

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des Sciences appliquées
Département de génie civil

DÉVELOPPEMENT DU RETRAIT ENDOGÈNE DANS UNE DALLE
MINCE CONSTRUITE AVEC UN BÉTON DE RAPPORT EAU/CIMENT
ÉGAL à 0,30 MÛRI DE QUATRE FAÇONS DIFFÉRENTES

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Francine Anne BLAIS

Sherbrooke (Québec), CANADA

Avril 2001

SOMMAIRE

Les déformations développées dans un béton à haute performance (BHP) de rapport eau/ciment égal à 0,30 ont été mesurées à l'aide de jauge de déformation à corde vibrante. Les cordes ont été positionnées près de la surface, au cœur et au fond de 4 dalles expérimentales (2500×600×200 mm). L'acquisition des données a commencé à la fin de la période dormante et s'est terminé après 28 jours. Quatre différents modes de mûrissement ont été analysés lors de notre recherche : un mûrissement sans ajout d'eau extérieure, un ajout d'eau extérieure après 3 heures et un autre après 24 heures et un mûrissement quasi adiabatique.

Les résultats obtenus démontrent que le mûrissement quasi adiabatique réduit de façon significative le retrait isotherme dans un élément mince, le mûrissement le plus efficace après celui-ci est le mûrissement avec l'ajout d'eau extérieure 3 heures après le contact eau ciment. L'effet bénéfique du mûrissement à l'eau décroît après 48 heures car le réseau de pores très fins réduit l'efficacité de l'apport d'eau en diminuant la connectivité du réseau capillaire. De plus, l'influence des dimensions des éléments de béton a été vérifiée. Les essais permettent de constater que le rapport entre la surface exposée et le volume de l'élément influence le développement des déformations totales et isothermes.

REMERCIEMENTS

Initialement, j'aimerais remercier Claude Faucher, Sylvain Roy et Valérie Seigneur pour l'aide qu'ils m'ont apporté lors de mes essais. Aussi, je voudrais remercier Lise Morency pour ses doigts de fée.

Les sourires de Ghislaine Luc, Christine Couture et Nathalie Vallée, ont toujours été d'un grand réconfort.

J'aimerais sincèrement dire que sans Nikola Petrov, je n'aurai pas pu présenter un document aussi rigoureux techniquement. Son esprit d'analyse m'a permis, j'espère, d'être à la hauteur des attentes.

J'aimerais aussi remercier mon cher collègue de toujours ; Éric Dallaire. Il m'endure depuis le baccalauréat.

Évidemment, je n'aurai jamais fait cette maîtrise sans la personne qui croyait le plus en moi. Pierre-Claude Aïtcin, mon directeur de maîtrise, m'a vraiment toujours soutenue. C'est réconfortant de sentir à travers cette personne le monde sans limites qui s'offre à moi. Pierre-Claude est mon éternel positif. C'est bien car j'arrive à le croire. Évidemment Gisèle et Isabelle m'ont écoutée et soutenue pendant les périodes difficiles, en plus de me faire rire.

Je voudrais aussi remercier André L'Espérance. La vie nous a séparés, mais on n'oublie jamais une collaboration de si longue date.

Une personne qui m'est chère et qui m'a présentée à la famille Aïtcin, il y a de ça plus de 25 ans, c'est Annick Weight. Annick m'a ouvert les horizons. De plus, elle a toujours eu une oreille attentive surtout pendant une période difficile de la vie telle que l'adolescence. Annick a toujours été un exemple de force et de détermination pour moi.

Il y a mon amie Manon Robitaille qui vit les mêmes difficultés que moi présentement. Nous nous encourageons mutuellement depuis plusieurs années. Lâche pas, les études finissent bientôt. Je t'aime. Notre amitié est l'exemple parfait de la solidarité féminine.

De plus, je tiens à remercier les membres de la famille Powell, en particulier Michèle, Charles, Guy et Gertrude. Sans eux, honnêtement, la terre serait plus petite qu'elle n'ait en réalité.

Je voudrais remercier mes frères et sœurs. Ils et elles se nomment ; Jocelyne, Marc, Raymond, Lise, Denyse, Andrée, Éleine et Pierre. L'union fait la force. Mes frères et sœurs ont tous à un moment donné et à leur façon contribués à qui je suis donc à donner vie à ce mémoire.

En dernier et non les moindres, je voudrais remercier mon père, Marcel et ma mère, Doreen. Évidemment, ils sont mon point de départ. Je voudrais surtout dire à ma mère qui m'a permis de rester aussi longtemps que nécessaire en dessous de sa jupe combien je l'ai apprécié et combien sa chaleur m'a fait avoir confiance en la vie.

Ce n'est pas facile d'être différente de son entourage et ne pas désirer les mêmes choses que plusieurs femmes de son époque. Ma mère m'a donné des ailes et inculqué de bonnes valeurs. Pour toutes ses raisons, ma très chère mère, je te dédie ce mémoire. Merci mille fois

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
	2.1 Introduction	3
	2.2 Facteurs influençant le retrait	4
	2.3 Le retrait plastique	5
	2.4 Le retrait de séchage	6
	2.5 Le retrait thermique	7
	2.6 Le retrait de carbonatation	7
	2.7 Le retrait endogène	8
	2.7.1 Introduction	8
	2.7.2 Rappels historiques	9
	2.7.3 Le retrait isotherme de la pâte de ciment	11
	2.7.4 Autodessiccation	11
	2.7.5 Conclusion	13
	2.8 Autres caractéristiques qui influencent les changements volumétriques du béton	13
	2.8.1 Introduction	13
	2.9 Différentes approches utilisées pour mesurer le retrait endogène	15
	2.9.1 La norme ASTM C157	16
	2.10 Contrôle du retrait endogène	16
	2.10.1 L'incorporation de granulats légers dans les BHP	16
	2.10.2 Adjuvants réducteurs de retrait	16
	2.10.3 Polymères superabsorbants	17
	2.11 Conclusion	17
3	OBJECTIF DE LA RECHERCHE	18
4	MATÉRIAUX ET MODES DE MÛRISSEMENT	19
	4.1 Fabrication du béton	19
	4.1.1 Composition du BHP utilisé	19
	4.1.2 Séquence de malaxage	19
	4.2 Caractéristiques du béton frais et durci	22
	4.3 Modes de mûrissement	23
	4.3.1 Mûrissement sans eau (MSE)	23
	4.3.2 Mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)	23
	4.3.3 Mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)	24
	4.3.4 Mûrissement quasi adiabatique (MA)	24
	4.3.5 Le décoffrage	26
5	MÉTHODOLOGIE	27
	5.1 Traitement des données	27
	5.1.1 Équations des jauges à déformation à corde vibrante (CV)	27
	Température des cordes vibrantes	27
	Déformation totale (ϵ_{tot})	28
	5.2 La valeur initiale de la déformation (f_0)	28
	5.3 Les déformations relatives au fluage	29
	5.4 Le coefficient de dilatation thermique (CDT)	29
	5.4.1 Introduction	29

5.4.2	Détermination du CDT du béton durci	30
5.4.3	Détermination du CDT variable	31
	<u>Hypothèses de calcul pour considérer la variation du CDT lors de la prise du béton</u>	32
	<u>Equation lorsque le CDT varie en fonction du temps</u>	32
5.4.4	Déformation endogène (ϵ end)	33
	<u>Déformation endogène (ϵ end) avec CDT variable</u>	33
	<u>Déformation endogène (ϵ end) pour CDT constant (CDTct)</u>	33
5.4.5	Position des instruments	34
5.4.6	Conclusion	36
6	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	37
6.1	Introduction	37
6.2	Anisotropie des déformations au cœur de la dalle.....	39
6.3	Température.....	40
6.3.1	Introduction	40
6.3.2	M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures.....	40
6.3.3	M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures.....	41
6.3.4	MSE - Mûrissement sans eau	42
6.3.5	MA - Mûrissement quasi adiabatique.....	43
6.3.6	Influence du mûrissement sur le développement de la température dans la dalle de BHP.....	44
6.4	Déformation totale.....	46
6.4.1	Introduction	46
6.4.2	M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures.....	46
6.4.3	M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures.....	47
6.4.4	MSE - Mûrissement sans eau	48
6.4.5	MA - Mûrissement quasi adiabatique.....	49
6.4.6	Influence du mûrissement sur les déformations totales développées dans la dalle	50
6.5	Déformation isotherme	52
6.5.1	Introduction	52
6.5.2	M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures.....	52
6.5.3	M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures.....	53
6.5.4	MSE - Mûrissement sans eau	54
6.5.5	MA - Mûrissement quasi adiabatique.....	55
6.5.6	Influence du mûrissement sur la déformation isotherme développée dans la dalle	56
6.6	Influence de la dimension.....	58
6.6.1	Température développée dans le cube.....	59
6.6.2	Déformation totale.....	60
6.6.3	Déformation isotherme	61
6.6.4	Influence de la température développée selon la dimension de l'élément	62
6.6.5	Influence de la déformation totale développée selon la dimension de l'élément	64
6.6.6	Influence de la déformation isotherme développée selon la dimension de l'élément.....	65
	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	68
	BIBLIOGRAPHIE.....	71

LISTE DES FIGURES

- Figure 2.1 Évolution du CDT d'un béton en fonction du temps [Laplante, 1993]
- Figure 4.1. Séquence de malaxage lors de la fabrication du BHP
- Figure 4.2 La mise en place du BHP dans le coffrage près d'une corde vibrante
- Figure 4.3 La mise en place du BHP dans le coffrage
- Figure 4.4 Fin d'activité de mise en place d'une dalle type
- Figure 4.5 Mûrissement sans eau (MSE)
- Figure 4.6 Mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)
- Figure 4.7 Mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)
- Figure 4.8 Mûrissement quasi adiabatique (MA)
- Figure 4.9 Décoffrage d'une dalle type
- Figure 5.1 Variation du CDT en fonction du temps pour un béton ordinaire et la courbe Type utilisée lors de nos calculs
- Figure 5.2 Vues en plan et en élévation de la position des instruments dans les dalles
- Figure 5.3 Positionnement des cordes vibrantes avant la coulée du BHP
- Figure 5.4 Photo d'une jauge de déformation à corde vibrante
- Figure 6.1 Déformation totale développée au cœur de la dalle mesurée selon les 2 axes horizontales perpendiculairement une par rapport à l'autre
- Figure 6.2 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)
- Figure 6.3 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)
- Figure 6.4 Variation de la température en fonction du temps sans aucun mûrissement (MSE)
- Figure 6.5 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement quasi adiabatique (MA)
- Figure 6.6 Influence du mûrissement sur le développement de la température à la surface, au cœur et au fond de la dalle en fonction du temps
- Figure 6.7 Déformation totale développée dans la dalle mûrie après 24 heures (M24)
- Figure 6.8 Déformation totale développée dans la dalle mûrie après 3 heures (M3)
- Figure 6.9 Déformation totale développée dans la dalle sans mûrissement à l'eau (MSE)
- Figure 6.10 Déformation totale développée dans la dalle mûrie dans un caisson quasi adiabatique (MA)

- Figure 6.11 Déformation totale selon le mode de mûrissement a) à la surface, b) au centre et c) au fond de la dalle
- Figure 6.12 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie après 24 heures (M24)
- Figure 6.13 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie après 3 heures (M3)
- Figure 6.14 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie sans eau (MSE)
- Figure 6.15 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie de façon quasi adiabatique (MA)
- Figure 6.16 Déformation isotherme en fonction du temps selon le mode mûrissement à la surface, au centre et au fond de la dalle
- Figure 6.17 Vues en plan et de côté de la position des instruments dans le cube
- Figure 6.18 Température développée dans le cube selon le mode de mûrissement M24
- Figure 6.19 Déformation totale développée dans le cube selon le mode de mûrissement (M24)
- Figure 6.20 Déformation isotherme développée dans le cube selon le mode de mûrissement M24
- Figure 6.21 Comparaison de la température développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement
- Figure 6.22 Comparaison de la déformation totale développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement
- Figure 6.23 Comparaison de la déformation isotherme développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement

LISTE DES TABLEAUX

- TABLEAU 2.1 – FACTEURS INFLUENÇANT LE RETRAIT
- TABLEAU 2.2 – PROPRIÉTÉS INFLUENÇANT L'INTERACTION ENTRE LES GRANULATS ET LA PÂTE CIMANTAIRE LORS DE L'HYDRATATION [Laplante, 1993]
- TABLEAU 4.1 – COMPOSITION TYPE DU BHP DE RAPPORT E/C ÉGAL À 0,30
- TABLEAU 4.2 – CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON FRAIS ET DURCI
- TABLEAU 4.3 – LES MODES DE MÛRISSEMENT DE CHAQUE DALLE
- TABLEAU 5.1 – COORDONNÉES DES INSTRUMENTS DANS LA DALLE
- TABLEAU 6.1 – COORDONNÉES DES INSTRUMENTS DANS LE CUBE

LISTE DES SYMBOLES

AEA	Agent entraîneur d'air
BHP	Béton à haute performance
BO	Béton ordinaire
CDT	Coefficient de dilatation thermique
CDT _{ct}	Coefficient de dilatation thermique constant
CDT _i	Coefficient de dilatation thermique instantané d'un intervalle de mesure
CDT var	Coefficient de dilatation thermique variable
CV	Jauge de déformation à corde vibrante
d	Densité du matériau
E/C	Rapport eau/ciment
ε end	Déformation endogène
ε iso	Déformation isotherme
ε séc	Déformation de séchage
ε therm	Déformation thermique
$\Sigma \varepsilon$ therm _i	Sommation des déformations thermiques instantannées selon l'intervalle de mesure
ε tot	Déformation totale
f	Fréquence en Hertz de la déformation donnée par le CR10
f ₀	Valeur initiale de la déformation
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
M3	Mûrissement à l'eau après 3 heures
M24	Mûrissement à l'eau après 24 heures
MA	Mûrissement quasi adiabatique
MSE	Mûrissement sans eau
Rt	Donnée brute obtenue par le CR10
SF	Fumée de silice
T	Température en °C
T(CV) ₀ :	température à la fin de la période dormante
t ₀ , t ₁	Fin de la période dormante, intervalle de temps où CDT var est mesuré
V	Tension, en millivolt, mV

1 INTRODUCTION

La recherche dans le domaine du béton est en évolution constante. En conséquence, nous pouvons fabriquer des bétons dont le rapport eau/ciment (E/C) est très faible. Ces bétons sont plus performants et plus durables que les bétons ordinaires (BO).

Grâce à ces nouveaux développements, l'industrie de la construction a pu réaliser de nouveaux projets tels que le Pont de la Confédération qui n'aurait pu être construit de façon économique sans des bétons de faible rapport E/C. Cependant avec l'accroissement de l'utilisation de bétons de faible rapport E/C, on a remarqué que ces derniers pouvaient être très sensibles à la fissuration à jeune âge, particulièrement sur les surfaces horizontales telles que les dalles de pont.

Une différence essentielle existe entre les bétons ordinaires et les bétons à haute performance (BHP) de faible rapport E/C c'est leur comportement dans le domaine du retrait. Dans un béton ordinaire, le retrait thermique et le retrait de séchage sont les retraits prépondérants, tandis que dans un béton de faible rapport E/C, on constate que le retrait endogène prend de plus en plus d'importance quand le rapport E/C diminue.

Actuellement, étant donné que beaucoup de gens ne comprennent pas bien ce qu'est le retrait endogène des bétons de faible rapport E/C, des problèmes de chantiers sont survenus et l'utilisation des BHP a quelque peu été discréditée. On peut maintenant démontrer que les techniques de mûrissement conventionnelles des bétons ordinaires au chantier ne peuvent pas être utilisées pour les BHP si l'on veut empêcher et/ou minimiser le développement du retrait endogène.

L'objectif de ce programme de recherche est d'analyser le développement du retrait endogène dans une dalle mince de rapport E/C égal à 0,30 mûrie selon quatre modes de mûrissement différents. Nous avons utilisé quatre modes de mûrissement afin de mesurer expérimentalement le retrait endogène qui se développe dans chaque cas. Ces quatre modes de mûrissement sont les suivants : un mûrissement à l'eau après 24 heures (M24), un

mûrissement à l'eau après 3 heures (M3), un mûrissement sans eau (MSE) (séché à l'air) et un mûrissement quasi adiabatique (MA).

La section 2 couvre la revue bibliographique en commençant par une introduction et des rappels historiques relatifs au retrait endogène. Ensuite, on analyse les principaux facteurs qui influencent le retrait ainsi que les différents types de retrait dus aux diverses variations volumétriques. On a porté une attention particulière au retrait endogène, car c'est celui qui constitue l'intérêt principal de cette recherche. De plus, cette revue bibliographique présente d'autres caractéristiques qui ont une influence sur les changements volumétriques. Enfin, la revue bibliographique se termine en décrivant certaines approches utilisées pour tenter de réduire et/ou d'évaluer le retrait endogène. La section 3 présente les objectifs de cette recherche. La section 4 décrit les matériaux utilisés dans la formulation du BHP et les caractéristiques du béton frais et durci. Cette section se termine en précisant les 4 modes de mûrissement. La section 5 traite de la méthodologie utilisée lors du traitement des données. L'analyse des résultats obtenus ainsi que les discussions relatives à ces derniers sont présentées à la section 6. Enfin en dernier lieu, sont présentées les conclusions et les recommandations de cette recherche.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

Lors de leur cours, les ingénieurs apprennent que le ciment est un liant hydraulique. Ce dernier, une fois mélangé avec de l'eau, des granulats et certains adjuvants chimiques se transforme en béton lors du processus d'hydratation [Kosmatka et coll., 1995; Gagné, 1999].

Lors de ce processus exothermique, le béton se contracte et/ou gonfle selon les conditions de mûrissement auxquelles il est soumis. Donc, le béton subit des changements volumétriques en l'absence de chargement qui selon les cas peut entraîner la fissuration du béton [Baron, 1982]. Il y a apparition de fissures plus ou moins ouvertes sur les surfaces exposées de l'élément nouvellement mis en place à la suite de l'apparition de contraintes de traction dans le béton [Baron, 1982]. Selon Détriché [1992], la fissuration précoce des ouvrages en béton est la plus pénalisante pour leur durabilité. À l'échelle macroscopique, il est aisé de constater visuellement les fissures précoces qui apparaissent sur les ouvrages en béton. Il est important de mentionner que les fissures précoces excluent la fissuration fonctionnelle du béton armé qui peut être reliée à des agents agressifs tels que l'action du gel-dégel, la corrosion et les réactions alcalis-granat ou des surcharges. Ce dernier type de fissuration est exclu de cette recherche car il apparaît une fois la mise en service des ouvrages de béton. De plus, les phénomènes reliés aux agents agressifs n'ont absolument pas la même origine que la fissuration précoce. Nos travaux de recherche porteront plus spécifiquement sur le retrait qui provoque la fissuration précoce et qui peut apparaître dès le commencement du processus d'hydratation.

À première vue, le retrait est un phénomène simple qui correspond, à une contraction volumétrique que l'on observe quand, par exemple, un béton se dessèche [Aïtcin et coll., 1997]. Cette contraction volumétrique se développe dans les trois dimensions. Néanmoins, en 1997, Aïtcin, Neville et Acker notent que, généralement, on exprime le retrait sous la forme d'une déformation linéaire étant donné que les éléments structuraux en béton ont

une ou deux dimensions nettement plus petites que la troisième et que les effets du retrait y sont moins sensibles.

On distingue plusieurs types de retrait qui peuvent entraîner une fissuration du béton.

2.2 Facteurs influençant le retrait

Le tableau 2.1 résume les principaux facteurs qui influencent le retrait ainsi que le fluage [Khan, Cook, et Mitchell., 1997; COMITÉ ACI 209].

TABLEAU 2.1 – FACTEURS INFLUENÇANT LE RETRAIT

Composition du béton	Type de ciment (ex : teneur en C ₃ A, finesse)
	Rapport E/C
	Proportion du mélange
	Caractéristiques des granulats
	Ajouts cimentaires (ex : fumée de silice)
	Adjuvants chimiques (ex : superplastifiant)
	Résistance mécanique du béton
Mûrissement	Teneur en ciment
	Durée
	Température
Environnement de l'élément en béton	Humidité relative
	Température du béton
Géométrie de l'élément en béton	Humidité relative du béton
	Dimension
	Rapport surface/ volume

2.3 Le retrait plastique

Le retrait plastique est d'origine exogène, il peut se développer à la surface du béton, dès la fin de sa mise en place, par dessiccation et il se manifeste alors avant et pendant la prise du béton [Détriché, 1992]. L'hypothèse vérifiée par Wittmann [1968] est que le retrait plastique est engendré par la dépression capillaire qui se développe lorsque des ménisques se forment dans les capillaires du béton frais. Une des caractéristiques de ce retrait particulier de dessiccation est qu'il se produit pendant un temps limité. Les fissures apparaissent dès que la surface de béton n'est plus protégée par l'eau de ressuage. Les fissures de retrait plastique apparaissent à n'importe quel temps, chaque fois que la surface de béton se dessèche très rapidement par évaporation. Le retrait plastique, est donc fonction de la vitesse de dessiccation du béton frais. Les conditions suivantes, prises individuellement ou collectivement, augmentent l'évaporation de l'eau de surface et par voie de conséquence l'apparition de fissures de retrait plastique [Kosmatka et coll., 1995] ;

1. Températures élevées de l'air ambiant et du béton,
2. Faible humidité,
3. Fort vent,
4. Exposition au soleil,
5. Adjuvants modifiant la vitesse de prise.

Ces dernières conditions vont influencer la longueur des fissures horizontales qui apparaissent sur la surface du béton frais [Neville, 1995]. La fin du retrait plastique coïncide à peu près avec la fin de la prise, lorsque la capacité de déformation du béton décroît fortement [Détriché, 1992].

2.4 Le retrait de séchage

Selon Bissonnette, Pierre et Pigeon [1997], le retrait de séchage est l'une des plus importantes sources potentielles de détérioration des ouvrages en béton. Les contraintes de traction qui conduisent à la fissuration du matériau s'expliquent par le fait que la contraction libre du béton est généralement empêchée.

Aïtcin [1998b] explique que le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation localisé qui commence à se développer à la surface du béton par où s'évapore l'eau interne du béton. La cause essentielle du retrait de séchage est évidemment l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir des surfaces de béton exposées à l'air ambiant [Aïtcin et coll., 1997]. L'évaporation se produit aussitôt que le degré hygrométrique de l'air ambiant est inférieur à celui qui règne dans le réseau capillaire. Les forces de tension développées dans les ménisques à l'intérieur du béton entraînent une contraction du béton. La valeur du retrait de séchage dépend de plusieurs facteurs. Ces principaux facteurs sont les suivants [Buil et coll., 1992 ; Aïtcin, 1998a] ;

1. Les caractéristiques du matériau (par exemple; E/C, porosité, perméabilité),
2. Les caractéristiques du réseau capillaire (diamètre des pores, connectivité, tortuosité),
3. Les températures de l'air ambiant et du matériau,
4. L'humidité relative du milieu,
5. L'âge du béton au moment de son exposition à des conditions de séchage,
6. La dimension de l'élément de béton,
7. Le rapport surface/volume,

Le retrait de séchage peut être évité en contrôlant l'évaporation de l'eau contenue dans le béton frais. Par exemple, dès la fin de la mise en place du béton, un produit appelé retardateur d'évaporation peut être appliqué sur la surface du béton [Blais et coll., 1996].

Il existe trois principales théories pour expliquer le mécanisme du retrait de séchage [Powers, 1968; Baron, 1982 ; Acker, 1992]. Sans approfondir chaque théorie, on peut citer les principales causes invoquées par les chercheurs ;

1. la dépression capillaire,
2. la variation de la tension superficielle,
3. la variation de la pression de disjonction.

2.5 Le retrait thermique

Lors du processus d'hydratation, le béton peut se dilater et se contracter durant la période de durcissement [Laplante, 1993]. Lors de l'hydratation, différentes réactions chimiques se développent et entraînent alors un dégagement de chaleur, un gain de résistance et une contraction du volume solide causée par le refroidissement du béton vers la température ambiante [Aïtcin, 1998b]. Pour des raisons d'uniformité de vocabulaire, cette contraction thermique est appelée le retrait thermique [Aïtcin et coll., 1997]. Ces déformations sont généralement empêchées, à différents degrés, par des structures adjacentes ou par différentes parties de l'élément lui-même. Laplante [1993] distingue deux types de fissuration d'origine thermique :

1. Les fissures de peau superficielles causées par des déformations empêchées au sein même de l'élément. Généralement, ces fissures sont causées par la présence d'un gradient thermique entre la surface et le reste de l'élément.
2. Les fissures traversantes (qui traversent toute la section de l'élément) causées par la restriction des variations de température par des facteurs extérieurs tels qu'une fondation.

2.6 Le retrait de carbonatation

Kosmatka et coll. [1995] définit la réaction de carbonatation comme le processus par lequel le gaz carbonique présent dans l'air pénètre à l'intérieur du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du carbonate de calcium. Baron [1982] explique que la carbonatation est

la réaction entre le gaz carbonique de l'atmosphère et la chaux libérée par l'hydratation (portlandite) pour former du carbonate de calcium.

Cette réaction libère de l'eau et se développe de la façon suivante :



Cette réaction de la pâte hydratée avec le gaz carbonique de l'air en présence d'humidité cause une contraction volumétrique que l'on appelle le retrait de carbonatation [Aïtcin et coll., 1997]. La carbonatation ne se développe pas sur une très grande profondeur soit, généralement sur moins de 2 millimètres dans les bétons denses de qualité. Conséquemment, les fissures relatives au retrait de carbonatation sont peu profondes, elles sont limitées à la surface exposée du béton et elles n'apparaissent que très tardivement bien après les fissures dues au retrait de séchage.

2.7 Le retrait endogène

2.7.1 Introduction

Dans la dernière décennie, la technologie du béton s'est beaucoup développée grâce à l'utilisation accrue d'adjuvants chimiques. Conséquemment, le rapport E/C a diminué. Ces bétons ont des propriétés mécaniques supérieures telles que la résistance à la compression comparativement à celles d'un béton traditionnel [Jensen et Hansen, 1996]. Le phénomène qui cause un accroissement potentiel de la fissuration est le retrait identifié comme le retrait endogène. Étant donné que ce phénomène de retrait endogène commence à être progressivement connu, divers termes scientifiques sont utilisés pour parler de ce type de retrait dans les communications scientifiques [Aïtcin, 1998b]. Jensen et Hansen [1996] ont identifié jusqu'à huit termes différents qui ont été utilisés par divers chercheurs pour dénommer ce même phénomène.

Toutefois, même si récemment, les scientifiques s'intéressent à ce phénomène et tentent de trouver des solutions diverses pour contrôler le développement du retrait endogène, on se rend

compte que ce phénomène a été mis en évidence depuis le début du siècle dernier [Le Chatelier, 1900].

2.7.2 *Rappels historiques*

Lynam [1934] a constaté que le béton lors du processus d'hydratation subissait un autre type de retrait que celui bien connu dû à la dessiccation. Le développement de ce retrait avait pour origine d'autres raisons que les effets causés par la perte d'humidité environnante ou par une variation thermique. Lynam [1934] a nommé ce retrait : le retrait endogène.

R.E. Davis [1930] a publié des résultats concernant l'étude des changements volumétriques produits dans la pâte de ciment, les mortiers et les bétons. Il a constaté que certaines variations volumétriques n'étaient pas causées par l'application de contraintes. Son article fait aussi référence à Le Chatelier. En effet, Le Chatelier [1900] a étudié des changements volumétriques plus ou moins importants qui accompagnent le durcissement des pâtes de ciment. Déjà en 1900, Le Chatelier constate que l'hydratation des liants hydrauliques est accompagnée à la fois d'une augmentation du volume apparent et d'une diminution du volume absolu. Le Chatelier [1900] en publiant cet article admet que ses résultats peuvent sembler contradictoires avec les idées généralement admises à cette époque. De plus, ce chercheur affirme qu'il ne peut entièrement expliquer l'augmentation du volume apparent due au manque de précision des techniques de mesure à sa disposition à cette époque.

Le Chatelier [1900] fait une distinction entre le volume apparent et le volume absolu. Il définit le volume apparent d'une pâte de ciment comme la totalité du volume compris entre les surfaces limitant cette masse, sans se préoccuper de sa structure interne ou de sa porosité. Le volume apparent est la somme des volumes du ciment solide, les hydrates, de l'eau et des gaz emprisonnés. Tandis que le volume absolu d'une pâte inclut seulement la somme des volumes de matières solides et liquides. Le volume des gaz piégés dans la pâte de ciment est exclu, donc, le volume absolu n'inclut pas les vides qui peuvent être présents dans la pâte.

Toutefois, sans entrer dans tous les détails de ces variations de volume, il est clair que Le Chatelier [1900] a bien identifié des variations de volumes relatives au processus

d'hydratation. Il est important de mentionner que les essais de Le Chatelier [1900] se faisaient en laboratoire dans des conditions quasi isothermes.

En 1940, H.E. Davis confirme l'existence de variations macroscopiques de volume dites endogènes dans le béton causé par l'hydratation du ciment. De plus, H.E Davis [1940] affirme que ces changements de volume endogènes doivent être différenciés des variations de volume causées par les gradients d'humidité, de température et de chargement.

Buil [1979] mentionne que lors de l'hydratation du ciment, le volume absolu des hydrates formés est inférieur au volume absolu initial des constituants. Cet auteur confirme les recherches de Le Chatelier de 1900. De plus, Buil [1979] nous indique que cette diminution du volume apparent, qu'il appelle la contraction de Le Chatelier, est égale à environ 10% du volume de pâte initiale.

Powers [1958] a aussi étudié les changements volumétriques causés par l'hydratation du ciment Portland. Selon Aïtcin, Neville et Acker [1997], la réaction d'hydratation du ciment est une expression globale qui regroupe plusieurs réactions chimiques qui se produisent lorsque le ciment entre en contact avec l'eau. Les réactions chimiques résultent en la formation d'une pâte de ciment hydraté cohésive qui confère au béton sa résistance. Lors du processus d'hydratation, les réactions chimiques qui se produisent au sein du béton génèrent une quantité de chaleur. Toutes les réactions chimiques lors de l'hydratation du ciment sont exothermiques [Aïtcin, 1998b]. De plus, l'hydratation du ciment est accompagnée par une réduction de volume de la pâte de ciment hydraté, contraction communément appelée, la contraction de Le Chatelier ou de Powers [Aïtcin, Neville et Acker, 1997].

Le retrait endogène est défini comme la conséquence de la contraction de la pâte de ciment hydraté durant le processus d'hydratation [Tazawa et Miyazawa, 1996].

2.7.3 *Le retrait isotherme de la pâte de ciment*

De façon générale, on distingue, pour la pâte de ciment, deux types de retrait isotherme. Le retrait de séchage que nous avons vu à la section 2.4 et le retrait endogène. Laplante [1993] définit le retrait endogène comme étant causé par les déformations libres que présente la pâte de ciment en cours d'hydratation en conditions isothermes et en l'absence d'échanges d'humidité avec le milieu environnant. L'évolution des déformations endogènes a été vérifiée par plusieurs chercheurs dont Baron [1982].

Maintenant, nous allons tenter d'expliquer le phénomène relié à la déformation endogène.

2.7.4 *Autodessiccation*

L'autodessiccation se développe après la prise, pendant le durcissement. L'autodessiccation se produit lorsque les réactions d'hydratation consomment presque la totalité de l'eau en ne laissant qu'une trop petite quantité d'eau pour saturer les surfaces solides, résultant ainsi à une diminution de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte.

Les phénomènes d'autodessiccation et de dessiccation se traduisent par l'apparition de ménisques à l'intérieur du réseau capillaire et d'une porosité remplie de gaz en l'absence de toute source d'eau extérieure. Cependant, il existe une différence fondamentale entre ces deux phénomènes.

L'autodessiccation se développe progressivement de façon homogène et isotrope à l'intérieur du béton en autant que la répartition des grains de ciment soit uniformément répartis dans la masse de béton, tandis que la dessiccation est un phénomène d'origine externe localisé qui se développe au niveau de la surface et qui progresse vers le cœur du béton [Aïtcin, 1998b].

Le retrait d'autodessiccation désigne la contraction, isotherme, observée sur une éprouvette de béton en cours d'hydratation qui est protégée de tout échange d'eau avec le milieu extérieur [Détriché, 1982].

Le retrait relié au phénomène d'autodessiccation de la pâte de ciment au cours de son hydratation est une conséquence de la contraction de Le Chatelier. Physiquement, au début du processus d'hydratation du béton, dès que le ciment rentre en contact avec l'eau, la contraction chimique (Le Chatelier) se développe dès la formation des premiers hydrates. Par contre, cette contraction est empêchée, initialement, par le squelette granulaire (inclusion inerte ayant des propriétés constantes) puis graduellement, par la pâte elle-même qui se structure et se rigidifie en fonction du temps. Ceci crée un certain nombre de pores très fins par rapport au réseau de pores capillaires initialement remplis d'eau qui sont générés lors de la mise en place du béton. Physiquement, ces pores très fins drainent graduellement l'eau des gros capillaires. Conséquemment, les pores capillaires se vident de leur eau sans que la pâte de ciment perde de masse. En fait, on assiste à un transfert de l'eau contenue dans les pores capillaires vers la porosité très fine générée lors de l'hydratation du ciment.

Ainsi, le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment initial. Cette diminution du volume absolu engendre la création de vides gazeux à l'intérieur de la porosité de la pâte de ciment. Conséquemment, Détriché [1992] poursuit en expliquant que ceci provoque la création de ménisques et de tractions capillaires internes, comme s'il s'agissait d'une dessiccation avec départ d'eau vers l'extérieur. Les forces de tension développées dans les ménisques tirent sur le béton qui rétrécit et c'est ainsi que naît le retrait endogène.

Plus, le rapport E/C diminue plus le phénomène d'autodessiccation prend de l'importance. Le retrait d'autodessiccation est un retrait qui se produit à l'intérieur du béton de façon homogène et isotrope.

Toutefois, lorsque nous avons une source d'eau extérieure, par exemple, lorsqu'un béton est mûri à l'eau, les pores très fins qui se créent à mesure que la contraction est empêchée (par la

pâte elle-même après sa rigidification et le squelette granulaire) continuent à drainer l'eau des gros capillaires. Mais les gros capillaires restent remplis d'eau grâce à leur approvisionnement en eau provenant de la source extérieure. Ce phénomène se poursuit tant et aussi longtemps que la connectivité du réseau des pores capillaires et de la source d'eau extérieure est assurée. À ce moment, il se produit une augmentation du volume apparent due à l'eau extérieure disponible même s'il y a une diminution du volume absolu des hydrates. Physiquement ceci se traduit par un gonflement du béton au début du processus d'hydratation. Par contre, si à un moment donné, un ménisque se forme dans le réseau de pores très fins et de capillaires, la continuité de la phase liquide n'existe plus, par conséquent, l'eau n'a plus la possibilité de se rendre dans les pores très fins créés par la contraction chimique, malgré la présence d'une source d'eau, il se produit alors un retrait endogène [AÏTCIN; 1998c]. Si une source d'eau extérieure est disponible lorsque s'amorce le processus d'hydratation, il vaut mieux alors parler de retrait isotherme, car selon la définition, un retrait endogène est un retrait qui se développe sans aucun apport d'eau provenant de l'extérieur. Toutefois, dès que la connexion avec la source extérieure d'eau est coupée, la contraction volumétrique se produit de façon homogène et isotrope et est reliée au processus d'hydratation donc reliée au phénomène autodessiccation, conséquemment relié au retrait endogène.

2.7.5 Conclusion

On constate qu'il existe encore certaines ambiguïtés autour du retrait endogène comparativement aux autres types de retraits. Nos travaux vont tenter d'éclaircir certaines interrogations concernant le mode de mûrissement d'un BHP de façon à essayer de minimiser les effets du retrait endogène.

2.8 Autres caractéristiques qui influencent les changements volumétriques du béton

2.8.1 Introduction

Lors du processus d'hydratation, après la période dormante, le béton fait prise. Progressivement, la matrice cimentaire devient un squelette rigide dont les propriétés physico-mécaniques évoluent en fonction du temps. Toutefois, les granulats, eux, constituent

des inclusions inertes dont les propriétés sont constantes. Donc, lors de l'échauffement et lors du refroidissement du béton durcissant, les différences entre les caractéristiques de la matrice cimentaire et les granulats influencent leur interaction [Laplante, 1993]. Le tableau 2.2 présente les différences des trois caractéristiques pour la matrice cimentaire et les granulats.

TABLEAU 2.2 – PROPRIÉTÉS INFLUENÇANT L'INTERACTION ENTRE LES GRANULATS ET LA PÂTE CIMANTAIRE LORS DE L'HYDRATATION [Laplante, 1993]

Propriété	Pâte de ciment hydratée	Granulat
Coefficient de dilatation thermique (CDT) ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	15 à 30	5 à 12
Module élastique (GPa)	0 à 30	Varie de 40 à 70
Propriétés viscoélastiques (fluage-relaxation)	Variable d'une pâte à l'autre	Peu de fluage, négligeable

Les propriétés des granulats et de la pâte cimentaire influencent le comportement futur du béton.

Module élastique (Module de Young)

Le béton est un matériau évolutif ou vieillissant, et son module d'élasticité évolue lors du durcissement du béton. Le module élastique croît en fonction du temps. L'ampleur des déformations élastiques par l'application d'une charge dépend de ce module élastique.

Le fluage

Afin de bien évaluer le retrait endogène selon les 4 modes de mûrissement, nous devons être capables de déterminer la déformation totale que subit la dalle de BHP. En conséquence, la déformation relative au fluage doit être considérée.

Le fluage est défini par Kosmatka et coll. [1995] comme étant la déformation qui commence immédiatement après l'application d'une charge et qui se poursuit dans le temps à un taux

décroissant tant et aussi longtemps que la charge est appliquée. Lors de l'analyse des résultats, la déformation relative au fluage doit être considérée.

Coefficient de dilatation thermique (CDT)

Le CDT varie en fonction du temps. Initialement, lorsque le béton commence à peine à durcir, le CDT de la pâte est élevé. À cette étape, la cohésion du béton est faible. L'eau, très présente durant cette période, conditionne un CDT élevé. Plus la pâte de ciment s'hydrate, plus le CDT diminue pour ensuite se stabiliser à une valeur quasi constante en fonction du temps. La figure 2.1 présente l'évolution du CDT d'un béton ordinaire en fonction du temps.

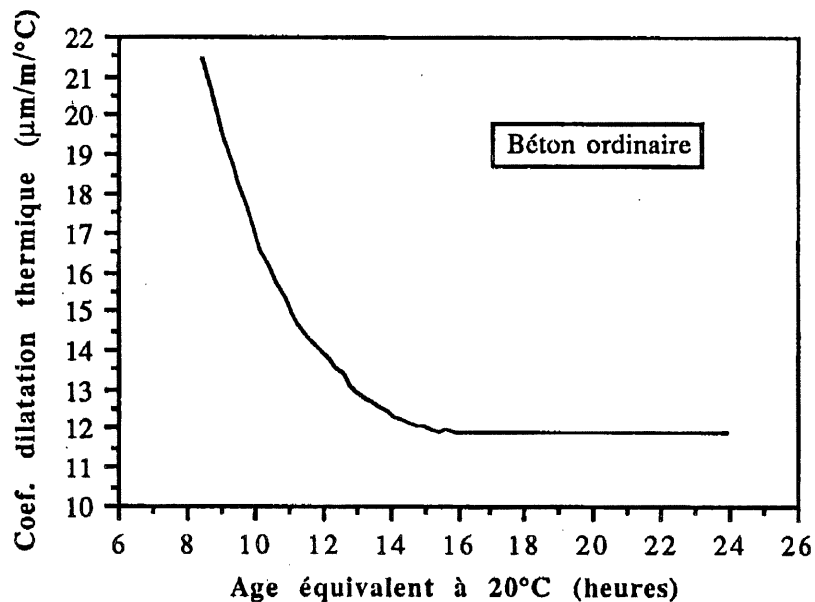


Figure 2.1 Évolution du CDT d'un béton en fonction du temps [Laplante, 1993]

2.9 Différentes approches utilisées pour mesurer le retrait endogène

Actuellement, il existe différentes méthodes pour mesurer le retrait endogène. Certaines méthodes de mesure ont pour objectif de déterminer son amplitude et d'autres méthodes tentent plutôt de trouver des solutions pour réduire et/ou éliminer le retrait endogène.

2.9.1 *La norme ASTM C157*

La norme ASTM C157 est la méthode normalisée qui permet de déterminer le retrait de séchage d'un béton ordinaire. Cette norme permet de déterminer le retrait total d'un béton ordinaire, car le retrait endogène est négligeable pour ce type de béton [Lepage et coll., 1998]. À l'inverse, l'amplitude du retrait endogène est importante dans le cas des BHP. Le retrait endogène ne peut être déterminé par cette méthode, car les mesures de longueur effectuées sur prisme ne débutent qu'après 24 heures. En conséquence, le retrait endogène est sous-estimé, car les déformations endogènes débutent dès la prise, soit approximativement 6 heures après le contact entre le ciment et l'eau.

Une norme qui permet d'évaluer l'évolution du retrait endogène dès le début de prise doit être développée.

2.10 Contrôle du retrait endogène

2.10.1 *L'incorporation de granulats légers dans les BHP*

On peut incorporer des granulats légers saturés lors de la fabrication d'un BHP afin de minimiser le retrait endogène. On formule alors un béton de faible rapport E/C en remplaçant une portion des gros granulats par un granulats léger saturé [Van Bruegel et de Vries, 1998]. L'apport des granulats légers saturés est de contrer la déformation endogène interne causée par l'autodessiccation en augmentant la quantité d'eau disponible à l'intérieur du BHP afin de diminuer l'évaporation interne.

2.10.2 *Adjuvants réducteurs de retrait*

Un nouvel adjuvant chimique peut être incorporé dans la fabrication du béton pour tenter de réduire le retrait. Les adjuvants réducteurs de retrait ont pour effet de diminuer la tension de surface à l'intérieur des pores capillaires. Selon Tazawa [1995], cette tension de surface a

pour origine le retrait de dessiccation. L'introduction d'un adjuvant réducteur de retrait diminue le retrait dans le cas des bétons ordinaires avec ou sans air.

Présentement, des recherches se poursuivent pour améliorer le comportement ces adjuvants face à leur résistance à l'écaillage.

2.10.3 Polymères superabsorbants

Jensen et Hansen [2000] ont développé un nouveau concept qui permet de prévenir l'autodessiccation dans les BHP. Ce concept consiste à incorporer de fines particules de polymères superabsorbants gonflés d'eau lors de la fabrication du béton. Cette incorporation a pour effet de contribuer à la formation d'inclusions de macropores chargés d'eau dans le béton frais qui agissent comme entraîneur d'eau interne. Ces macropores saturés d'eau agissent comme un entraîneur d'eau qui semble aider le contrôle de l'autodessiccation des BHP sans affaiblir leur résistance et leur durabilité.

Jusqu'à présent les travaux de Jensen et Hansen [2000] semblent très intéressants. Les effets de ces polymères superabsorbants méritent d'être étudiés de façon plus approfondie.

2.11 Conclusion

Nous avons démontré dans cette revue bibliographique que le retrait est un phénomène complexe qui peut entraîner l'apparition d'un réseau de fissures. Lorsqu'il est mal contrôlé, le retrait commence à se produire dans un élément de béton lors du processus d'hydratation. L'évolution du retrait endogène est directement reliée à la cinétique des réactions de l'hydratation. Cette fissuration précoce peut radicalement réduire la durabilité du béton. Elle donne souvent, en effet, des fissures ouvertes qui deviennent les sentiers des agents agressifs qui attaquent le béton et l'armature. En conséquence, l'affaiblissement de la structure en résulte.

Donc, trouver une solution à la fissuration précoce causée par le retrait endogène est de la plus haute importance.

3 OBJECTIF DE LA RECHERCHE

Au cours de cette recherche, nous allons comparer le développement du retrait dans des dalles construites avec un béton à haute performance de formulation usuelle selon différents modes de mûrissement. Nous entendons par formulation usuelle d'un BHP, une formulation développée à l'Université de Sherbrooke et déjà utilisée lors de la réfection et/ou de la construction de diverses structures appartenant au Ministère des transports du Québec.

L'intérêt de vérifier l'effet de différentes méthodes de mûrissement sur le retrait de cette formulation de BHP est devenu essentiel puisque après la mise en service de ces structures, on a pu voir se développer dans certains cas des fissures de retrait. L'apparition de ces fissures a été constatée indépendamment du mode de mûrissement effectué au chantier. Personnellement, lors de la réfection du pont Jacques-Cartier à Sherbrooke, nous avons constaté, l'apparition de fissures apparentes là où un mûrissement à l'eau « classique » avait été appliqué après 24 heures, sans toutefois pouvoir, à cette époque, expliquer l'apparition de ces fissures. De plus, nous avons pu aussi constater qu'en des endroits où l'entrepreneur avait négligé le mûrissement aucune fissure n'était apparue.

Une des conséquences de ces problèmes de fissuration, les quelques fois où ils se sont développés, a été de discréditer la durabilité du BHP et de minimiser son utilisation, sans toutefois mettre en évidence l'importance du mûrissement. Conséquemment, nos travaux de recherche visent à déterminer le développement du retrait total et du retrait endogène d'un BHP mûri de quatre façons différentes afin, si possible, de contrôler cet aspect négatif des BHP.

4 MATÉRIAUX ET MODES DE MÛRISSEMENT

Cette section a pour objectif de présenter le béton utilisé lors de cette recherche ainsi que, ses caractéristiques à l'état frais et durci. De plus, les différents modes de mûrissement utilisés sont brièvement expliqués.

4.1 Fabrication du béton

4.1.1 Composition du BHP utilisé

Un BHP de rapport E/C égal à 0,30 a été utilisé lors des essais de cette recherche. Le ciment utilisé est de Type 10SF. Ce ciment composé contient 8% de fumée de silice (SF). La composition du BHP utilisé est présentée au Tableau 4.1.

TABLEAU 4.1- COMPOSITION TYPE DU BHP DE RAPPORT E/C ÉGAL À 0,30

Constituants	Proportions SSS
Eau	131 kg/m ³
Ciment Type 10SF ; d=3,10	450 kg/m ³
Sable naturel	720 kg/m ³
Calcaire métamorphique 14 mm	1050 kg/m ³
Superplastifiant Disal densité=1,21 ; % solide = 42%	6,2 l/m ³
Réducteur d'eau - TCDA DX	250 ml/m ³
AEA – Air Extra	60 ml/m ³

4.1.2 Séquence de malaxage

La séquence de malaxage pour fabriquer un BHP est celle normalement utilisée dans les centrales de béton prêt à l'emploi. Cette séquence a été utilisée pendant tous les essais lors de la coulée des dalles de BHP.

Avant de commencer le malaxage, on commence par homogénéiser le sable dans le malaxeur et l'on détermine sa teneur en eau afin de pouvoir déterminer avec précision la quantité d'eau de gâchage à rajouter pour contrôler de façon précise le rapport E/C. Ensuite, le gros granulat est ajouté sur le sable sans toutefois le malaxer. Ensuite, l'agent entraîneur d'air (AEA) est répandu sur le gros granulat. Le malaxage du béton peut commencer.

La séquence de malaxage est schématisée à la figure 4.1

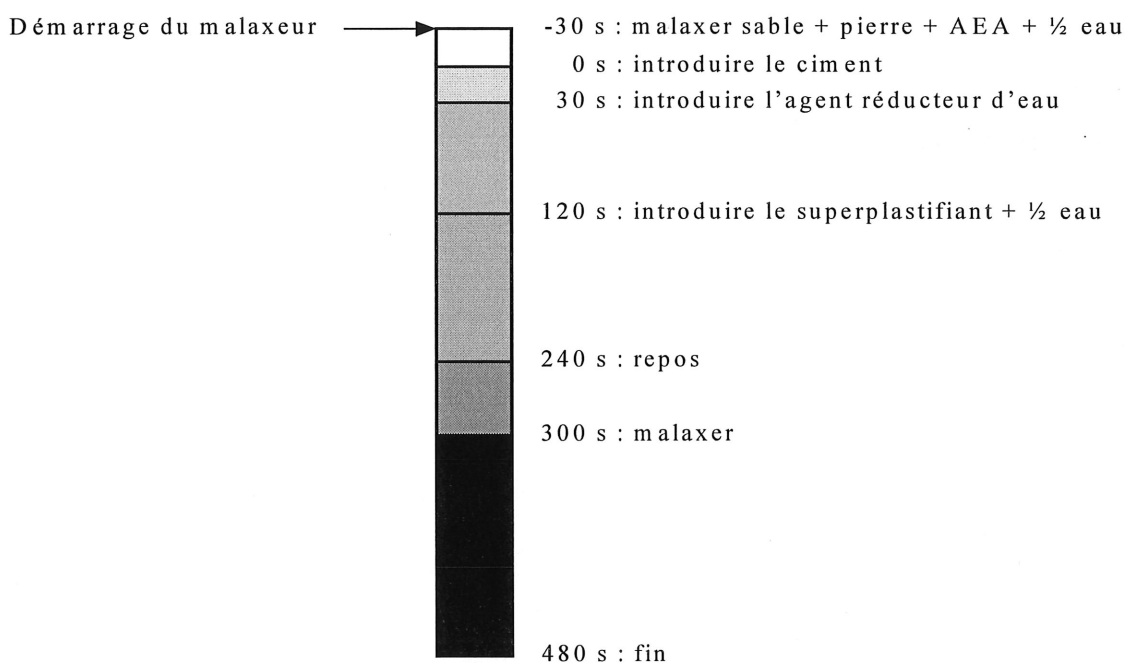


Figure 4.1. Séquence de malaxage lors de la fabrication du BHP

Une fois les caractéristiques du béton frais vérifiées et conformes aux exigences préalablement établies, le BHP a été mis en place dans les coffrages. Le béton frais est placé délicatement autour des instruments afin d'éviter leur endommagement. Une fois, les instruments de mesure recouverts de béton, le BHP est mis en place à l'aide d'une pelle et vibré par la suite à l'aide d'une aiguille vibrante.

Les figures 4.2 et 4.3 présentent les activités de mise en place du béton.

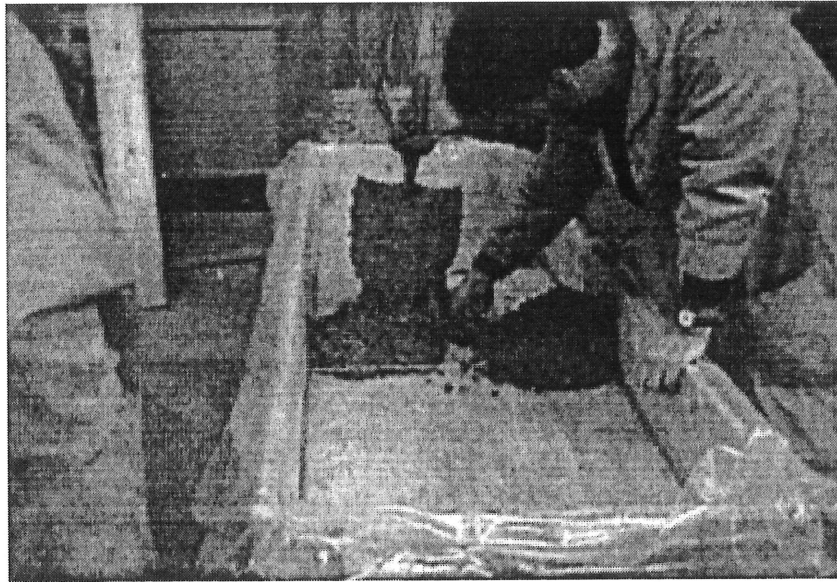


Figure 4.2 La mise en place du BHP dans le coffrage près d'une corde vibrante

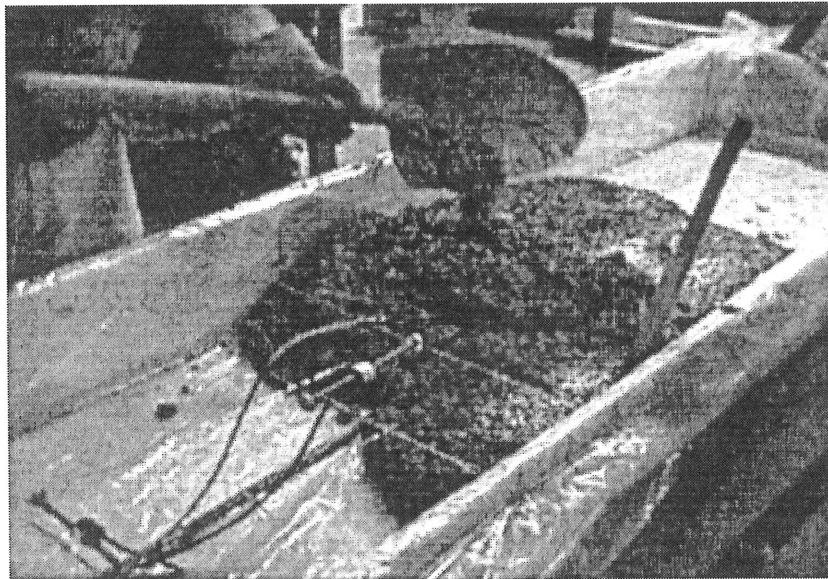


Figure 4.3 La mise en place du BHP dans le coffrage

La figure 4.4 présente une dalle type de BHP à la fin de la mise en place.

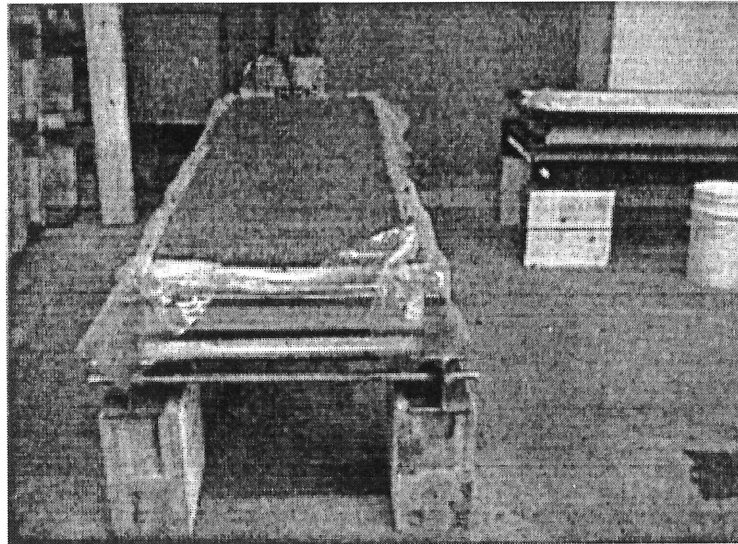


Figure 4.4 Fin d'activité de mise en place d'une dalle type

Les dalles sont posées sur des supports et sont donc soumises à l'effet de leur propre poids.

4.2 Caractéristiques du béton frais et durci

Les caractéristiques du béton frais et durci ont été déterminées selon la norme canadienne CSA A23.1-94. Cette norme est présentement celle toujours en vigueur pour tous les essais effectués sur le béton sur chantier. Tous les essais effectués sur béton ont été conformes à cette norme.

Les caractéristiques du béton frais et durci sont présentées au tableau 4.2.

TABLEAU 4.2- CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON FRAIS ET DURCI

Essais sur béton frais et durci				
Dalle	Affaissement (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en air (%)	f _c à 28d (MPa)
D1	180	2355	6,5	76,3
D2	160	2295	6,1	--*
D3	170	2405	4,4	83,0
D4	180	2355	6,5	74,5

* f_c à 28d non disponible pour cette dalle

La résistance à la compression à 28 jours a été déterminée en fonction de la moyenne obtenue sur 3 échantillons de béton. De plus, on peut remarquer que la teneur en air de la dalle D3 est inférieure à celle des 3 autres dalles. Ceci explique pourquoi la résistance à la compression mesurée après 28 jours est supérieure à celle des 2 autres dalles. La résistance à la compression de la dalle D3 n'est pas disponible car lors de la compilation de tous les résultats, cette dernière était manquante.

4.3 Modes de mûrissement

Les quatre modes de mûrissement que nous avons retenus lors de ces travaux sont les suivants :

4.3.1 Mûrissement sans eau (MSE)

Immédiatement après la finition de la surface supérieure de la dalle, une feuille de plastique est étendue sur le béton frais pour la recouvrir complètement et ce, pour une période de 7 jours.

Malheureusement, ce mode de "non-mûrissement", qui peut déjà être très dommageable pour un béton ordinaire est encore trop souvent utilisé dans le domaine de la construction. C'est pourquoi nous avons tenu à vérifier ce que ce manque de mûrissement pouvait entraîner au niveau du développement du retrait dans une dalle de BHP.

4.3.2 Mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)

Ce mûrissement suit les recommandations du Ministère des transports du Québec pour les bétons ordinaires.

Immédiatement après la finition de la surface exposée de la dalle, un produit transparent appelé retardateur d'évaporation, est appliqué par vaporisation, puis après 24 heures, on applique un géotextile humide que l'on recouvre ensuite d'une feuille de plastique. Le mûrissement se poursuit jusqu'au 7^e jour.

4.3.3 Mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)

Ce mûrissement consiste à appliquer une mince couche d'eau sur la surface supérieure de l'élément, 3 heures après la coulée jusqu'au 7^e jour. Initialement, l'eau est coulée délicatement sur la surface supérieure pour ne pas endommager la qualité du béton. Pendant, 7 jours, l'eau est rajoutée afin de s'assurer que cette surface est toujours garder mouillée. La surface supérieure est gardée immerger d'eau pendant toute la durée de ce mûrissement.

4.3.4 Mûrissement quasi adiabatique (MA)

Immédiatement après la finition de la surface supérieuree de la dalle, on commence par appliquer, un géotextile humide puis on le recouvre d'une feuille de plastique. Finalement, on place une laine minérale isolante au-dessus du tout. Cette laine couvre entièrement toutes les surfaces de l'élément. La durée de ce mûrissement est de 7 jours.

Les figures 4.5 à 4.8 présentent les dalles soumises aux différents modes de mûrissement.



Figure 4.5 Mûrissement sans eau (MSE)

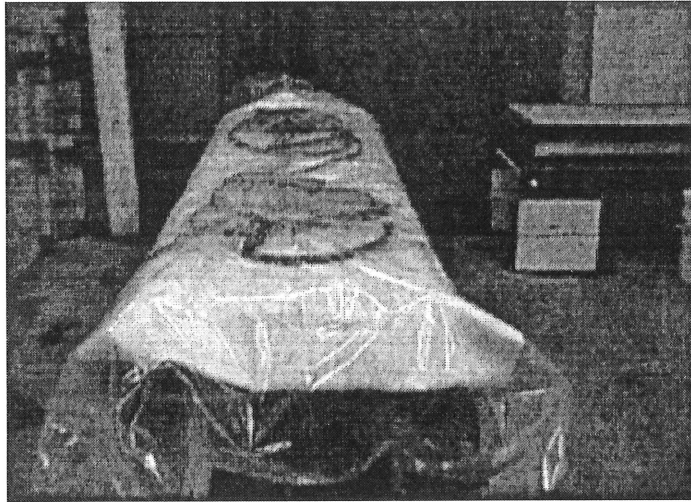


Figure 4.6 Mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)

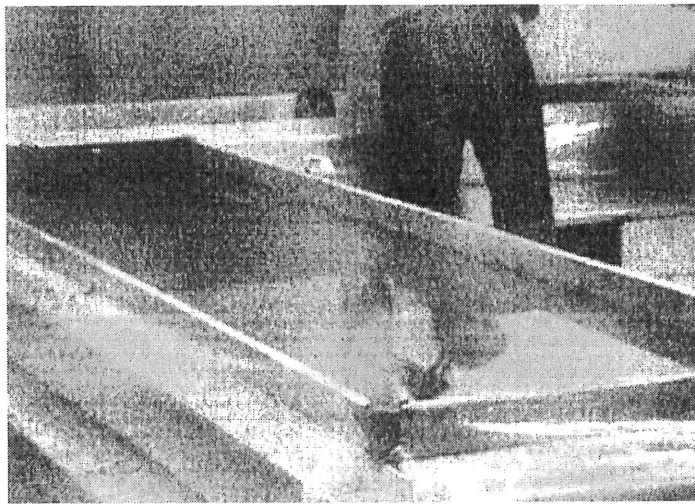


Figure 4.7 Mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)

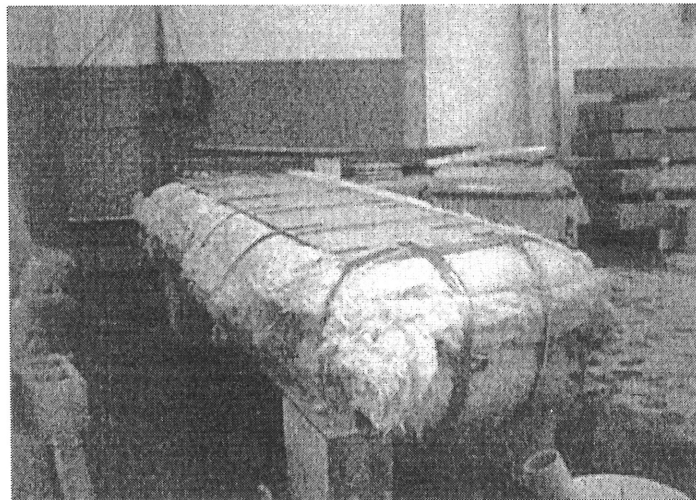


Figure 4.8 Mûrissement quasi adiabatique (MA)

Le tableau 4.3 identifie les 4 modes de mûrissement effectués pour chaque dalle.

TABLEAU 4.3 - LES MODES DE MÛRISSEMENT DE CHAQUE DALLE

Dalle	Mode de mûrissement
D1	Mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)
D2	Mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)
D3	Mûrissement sans eau (MSE)
D4	Mûrissement quasi adiabatique (MA)

4.3.5 Le décoffrage

Après une semaine, indépendamment du mode de mûrissement, tout matériel recouvrant la surface supérieure de la dalle de béton a été enlevé ainsi que le fond du moule. Le BHP est exposé à l'air à l'exception du coffrage latéral qui lui a été enlevé 28 jours après la coulée du BHP.

La figure 4.9 présente une photo d'une dalle type décoffrée.

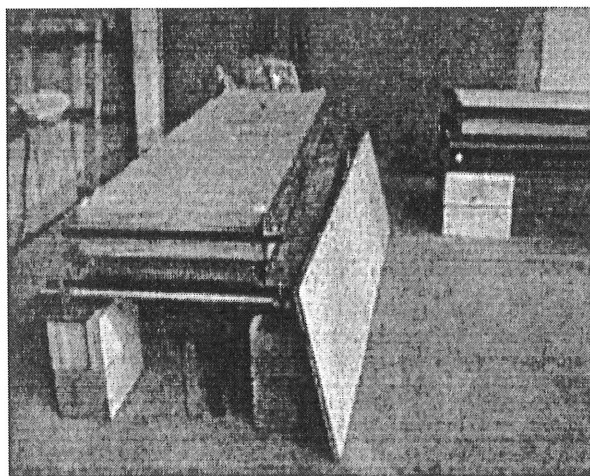


Figure 4.9 Décoffrage d'une dalle type

5 MÉTHODOLOGIE

Nous présentons la méthodologie utilisée pour effectuer l'acquisition des données à l'aide de jauge de déformation à corde vibrante. Ce type de jauge permet aussi de mesurer la température. Les jauges utilisés sont des extensomètres à corde vibrante de Roctest de modèle EM-5.

5.1 Traitement des données

Le système d'acquisition utilisé est un CR10 relié à un ordinateur qui permet d'enregistrer en continu des données brutes recueillies par les jauges de déformation à corde vibrante. Initialement, l'intervalle entre chaque enregistrement est de 15 minutes durant toute la période de mûrissement. Après le 7^e jour, l'intervalle est rallongé pour permettre l'acquisition de données à toutes les heures jusqu'au 28^e jour. Par la suite, l'acquisition de données est effectuée de façon ponctuelle, au besoin.

Les lectures brutes doivent être ensuite traitées pour permettre de décomposer la nature des mesures effectuées par les jauges de déformation à corde vibrante. Une fois les lectures brutes traitées, on obtient les déformations et les températures.

Les lectures brutes des jauges de déformation à corde vibrante enregistrées par l'ordinateur sont celles d'une tension (V : mV) et d'une fréquence (f : en Hz).

Les équations nécessaires pour traiter les lectures brutes sont les suivantes :

5.1.1 *Équations des jauges à déformation à corde vibrante (CV)*

Température des cordes vibrantes

L'équation 5-1 permet de déterminer les températures des cordes vibrantes à l'aide des données brutes. L'équation 5-1 est la suivante :

$$T(CV) = \frac{1}{(1,49896 \times 10^{-3} + 2,3781 \times 10^{-4} \times \ln(Rt) + 2,3781 \times 10^{-7} \times (\ln(Rt))^3)} - 273,15 \quad (5-1)$$

où T(CV) en (°C)

avec $Rt = 2000 \times [(6250/V) - 3]$ et V ; donnée brute obtenue par le CR10.

Déformation totale (ε tot)

L'équation 5-2 permet de transformer les données brutes des cordes vibrantes en déformation totale. L'équation 5-2 est la suivante :

$$\varepsilon \text{ tot} = 4,0624 \times 1000 \times (f - f_0) + 11,5 \times [T(CV) - T(CV)_0] \quad (\mu\text{m/m}) \quad (5-2)$$

f ; déformation donnée par le CR10.

f₀ ; valeur initiale de la déformation f

Les équations utilisées pour calculer le retrait endogène seront présentées ultérieurement. Certaines hypothèses doivent être posées et expliquées avant de présenter les relations qui permettent de calculer le retrait endogène. Jusqu'à maintenant les calculs du retrait endogène prenaient en compte un coefficient de dilatation thermique constant [Lepage et coll., 1998 ; Bonneau et coll. 1999 ; Seigneur, 2001], par contre grâce aux travaux de Kada et coll. [2000] nous pouvons intégrer maintenant la variation du CDT dans nos calculs du retrait endogène.

Les sections suivantes présentent certaines hypothèses qui ont été faites afin de calculer le retrait endogène à partir des données brutes enregistrées à l'aide des cordes vibrantes.

5.2 La valeur initiale de la déformation (f₀)

L'acquisition des données brutes débute dès le branchement du CR10 et de l'ordinateur soit, dès la mise en place du béton. En conséquence, les premières données brutes peuvent varier durant les activités de bétonnage, car les cordes vibrantes peuvent être déstabilisées durant

cette courte période de manutention du béton. Conséquemment, les données brutes avant le début de prise sont éliminées.

Les cordes vibrantes sont utilisées dans le but de mesurer le retrait total et de calculer le retrait endogène. Le traitement des données à l'aide de corde vibrante exige la détermination de la valeur initiale de la déformation (f_0). Cette valeur d'origine permet de tracer les courbes de déformation en fonction du temps. L'origine des calculs de déformation a été choisie à la fin de la période dormante. À ce moment-là, sur la courbe donnant la température en fonction du temps, on constate que la température commence à s'élever. Le phénomène s'explique par le début d'une activité thermique. Typiquement, cette reprise accélérée de l'hydratation est due aux silicates, elle se produit entre 9 et 12 heures après le contact entre l'eau et le ciment dans un BHP.

5.3 Les déformations relatives au fluage

Une fois les données brutes des jauges à cordes vibrantes traitées, on peut déterminer les déformations totales et tenir compte des déformations relatives aux variations de température du béton. Toutefois, les déformations relatives au fluage ne peuvent être éliminées des déformations calculées. Conséquemment, les déformations totales dans le béton incluent les déformations dues au fluage.

5.4 Le coefficient de dilatation thermique (CDT)

5.4.1 Introduction

À la section 2.8, nous avons présenté l'évolution de CDT à l'aide de la figure 2.1 [Laplante, 1993]. Nous avons vu que le CDT subit de grandes variations lorsque le béton passe de l'état plastique à l'état durci soit, dès que le ciment est mis en contact avec l'eau. Étant donné que le retrait endogène se développe dans les BHP dès le début du processus d'hydratation, donc lorsque le CDT varie, nous devons considérer ces variations dans nos calculs du retrait endogène. Antérieurement, la valeur de CDT utilisée dans les calculs de

retrait endogène à l'aide des cordes vibrantes était uniquement la valeur du CDT du béton durci. La valeur du CDT du béton durci est déterminée à l'aide d'un LVDT (Linear variable differential transducer). Nous expliquerons à la sous-section suivante cette méthode. La période initiale de variation du CDT jusqu'à sa valeur quasi constante a été déterminée à l'aide de la figure 2.1 en appliquant certaines hypothèses concernant l'évolution du CDT. Par la suite, ces hypothèses seront intégrées dans le calcul du retrait endogène. Pour fin de compréhension, nous reproduirons la figure 2.1 et nous y ajouterons la courbe simplifiée montrant l'évolution du CDT. Ces deux courbes seront présentées à la figure 5.1.

Présentement, Kada et coll. [2000] essayent de développer une méthode qui permettra de connaître les valeurs de CDT au cours de l'hydratation durant les 24 premières heures en étudiant la réponse d'une éprouvette de béton à des chocs thermiques. Pour notre recherche, nous nous référons aux travaux de Kada et coll. [2000], c'est ce que nous avons fait à la figure 5.1 pour poser nos hypothèses de calcul afin de déterminer les variations du coefficient de dilatation thermique jusqu'à ce que sa valeur soit devenue quasi constante. Les travaux de Kada et coll. [2000] sont présentement en cours, d'où la nécessité de poser certaines hypothèses lors de nos travaux de recherche pour tenir compte de la variation du CDT dès le contact du ciment avec l'eau. Les hypothèses posées constituent cependant une bonne approximation du comportement réel du CDT [Petrov et coll., 2000]. Cette approximation est plus près de la réalité que celle qui consiste à seulement considérer le CDT comme constant lors de la prise du béton [Bonneau et coll., 1999].

5.4.2 Détermination du CDT du béton durci

Le coefficient de dilatation thermique du béton durci déterminé expérimentalement par Valérie Seigneur a été trouvé égal à $6,9 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ pour le BHP de rapport E/C égal à 0,30. Le coefficient de dilatation thermique a été déterminé à l'aide de capteurs LVDT. Ces derniers permettent de mesurer l'élongation d'un cylindre en fonction de la variation de température. La pente de la droite donnant l'élongation en fonction de la variation de température permet de déduire le coefficient de dilatation thermique du béton durci. Cette méthode n'est pas normalisée.

Toutefois, il est important de noter que le coefficient de dilatation thermique obtenu par cet essai est déterminé lorsque le béton a durci. Une fois, le béton durci, le coefficient de dilatation thermique a atteint une valeur quasi constante propre au béton fabriqué. Maintenant, nous allons considérer l'évolution initiale du CDT lorsque le béton est à l'état plastique.

5.4.3 Variation du CDT en fonction du temps

Pour commencer nous présentons la figure 5.1. Cette figure présente l'évolution du CDT d'un béton ordinaire en fonction de l'âge équivalent à 20°C [Laplante, 1993].

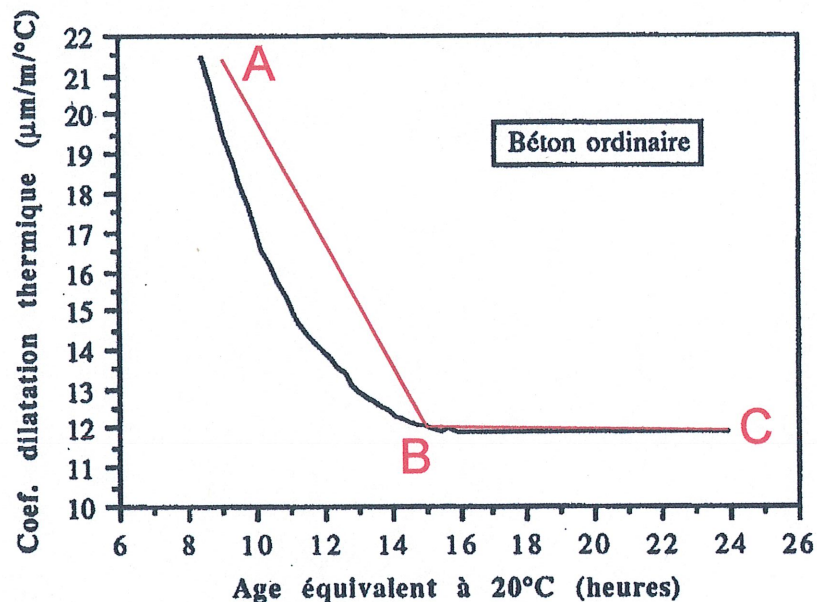


Figure 5.1 Variation du CDT en fonction du temps pour un béton ordinaire et la courbe type utilisée lors de nos calculs

La figure 5.1 présente les variations du CDT d'un béton et la courbe de couleur rouge représentant le CDT pris en compte dans nos calculs.

Sur la figure 5.1, on constate qu'initialement, dès la mise en place du béton, le coefficient de dilatation thermique varie selon l'état de durcissement du béton. Le coefficient de dilatation thermique est très élevé lorsque le béton est à l'état plastique pour ensuite diminuer et se stabiliser à une valeur quasi constante une fois le béton durci.

Hypothèses de calcul pour considérer la variation du CDT lors de la prise du béton

1. La valeur quasi constante est considérée constante [Figure 5.1 ; point de B à C]
2. La coordonnée du point C est égale à la valeur du CDT du béton durci à 24 heures : (24 heures, 6,9 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)
3. La décroissance du CDT à partir de sa valeur initiale maximale jusqu'à sa valeur quasi constante est considérée comme linéaire [Figure 5.1 ; courbe allant de A à B]
4. La valeur maximale (déformation maximale) du CDT au début de la courbe est égale à 3 fois la valeur du CDT déterminée pour le BHP durci [Figure 5.1 ; point A] [Petrov et coll. ; 2000]. Cette valeur n'est qu'une approximation. Toutefois, elle est plus réaliste que si nous considérons un CDT constant.
5. Les coordonnées correspondantes du point A sont (t_0 , $3 \times 6,9$). On définit t_0 comme l'heure qui correspond à la déformation à l'origine des mesures (f_0), soit l'heure de la fin de la période dormante déterminée pour chaque dalle de BHP coulée lors de nos travaux. On peut noter que la fin de la période dormante varie selon le mode de mûrissement retenu pour chaque dalle.
6. Une fois la valeur constante du CDT atteinte, la coordonnée correspondante du début de la partie constante de la courbe constante équivaut au maximum du flux thermique et le temps correspondant. Le temps relatif à la fin de prise varie selon chaque mode de mûrissement [Figure 5.1 ; point B].

Ces hypothèses nous permettent d'établir les deux équations linéaires qui représentent la valeur du coefficient de dilatation thermique. Ces deux équations permettent de suivre l'évolution estimée du CDT. Les équations sont les suivantes :

Équation lorsque le CDT varie en fonction du temps

La variation linéaire du CDT est présentée par l'équation 5-3 suivante :
point A à B

$$\text{CDT var (t)} = [2\text{CDT}_{\text{ct}} / (t_0 - t_1)] \times (t - t_0) + 3\text{CDT}_{\text{ct}} \quad \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C} \quad (5-3)$$

Une fois le béton durci, la valeur du CDT est la suivante :
point B à C

$$CDT(t) = cte \quad \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C} \quad (5-4)$$

Où $CDT_{ct} = 6,9 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ pour le BHP de notre étude.

Les valeurs calculées à l'aide des équations 5-3 et 5-4 sont ensuite compilées pour obtenir l'évolution totale du CDT pour chaque dalle de BHP.

Après avoir trouvé les deux équations qui nous permettent d'effectuer les corrections thermiques, nous allons présenter maintenant à la sous-section suivante les 2 relations qui permettent de déterminer le retrait endogène à l'aide des données brutes des cordes vibrantes.

5.4.4 Déformation endogène (ε_{end})

Déformation endogène (ε_{end}) avec CDT variable

L'équation 5-5 est utilisée pour calculer le retrait endogène lorsque le CDT varie.

$$\varepsilon_{end} = 4,0624 \times 1000 \times (f - f_0) + (11,5 - CDT \text{ var}) \times [T(CV) - T(CV)_0], \quad (\mu\text{m}/\text{m}) \quad (5-5)$$

où $CDT \text{ var}$: valeur de CDT déterminée par l'équation 5-3

Déformation endogène (ε_{end}) pour CDT constant (CDT_{ct})

$$\varepsilon_{end} = 4,0624 \times 1000 \times (f - f_0) + (11,5 - CDT_{ct}) \times [T(CV) - T(CV)_0] \quad (\mu\text{m}/\text{m}) \quad (5-6)$$

où $CDT_{ct} = 6,9 \mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ pour BHP de notre recherche (équation 5-4)

Par la suite le calcul du retrait endogène de chaque dalle tient compte des équations 5-5 et 5-6 compilées ensemble.

5.4.5 Position des instruments

La position des capteurs est donnée en millimètres par rapport au centre du coffrage (0,0,0). À la figure 5.2 et le tableau 5.1, on retrouve respectivement la position et les coordonnées des instruments inclus dans chacune des dalles.

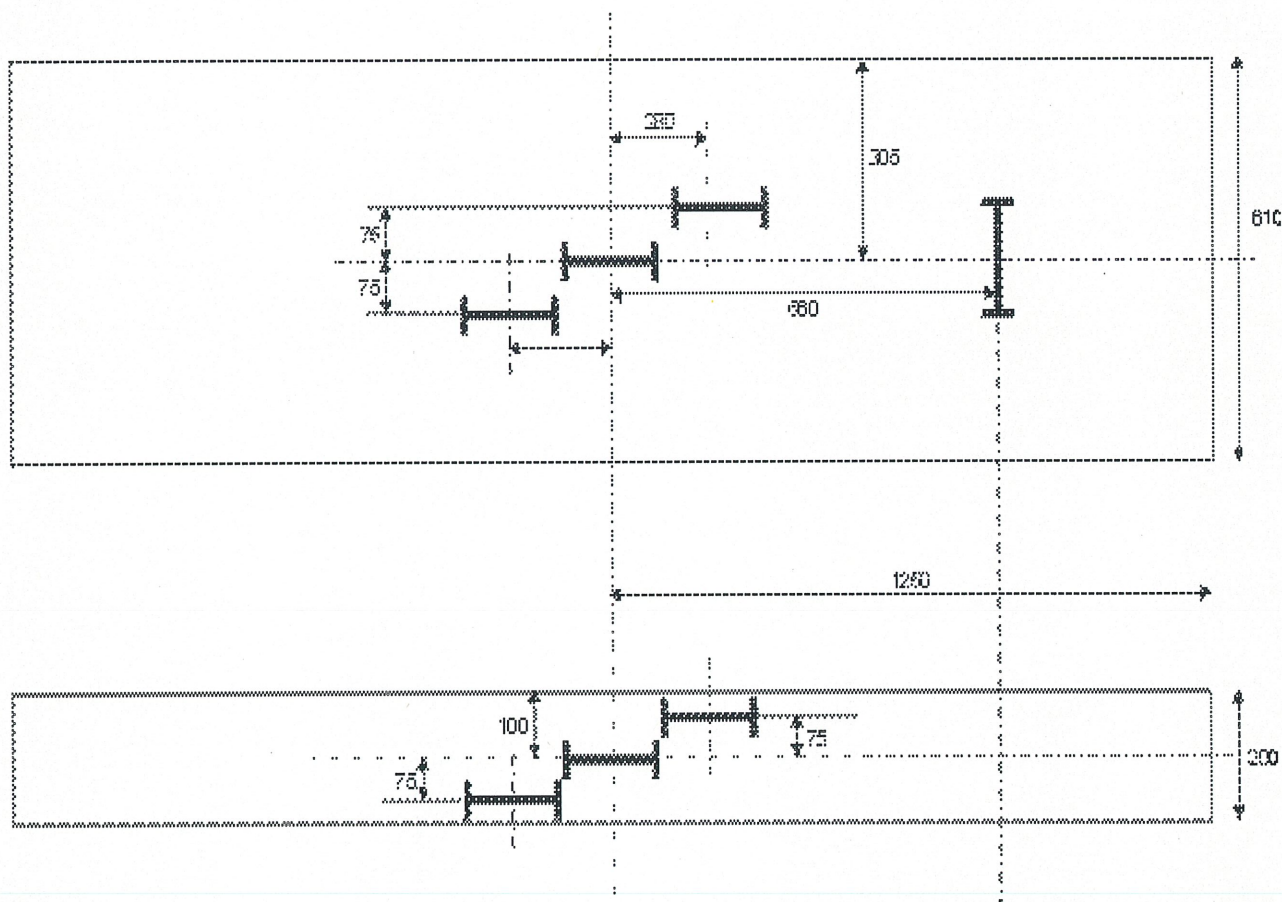


Figure 5.2 Vues en plan et en élévation de la position des instruments dans les dalles

TABLEAU 5.1-COORDONNÉES DES INSTRUMENTS DANS LA DALLE

Type d'instrument	Coordonnées (en mm)	Commentaires
CV1	280, 75,-75	Longitudinale au fond
CV2	0,0,0	Longitudinale au cœur
CV3	-280,-75, 75	Longitudinale au-dessus
CV4	-610,0,0	Transversale au cœur

La figure 5.3 montre le positionnement des cordes vibrantes installées avant la mise en place du béton.

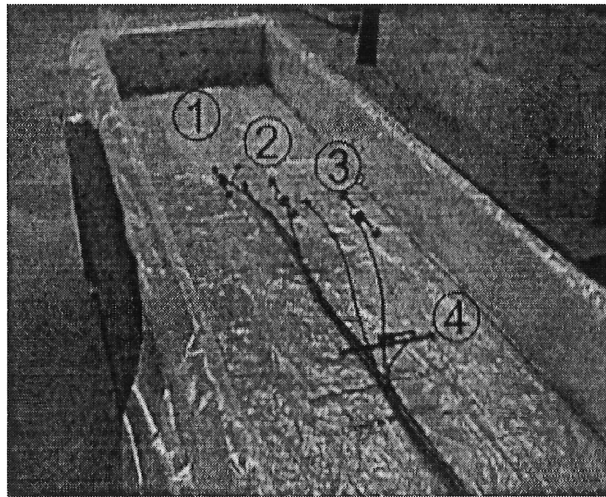


Figure 5.3 Positionnement des cordes vibrantes avant la coulée du BHP

Une photographie d'une corde vibrante est présentée à la figure 5.4.

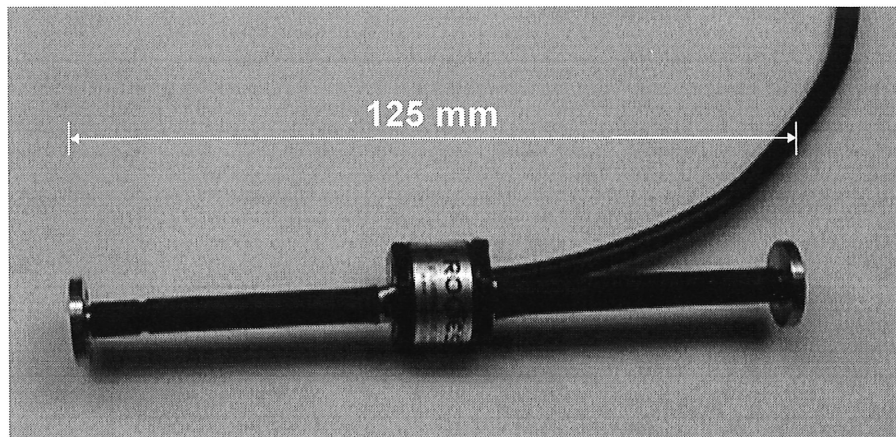


Figure 5.4 Photo d'une jauge de déformation à corde vibrante

5.4.6 Conclusion

La méthode d'acquisition de données à l'aide de jauge à cordes vibrantes qui permet de déterminer le retrait endogène est relativement simple à utiliser. À l'aide des cordes vibrantes, nous pouvons, en tout temps, mesurer ponctuellement le retrait. Il suffit de brancher l'ordinateur et le CR10, effectuer une prise de données brutes et ensuite les traiter. Les travaux actuels permettent de tenir compte de la variation du CDT en fonction du temps et de s'approcher de la valeur réelle du retrait endogène.

6 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Introduction

L'analyse des résultats est effectuée selon les données obtenues à l'aide des jauges de déformation à corde vibrante. À la section 5.2, nous avons mentionné que l'origine des calculs de déformation a été choisie à la fin de la période dormante puisque c'est à ce moment que nous constatons un début d'activité thermique.

L'acquisition des données brutes par corde vibrante permet de déterminer la déformation totale du béton après que les données brutes ont été transformées. La déformation totale mesurée du BHP tient compte de la déformation thermique ($\varepsilon_{\text{therm}}$), de la déformation endogène (ε_{end}) et de la déformation due au séchage ($\varepsilon_{\text{séc}}$). La déformation totale est définie à l'aide de l'équation 6-1 suivante :

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{end}} + \varepsilon_{\text{séc}} \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-1)$$

La déformation thermique des cordes vibrantes est déterminée en considérant l'évolution du CDT selon l'état du béton en fonction du temps. La déformation thermique est présentée par les équations 6-2a et 6-2b suivantes :

$$\varepsilon_{\text{therm}} = \sum \varepsilon_{\text{therm } i} \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-2a)$$

où

$$\varepsilon_{\text{therm}} = \text{CDT}_i \times [T(\text{CV})_i - T(\text{CV})_{i-1}] \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-2b)$$

où CDT_i : CDT correspondant à $T(\text{CV})_i$ instantané selon l'intervalle de mesure

Les essais ont été effectués en laboratoire à température ambiante à l'exception de la dalle dont le mûrissement a été fait en condition quasi adiabatique (en limitant les échanges de chaleur avec l'extérieur). Conséquemment, nous devons déterminer la déformation isotherme

(ϵ iso) correspondante. La déformation isotherme tient compte de la déformation endogène et de la déformation due au séchage. L'équation 6-3 correspond à la déformation isotherme.

$$\epsilon \text{ iso} = \epsilon \text{ end} + \epsilon \text{ séc} \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-3)$$

Il est difficile de séparer le retrait de séchage du retrait endogène. Toutefois, lors des différents modes de mûrissement, nous limitons l'évaporation donc le retrait de séchage qui peut être alors considérée comme négligeable par rapport à la déformation endogène. En conséquence, durant le mûrissement, la déformation isotherme peut être considérée équivalente à la déformation endogène.

Puisque l'évaporation est limitée, l'équation 6-3 peut se réécrire comme suit :

$$\epsilon \text{ iso} \approx \epsilon \text{ end} \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-4)$$

Conséquemment,

$$\epsilon \text{ iso} = \epsilon \text{ tot} - \epsilon \text{ therm} \approx \epsilon \text{ end} \quad (\mu\text{m/m}) \quad (6-5)$$

La déformation isotherme correspond à la déformation totale à laquelle on soustrait la déformation thermique.

Maintenant que nous vous avons présenté les équations qui permettent de déterminer les différents retraits qui peuvent se produire lors de l'hydratation, les sections suivantes serviront à analyser et à présenter graphiquement les températures et les déformations obtenues selon les différents modes de mûrissement pour chaque dalle. Dans un deuxième temps, nous avons coulé un bloc (700x700x700 mm) avec le même BHP que celui que nous avons utilisé dans notre recherche afin de vérifier si les dimensions de l'élément pouvaient influencer les déformations et les températures obtenues.

6.2 Anisotropie des déformations au cœur de la dalle

Initialement, nous avons installé 2 cordes vibrantes au cœur de la dalle D1 positionnées selon 2 axes horizontaux perpendiculaire l'une par rapport à l'autre (CV2 et CV4). Nous avons voulu vérifier si le retrait mesuré présentait une anisotropie dans ce plan. Après analyse, nous constatons que les valeurs obtenues pour les déformations mesurées par les deux cordes vibrantes, positionnées au cœur de la dalle (plan horizontal), perpendiculairement une par rapport à l'autre (CV2 et CV4) sont similaires. La figure 6.1 présente les déformations obtenues au cœur de la dalle pour la dalle mûrie après 24 heures.

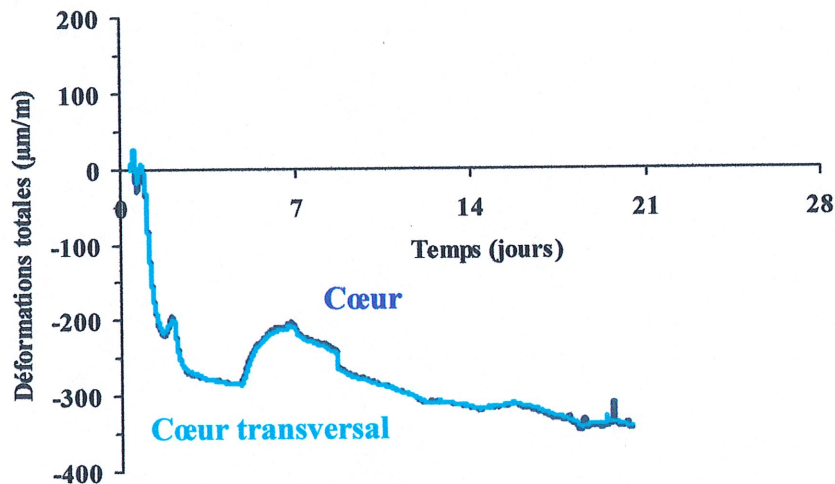


Figure 6.1 Déformation totale développée au cœur de la dalle mesurée selon 2 axes horizontaux perpendiculaires un par rapport à l'autre

On constate que les déformations totales mesurées sur les 2 cordes vibrantes sont identiques donc les déformations mesurées au cœur de la dalle sont isotropes dans le plan horizontal. En conséquence, la corde vibrante CV4 a été éliminée dans les 3 dalles suivantes. Les mêmes résultats ont été constatés pour la température. Par la suite, seulement 3 cordes vibrantes ont été installées lors des coulées subséquentes.

Afin d'uniformiser la présentation des courbes subséquentes, les trois même couleurs seront utilisées pour chacune des cordes vibrantes. Les couleurs des courbes sont les suivantes :

- Courbe rouge CV1 fond
- Courbe bleue CV2 cœur
- Courbe verte CV3 surface

6.3 Température

6.3.1 Introduction

On note que pour tous les modes de mûrissement retenus, l'activité thermique tend à se stabiliser à l'intérieur d'un intervalle de sept jours et ce, indépendamment du mode de mûrissement, même si l'acquisition a été effectuée durant au moins 21 jours. Pour bien représenter l'activité thermique développée à jeune âge dans la dalle, nous nous limiterons graphiquement à cette période de 7 jours.

6.3.2 M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures

La figure 6.2 illustre la température développée dans toute la dalle lorsque le mûrissement de cette dernière débute 24 heures après le contact entre le ciment et l'eau. Selon la figure 6.2, on constate que la dalle a subi une baisse anormale de température de plus de 10°C. Normalement, la température du laboratoire est d'environ 23°C soit la température ambiante mesurée au commencement de l'essai. Cette dalle de BHP a été coulée le 26 janvier 1999. La température de l'eau du robinet à cette période de l'année se situe aux environs de 7°C. Le mûrissement a débuté 24 heures après le contact entre le ciment et l'eau. Le mûrissement a été effectué de la façon suivante : après 24 heures, de l'eau du robinet a été utilisée de façon continue. Ensuite l'eau a été arrêtée pour une période approximative de 10 heures. Par la suite, afin de prévenir l'assèchement de la jute humide, nous avons remis de l'eau en continu pendant plus de 3 jours. Au cinquième jour de l'essai, l'eau n'a plus été utilisée qu'au besoin pour garder la jute humide. À la figure 6.2, il est possible de vérifier que l'eau à température si froide ralentit le processus d'hydratation de cet élément mince.

Les températures maximales mesurées au cœur et au fond de la dalle sont respectivement de 41°C et 40°C. La température maximale à 25 mm au-dessous de la surface supérieure est légèrement inférieure, elle est de 38°C, ce qui est conforme aux attentes à cause de la dissipation de la chaleur dans l'environnement à partir de la surface exposée. Trois jours après le début de l'essai, on constate que la température du béton est pratiquement uniforme dans toute la section de la dalle M24.

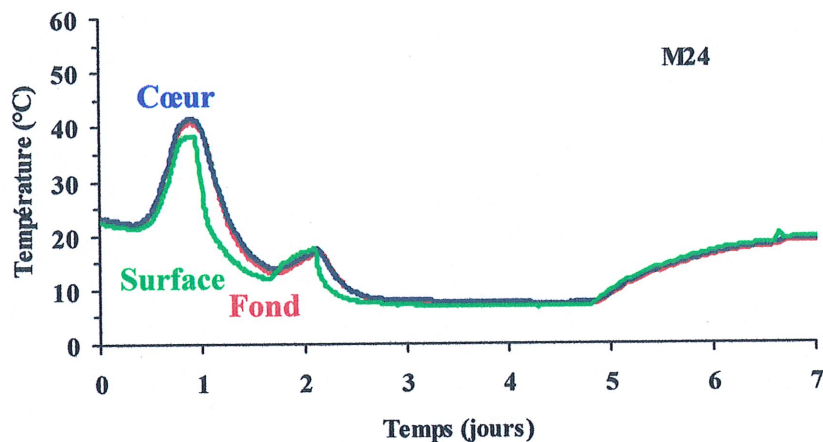


Figure 6.2 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement à l'eau après 24 heures (M24)

6.3.3 M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures

La figure 6.3 représente la température mesurée durant les 7 premiers jours selon le mûrissement à l'eau commencé 3 heures après le contact entre le ciment et l'eau. À première vue, on constate que l'essai a bien été effectué à la température ambiante usuelle du laboratoire soit, environ 23°C. De plus, la température revient à la température ambiante 3 jours après le début de l'essai. Les températures enregistrées pour le cœur et le fond de la dalle sont similaires. La température maximale est de 45°C, tandis que celle du béton près de la surface est de 41°C. La température de l'eau appliquée directement sur la surface supérieure influence la température du béton située le plus près de cette surface. De plus, on remarque qu'après 2 jours, les températures à travers la dalle sont pratiquement identiques.

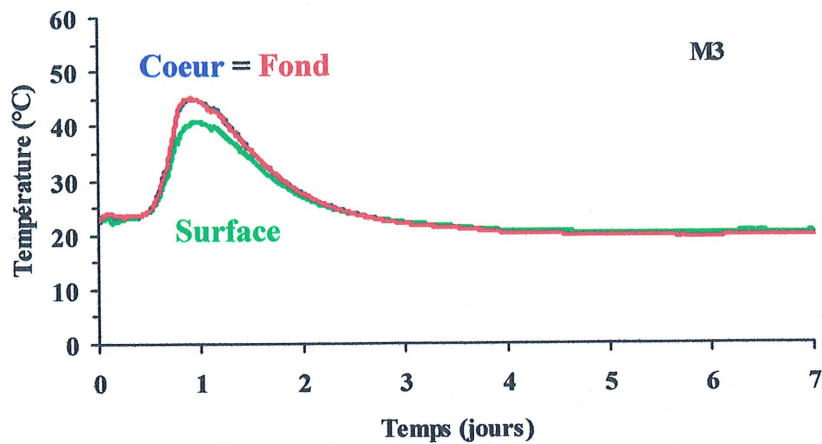


Figure 6.3 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement à l'eau après 3 heures (M3)

6.3.4 MSE - Mûrissement sans eau

La figure 6.4 montre une forte augmentation de la température qui a été supérieure à 50°C pour toutes les cordes vibrantes installées dans la dalle.

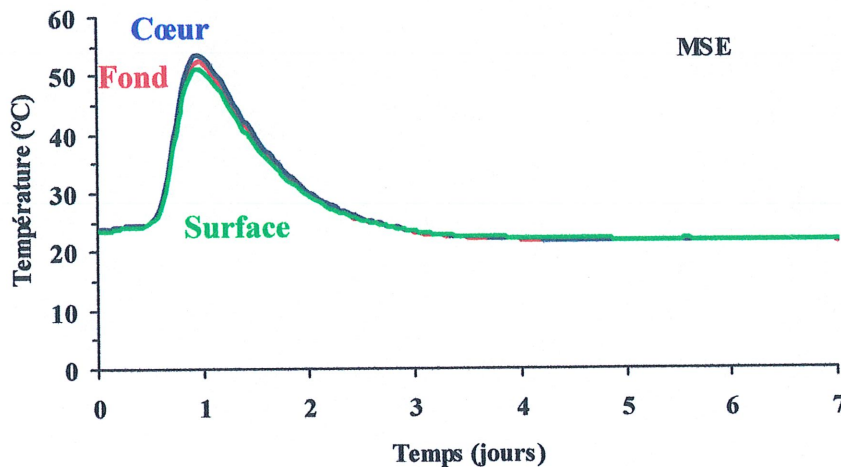


Figure 6.4 Variation de la température en fonction du temps sans aucun mûrissement (MSE)

De plus, il est à noter que la température maximale développée à la surface se rapproche des températures mesurées au cœur et au fond de la dalle. Les températures maximales mesurées sont respectivement de 51°C, 52°C et de 53°C à la surface, au cœur et au fond de la dalle.

Ceci démontre qu'en l'absence d'apport d'eau extérieure lors du mûrissement la température du béton dans la dalle est plus homogène.

6.3.5 MA - Mûrissement quasi adiabatique

La figure 6.5 présente la température en fonction du temps dans la dalle selon le mode de mûrissement quasi adiabatique.

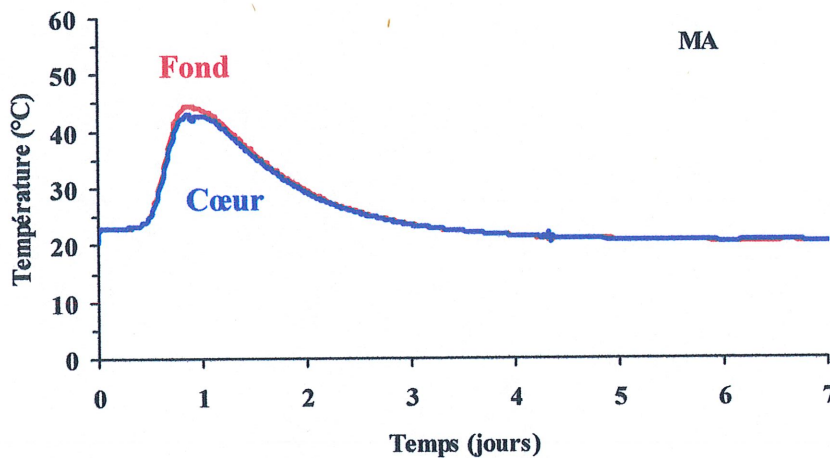


Figure 6.5 Variation de la température en fonction du temps selon le mûrissement quasi adiabatique (MA)

Étant donné qu'il s'agit d'un mûrissement où les échanges de chaleur avec l'extérieur sont limités, nous avons décidé de ne pas installer de corde vibrante près de la surface (CV3). Ainsi, nous supposons que les déformations sont semblables à proximité des surfaces (inférieure et supérieure). À l'aide de la figure 6.5, on remarque que les températures maximales développées au cœur et au fond de la dalle sont inférieures à 45°C. Le maximum de température mesuré au cœur de la dalle est de 43°C et de 44°C au fond de la dalle. De plus, on constate que la variation de la température en fonction du temps est similaire pour le fond et le cœur de la dalle. Ceci est dû à l'isolant thermique. La température légèrement plus faible

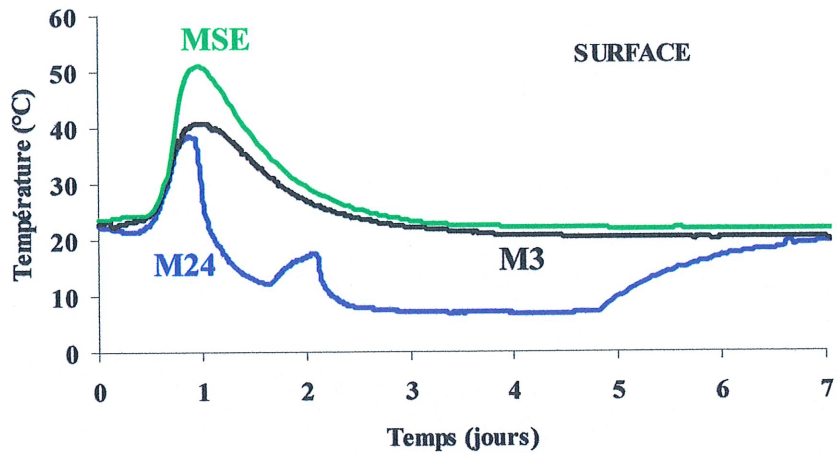
au niveau du cœur est probablement due à la présence de la jute humide sur la surface supérieure.

6.3.6 *Influence du mûrissement sur le développement de la température dans la dalle de BHP*

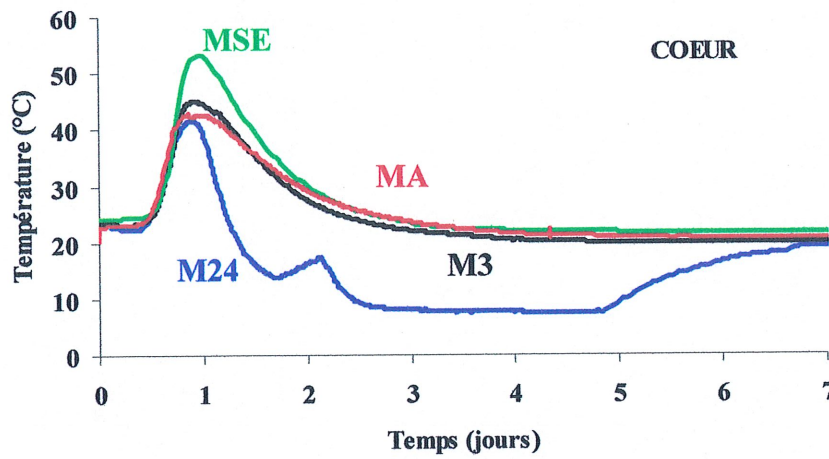
Afin d'uniformiser la présentation des courbes subséquentes, les quatre mêmes couleurs seront utilisées pour chaque mode de mûrissement. Les couleurs des courbes sont les suivantes :

- Courbe rouge MA
- Courbe noire M3
- Courbe bleue M24
- Courbe verte MSE

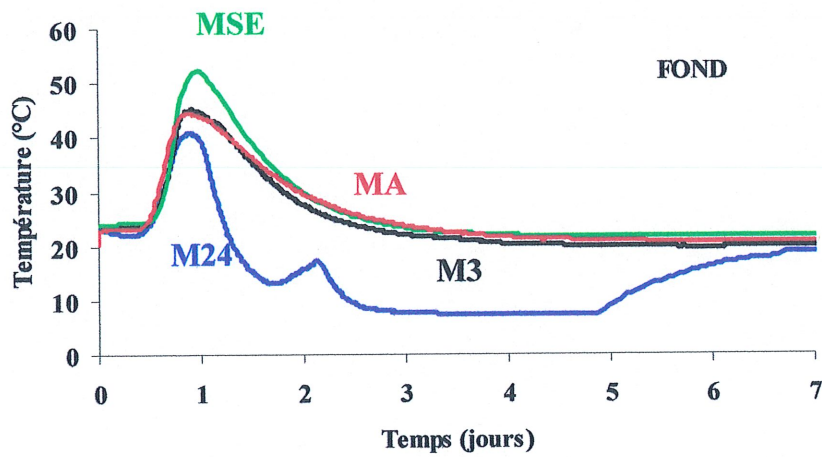
La figure 6.6 représente l'influence du mûrissement sur la température développée dans l'épaisseur de la dalle. La figure 6.6 résume l'effet du mûrissement sur la température selon la surface, le cœur et le fond de la dalle. Selon la figure 6.6, la température maximale atteinte lors des différents mûrissements varie. Toutefois, on remarque que le mode de mûrissement le plus pénalisant pour l'augmentation de température est celui où aucune eau n'est ajoutée à jeune âge sur la dalle de BHP. En outre, le refroidissement subi lors du mûrissement M24 modifie probablement la valeur maximale atteinte, car on note un deuxième accroissement de température entre le premier et le deuxième jour. On peut seulement noter qu'il y a effectivement une activité thermique importante dans la dalle de BHP puisqu'une hausse de température est mesurée entre le deuxième et le troisième jour pour ensuite diminuer de nouveau jusqu'au cinquième jour. De plus, on remarque que la température maximale développée lors du mûrissement M3 est supérieure à celle mesurée selon le mode de mûrissement M24. Lors du mûrissement MSE, la hausse de température est supérieure à celle mesurée lors des deux modes de mûrissement M3 et M24. Lors du mûrissement M3, on remarque que le fait d'ajouter de l'eau rapidement diminue la température maximale atteinte dans la dalle. À la figure 6.6, nous observons que le mûrissement quasi adiabatique provoque un dégagement de chaleur moindre par rapport aux autres modes de mûrissement de notre recherche, ce résultat surprenant peut s'expliquer par le fait que la jute humide installée et ensuite scellée dans la laine de verre semble être bénéfique pour minimiser la hausse de température au début de ce mode de mûrissement.



a)



b)



c)

Figure 6.6 Influence du mûrissement sur le développement de la température a) à la surface, b) au cœur et c) au fond de la dalle en fonction du temps

6.4 Déformation totale

6.4.1 Introduction

Les déformations totales développées dans la dalle de BHP selon les différents modes de mûrissement sont présentées dans les sous-sections suivantes. Les courbes de déformation sont illustrées durant une période d'au moins 28 jours, sauf pour M24. On constate que les variations volumétriques se stabilisent en fonction du temps, toutefois, plus lentement que l'activité thermique.

6.4.2 M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures

La figure 6.7 illustre la déformation totale mesurée dans le BHP mûri 24 heures après le contact du ciment et de l'eau pendant les 21 premiers jours. À la figure 6.7, on constate que la déformation totale est directement influencée par la faible température de l'eau du robinet. Ceci est en accord avec l'équation 6-1 puisque la déformation totale est la somme de toutes les déformations ce qui inclut la déformation thermique. Comme mentionné précédemment, la durée du refroidissement étant inconnue, on peut seulement stipuler que le refroidissement influence directement les déformations totales développées lors de ce mûrissement. Nous remarquons que la dalle de BHP, sur toute son épaisseur, a subi un très faible gonflement respectivement inférieur, à 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ au fond, à 13 $\mu\text{m}/\text{m}$ au cœur et à 10 $\mu\text{m}/\text{m}$. À la figure 6.2 de la section 6.3, il est possible de constater que le béton près de la surface a subi le plus grande baisse de température. La figure 6.7 nous permet de constater que le BHP près de la surface a développé la plus grande déformation totale soit un retrait de plus de 385 $\mu\text{m}/\text{m}$ après 21 jours. Ceci peut s'expliquer par le fait que la section près de la surface a aussi subi un retrait de séchage en plus d'un refroidissement. On note un gradient de déformation de plus de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ entre le fond et la surface de la dalle après 21 jours. La figure 6.7 démontre bien qu'après 7 jours un gradient de déformation s'installe graduellement entre la surface par rapport au cœur et au fond de la dalle. La dalle subit probablement un cambrement lors du séchage à l'air après la fin du mûrissement.

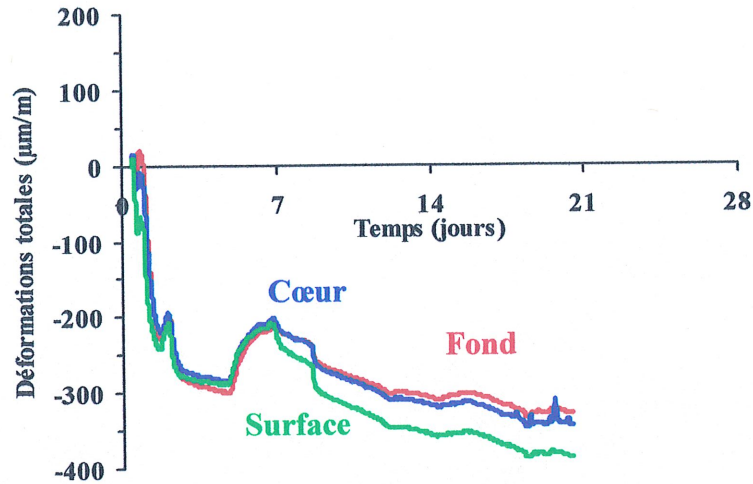


Figure 6.7 Déformation totale développée dans la dalle mûrie après 24 heures (M24)

6.4.3 M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures

La figure 6.8 présente les déformations totales obtenues dans la dalle M3 durant les premiers 28 jours. On remarque un gonflement qui se développe dès le début du mûrissement soit, 3 heures après le contact entre le ciment et l'eau et ce, dans toute son épaisseur. Le gonflement est maximal près de la surface ($148 \mu\text{m/m}$), au cœur de la dalle, le béton développe qu'un gonflement $129 \mu\text{m/m}$ et de $117 \mu\text{m/m}$ près du fond du coffrage. De plus, on constate que ces maxima sont tous mesurés 21 heures après le contact entre l'eau et le ciment soit, à très jeune âge. Le béton près de la surface se dilate pendant une durée maximale de 24 heures. Par la suite, la dalle reprend graduellement sa forme initiale pour subir ensuite un retrait. La figure 6.8 démontre qu'après les premiers 7 jours, la dalle développe une contraction volumétrique sur toute sa section verticale. On constate que le gradient de déformation totale maximal est de $140 \mu\text{m/m}$ à l'arrêt du mûrissement au septième jour dans toute la section verticale. Par la suite, le gradient est environ $100 \mu\text{m/m}$ dû au séchage à l'air de la surface exposée.

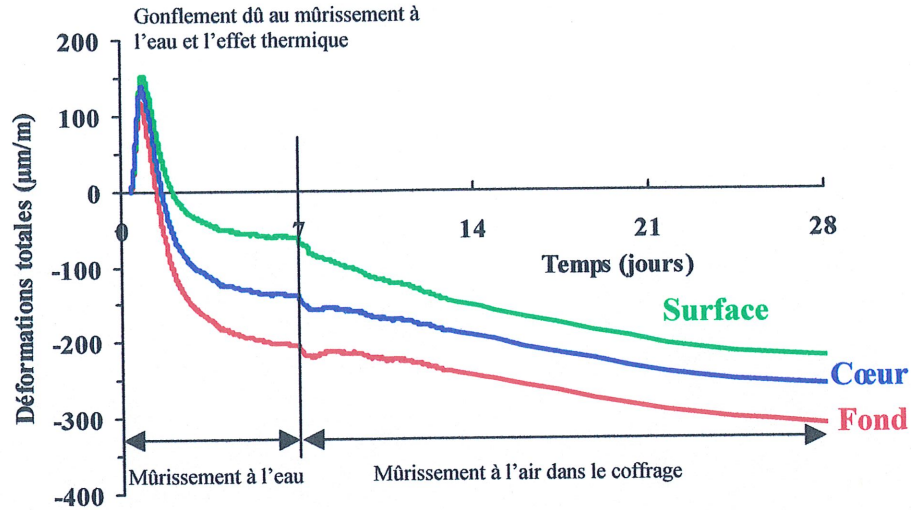


Figure 6.8 Déformation totale développée dans la dalle mûrie après 3 heures (M3)

À sept jour, le retrait le plus faible est mesuré à la surface ($60 \mu\text{m/m}$), ensuite au cœur ($138 \mu\text{m/m}$) et le plus important est au fond, soit de $204 \mu\text{m/m}$. Ceci nous permet de constater que l'effet bénéfique du mûrissement au fond du moule se fait d'autant moins sentir que l'on s'éloigne de la source d'eau. De plus, le gonflement initial causé par l'absorption de l'eau est moindre au fond qu'à la surface.

6.4.4 MSE - Mûrissement sans eau

La figure 6.9 présente les déformations totales enregistrées dans la dalle de BHP sans aucun apport d'eau pendant 28 jours. On constate que la dalle subit une dilatation dans toute sa section verticale. La dilatation maximale à la surface, au cœur et au fond de la dalle est du même ordre de grandeur. Elle varie respectivement de $115 \mu\text{m/m}$ à la surface, de $122 \mu\text{m/m}$ au cœur et de $126 \mu\text{m/m}$ près du fond du coffrage. Par la suite, la dalle subit une contraction volumétrique similaire qui dure approximativement 24 heures. Ensuite, à la figure 6.9, on constate un gradient plus important de déformation totale dans la dalle à partir du deuxième jour jusqu'au septième jour soit durant la période que le plastique recouvre complètement la dalle. Ensuite ce gradient s'estompe graduellement. Au septième jour, lorsque le plastique couvrant la dalle est enlevé, l'écart de déformation totale mesuré diminue. Ceci s'explique

probablement par l'enlèvement de la feuille de plastique et à l'exposition à l'air de la dalle. La condensation de l'eau retenue dans le plastique durant 7 jours pourrait expliquer cet écart. Une fois le plastique enlevé l'écart de déformation totale dans la section diminue dans la section verticale.

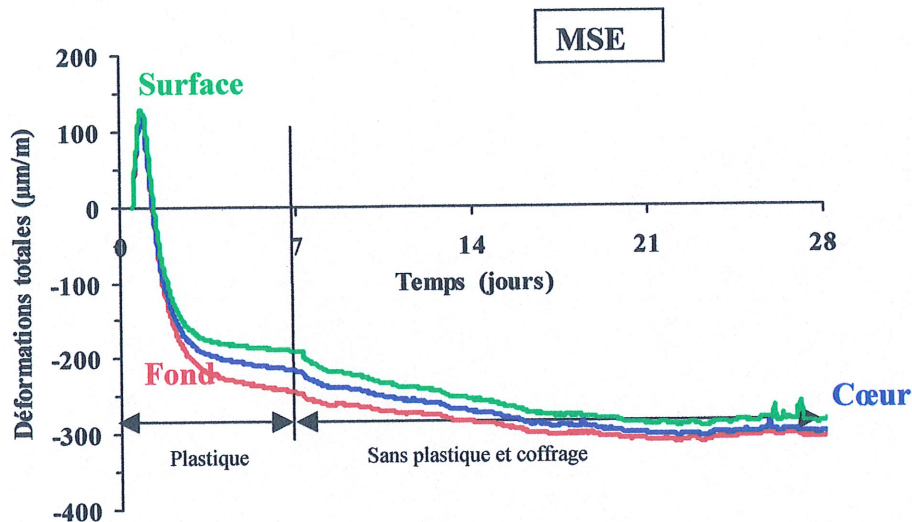


Figure 6.9 Déformation totale développée dans la dalle sans mûrissement à l'eau (MSE)

La déformation totale mesurée après 28 jours est similaire. Seul, le béton près de la surface a un retrait légèrement plus faible que celui développé au cœur et au fond de la dalle. Cette différence est probablement attribuable à la fiabilité du système de mesure.

6.4.5 MA - Mûrissement quasi adiabatique

La figure 6.10 illustre l'influence du mûrissement quasi adiabatique sur la déformation totale développée pendant 28 jours. On remarque que la dalle subit un gonflement au cœur et au fond de la dalle. Le gonflement le plus faible est mesuré près du fond de la dalle. À l'exception du gonflement maximum qui diffère au cœur (111 $\mu\text{m/m}$) par rapport à celui mesuré près du fond de coffrage de la dalle (95 $\mu\text{m/m}$), on constate que la déformation totale développée sur la section de la dalle est pratiquement identique pendant 28 jours. De plus, le retrait mesuré à partir du 7^e jour jusqu'au 28^e jour varie approximativement de 122 à 178 $\mu\text{m/m}$.

La figure 6.10 permet de remarquer que lorsque les conditions de mûrissement sont uniformes sur toute l'épaisseur de la dalle, nous obtenons les mêmes déformations totales. Le contrôle d'échanges thermiques et hydriques vers l'extérieur lors du mûrissement permet le développement uniforme des déformations totales dans toute son épaisseur.

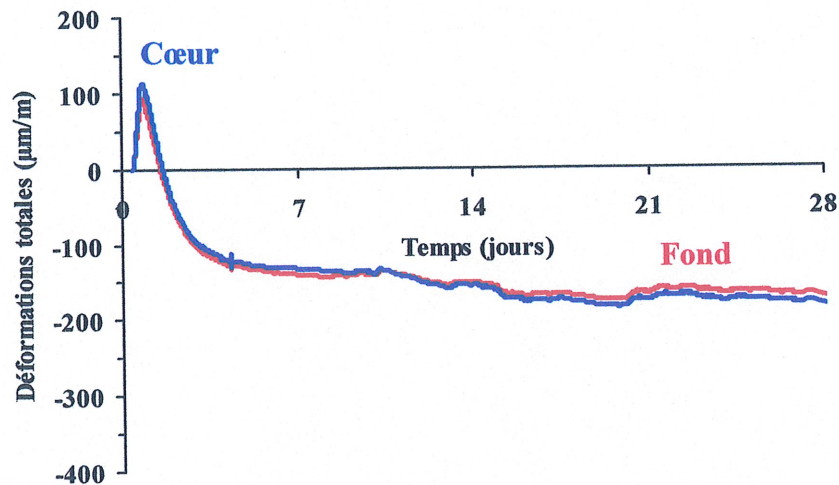
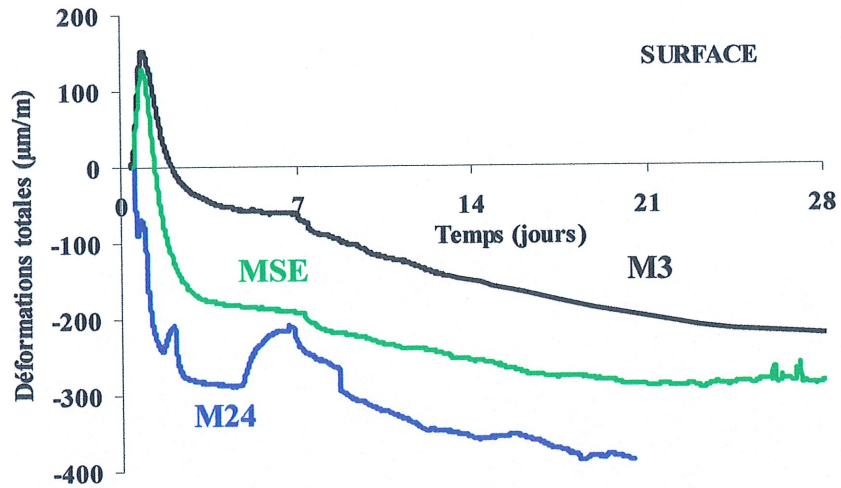


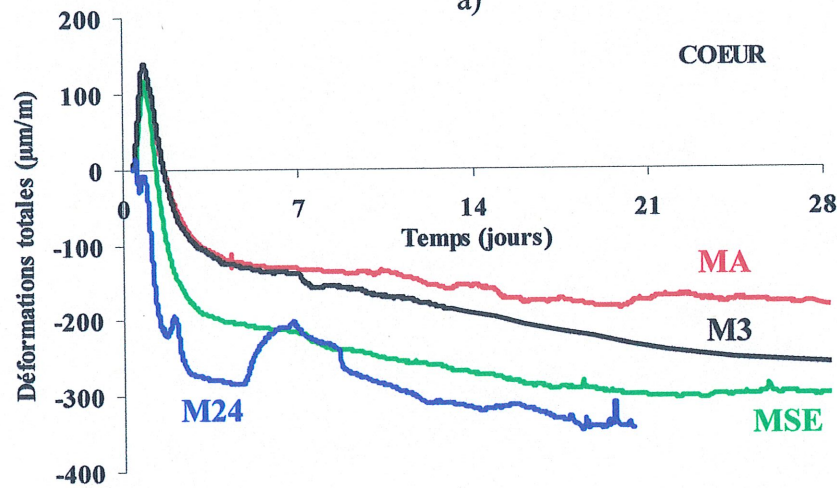
Figure 6.10 Déformation totale développée dans la dalle mûrie dans un caisson quasi adiabatique (MA)

6.4.6 Influence du mûrissement sur les déformations totales développées dans la dalle

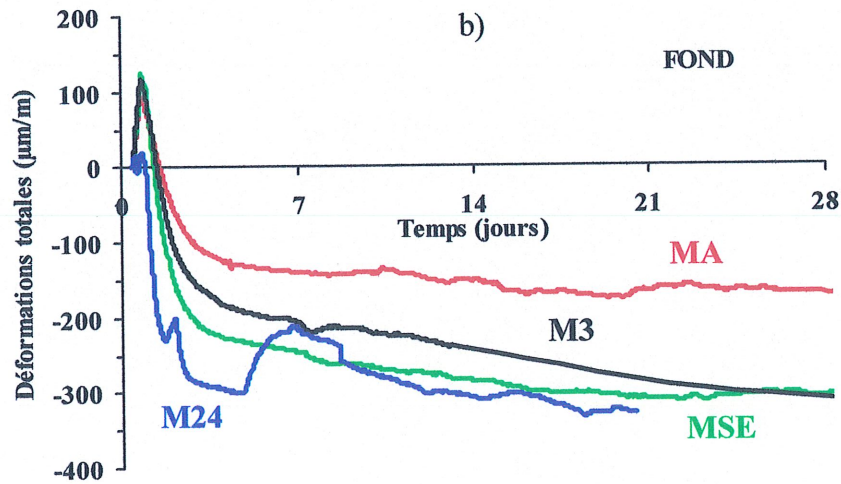
La figure 6.11 représente les déformations totales développées dans la dalle selon les différents modes de mûrissement retenus lors de notre recherche. La figure 6.11 illustre respectivement l'influence du mûrissement, à la surface (a), au cœur (b) et au fond (c) de la dalle sur les déformations totales enregistrées. On constate que le refroidissement subi par la dalle M24 influence directement les résultats de la déformation totale obtenus. De plus, la figure 6.11 nous permet de remarquer que le mûrissement quasi adiabatique développe moins de retrait que tous les autres modes de mûrissement tant au cœur qu'au fond de la dalle. En limitant l'échange vers l'extérieur lors du mûrissement du BHP, ceci permet de développer une déformation totale uniforme dans toute la section verticale. Même si la dalle M24 a subi un refroidissement, on note que le retrait final de cette dernière après 21 jours est similaire à celui mesuré lorsque aucun apport d'eau n'est ajouté sur la dalle (MSE).



a)



b)



c)

Figure 6.11 Déformation totale selon le mode de mûrissement a) à la surface, b) au centre et c) au fond de la dalle

On remarque que l'échauffement est plus élevé pour le mûrissement MSE parce qu'il n'y a pas eu d'eau ajoutée durant tout l'essai. À l'aide des figures 6.11a et b, on voit que l'ajout d'eau à très jeune âge (M3) diminue le retrait à la surface et au cœur de la dalle. On constate peu d'effet au fond de la dalle car le réseau de pores très fins s'est déjà développé et que la connectivité du réseau des pores capillaires et de la source d'eau extérieure n'existe plus. Malgré la présence d'eau sur la surface exposée lors du mûrissement M3, un retrait plus grand se produit au fond du moule.

6.5 Déformation isotherme

6.5.1 Introduction

Tel que mentionné à la section 6-1, les essais ont été effectués en laboratoire à température constante. Toutefois, lors des essais, l'évaporation a été limitée donc la déformation relative au séchage est considérée négligeable. Conséquemment lorsque nous discutons de déformation isotherme, nous parlons aussi de déformation endogène.

6.5.2 M24-Mûrissement à l'eau après 24 heures

La figure 6.12 représente la déformation isotherme développée dans la dalle dont le mûrissement à l'eau débute 24 heures après le contact eau ciment.

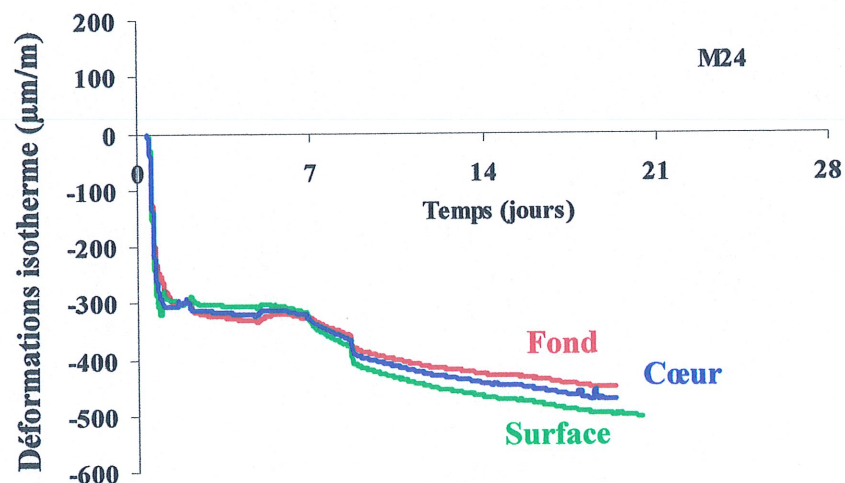


Figure 6.12 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie après 24 heures (M24)

À la figure 6.12, on remarque que la dalle mûrie après 24 heures (M24) développe un important retrait endogène à jeune âge dans toute son épaisseur. On a mesuré un retrait isotherme de $300 \mu\text{m/m}$ à travers toute la section verticale de la dalle. Le retrait isotherme continue graduellement à s'accroître de façon assez homogène durant les premiers 7 jours. Après la fin du mûrissement, on remarque que le retrait isotherme s'accroît jusqu'au 21^e jour. Toutefois, on constate que le retrait endogène développé varie selon la position des cordes vibrantes. On voit que le béton situé au fond de la dalle développe un retrait isotherme plus faible que celui mesuré respectivement au cœur et à la surface de la dalle. Toutefois, à 21 jours, le gradient de déformation isotherme est faible. Ce gradient varie respectivement de $20 \mu\text{m/m}$ entre le fond et le cœur et de $40 \mu\text{m/m}$ entre le cœur et la surface de la dalle. Le retrait maximal mesuré après 21 jours est de $504 \mu\text{m/m}$ pour le BHP situé près de la surface. Après 7 jours, le béton commence à sécher. Ceci explique le passage du retrait à la surface en dessous des 2 autres (cœur et fond) seulement après le 7^e jour. L'écart entre les retraits mesurés s'accroît jusqu'au 21^e jour. Le béton près de la surface sèche plus rapidement que celui au cœur et au fond de la dalle.

6.5.3 M3 - Mûrissement à l'eau après 3 heures

La figure 6.13 illustre les déformations isothermes développées lors du mûrissement à l'eau qui débute 3 heures après le contact eau-ciment. On remarque que la dalle subit rapidement, à très jeune âge, un gonflement dans sa section verticale. On constate que le gonflement maximal mesuré est de $150 \mu\text{m/m}$ pour le béton situé près de la surface. Le gonflement de la dalle débute approximativement 24 heures après le contact ciment eau pour le béton près de la surface et se termine 28 heures après. Pour le cœur de la dalle et le fond de la dalle, le gonflement commence respectivement après 18 heures pour le fond de la dalle et après 24 heures pour le cœur de la dalle. À la suite du gonflement, on constate un retrait isotherme. On dénote un gradient du retrait isotherme selon l'épaisseur de la dalle. Le même gradient de retrait isotherme est constaté durant la période de mûrissement. Le gradient du retrait isotherme enregistré est environ $70 \mu\text{m/m}$ à travers la dalle. Le retrait isotherme mesuré respectivement au 7^e jour est de $62 \mu\text{m/m}$ à la surface, de $140 \mu\text{m/m}$ au cœur et de $206 \mu\text{m/m}$ près du fond du coffrage. Cette différence de retrait isotherme mesurée persiste jusqu'à la fin

de l'acquisition. Toutefois, le gradient est moins important à la fin de l'essai lorsque le béton est mûri à l'air.

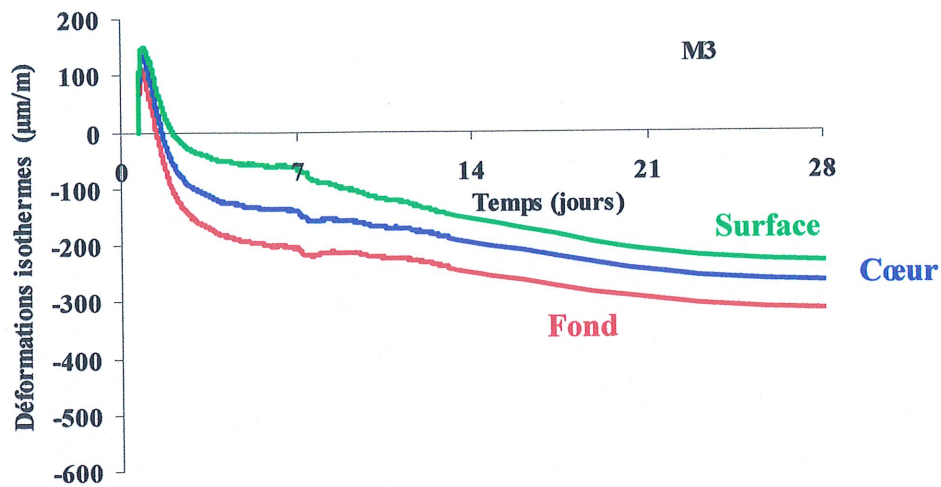


Figure 6.13 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie après 3 heures (M3)

6.5.4 MSE - Mûrissement sans eau

La figure 6.14 représente les déformations isothermes développées dans la dalle lorsque cette dernière ne reçoit aucun apport d'eau extérieure durant tout l'essai. On remarque que 24 heures après le début de ce mode de mûrissement le retrait isotherme enregistré est respectivement de 201 $\mu\text{m/m}$ au fond, de 270 $\mu\text{m/m}$ à la surface et de 312 $\mu\text{m/m}$ pour le cœur de la dalle. De plus, nous notons sur la figure 6.14 que nous avons environ la même différence de retrait endogène entre la surface et le fond à partir du 1^{er} jour jusqu'à la fin de l'essai. En plus, on constate que la surface a subi un retrait endogène moindre que celui développé au cœur. Les déformations isothermes varient de 400 $\mu\text{m/m}$ à 500 $\mu\text{m/m}$ du fond par rapport au cœur de la dalle après 28 jours. Aucun gonflement n'est mesuré durant ce mode mûrissement.

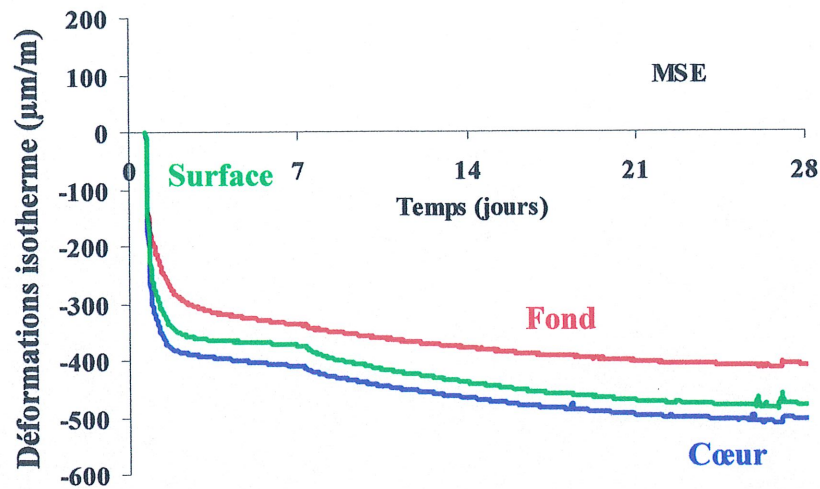


Figure 6.14 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie sans eau (MSE)

6.5.5 MA - Mûrissement quasi adiabatique

La figure 6.15 présente la déformation isotherme enregistrée dans la dalle durant le mûrissement quasi adiabatique. On constate que le retrait isotherme globale au fond de la dalle est moindre que celui mesuré au cœur de la dalle. Par contre, il est important de noter qu'à très jeune âge (1 jour) la déformation isotherme est supérieure à celle développée au cœur. Nous pensons que ce changement volumétrique brusque au début du mûrissement est causé par la présence de l'eau contenue dans la jute humide qui réduit les déformations isothermes au cœur par rapport au fond de la dalle. Tandis que lorsque l'eau manque, une fois que la jute humide s'est asséchée, la dalle subit un cambrement. Lors de ce cambrement, le béton au niveau du fond subit un certain étirement plus ou moins important dû aux contraintes de flexion additionnelles. Cet effet semble être suffisamment significatif pour modifier la déformation isotherme globale près du fond de coffrage. À ce niveau de la dalle, l'expansion due à la flexion semble contrer le retrait isotherme. Conséquemment, on a mesuré un retrait isotherme moindre entre le 1^e et le 3^e jour. Par contre, le cœur de la dalle, situé au même niveau que l'axe neutre des contraintes en flexion semble subir moins l'effet de cambrement. Seul, le retrait isotherme semble prévaloir au cœur de la dalle. Il est important de constater qu'en limitant l'échange avec l'extérieur le fond développe moins de retrait isotherme.

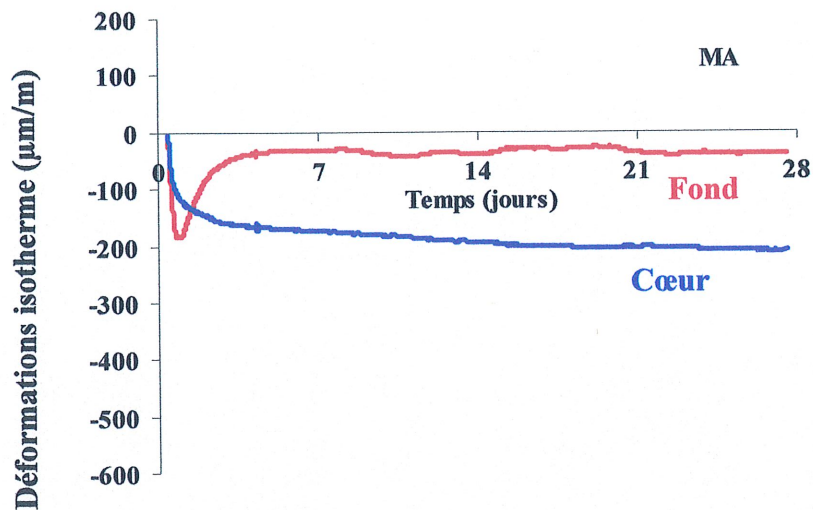
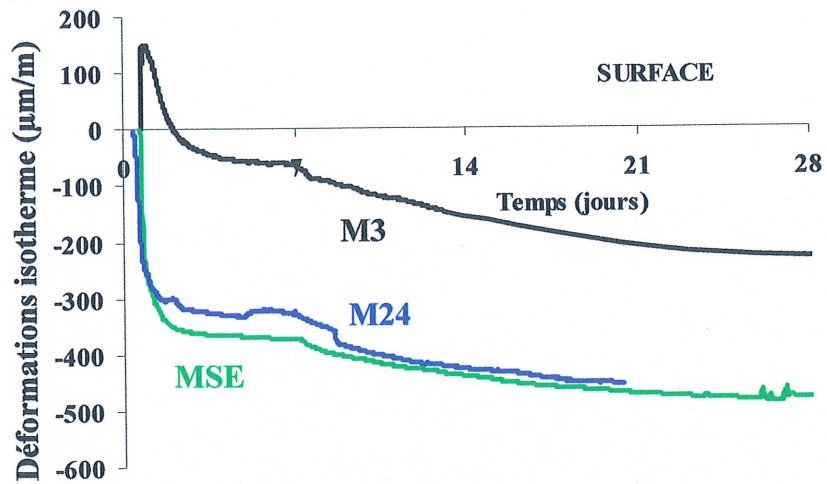


Figure 6.15 Déformation isotherme développée dans la dalle mûrie de façon quasi adiabatique (MA)

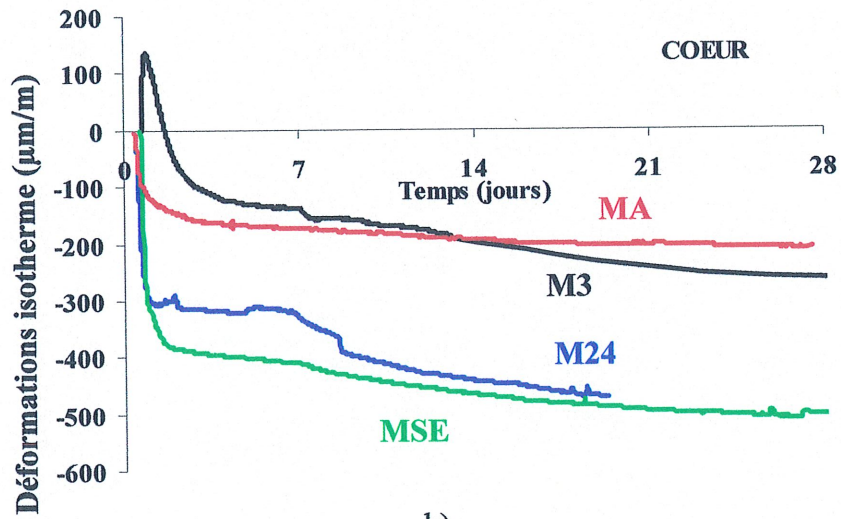
6.5.6 Influence du mûrissement sur la déformation isotherme développée dans la dalle

La figure 6.16 illustre respectivement les changements volumétriques isothermes mesurés à la surface (a), au cœur (b) et au fond (c) de la dalle pendant 28 jours selon les différents modes de mûrissement étudiés lors de notre recherche.

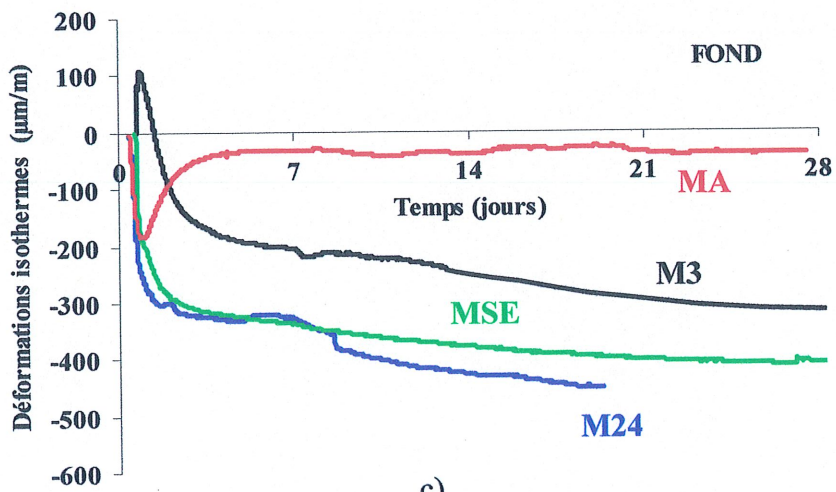
Selon la figure 6.16 a et b, on constate que le meilleur mûrissement pour limiter le retrait isotherme est le mûrissement quasi adiabatique (MA) pour la dalle de BHP suivi du mûrissement à l'eau 3 heures après le contact eau ciment. On constate que le gonflement initial mesuré selon le mode de mûrissement M3 compense le retrait isotherme global enregistré dans toute l'épaisseur de la dalle de BHP. De plus, on constate à la figure 6.16 que les deux mûrissements les moins efficaces pour des dalles de BHP dont le rapport E/C égal à 0,30 sont les mûrissements M24 et MSE. Aucun gonflement ne vient compenser le retrait endogène lors des mûrissements MSE et M24.



a)



b)



c)

Figure 6.16 Déformation isotherme en fonction du temps selon le mode mûrissement à la surface, au cœur et au fond de la dalle

On constate que le fait d'ajouter de l'eau 24 heures après le contact entre le ciment et l'eau n'a que peu d'effet pour limiter le retrait isotherme par rapport au retrait mesuré selon le mode de mûrissement MSE. On constate que le retrait isotherme est similaire dans le cas de la dalle mûrie à l'eau après 24 heures et celui où il n'y a aucun apport d'eau (MSE). Conséquemment, le fait d'ajouter de l'eau 24 heures après le contact eau-ciment ne réduit pas le retrait isotherme. Toutefois, l'ajout d'eau 3 heures après le contact eau et ciment réduit le retrait isotherme global.

Il est à noter que la dimension de l'élément de faible épaisseur telle qu'une dalle de pont en BHP influence les déformations totales et isothermes (endogènes) développées à travers la section verticale. Les déformations totales et isothermes (endogènes) mesurées varient selon les conditions d'exposition du BHP. L'effet bénéfique du mûrissement à l'eau est surtout constaté à l'endroit le plus rapproché de la surface supérieure.

6.6 Influence de la dimension

Notre recherche devait se limiter à vérifier le comportement du retrait endogène dans une dalle de BHP de rapport E/C égal à 0,30. Nous avons constaté que la dimension d'un élément mince influençait les contractions volumétriques totales et endogènes. En conséquence, nous avons voulu poursuivre nos travaux afin de vérifier si le même comportement se produit lorsque la dimension de l'élément est plus importante. Avec le même BHP que celui utilisé lors de notre recherche, nous avons coulé et instrumenté un cube de 700 mm de côté. Les coordonnées des instruments sont présentées à la figure 6.17 et dans le tableau 6.1. Le seul mode de mûrissement appliqué est le M24.

TABLEAU 6.1-COORDONNÉES DE L'INSTRUMENTATION DANS LE CUBE

Type d'instrument	Coordonnées (en mm)	Commentaires
CV1	330, 0,0	Longitudinale latérale
CV2	100,0,0	Longitudinale verticale
CV3	0,0, 0	Longitudinale centrale

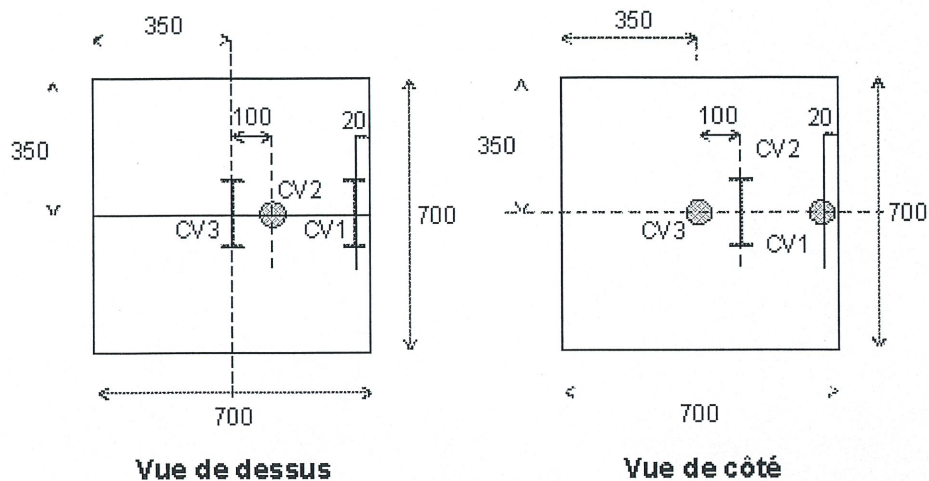


Figure 6.17 Vues en plan et de côté de la position des instruments dans le cube

Il est bon de signaler que les cordes vibrantes n'ont pas été installées de la même façon dans le cube que dans la dalle. Dans le cube, nous avons placé toutes les cordes vibrantes au cœur de l'élément soit sur le même axe horizontal. Toutefois, nous avons fait varier la position latérale des cordes vibrantes. En outre, nous avons voulu aussi vérifier si les déformations étaient isotropes. Pour cette raison, nous avons positionné la corde vibrante CV2 verticalement tandis que les cordes vibrants CV1 et CV3 ont été placées horizontalement.

Afin d'uniformiser la présentation des courbes subséquentes, les couleurs suivantes seront utilisées pour chaque corde vibrante. Les couleurs des courbes sont les suivantes :

- CV1 courbe rouge surface
- CV2 courbe verte verticale
- CV3 courbe bleu cœur

6.6.1 Température développée dans le cube

La figure 6.18 permet de constater que les deux cordes vibrantes (CV2 et CV3) installées près (à 100 mm) et au cœur du cube ont enregistré la même température en fonction du temps. On remarque que, les températures atteintes autour du cœur d'un élément de grandes dimensions sont relativement élevées. La figure 6.18 nous permet de bien voir que la température maximale obtenue près de la surface est moindre que celles à proximité et au cœur du cube. De plus, on constate qu'à 24 heures, la température maximale varie de 52°C à 49°C et ce, très

rapidement. Cette variation est probablement attribuable à l'ajout de la jute humide à la surface de l'élément et au décoffrage. Contrairement à la dalle, le cube a été décoffré après 24 heures parce qu'il fallait réutiliser les coffrages. Toutefois, on observe que les 3 cordes vibrantes, 3 jours après le contact ciment et eau, enregistrent des températures similaires.

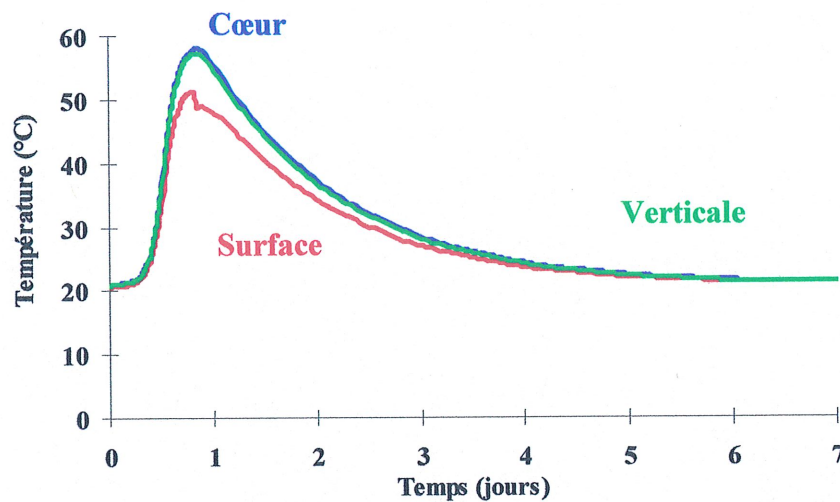


Figure 6.18 Température développée dans le cube selon le mode de mûrissement M24

6.6.2 Déformation totale

La figure 6.19 illustre la déformation totale mesurée dans le cube. On remarque que les déformations totales obtenues dans le cube sont pratiquement identiques quelle que soit la position de la corde vibrante. L'élément subit un gonflement maximal à très jeune âge, soit vers les 20 heures après le contact eau ciment pour ensuite reprendre sa forme initiale approximativement à 30 heures. Subséquemment, l'élément subit une contraction volumétrique qui se stabilise aux environs de 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ après 21 jours et ce, pour toutes les cordes vibrantes.

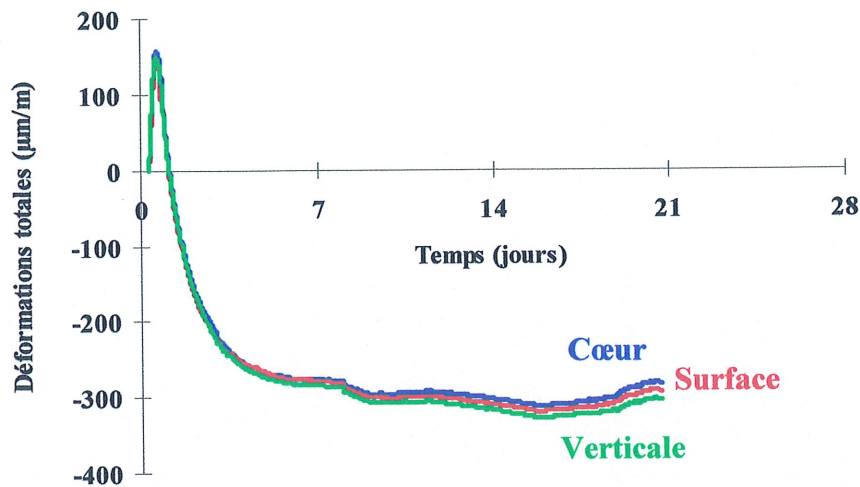


Figure 6.19 Déformation totale développée dans le cube selon le mode de mûrissement (M24)

6.6.3 Déformation isotherme

La figure 6.20 nous représente l'évolution du retrait isotherme dans le cube. On remarque que les déformations isothermes sont sensiblement les mêmes pour toutes les cordes vibrantes. On remarque qu'aucune expansion n'a été mesurée dans le cube. De plus, on constate que l'effet bénéfique du mûrissement à l'eau 24 heures après le contact entre le ciment et l'eau diminue légèrement le retrait isotherme près de la surface supérieure. Toutefois, le retrait mesuré varie de 400 à 500 $\mu\text{m/m}$. Le retrait isotherme mesuré dans le cube est élevé. De plus, l'eau extérieure ajoutée lors de la période de mûrissement ne semble pas se rendre au cœur du cube. Conséquemment, il est possible de dire qu'un élément de grandes dimensions en BHP développe principalement du retrait endogène. Le comportement de la surface d'un élément peut toutefois être influencée par un retrait de séchage si le mode de mûrissement est inadéquat et selon les conditions atmosphériques.

La figure 6.20 nous permet de comparer les déformations endogènes verticales et horizontales développées dans l'élément cubique. Cette figure nous permet de vérifier l'isotropie du retrait

endogène entre les cordes vibrantes installées horizontalement et celle positionnée verticalement au cœur de l'élément. Ceci prouve qu'un BHP dont les grains de ciment sont dispersés uniformément lors du malaxage développe un retrait endogène isotrope dans tout élément de grandes dimensions. Toutefois, la surface peut subir un certain retrait de séchage selon les conditions d'expositions. Néanmoins, plus on se déplace vers le cœur de l'élément, plus on constate une isotropie dans la déformation endogène à travers le cube.

Conséquemment, nous allons maintenant comparer les valeurs obtenues (CV3) au cœur du cube et celles de la dalle selon la température et les déformations développées à la sous-section suivante.

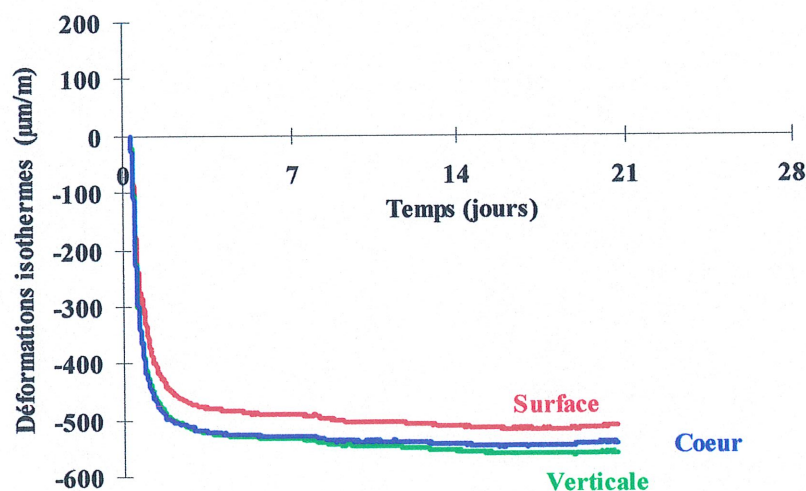


Figure 6.20 Déformation isotherme développée dans le cube selon le mode de mûrissement M24

6.6.4 Influence de la température développée selon la dimension de l'élément

Les couleurs des courbes utilisées pour les dalles sont demeurées les mêmes selon les modes de mûrissement (section 6.3.6). En plus, nous avons ajouté une courbe de couleur rose qui représente la courbe obtenue avec la corde CV3 du cube. La figure 6.21 présente la température développée dans les cordes vibrantes installées au cœur du cube (CV3) et dans les dalles (CV2) selon les différents modes de mûrissement. À première vue, on constate que la

température développée dans un élément de grande dimension est la plus élevée. Ceci nous indique que lors de l'hydratation du cube, sa géométrie permet moins de dégagement de chaleur à partir de la surface. Conséquemment, une autoactivation de l'hydratation s'enclenche parce que ce processus se déroule à plus haute température. De plus, cette constatation confirme que le rapport surface/volume mentionné au tableau 2.1 (section 2.2) influence directement la température développée à l'intérieur de l'élément. Plus le rapport entre la surface et le volume est élevé, par exemple, une dalle, plus il y a de pertes de chaleur. Conséquemment, moins la surface exposée par rapport au volume est grande comme dans le cas d'un cube, par exemple, une culée ou bien une colonne, plus la température est élevée. Le refroidissement subi dans la dalle lors du mûrissement M24 à très jeune âge a certainement modifié l'accroissement maximal de température, par contre, au pire la température maximale aurait été celle obtenue dans le cas où aucune eau n'a été ajoutée après la coulée et n'aurait probablement jamais obtenu le même maximum de température que le cube mûri dans les mêmes conditions puisque leur rapport surface/volume respectif est différent.

La figure 6.21 permet aussi de vérifier que les mûrissements à l'eau 3 heures après le contact ciment eau (M3) et celui obtenu dans les conditions quasi adiabatiques sont les modes de mûrissement les plus efficaces pour les dalles de BHP de rapport égal à 0,30. Néanmoins, on remarque que le mûrissement quasi adiabatique est le mûrissement recommandé pour permettre un accroissement de température le moins élevé. Avec ce mode de mûrissement, en limitant les échanges avec l'extérieur, on peut, durant le processus d'hydratation, diminuer la diffusion de la chaleur générée et ainsi d'allonger la période de refroidissement. Toutefois, le mûrissement quasi adiabatique du point de vue pratique sur les chantiers ne se fera sûrement pas sans heurts. Déjà, les entrepreneurs ont de la difficulté à seulement prévoir un mode de mûrissement à l'aide d'une source d'eau extérieure après la coulée d'un béton. Il suffira de la leur imposer.

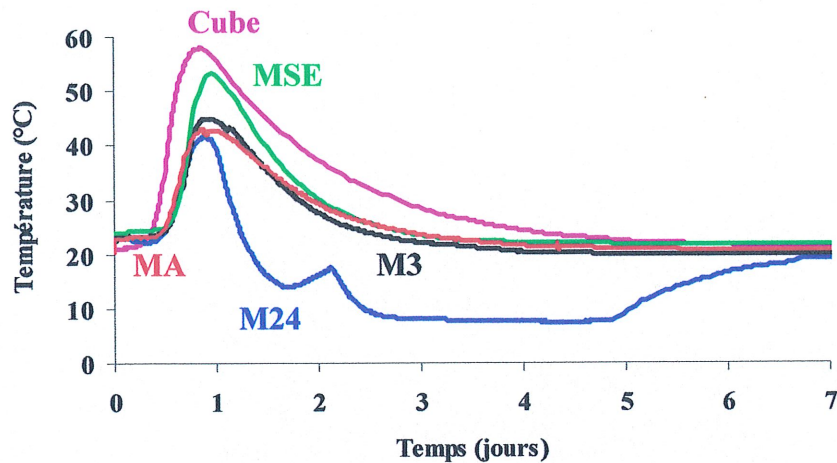


Figure 6.21 Comparaison de la température développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement

6.6.5 Influence de la déformation totale développée selon la dimension de l'élément

La figure 6.22 représente la déformation totale calculée au cœur du cube et des dalles soumises aux modes de mûrissement de notre recherche. Tel que mentionné précédemment, le rapport entre la surface et le volume influence directement l'accroissement de la température. Conséquemment, la déformation totale mesurée est aussi influencée. De plus, les modes de mûrissement dont le retrait total après 28 jours est plus faible, sont le mûrissement quasi adiabatique (MA) et le cas de mûrissement où l'eau est ajoutée seulement 3 heures après le premier contact entre l'eau et le ciment. De plus, on constate aussi que le cube subit un important retrait après 21 jours au cœur de l'élément probablement dû à l'accroissement élevé de température dès les premières heures après la coulée du BHP. La géométrie du cube influence directement la déformation totale à long terme. En valeur absolue, le cube a subi une déformation totale de plus de 450 $\mu\text{m}/\text{m}$. Toutefois, on note que le retrait total est inférieur à 300 $\mu\text{m}/\text{m}$. Le cube semble bénéficier de l'expansion thermique du départ. Ceci semble aussi être valable dans le cas des mûrissements M3 et MA qui génèrent un retrait total moindre. Nous allons vérifier si ceci se reproduit lorsque nous déterminons le retrait isotherme du cube et des dalles selon leur différent mode de mûrissement.

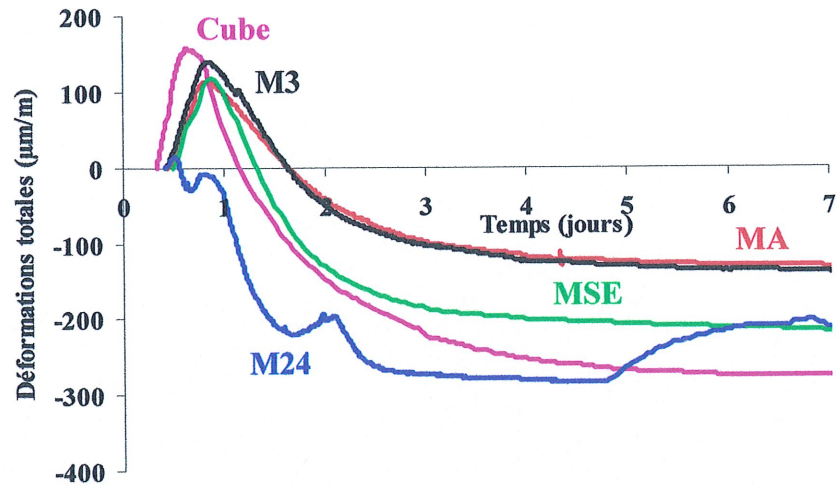


Figure 6.22 Comparaison de la déformation totale développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement

6.6.6 Influence de la déformation isotherme développée selon la dimension de l'élément

La figure 6.23 permet de comparer les déformations isothermes développées dans le cube et dans les dalles selon leur mode de mûrissement respectif.

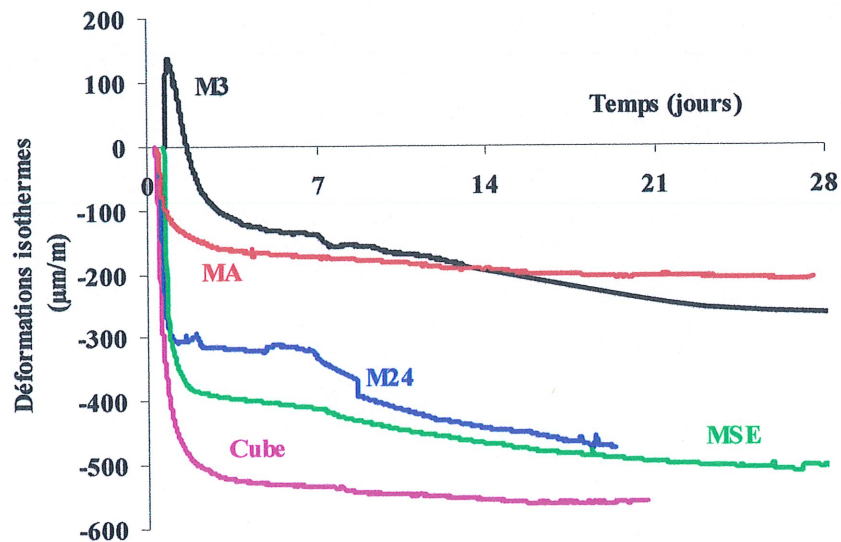


Figure 6.23 Comparaison de la déformation isotherme développée dans le cube et au cœur des dalles selon les différents modes de mûrissement

La figure 6.23 permet de constater aisément l'effet des différents modes de mûrissement sur le développement du retrait isotherme dans le cube et dans une dalle de BHP. Premièrement, on observe que le retrait isotherme le plus faible qui a été mesuré dans la dalle est celui dont le mûrissement commence 3 heures après le contact eau-ciment. Le retrait isotherme mesuré est approximativement de $135 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le mode de mûrissement M3. En second lieu, on mesure un retrait isotherme de l'ordre de $170 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le mûrissement MA. Ensuite, le cube développe un retrait endogène de $550 \mu\text{m}/\text{m}$. Tandis que pour les mûrissements M24 et MSE, on mesure respectivement un retrait isotherme de $320 \mu\text{m}/\text{m}$ et de $410 \mu\text{m}/\text{m}$. La figure 6.23 permet de confirmer qu'il est de mauvaise pratique de n'effectuer aucun mûrissement à l'eau après une coulée de BHP. Même si la dalle mûrie après 24 heures a subi un refroidissement, nous constatons que lorsque nous mesurons le retrait isotherme, ce mode mûrissement est à proscrire pour les dalles puisque l'on décompte une différence de retrait isotherme de plus de $185 \mu\text{m}/\text{m}$ entre le M24 et M3. Ceci confirme que l'ajout d'eau est bénéfique pour diminuer le retrait isotherme et que l'eau doit être rapidement ajoutée après une coulée puisque l'effet de l'eau est peu significatif après 24 heures.

La figure 6.23 montre que les déformations isothermes sont importantes pour le cube et pour la dalle mûrie selon M3. On note respectivement en valeur absolue une déformation de plus de $550 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le cube et de plus de $450 \mu\text{m}/\text{m}$ pour la dalle mûrie selon M3. Il est intéressant de remarquer qu'en valeur absolue le cube et la dalle mûrie selon le mode mûrissement M3 ont une déformation isotherme globale qui se rapproche. On note aussi que la dalle sans apport d'eau extérieure, la déformation endogène développée correspond uniquement à une forte contraction volumétrique sans expansion initial. De plus, la dalle mûrie selon le mode M3 semble profiter de l'expansion thermique du départ puisque l'on mesure une contraction volumétrique de $250 \mu\text{m}/\text{m}$. Conséquemment, on constate qu'élément mince dont le mûrissement est adéquat, pourrait moins fissurer car sa contraction volumétrique est plus faible.

Par contre, on constate qu'il serait intéressant d'effectuer une cure quasi adiabatique sur un cube soit en le mûrissant à l'aide de jute humide et en isolant la surface exposée pour empêcher le retrait de séchage. Au cœur du cube, on pense que le mûrissement est

adiabatique, car il n'y a pas d'échange avec l'extérieur à cette profondeur. Ceci permettrait de vérifier si un élément de grande dimension mûri de façon quasi adiabatique améliorerait sa performance face au retrait endogène. Ceci permettrait de vérifier si le BHP peut être utilisé lorsque l'on bétonne des éléments de masse au lieu de les couler avec un béton ordinaire. Ceci permettrait de développer une meilleure qualité de béton et augmenterait ainsi la durabilité des ouvrages de grandes dimensions.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le béton subit des changements volumétriques lors du processus d'hydratation. Lors de ce processus, les essais ont démontré que le béton gonfle et/ou se contracte selon les conditions de mûrissement auxquelles il est soumis et ce, en l'absence de chargement.

La revue bibliographique nous a permis de constater que le retrait est un phénomène fort complexe. Il existe en effet plusieurs types de retrait. Le type de retrait que développe un béton varie selon sa composition, son mode de mûrissement, l'environnement auquel il est soumis et selon la géométrie de l'élément.

Lors de notre étude, nous nous sommes intéressés au retrait que nous observons dans un BHP de rapport eau/ciment égal à 0,30. Étant donné la complexité du phénomène du retrait, nous avons principalement étudié l'influence du mode de mûrissement sur le développement du retrait endogène dans une dalle mince. Parallèlement à ces travaux, nous avons tenu à vérifier que les déformations développées par le retrait endogène étaient isotropes. Nous avons aussi voulu voir l'influence de la dimension d'un élément en béton sur le développement du retrait en comparant le retrait développé dans nos dalles mûries de quatre façons différentes à celui développé dans un cube de grandes dimensions.

Nos travaux de recherche nous permettent de conclure que :

- Les jauges de déformation à corde vibrante permettent de suivre et de mesurer le développement des déformations dans les BHP et ce, à très jeune âge. Nous avons aussi constaté que la norme ASTM C157 ne peut pas être utilisée pour mesurer des déformations isothermes dans les BHP, car en ne commençant les mesures qu'après 24 heures, cette norme sous-estime les valeurs des déformations obtenues.
- Les jauges de déformation à corde vibrante sont des instruments de mesure fiables et faciles à utiliser pour mesurer le retrait total à partir duquel on peut calculer les retraits isotherme, thermique et endogène. De plus, en utilisant des cordes vibrantes, il est même possible de tenir compte de la variation du coefficient de dilatation thermique dans les calculs qui permettent d'obtenir le retrait endogène ou isotherme.

- Les déformations endogènes développées dans le plan horizontal au centre d'une dalle sont isotropes.
- Le mode de mûrissement retenu influence directement le développement du retrait endogène.
- Le mode de mûrissement influence aussi la température maximale développée dans une dalle mince. Plus, on retarde l'apport d'eau extérieure plus la température maximale est élevée. Conséquemment, plus la déformation thermique est élevée et plus le retrait isotherme est élevé.
- Le mode de mûrissement qui permet de diminuer le plus le retrait isotherme dans les éléments minces est le mûrissement quasi adiabatique (MA), suivi du mode de mûrissement M3.
- Les essais confirment que les mûrissements M24, le mûrissement généralement recommandé pour les bétons ordinaires et le MSE, le mûrissement sans aucun apport d'eau extérieur, malheureusement trop souvent utilisé dans le domaine de la construction, sont les moins efficaces pour contrôler le retrait endogène des BHP.

De plus, nos travaux nous permettent aussi d'établir certaines conclusions sur l'influence de la dimension d'un élément en BHP.

- Le rapport surface/volume dicte le développement de la température et des déformations. Plus le rapport surface/volume est élevé plus il y a de déperdition de chaleur et plus les gradients thermiques sont élevés. Par contre, moins la surface exposée est grande par rapport au volume de l'élément, plus les températures et les déformations développées au cœur de l'élément seront grandes.
- Durant la montée en température d'un élément en béton, le retrait endogène permet de diminuer la déformation thermique du béton. Ce n'est que lorsque le béton commence à se refroidir et donc à se contracter que le retrait endogène s'ajoute au retrait thermique.

Les conclusions de notre recherche nous amènent à formuler les recommandations suivantes :

- Il serait nécessaire d'établir une nouvelle norme ASTM pour mesurer les déformations isotherms à très jeune âge. On pourrait utiliser par exemple des jauges à déformations à corde vibrante. Ce type d'instrument est simple d'utilisation et permet de mesurer à très

jeune âge l'activité qui se développe dans le béton. De plus, les jauges à déformations à corde vibrante permettent aussi de tenir compte de l'évolution du coefficient de dilatation thermique puisqu'elles enregistrent simultanément la température du béton.

- Une démarche constructive doit être établie afin de s'assurer que les mûrissements M24 et MSE soient dorénavant proscrits comme mûrissement des BHP. De plus, le mûrissement MSE devrait toujours être interdit comme mode de mûrissement dans le domaine de la construction.
- Étant donné que le meilleur mode de mûrissement proposé est le mûrissement quasi adiabatique (MA) pour une dalle et en deuxième lieu, le mûrissement avec un apport d'eau extérieur qui débute 3 heures après le contact eau ciment, il faudrait penser à développer des techniques de mûrissement utilisables et pratiques qui permettent de mettre en œuvre sur chantier ces modes de mûrissement pour des dalles de grande superficie.
- Il faudrait que l'entrepreneur soit payé pour mûrir le béton afin d'éviter que le mûrissement continue à être considéré comme une activité secondaire lors de la mise en place du béton.
- Il serait aussi opportun de vérifier jusqu'à quel rapport E/C un mûrissement avec apport d'eau est efficace quand on construit des éléments minces en BHP.
- Il faudrait vérifier les déformations totales et isothermes selon un mûrissement quasi adiabatique pour éventuellement utiliser le BHP comme matériau pour couler des éléments de grande dimension au lieu de les couler avec un béton ordinaire. On pourrait alors accroître la durabilité de ces derniers.
- Finalement, il serait très intéressant de déterminer quel est le retrait qu'un BHP et un béton ordinaire peuvent subir sans que ce retrait ne mette en cause leur durabilité face aux agents agressifs.

BIBLIOGRAPHIE

ACKER, P. (1992) *Retraits et fissurations du béton*, Association Française pour la construction, p.6-42 ISSN 0150-6900.

AİTCIN, P.-C. (1998a) *High-Performance Concrete*, *Modern Concrete Technology*, 1^{re} Edition, E&FN Spon, Routledge, Londres et New York, 591p., IBSN 0 419 19270 0.

AİTCIN, P.-C. (1998b) *Autogeneous Shrinkage Measurement*, Proceedings of International Workshop on Autogeneous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, pp. 245-256.

AİTCIN, P.-C. (1998c) *Non-Shrinking Concrete*, 4^e Conférence internationale Canmet/ACI/JCI Recent Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japon, p.215-226.

AİTCIN, P.-C. (1996) *The Volumetric Change of Concrete or Does Concrete Shrink or Does it Swell?* *Concrete International*, vol.21, no 12, pp. 77-80.

AİTCIN, P.-C., NEVILLE, A.M., ACKER, P., (1997) *Integrated View of Shrinkage Deformation*, *Concrete International*, vol.19, n^o9, p.35-41.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, Concrete and Aggregates*, Philadelphia, 825p.

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION (1994) *Béton-constituants et exécution des travaux, norme CAN-A23.1-M94*, éd. Association Canadienne de Normalisation, Rexdale (Canada), 260 p.

BARON, J., SAUTEREY, R., (1982) *Chapitre 27 Les retraits de la pâte de ciment*, Les Bétons Hydrauliques : Connaissance et Pratique, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p 485- 501.,ISBN 2-85978-033-5

BISSONNETTE, B., PIERRE, P., PIGEON, M. (1997) *Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials*, *Cement and Concrete Research*, vol.29, n^o12, 10p.

BLAIS, F. A., DALLAIRE, É, LESSARD, M L., AİTCIN, P.-C. (1996), *The Reconstruction of the Bridge Deck of the Jacques-Cartier Bridge in Sherbrooke (Québec) using High-Performance Concrete*, 30th Annual Meeting of Canadian Society for Civil Engineering, Edmonton, Alberta, mai, p.501-507.

BONNEAU, O., AİTCIN, P.-C. (1999) *Contrôle de la fissuration due au retrait endogène dans les ouvrages construits en béton à haute performance*, Rapport d'étape, Université de Sherbrooke

BUIL, M., OLLIVIER, J.-P. (1992), *Chapitre 3 Conception des bétons : la structure poreuse, La Durabilité des Bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p.57-127, ISBN 0222-8394.

BUIL, M., (1979), *Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante*, Rapport de Recherche LPC No 92, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 72 p.

COMITÉ ACI 209 *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (209R-92)*, American Concrete Institute, Detroit, 1992, 47 pp.

DAVIS, H.E. (1940) *Autogeneous Volume Change of Concrete*, Comptes rendus de la 43^e réunion annuelle de l'American Society of Testing Materials, Atlantic City, p. 1103-1113.

DAVIS, R.E. (1930) *A Summary of the Results of Investigations Having to do with Volumetric Changes in Cements, Mortars and Concretes, Due to Causes Other Than Stress*, Comptes rendus de l'American Concrete Institute, Detroit, p.407-443.

DÉTRICHÉ, C.H. (1992), *Chapitre 4 La maîtrise de la fissuration précoce : condition de la durabilité des ouvrages*, La Durabilité des Bétons, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p.107-128., ISBN 2-85978-184-6.

GAGNÉ, R. (1999) *Durabilité et réparations du béton*, Note de cours, Université de Sherbrooke.

JCI COMMITTEE REPORT (juin 1998) *Autogeneous Shrinkage Measurement*, Proceedings of International Workshop on Autogeneous Shrinkage of Concrete, (éd. Tazawa), Hiroshima, pp. 245-256.

JENSEN, O.M., HANSEN, P.F. (2000) *Water-entrained Cement-based Materials I. Principle and Theoretical background*, Soumis à Cement and Concrete Research.

JENSEN, O.M., HANSEN, P.F. (1996) *Autogeneous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste*, ACI Materials Journal, Vol.93, No. 6, pp. 539-543.

KADA, H., LACHEMI, M., PETROV, N., BONNEAU, O., AÏTCIN, P.-C., *Determination of the Coefficient Thermal Expansion of High Performance Concrete from Initial Settings*, soumis pour publication à Matériaux et Structures

KHAN, A., COOK, W.D., MITCHELL, D (1997) *Creep, Shrinkage and Thermal Strains in Normal, Medium and High-strength Concretes during Hydration*, ACI Materials Journal, Vol.94, No. 2, pp. 156-163.

KOSMATKA, S.H., PANARESE, W.C., GISSING, K.D., MACLEOD, N.F. (1995) *Contrôle et dosage des mélanges de béton*, Ottawa, 6^e édition, Association Canadienne du Ciment Portland, 228p. ISBN 0-89312-139-8.

LAPLANTE, P. (1993) *Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances*, Bulletin de la Société de l'Encouragement pour l'Industrie Nationale, Paris (s.éd.) 299 p., ISSN 1161-028X.

LE CHÂTELIER, M.H. (1900) *Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments*, Bulletin de la Société de l'Encouragement pour l'Industrie Nationale, 5^e série, Tome 5 p. 54-57.

LEPAGE, S., BAALBAKI, M., DALLAIRE, É., AÎTCIN, P.C. (1998) *Early Skrinkage Development in High-Performance Concrete*, Cement Concrete and Aggregates, Vol. 21, no 2, juin, p.31-35.

LYNAM, C. G. (1934) *Growth and Movement in Portland Cement*, Oxford University Press London : Humphrey Milford, pp.

NEVILLE, A.M (1995) *Properties of Concrete*, 4e Édition, John Wiley, New York, et Longman, Angleterre, 844p., ISBN 0-582-23070-5.

PETROV, N., SEIGNEUR, V., MORIN, R. VÉZINA, D., CHANTELOIS A., (2000), *Contrôle de la fissuration due au retrait dans les ouvrages construits en béton à haute performance*, 7^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 8 et 9 mai 2000, Québec, Canada.

POWERS, T. C. (1958) *A Discussion of Cement hydration in Relation to the Curing of Concrete*, Comptes rendus du Highway Research Board, vol. 27, p.178-188.

POWERS, T. C. (1968) *The Thermodynamics of Volume Change and Creep*, Matériaux et Constructions, RILEM, Vol. 1, No 6, p. 487- 508.

SEIGNEUR, V. (2001) *Étude de l'influence du mûrissement à l'eau et de l'ajout d'un agent de retrait sur le retrait endogène de bétons à haute performance*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 97p.

TAZAWA, E.I., MIYAZAWA, S. (1995) *Influence of Cement and Admixture on Autogeneous Shrinkage of Cement Paste*, Cement and Concrete Research, vol. 25, no 2, p. 281-287.

TAZAWA, E.I., MIYAZAWA, S. (1996) *Influence of Curing Conditions on Autogeneous Shrinkage of Concrete*, International Conference on Engineering Materials, (ed. A. Al-Manaser, S. Nagataki, R. Joshi) CSCE/JSCE, Ottawa, Tokyo 1997, p. 373-384.

VAN BRUEGEL, K., DE VRIES, J. (1998) *Mixture Optimisation of Low Water/Cement Ratio High Strength Concretes in View of Reduction of Autogeneous Shrinkage*, 1th International Symposium on High-Performance and Powder Reactive Concretes, Sherbrooke, p.365-382.

WITTMANN F. (1968) *Surface Tension Shrinkage and Strength of Hardened Cement Paste*, Matériaux et Constructions, RILEM, Vol. 1, No 6, p. 547-552.