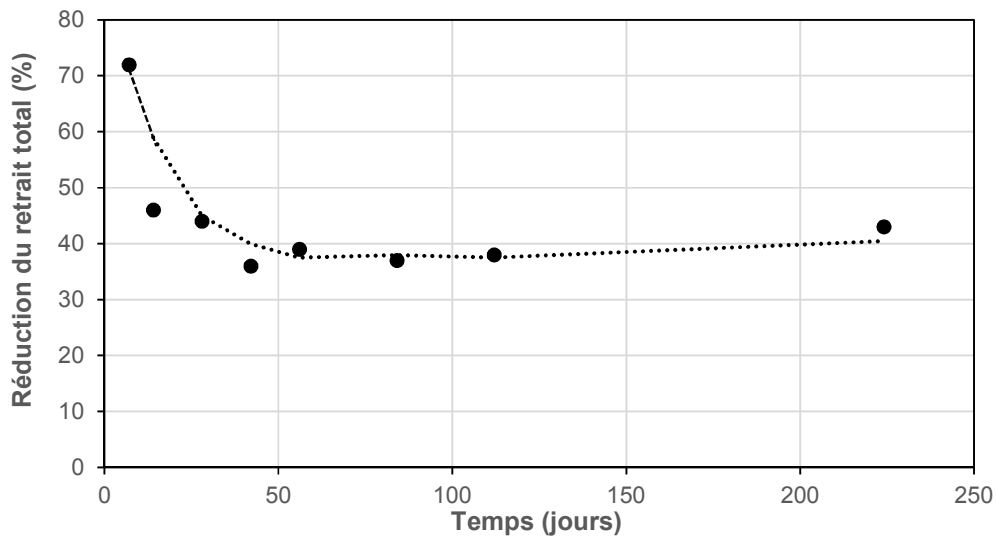


Figure 6.21 - Influence de l'ARR sur la diminution du retrait total des bétons avec et sans *Conex*

6.5.2 Étude comparative des différentes méthodes pour la mesure du retrait total

Dans le cadre de ce projet, le retrait total a été déterminé à partir des lectures des capteurs à corde vibrante ou à partir des mesures selon la procédure ASTM C157. Les figures 6.22 et 6.23 permettent de comparer l'intensité du retrait total selon que celui-ci a été déterminé avec une ou l'autre des deux approches.

La figure 6.22 montre la comparaison du retrait total des bétons sans ARR. La ligne d'égalité indique une concordance parfaite des deux approches.

On constate que les points expérimentaux sont tous localisés sous la ligne d'égalité. Ceci indique que le retrait total mesuré selon l'approche ASTM C157 est systématiquement supérieur à celui mesuré à l'aide des capteurs à corde vibrante. La cause de cette différence a déjà été expliquée auparavant. L'écart résulte du fait que la procédure ASTM C157 ne permet pas de mesurer toute l'expansion initiale. Puisque celle-ci est sous-estimée, il en résulte un retrait total plus important.

Les capteurs à corde vibrante sont capables de mesurer toute l'expansion initiale. Cette expansion initiale annule une partie du retrait total. Le retrait est donc mieux évalué avec les capteurs à cordes vibrante. En moyenne, l'erreur commise en déterminant le retrait total en utilisant les mesures ASTM C157 est une surestimation du retrait d'environ 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ (figure 6.22).

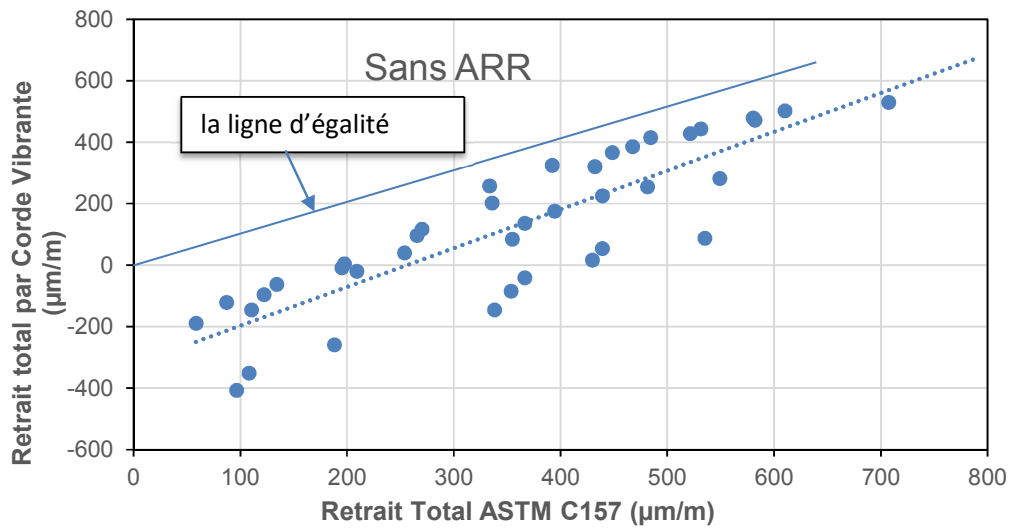


Figure 6.22 - Étude comparative des deux méthodes utilisées par la mesure du retrait total sans ARR en un nuage de points

La comparaison obtenue avec les bétons avec ARR (figure 6.23) est très similaire. On constate à nouveau que le retrait total déterminé selon la procédure ASTM C157 est systématiquement surestimé. L'écart entre les deux approches est une surestimation d'environ 150 $\mu\text{m/m}$ à 200 $\mu\text{m/m}$ dans le cas de la procédure ASTM C157.

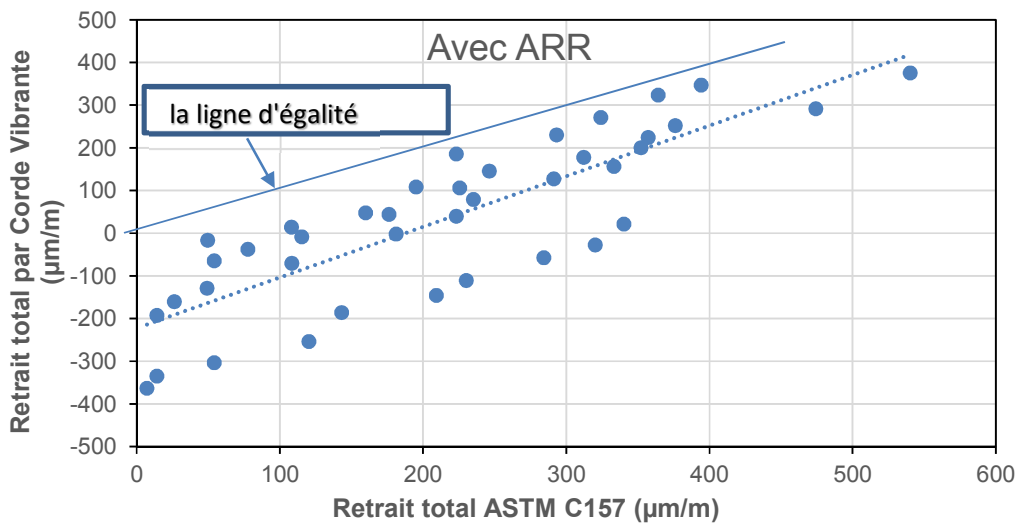


Figure 6.23 - Étude comparative des deux méthodes utilisées par la mesure du retrait total avec ARR en un nuage de points

7. CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent de mieux comprendre les effets de l'agent d'expansion interne (*Conex*) et l'agent réducteur de retrait (ARR) sur les propriétés, les variations volumiques (libres et restreintes) du béton, le retrait total et le retrait de séchage.

Les bétons formulés ont une classe de résistances mécaniques de 25 MPa sans air entraîné. L'utilisation du *Conex* n'a pas d'effet significatif sur l'affaissement, le pourcentage d'air et la résistance à la compression. L'ajout d'un réducteur de retrait produit une augmentation de l'affaissement, n'a pas d'influence significative sur le volume d'air et conduit à une diminution de 15% de la résistance à la compression à 28 jours.

Ce projet de recherche a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- L'agent d'expansion *Conex* produit une expansion interne qui survient principalement durant les 24 premières heures suivant le contact eau-ciment. L'expansion est approximativement proportionnelle au dosage exprimé en pourcentage massique de la masse du liant.
- L'intensité de l'expansion peut être précisément mesurée à l'aide des capteurs à cordes vibrantes noyés dans des éprouvettes prismatiques. La procédure d'essai ASTM C157 ne doit pas être utilisée pour caractériser l'expansion des bétons fabriqués avec un agent d'expansion de type G.
- Pour un dosage en *Conex* donné, l'expansion restreinte mesurée selon la procédure ASTM C878 est toujours plus faible que l'expansion libre mesurée à l'aide des capteurs à cordes vibrantes.
- L'effet de la restriction interne sur l'expansion est cependant relativement faible. En effet, la diminution de l'expansion est comprise entre 90 et 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, quel que soit le dosage en *Conex*. Ces résultats démontrent que l'expansion interne produit une contrainte interne suffisamment importante pour pleinement solliciter la tige métallique interne et ainsi engendrer une précontrainte chimique de compression dans le béton.

- L'ajout d'un ARR dans un béton avec *Conex* a pour effet de diminuer légèrement l'expansion initiale. Cette diminution se produit à la fois dans le cas de l'expansion libre et dans le cas de l'expansion restreinte. La diminution des expansions due à l'ARR est cependant relativement faible puisqu'elle est d'environ 50 à 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, quel que soit le dosage en *Conex*.
- L'utilisation du *Conex* ne modifie pas significativement la cinétique ni l'intensité du retrait de séchage.
- L'utilisation du *Conex* contribue à diminuer significativement le retrait total car l'expansion initiale peut annuler une partie ou même la totalité du retrait de séchage qui survient après le mûrissement humide jusqu'à 224 jours.
- L'ajout de l'ARR dans les bétons avec ou sans *Conex* engendre une diminution de 30% à 40% du retrait de séchage. La diminution de 40% est obtenue au jeune âge (7-28 jours) et la diminution de 30% est obtenue à plus long terme (224 jours).
- L'utilisation combinée de 3% de *Conex* et 2% d'ARR produit un retrait total équivalent à celui obtenu avec 6% de *Conex* sans ARR.
- Les capteurs à corde vibrante et la procédure d'essai ASTM C157 donnent des mesures très proches avec des correspondances pour la caractérisation du retrait de séchage.
- La procédure d'essai ASTM C157 ne doit pas être utilisée pour tenter de caractériser l'expansion libre des bétons avec agent d'expansion interne. Cette procédure ne convient pas non plus pour caractériser le retrait total des bétons avec agent d'expansion interne.

RÉFÉRENCES

1. ASTM C 157, (2004). Test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. ASTM, Vol. 04.01.
2. ASTM C 878, (2003). Test method restrained expansion of shrinkage-compensating concrete. ASTM, Vol 04.02.
3. ASTM C 192, (2002). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
4. ACI Committee 223, (1998). Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pages 1-28.
5. ACI 223-93, (1994). Standard Practice for the Use Shrinkage-Compensating Concrete. Manual of Concrete Practice Part 1: Material and General Properties of Concrete, Detroit (MI), page 26.
6. Aïtcin, P.C.; Neville, A.M.; Acker, P. (1997). Integrated view of shrinkage deformation, concrete international, vol.19, n°9, pages 35-41.
7. Apaya, I., (2011). Retrait endogène et de séchage des BAP à air entraîné contenant divers composés organiques comme anti-retrait. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
8. Aï, H.; Young, J. F. (1997). Mechanisms of shrinkage reduction using a chemical admixture, in Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, H. Justnes, editor, Gothenburg, Sweeden, vol.3.
9. Aouad, I. (1998). Étude de l'influence du rapport eau/liant, de la fumée de silice et d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de pâtes de ciment. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec.
10. Bissonnette, B.; Perez, F.; Blais, S.; et Gagné, R. (2008). Évaluation des bétons à retrait compensé pour les travaux de réparation. CRIB - Université Laval et de Sherbrooke, Département de génie civil, Québec, Canada, pages 2-36.
11. Blais S. (2010). Étude sur l'utilisation des bétons à retrait compensé dans le domaine de réparations minces de béton. Mémoire de maîtrise. Département de génie civil, Faculté des sciences et génies, université Laval, Québec.
12. Baroghel-Bouny, V.; Godin, J. (1998). Nouvelle approche expérimentale du retrait de dessiccation des pâtes et des bétons durcis ordinaires et à très hautes performances. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°218.
13. Buil, M. (1979). Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante. Rapport de recherche LCPC, n°92.
14. Bentz, D. P.; Geiker, M. R.; and Hansen, K. K. (2001). Shrinkage-Reducing Admixtures and Early-Age Desiccation in Cement Paste and Mortars. Cement and Concrete Research, V. 31, N°7, pages 1075-1085.

15. Collepardi, M.; Borsoi, A.; Collepardi, S.; Ogoumah Olagot, J. J. and Troli, R. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*. Vol 27, No. 6, pages 704-708.
16. Collepardi, M.; Troli, R.; Bressan, M.; Liberatore, F.; Sforza, G. (2008). Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing and contraction joints. *Cement and Concrete Composites*. Vol 30, pages 887-891.
17. Chatterji, S. (1995). Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt Cao and Mgo. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25, No. 1, pages 51-56.
18. Chatterji, S. and Jeffery, J.W. (1966). The volume expansion of hardened cement paste due to the presence of "dead-burnt" CaO. *Magazine of Concrete Research*, 18 (55), pages 65-68.
19. Cerulli, T.; Pistolesi, C.; Maltese, C.; Salvioni, D. (2001). Effects of shrinkage reducing admixtures on the physical mechanical properties of mortars, in: L. Jany, A. Nisperos (Eds.), *ICMA International Conference on Cement Microscopy*, New Mexico, pages 58–76.
20. Copeland, L.E. et Bragg, R.H. (1955). Self-desiccation in Portland Cement Pastes, Research Department bulletin RX052, Portland Cement Association.
21. Coussy, O., (1995). *Méchantes of porous continua*. J. Wiley and Sons, Chlchester, UK.
22. Coussy, O.; Eymard, R.; Lassabatère, T. (1998). Constitutive modeling of unsaturated drying deformable materials, *Journal of Engineering Méchantes*, ASCE, vol. 124, n°6, pages 658-667.
23. Deng, M.; Hong, D.; Lan, X.; Tang, M.; (1995). Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime. *Cement and Concrete Research*. Vol 25, N° 2, pages 440-448.
24. Evans, D.F.; Wennerström, H. (1999). *The Colloid Domain*, 2nd Ed. Wiley-VCH, New York.
25. Fu, Y.; Xie, P.; Gu, P. and Beaudoin, J. J. (1994). *Gem. Concrete*. REX. 24 (2), 267.
26. Fattahi, S. (2015). *Étude de l'autocicatrisation de mortiers contenant des additions réactives*. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke, Québec.
27. Gagné, R.; Morin, R. (2005). Resurfaçage adhérent de tabliers à la ville de Montréal : Suivi des projets du pont du cosmos et des passages inférieurs girouard et cavendish. *Compte-rendu du séminaire ACI - Progrès dans le domaine du béton*, 30 novembre-1er décembre, Montréal, pages 18.
28. Gagné, R. (2013). *Cours GCI 714. Étude de la durabilité des bétons*, Chapitre 2. Université de Sherbrooke, Québec.
29. Gagné, R.; Lauture, F.; Bissonnette, B.; Morency, M. et Morin, R. (2003). Réparation d'un tablier de pont en béton armé à l'aide de resurfaçages minces adhérents : Résultats de la planche d'essais du pont du Cosmos, *INFRA 2003*, 17-19 novembre, Montréal, pages 17.

30. Gagné, R.; Charest N.; Pichette, F.; Bissonnette, B.; Lauture, F.; La Fontaine, F. (2005). Resurfaçage adhérent du tablier du passage inférieur girouard à montréal, pages 1-17.
31. Gagné, R.; Bissonnette, B.; Morin, R.; Thibault, M. (2008). Innovative concrete overlays for bridge-deck rehabilitation in Montréal. CRIB University of Sherbrooke, Laval University, Department of Civil Engineering, Ville de Montréal, Québec, Canada.
32. Gagné, R.; Argouges, M. (2011). Caractérisation des retraits de bétons avec agents expansifs. Département de génie civil, Université de Sherbrooke No de projet UdeS : 08-012 (Euclid), 08-016 (Ciment St-Laurent).
33. Gebber, S.H. et Klieger, P. (1986). Effect of fly ash on durability of air-entrained concrete. Research and Development Bulletin RD090, Portland Cement Association.
34. Gettu, R.; Roncero, J.; and Martin, M. A., (2002). Study of the Behavior of Concrete with Shrinkage-Reducing Admixtures Subjected to Long-Term Drying. Concrete: Material Science to Application-A Tribute to Surendra P. Shah, SP-206, P. Balaguru, A. Naaman, and W. Weiss, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pages 157-166.
35. Hammer, T. A. (1999). Test methods for linear measurement of autogenous shrinkage before setting. Autogenous shrinkage of concrete, E. Tazawa, dir., EFN Spon and Routledge, New York, pages 143-154.
36. Hansen, W., (1987). Drying shrinkage mechanisms in Portland cement paste, Journal of the American Ceramic Society, vol. 70, n°5, pages 323-328.
37. Huheey, J.E. (1995). Inorganic Chemistry, third edition, Harper & Row Publishers, New York, 1983, Ribeiro, M. Sofia, Repair ma Lisbon, July, pages 328.
38. Hua, C. (1992). Analyse et modélisation du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante, Thèse de doctorat, L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, page 160.
39. Holt, Erika E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. VTT Publication 446, Technical Research Center of Finland, Espoo, page 194.
40. Kosmatka S. H.; Kerkhoff B.; Hooton R. D.; McGrath R. J. (2011). Dosage et contrôle des mélanges de béton. Manuel d'application, méthodes et matériaux. Cement Association of Canada. 8^e édition Canadienne, pages 149-165.
41. Konik Z.; Małolepszy J.; Roszczynialski W.; Stok A. (2007). Production of expansive additive to portland cement. Journal of the European Ceramic Society 27, pages 605–609.
42. Lobo, C. and Cohen, M., (1992). Effects of silica fume on expansion characteristics of expansive cement pastes. ACI Materials Jom, 89 pages 481-490.
43. Lobo, C. and Cohen, M. D., (1991). Pore structure development in type K expansive cement pastes, Cement and Concrete Research, 21 (2-3) pages 229-241.
44. Lobo, C., et Cohen, M.D. (1992). Hydration of type K expansive cement paste and the effect of silica fume: I. Expansion and solid phase analysis. Cement and Concrete Research, 22 (5) pages 961- 969.
45. Lobo, C. and Cohen, M. D., (1993). Hydration of type K expansive cement paste and the effect of silica fume: II. Pore solution analysis and proposed hydration mechanism, Cement and Concrete Research, 23 (1) pages 104-114.

46. Lossier, H., (1946). Cements with Controlled Expansions and their Applications to Prestressed Concrete. *The Structural Engineer*, 24, N°10, pages 505-534.
47. Le Chatelier, H. (1900). Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments. *Bulletin société de l'encouragement pour l'industrie nationale*, 5^e série, Tome 5, Paris.
48. Lessard, M. et Gagné, R.; (2009). Les bétons spéciaux de la théorie à la pratique. Séminaire ACI. Université Laval, Québec.
49. Lura, P.; Jensen, O. M., and van Breugel, K., (2003). Autogenous Shrinkage in High-Performance Cement Paste: An Evaluation of Basic Mechanisms, *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 2, pages 223-232.
50. Maltese, C.; Pistolesi, C.; Lolli, A.; Bravo, A.; Cerulli, T.; Salvioni, D. (2005). Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. *Cement and Concrete Research*. Vol 35, pages 2244-2251.
51. Meddah M. S.; Suzuki M.; Ryoichi S. (2011). Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete. *Construction and Building Materials* 25, pages 239-250.
52. Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. 4e édition, pages 446-449.
53. Nmai, C.; Tomita, R.; Hondo, F.; Buffenbarger, J., (1998), Shrinkage reducing admixtures, *Concrete International*, vol 20 n°4, pages 31-37.
54. Rajabipour, F.; Sant, G.; Weiss, J. (2007). Interactions between shrinkage reducing admixtures (ARR) and cement paste's pore solution. *Cement and Concrete Research*. Vol 38, pages 606-615.
55. Ribeiro, M. S. (1998). Expansive cement blend for use in shrinkage compensating mortars. *Matériaux et Constructions*, Vol. 31, pages 400-404.
56. Ribeiro, M. S. (1995). Repair materials of concrete structures, Experimental modelling of an inorganic binder-based mortar. Dissertation for Master's degree in Construction, I.S.T. -Technical University of Lisbon- University of Engineering. Lisbon.
57. Seddik, M.; Ryoichi, S. (2010). Effect of curing methods on autogenous shrinkage and self-induced stress of high-performance concrete. *ACI Materials Journal/January-February*. V. 107, No. 1, pages 65-74.
58. Shoya, M., Sugita, M. (1989). Application of special admixture to reduce shrinkage cracking of air dried concrete, Hachinohe Institute of Technology, Hachinohe, Japan, pages 1-11.
59. Seigneur, V. (2000). Étude de l'influence du mûrissement à l'eau et de l'ajout d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène de bétons à haute performance. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, département de génie civil, Sherbrooke, Québec.
60. Shah, S.P.; Karaguler, M.E. et Sarigaphuti, M. (1992). Effects of Shrinkage-Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete. *ACI Materials Journal*, 89 (3), pages 289-295.

61. Sant, G.; Rajabipour, F.; Lura, P.; and Weiss, J. (2007). Volume Changes in Pastes Containing Shrinkage Reducing Admixtures under Autogenous and Drying Conditions,” 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, QC, Canada, page 12 (electronic *Proceedings*).
62. The Euclid Chemical Company. *Conex* Adjuvant réducteur et compensateur de retrait. Euclid Concrete Admixtures, Révision: 1.13 (Québec) Canada.
63. Tazawa, E.; Miyazawa, S. et Kasai, T. (1995) Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol 25, No 2, pages 288-292.
64. Tazawa, E.; Miyazawa, S., (1995). Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n°2, pages 281-287.
65. Tomita, R., (1992). A study on the mechanism of drying shrinkage reduction through the use of an organic shrinkage reducing agent. *Concrete Library of JSCE*, N°19, pages 233-245.
66. Ulm, F-J.; Rossi, P., Schaller, I. (1999). Durability scaling of cracking in HPC structures subject to hygrothermal gradients. *Journal of Engineering Méchantes*, ASCE, vol. 125, n°6, pages 693-702.
67. Weiss, J.; Pietro, L.; Rajabipour, F. and Sant, G. (2008). Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages. *ACI Materials Journal/September-October*. Title no. 105-M55 pages 478-486.
68. Weiss, W.J. (1999). Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete element, Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL.
69. Yan F.; Ping G.; Ping X.; Beaudoin J.J. (1995). Effect of chemical admixtures on the expansion of shrinkage-compensating cement containing a pre-hydrated high alumina cement -based expansive additive. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25. No. 1, pages 29-38.
70. Yan F.; Ping G.; Ping X.; Beaudoin J.J. (1994). Characteristics of shrinkage compensating expansive cement containing a pre-hydrated high alumina cement-based expansive additive. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 2, pages. 267-276.
71. Yan. P. Y.; Zheng F. and Xu Z. Q. (2003). Hydration of shrinkage-compensating binders with different compositions and water–binder ratios. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 74 pages 201–209.
72. Young, J.F. et coll., (1986). Physical Mecanisms and their Mathematical Description. *Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modeling*, Preprints of the Fourth RILEM International Symposium, Evanston (IL), pages 44 -78.
73. Zreiki, J. (2009). Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages. Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan. ENS Cachan / CNRS / Université Paris 6.