

MOHAMED BOUHLEL

COMPORTEMENT DU BÉTON AU JEUNE ÂGE SOUS DIFFÉRENTES CONDITIONS THERMIQUES

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en génie civil
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2012

Résumé

Les matériaux cimentaires sont utilisés de plus en plus dans le domaine de la construction civile. Plusieurs recherches expérimentales sont réalisées dans le but de mieux comprendre les mécanismes pilotant le comportement des bétons et d'identifier les facteurs responsables afin d'en assurer à la fois une meilleure durabilité et une bonne résistance. Or, les bétons dits de haute performance sont susceptibles à se fissurer depuis les premières heures suivant l'initiation de la réaction d'hydratation. La durabilité des bétons est ainsi affectée. Ceci constitue un défi d'actualité.

C'est dans cette optique que la présente recherche a été initiée. Le terme jeune âge représente les premiers jours, voire les premières heures, suivant l'amorçage de la réaction d'hydratation des grains de ciments. À l'heure actuelle, il n'existe pas de procédure ni de montages expérimentaux « normalisés » permettant d'évaluer le comportement des bétons depuis le jeune âge. Le Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) a développé un dispositif expérimental qui permet de simuler le comportement des bétons sous des conditions de restrictions des déformations. Le montage, appelé montage de retrait restreint à déformations différées (R^2D^2), a été amélioré dans le cadre de cette étude afin de permettre d'examiner l'influence de la température sur le comportement des bétons au jeune âge.

Plusieurs bétons ont été formulés et testés en se basant sur trois types de ciments. Cinq rapports eau/ciment ont été testés et plusieurs profils thermiques ont été appliqués. L'influence du rapport eau/ciment, de la composition minéralogique et de la température sur le comportement ont été investis plus en profondeur. Le détail des résultats de cette étude expérimentale est présenté dans les sections qui suivent.

Abstract

Cementitious materials are used increasingly in the field of civil construction. Several experimental investigations are conducted to better understand the mechanisms controlling the behaviour of concrete and identify the factors responsible to ensure both durability and strength. But the so-called high performance concretes are likely to crack in the first hours after the initiation of the hydration reaction. The durability of concrete is thus affected. This constitutes a challenge for today.

This research has been initiated with this perspective in mind. The term young age represents the first days, even the first few hours following the initiation of the reaction of hydration of cement grains. Currently, there is no procedure or experimental setups standardized to assess the behaviour of concrete from an early age. The Research Center on Concrete Infrastructures (CRIB) has developed an experimental device that simulates the behaviour of concrete under conditions of restricted deformation. The assembly, called the assembly for restrained shrinkage deformations (R^2D^2) was improved as part of this study to help examine the influence of temperature on the behaviour of concrete at early age.

Several concrete were formulated and tested based on three types of cements. Five water /cement ratios were tested and several thermal profiles were applied. The influence of the water /cement ratio, the mineralogical composition of cement and the effect of the temperature on the concrete behaviour have been investigated in more depth.

Avant-propos

À ma mère,

Pour tout l'amour qu'elle m'avait consacré

À mon père,

Pour tout le support qu'il m'avait accordé

À ma femme,

Pour son grand cœur et son soutien sans relâche

À mes enfants,

Louay & Shaymaa pour leurs amours et leurs sourires

À mes chers professeurs, Benoît et Jacques,

Pour leurs encadrements, encouragements et amitiés

Pour toute personne qui m'a soutenue de près ou de loin

MERCI DE TOUT MON COEUR

Table des matières

1	Introduction générale.....	1
1.1	Introduction.....	1
1.2	Problématique.....	2
1.3	Objectifs de recherche et points d'originalité.....	3
1.4	Plan de la thèse.....	5
2	Revue de la documentation.....	7
2.1	Introduction.....	7
2.2	Caractéristiques du ciment.....	7
2.2.1	Fabrication du ciment.....	7
2.2.2	Caractéristiques chimiques du ciment portland.....	9
2.3	Hydratation du ciment.....	10
2.3.1	Les séquences de l'hydratation d'un ciment portland.....	10
2.3.2	Les produits d'hydratation.....	12
2.3.3	Les conséquences structurales du processus d'hydratation.....	14
2.4	Les propriétés déformationnelles des bétons.....	15
2.4.1	Le retrait chimique.....	16
2.4.2	Le retrait externe.....	17
2.4.3	Le fluage.....	20
2.4.4	Les déformations thermiques.....	33
2.5	Conclusion.....	40
3	Les essais de retrait restreint, <i>historique</i>.....	41
3.1	Introduction.....	41
3.2	Principe des essais à restriction active.....	42
3.3	Les principaux montages expérimentaux à restriction active.....	44
3.3.1	Montage expérimental utilisé par Paillère et coll. (1989).....	44
3.3.2	Montage expérimental utilisé par Bloom et coll. (1995).....	45
3.3.3	Montage d'essai utilisé par Kovler (1994).....	46
3.3.4	Montage expérimental utilisé par Altoubat (2001).....	47
3.3.5	Montage d'essai utilisé par BjØntegaard (1999).....	48
3.4	Synthèse.....	50
4	L'essai de retrait restreint R^2D^2.....	53
4.1	Introduction.....	53
4.2	Déroulement des essais R^2D^2	54
4.3	Montage expérimental de retrait restreint (R^2D^2).....	55
4.3.1	Améliorations fondamentales du montage R^2D^2 pour le contrôle en température.....	60
4.3.2	Étude de sensibilité des capteurs de déformations LVDT aux variations thermiques...65	
4.3.3	Étude de sensibilité des capteurs de proximité inductifs aux variations thermiques.....	74
4.3.4	Synthèse comparative : comportement des LVDT vs celui des CPI.....	78
4.3.5	Amélioration du montage R^2D^2 par Bédard (2009).....	79
4.4	Bilans des déformations.....	81
4.5	Bilans des modifications requises.....	83
5	Étude expérimentale.....	85

5.1	Introduction	85
5.1.1	Convention et notations	85
5.1.2	Programme expérimental	86
5.1.3	Méthode de fabrication.....	86
5.2	Étude expérimentale – Phase I	87
5.2.1	Matériaux	87
5.2.2	Répétabilité des essais R^2D^2	90
5.2.3	Influence du rapport E/C	103
5.2.4	Influence de la température	105
5.2.5	Synthèse des résultats	114
5.3	Étude expérimentale – Phase II	120
5.3.1	Matériaux	120
5.3.2	Influence du rapport E/C	122
5.3.3	Influence de la composition minéralogique	130
5.3.4	Synthèse des résultats	138
5.4	Étude expérimentale – Phase III.....	142
5.4.1	Influence du rapport E/C	143
5.4.2	Influence de la composition minéralogique	151
5.4.3	Synthèse des résultats	157
5.5	Synthèse comparative.....	160
6	Conclusions générales et recommandations	175
6.1	Répétabilité des essais R^2D^2	178
6.2	Influence du rapport eau/ciment.....	178
6.3	Influence de la composition minéralogiques du ciment.....	180
6.4	Influence de la température	182
6.5	Recommandations	186
7	Références bibliographiques	189
8	Annexe 1 : programme R2D2TEMP	195

Liste des figures

Figure 1-1 : Représentation schématique de l'organisation globale du projet	4
Figure 2-1 : Représentation schématique du procédé de fabrication des ciments	8
Figure 2-2 : Vue schématique d'un grain de ciment Portland [tiré de Garcia 99]	9
Figure 2-3 : Dégagement de chaleur issu de l'évolution de la réaction d'hydratation : [1] Préinduction, [2] Induction, [3] Accélération / début de prise, [4] Décélération, [5] Évolution de la réaction d'hydratation avec une cinétique presque constante [Gartner et coll. 88]	10
Figure 2-4 : Évolution schématique de l'hydratation d'une pâte de ciment en système scellé	14
Figure 2-5 : Un sommaire des changements volumétriques dans les matériaux cimentaires au jeune âge [Lange 00]	15
Figure 2-6 : Représentation schématique des variations volumétriques au sein d'une pâte de ciment	17
Figure 2-7 : Mécanisme de dépression capillaire [adapté de Hua et coll. 95]	18
Figure 2-8 : Évolution du retrait externe et du retrait chimique au court du temps – cas des pâtes de ciment [Bissonnette et coll. 02]	18
Figure 2-9 : Influence du rapport E/C sur le retrait externe des pâtes de ciment [Tazawa et coll. 95]	19
Figure 2-10 : Évolution du retrait externe d'une pâte de ciment (E/C=0.35) avec des ajouts en FS (0% à 10%) [Jensen et coll. 96]	20
Figure 2-11 : Représentation schématique des déformations d'un élément chargé en compression et exposé au séchage [Brooks 01]	21
Figure 2-12 : Fluage et retour de fluage d'une éprouvette de mortier, conservée dans l'air à une humidité relative de 95%, soumise à une contrainte de 14,8 MPa puis déchargée [Neville 59]	21
Figure 2-13 : Mécanisme de fluage à court terme : théorie de microdiffusion [Ulm 98].	23
Figure 2-14 : Mécanisme de fluage de type dislocation dans les nano pores [ULM et coll. 98]. ..	23
Figure 2-15 : (a) Fluage spécifique d'un béton ordinaire (E/C = 0.5) – (b) Fluage spécifique d'un béton à haute performance (E/C = 0.33) [Ulm et coll., 98]	25
Figure 2-16 : Fluage d'éprouvettes de mortier conservées continuellement à différents degrés d'humidité relative [Neville 59].	26
Figure 2-17 : Fluage d'éprouvettes de mortier conservées continuellement à différents degrés d'humidité [basé sur les travaux de Troxell et Coll. 1958]	27
Figure 2-18 : Relation entre le fluage et la durée du chargement pour des bétons conservés à différentes températures (rapport contrainte/résistance de 0.7) [Nasser et Coll. 65].	28
Figure 2-19 : Influence de la température sur le fluage d'un béton relativement au fluage à 20 °C [basé sur les travaux de Maréchal 69].	28
Figure 2-20 : Schématisation d'un matériau viscoélastique, d'un matériau élastique et d'un matériau visqueux.	29
Figure 2-21 : Exemples de modèles rhéologiques simulant le fluage.	30
Figure 2-22 : Fluage propre spécifique en traction et en compression pour des bétons fabriqués avec différents liants chargés à 28 jours à une température de 27 °C [Davis et Coll. 1937] .	31
Figure 2-23 : Représentation schématique des déformations dans un élément de béton [Neville 00]	32

Figure 2-24 : Influence de l'état d'humidité du système poreux mature sur l'évolution du CDT [Bjøntegaard 99].....	34
Figure 2-25 : Influence du type des granulats sur l'évolution du CDT [Bjøntegaard, 99]	35
Figure 2-26 : Evolution du CDT en cours de prise- cas des bétons ordinaires au jeune âge [Laplante et coll. 94]	35
Figure 2-27 : Contrôle de la température par le montage pendant des tests « à dents de scies » [Bjøntegaard 99].....	39
Figure 2-28 : CDT calculé durant un essai à dents de scie en conditions isotherme (20 °C) [Bjøntegaard 99].....	39
Figure 3-1 : Schéma opérationnel de l'essai de retrait restreint discrétisé [Acker et coll. 04]	43
Figure 3-2 : a) Appareil « Essai d'auto-fissuration », b) Exemple de résultats [Paillère et coll. 89]	44
Figure 3-3 : a) Montage expérimental, b) Exemple de résultats [Bloom et Coll, 1995].....	45
Figure 3-4 : a) Montage expérimental, b) Exemple de résultats obtenu par Kovler (1994)	46
Figure 3-5 : a) Montage expérimental utilisé par, b) Exemple de résultats [Altoubat, 2001].....	47
Figure 3-6 : a) Montage d'essai, b) Exemple de résultats [Bjøntegaard, 2001].....	48
Figure 3-7 : Évaluation de la distribution thermique dans l'élément en béton conditionné à une température de 20 °C [Bjøntegaard 01]	49
Figure 4-1 : Schéma type du déroulement d'un essai de retrait restreint	54
Figure 4-2 : Montage expérimental R ² D ² [Pigeon et coll. 2002].....	56
Figure 4-3 : (a) Photo d'un LVDT ; (b) Schéma d'un LVDT.....	57
Figure 4-4 : Système d'asservissement mécanique.....	58
Figure 4-5 : Système d'asservissement thermique utilisant la sonde interne du bain.....	59
Figure 4-6 : Système d'asservissement thermique utilisant la sonde externe dans le béton.....	59
Figure 4-7 : Configuration initiale des conduites d'eau dans le moule.....	60
Figure 4-8 : Nouvelle conception des canalisations dans des parois du montage R ² D ²	61
Figure 4-9 : Principe de fonctionnement du programme d'asservissement du bain	62
Figure 4-10 : Exemple d'application d'une consigne semi-adiabatique en utilisant la sonde interne.....	63
Figure 4-11 : Optimisation de la vitesse de la pompe	64
Figure 4-12 : Optimisation du débit	65
Figure 4-13 : Dispositif de maintien des capteurs LVDT sur le montage R ² D ²	66
Figure 4-14 : Schématisation de la calibration d'un capteur LVDT dans l'enceinte contrôlée en température.....	67
Figure 4-15 : Calibration d'un capteur LVDT à différentes températures environnantes isothermes.....	68
Figure 4-16 : Profil thermique imposé par le bain vs température mesurée dans l'enceinte	69
Figure 4-17 : Déformation fictive du montage asservi suite à une variation de la température	71
Figure 4-18 : Déformation fictive du montage libre suite à une variation de la température	71
Figure 4-19 : (a) Représentation schématique de la déformation enregistrée par le logiciel r2d2 suite à une variation de température (b) modèle simplifié du dispositif de maintien d'un LVDT dans les conditions de l'essai.....	72
Figure 4-20 : Évaluation de la température des LVDT dans leurs supports	73
Figure 4-21 : Profil thermique appliqué vs température LVDT.....	73
Figure 4-22 : Principe de fonctionnement d'un capteur de proximité inductif (CPI).	75
Figure 4-23 : Dispositif de calibration du capteur de proximité inductif.....	75

Figure 4-24 : Calibration d'un capteur à proximité inductif à différentes températures isothermes	76
Figure 4-25 : Dispositif de maintien du capteur de proximité inductif	77
Figure 4-26 : Consigne appliquée au bain vs Température mesurée au CPI	77
Figure 4-27 : Déplacement enregistré par le CPI suite à une variation de la température	78
Figure 4-28 : a) configuration originale, b) configuration amélioré par Bédard (2009)	80
Figure 4-29 : Exemple de résultats de l'évolution du CDT d'un mélange B40T10 (Bédard, 2009)	81
Figure 5-1 : Mesures des déformations endogènes totales pour un rapport $E/C = 0,35$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	92
Figure 5-2 : Mesures des déformations endogènes totales pour un rapport $E/C = 0,45$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	93
Figure 5-3 : Mesures des déformations endogènes décalées pour un rapport $E/C = 0,35$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	95
Figure 5-4 : Mesures des déformations endogènes décalées pour un rapport $E/C = 0,45$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	96
Figure 5-5 : Mesures des contraintes pour un rapport $E/C = 0,35$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	98
Figure 5-6 : Mesures des contraintes pour un rapport $E/C = 0,45$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	99
Figure 5-7 : Mesures des propriétés élastiques (module d'Young) - Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	100
Figure 5-8 : Mesures des déformations de fluage pour un rapport $E/C = 0,35$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	101
Figure 5-9 : Mesures des déformations de fluage pour un rapport $E/C = 0,45$ – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].	102
Figure 5-10 : Mesures des déformations endogènes totales (le zéro des déformations correspond au moment de contact eau-ciment).	106
Figure 5-11 : Amplitudes relatives des déformations endogènes totales à 10 °C et 30 °C mesurées par rapport aux déformations endogènes totales à 20 °C.	107
Figure 5-12 : Influence de la température sur les déformations libres décalées (le zéro des déformations correspond au moment de lancement de l'essai selon le critère de démarrage)	108
Figure 5-13 : Amplitudes des déformations endogènes à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des déformations endogènes à 20 °C.	109
Figure 5-14 : Influence de la température sur les déformations de fluage	110
Figure 5-15 : Amplitudes des déformations de fluage à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des déformations de fluage à 20 °C.	110
Figure 5-16 : Influence de la température sur les contraintes développées	111
Figure 5-17 : Amplitudes des contraintes à 10 °C et 30 °C vs amplitudes des contraintes à 20 °C.	112
Figure 5-18 : Amplitudes des modules élastiques à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des modules élastiques à 20 °C.	113
Figure 5-19 : Amplitudes des modules élastiques à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des modules élastiques à 20 °C.	114
Figure 5-20 : Représentation graphique de l'effet de la température sur le comportement au jeune âge du B35T10 au bout de six jours- Valeurs relatives par rapport aux résultats à 20 °C ...	117

Figure 5-21 : Représentation graphique du l'effet de la température sur le comportement au jeune âge du B45T10 au bout de six jours- Valeurs relatives par rapport aux résultats à 20 °C ...	118
Figure 5-22 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations endogènes totales.	123
Figure 5-23 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations endogènes décalées.	124
Figure 5-24 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations de fluage.	125
Figure 5-25 : Influence du rapport E/C sur les mesures des contraintes induites.	126
Figure 5-26 : Influence du rapport E/C sur les mesures des enveloppes des résistances en traction (essais de fendage).	127
Figure 5-27 : Influence du rapport E/C sur les mesures des modules élastiques.	128
Figure 5-28 : Influence du rapport E/C sur les mesures semi-adiabatiques.	129
Figure 5-29 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations endogènes totales en isotherme 20 °C.	131
Figure 5-30 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations endogènes décalées en isotherme 20 °C.	132
Figure 5-31 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations de fluage en isotherme 20 °C.	133
Figure 5-32 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des contraintes en isotherme 20 °C.	134
Figure 5-33 : Influence de la formulation des bétons sur les enveloppes de résistance en traction en isotherme 20 °C.	135
Figure 5-34 : Degrés de restriction atteint vers la fin des essais R ² D ² en isotherme 20 °C.	136
Figure 5-35 : Influence de la composition minéralogique sur les mesures des modules élastiques en isotherme 20 °C.	136
Figure 5-36 : Influence de la formulation des bétons sur les mesures des essais de calorimétrie semi-adiabatiques en isotherme 20 °C.	137
Figure 5-37 : Profil thermique appliquée durant la phase III.	142
Figure 5-38 : Déformations endogènes totales en isotherme 38 °C. - Influence du rapport E/C.	144
Figure 5-39 : Déformations endogènes décalées en isotherme 38 °C- Influence du rapport E/C.	145
Figure 5-40 : Mesures des contraintes en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C.	146
Figure 5-41 : Déformations de fluage en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C.	147
Figure 5-42 : Courbes d'évolution comparatives de la contrainte induite et de la résistance en traction en conditions isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C.	148
Figure 5-43 : Mesures des modules élastiques en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C.	149
Figure 5-44 : Déformations endogènes décalées en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment.	152
Figure 5-45 : Déformations de fluage en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment.	153
Figure 5-46 : Enveloppes de résistance en traction en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment.	154
Figure 5-47 : Degrés de restriction atteints vers à la fin des essais R ² D ² en isotherme 38 °C.	155
Figure 5-48 : Influence de la composition minéralogique sur les mesures des modules élastiques en isotherme 38 °C.	155
Figure 5-49 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes libres (E/C = 0,30)	161
Figure 5-50 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes libres (E/C = 0,40)	162
Figure 5-51 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes décalées (E/C = 0,30)	163

Figure 5-52 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes décalées (E/C = 0,40).....	164
Figure 5-53 : Influence de la température sur les mesures des déformations de fluage (E/C = 0,30)	165
Figure 5-54 : Influence de la température sur les mesures des déformations de fluage (E/C = 0,40)	166
Figure 5-55 : Influence de la température sur les mesures des contraintes (E/C = 0,30).....	167
Figure 5-56 : Influence de la température sur les mesures des contraintes (E/C = 0,40).....	168
Figure 5-57 : Influence de la température sur les mesures des résistances en traction (E/C = 0,30)	169
Figure 5-58 : Influence de la température sur les mesures des résistances en traction (E/C = 0,40)	170
Figure 5-59 : Influence de la température sur les mesures des modules élastiques	171
Figure 6-1 : Influence du ciment et du rapport E/C sur le développement des dépressions capillaires dans les réseaux poreux du béton en fonction du temps (Michaud, 2008)	182
Figure 6-2 : Mesures de fluage sous différentes conditions thermiques sur un béton muri de deux mois (d'après Atrushi, 2003).....	185

Liste des tableaux

Tableau 2.1 - Composition chimique habituelle du ciment Portland [Neville, 00].	8
Tableau 2.2 – Composition chimique du ciment	10
Tableau 3.1 : Limitations des différents montages de retrait discrétisé	50
Tableau 4.1 : Consigne imposée vs températures mesurées dans l'enceinte de calibration.	67
Tableau 4.2 : Températures appliquées par le bain vs celles mesurées au niveau du LVDT	74
Tableau 5.1 : Différentes étapes de la séquence de malaxage	87
Tableau 5.2 : Propriétés physiques et chimiques du ciment type 10.	88
Tableau 5.3 : Propriétés physiques des granulats	88
Tableau 5.4 : Formulations expérimentées	88
Tableau 5.5 : Propriétés à l'état frais	89
Tableau 5.6 : Résistances mécaniques- Charron (2002)	89
Tableau 5.7 : Profil thermiques isothermes	89
Tableau 5.8 : Écart des amplitudes des déformations totales au bout de 7 jours	91
Tableau 5.9 : Écart des amplitudes des déformations totales au bout de 7 jours	94
Tableau 5.10 : Influence de la température sur les mesures relatives (par rapport à celles mesurées à 20 °C) au bout de six jours. Rapport eau/ciment =0,35	116
Tableau 5.11 : Influence de la température sur les mesures relatives (par rapport à celles mesurées à 20 °C) au bout de six jours. Rapport eau/ciment =0,45	117
Tableau 5.12 : Propriétés chimiques des ciments type 10, type 50 et Whitehall1	121
Tableau 5.13 : Propriétés minéralogiques des ciments type 10, type 50 et Whitehall1	121
Tableau 5.14 : Propriétés physiques des granulats	122
Tableau 5.15 : Formulations finales des bétons étudiés	122
Tableau 6.1 – Tableau récapitulatif du programme expérimental réalisé	176

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Introduction

Depuis sa découverte vers la fin du 19^{ème} siècle, le béton a été considéré comme un des symboles du domaine du génie civil. Diverses recherches ont permis d'aider à mieux comprendre le comportement de ce matériau dont les propriétés évoluent en fonction de l'état d'avancement de la réaction d'hydratation. Il a été montré que cette réaction possède trois principales caractéristiques : un dégagement de chaleur (aspect exothermique), une augmentation de la résistance des produits d'hydratation et une diminution du volume total [Chatelier 1900].

Si les réactions d'hydratation des composants minéralogiques du ciment satisfont la loi de la conservation de masse, les produits résultants à la fin du processus d'hydratation possèdent un volume absolu total plus petit que celui des constituants initiaux [Chatelier 1900]. Le volume total des hydrates obtenus est inférieur d'environ 8 à 10% du volume initial des constituants. La réduction volumétrique, généralement connue sous le nom de «contraction Le Chatelier» ou «retrait chimique», peut entraîner dans certaines conditions des problèmes de fissuration au très jeune âge du béton (les premiers jours voire les premières heures d'hydratation). En effet, les éléments structuraux de béton ne sont pas libres de se déformer car ils sont généralement sous conditions restreintes de mouvement (totales ou partielles). Ces conditions de restriction combinées au phénomène de la contraction «Le Chatelier» génèrent des contraintes de traction qui peuvent mener à la fissuration du béton. La durabilité, l'esthétique et la résistance de la structure sont par conséquent mises à l'épreuve.

1.2 Problématique

La problématique de la fissuration des bétons, particulièrement au jeune âge, demeure un sujet d'actualité. Une fois la fissuration initiée, les agents agressifs auront plus de facilité à traverser la couche d'enrobage qui constitue la première barrière protectrice face aux attaques externes. Ils pourront, par la suite, atteindre l'armature et le cœur des éléments fissurés. La compréhension du comportement des bétons au jeune âge demeure la clef de réussite et le premier pas vers la résolution de ces problèmes. C'est dans ce contexte que le présent travail de recherche a été défini. Afin de mieux comprendre le comportement des bétons au jeune âge sous différentes conditions thermiques.

Le caractère exothermique de la réaction d'hydratation est d'une grande importance. Dans certaines conditions, le dégagement de chaleur issu de la réaction d'hydratation peut entraîner des élévations de température supérieures à 50 °C au sein de l'élément en béton et cela, sans apport de chaleur extérieure [Laplante 93]. Comme toute sollicitation physique externe, la variation de la température induit elle aussi des variations dimensionnelles. Ces déformations thermiques se développent simultanément avec les déformations endogènes. La nature du couplage entre ces deux types de déformations demeure un sujet ambigu. Diverses techniques et procédures ont été proposées dans le but d'évaluer la part de chacun de ces deux types de déformation [Laplante et coll. 94; Bjøntegaard et coll.00].

En présence de gradient de température, des contraintes se développent à travers la section. Les déformations thermiques sont ainsi restreintes localement au niveau de la section. Si un élément de béton durcissant est libre de se déformer durant les périodes d'échauffement et de refroidissement associées à l'hydratation du ciment au jeune âge, aucune contrainte additionnelle ne sera induite dans l'élément. Par conséquent, aucune fissure thermique n'apparaîtra. Cependant, dans la réalité, les variations volumétriques et dimensionnelles du béton sont presque toujours empêchées (par des éléments adjacents ou par des gradients thermiques ou endogènes au cœur de l'élément). Dans de telles situations, les déformations du béton seront partiellement ou totalement empêchées, [Laplante 93].

Les principaux paramètres qui gouvernent l'amplitude des contraintes d'origine thermique induites dans le béton sont : les conditions de retenue, les gradients thermiques qui se génèrent à travers la section et l'évolution des caractéristiques thermiques et mécaniques du béton. L'ampleur des contraintes induites est notamment dépendante des caractéristiques élastiques et viscoélastiques du béton [Laplante 93]. Dans de telles conditions de restriction des déformations, le caractère viscoélastique du béton permet d'atténuer les contraintes et réduire les déformations totales. Ce phénomène, connu sous le nom de « fluage », a été largement étudié pour des éléments soumis à des efforts de compression. Cependant, en traction, il demeure rarement analysé et se trouve donc peu documenté.

Le comportement diversifié des bétons au jeune âge nécessite un intérêt très particulier en vue de résoudre les problèmes de fissuration. Il est espéré que cette recherche clarifiera davantage les mécanismes affectant le comportement au jeune âge des bétons.

1.3 Objectifs de recherche et points d'originalité

La présente étude a comme objectif d'acquérir une meilleure compréhension du comportement du béton durant les premières heures suivant sa fabrication. Des essais simulant des cas de restriction des déformations ont été réalisés par le biais d'un montage conçu pour cet effet. Cet outil expérimental, appelé montage R²D², a été développé au sein du Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) à l'Université Laval. Plusieurs mélanges de bétons ont été testés ; dans un programme faisant intervenir différents types de ciment, différents rapports E/C et différentes températures de cure. L'objectif final consiste à contribuer à l'optimisation des formulations, des techniques de fabrication et de mise en place du béton pour assurer une meilleure durabilité des structures.

Les études ont été réparties entre différents étudiants et chercheurs. Le diagramme de la figure 1.2 résume la répartition globale des études planifiées entre les différents intervenants.

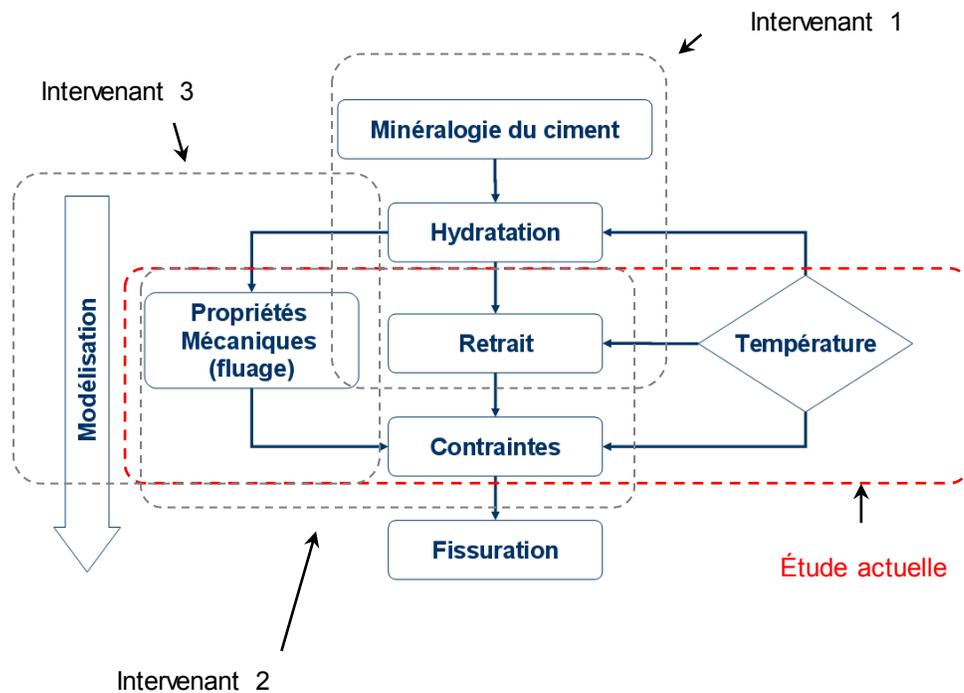


Figure 1-1 : Représentation schématique de l'organisation globale du projet.

L'originalité de cette étude découle de la nature même des essais expérimentaux. En effet, les essais de retrait restreint ne sont pas encore des essais normalisés. Plusieurs centres de recherche ont développé et continuent à développer plusieurs conceptions des montages expérimentaux en raison de l'importance et de la variété des résultats obtenus.

L'intérêt de cette recherche porte en particulier sur l'étude de l'influence de la température sur le comportement au jeune âge des bétons. C'est Toma (2000) qui a conçu le premier montage de retrait restreint au CRIB. Cette première version ne permettait pas de contrôler la température des essais. Charron (2002) a amélioré la conception originale pour permettre un asservissement thermique des essais R²D². Cette nouvelle conception a permis d'obtenir des résultats très intéressants en conditions isothermes, 10 °C, 20 °C et 30 °C. Toutefois, quelques limitations d'ordre conceptuel ont été observées. Le montage ne permettait pas d'appliquer des températures au dessus de 30 °C sans avoir des perturbations expérimentales.

Un autre défi consistait à résoudre la limitation au niveau du logiciel « Polytemp » fourni avec le bain d'asservissement. Afin que l'opérateur applique au béton un profil thermique non isotherme, cet outil permet, sur la base d'une programmation très préliminaire, d'imposer des consignes isothermes par palier.

Un des premiers objectifs de ces travaux consiste à améliorer la conception du montage afin de remédier à toutes ces problématiques. L'objectif ultime demeure la réalisation des essais thermiques dans des meilleures conditions et en analyser et interpréter les résultats.

1.4 Plan de la thèse

Le présent document est subdivisée en six chapitres, incluant celui-ci. Le deuxième chapitre est une revue bibliographique des principaux aspects concernant le comportement des matériaux cimentaires au jeune âge. La réaction d'hydratation des ciments portland, les produits de cette hydratation ainsi que leurs conséquences structurales sont présentés. Les propriétés déformationnelles des bétons seront, par la suite, étudiées. La question de découplage entre les déformations endogènes et les déformations thermiques sera examinée plus en détail. Le troisième chapitre sera consacré à la description des montages de retrait restreint conçu par différents laboratoires et centres de recherches. Une analyse des avantages et des limitations de chaque appareil sera présentée. Le quatrième chapitre sera dédié uniquement au montage expérimental de retrait restreint développé par le CRIB et qui a servi comme le moyen principal pour la réalisation de la présente étude expérimentale. Les résultats expérimentaux seront par la suite présentés à travers le cinquième chapitre. Une étude comparative des résultats de la deuxième et la troisième phases sera présentée. Dans le sixième chapitre, une discussion détaillée de toute cette étude expérimentale est présentée en vue de tirer le maximum de conclusions et de proposer par la suite des perspectives des recherches futures.

Chapitre 2

Revue de la documentation

2.1 Introduction

En conditions réelles d'exposition, les éléments de structure sont souvent restreints en déformation. Cela développe des contraintes internes qui, à leur tour, font intervenir d'autres mécanismes plus complexes tels que le fluage et la relaxation. Plusieurs de ces notions seront exposées au cours de la présente section. De plus, un sommaire de l'état des connaissances quant au comportement des matériaux cimentaires sera présenté. Les caractéristiques du ciment, le processus d'hydratation, les produits d'hydratation ainsi que les propriétés déformationnelles seront présentés.

2.2 Caractéristiques du ciment

2.2.1 Fabrication du ciment

Le ciment portland est fabriqué essentiellement à partir de matière calcaire, d'alumines et de silice présents dans l'argile et les schistes argileux (tableau 2.1). À hautes températures, ces composés réagissent les uns avec les autres pour former le clinker. Le ciment est obtenu par broyage de ce dernier (le clinker) et de gypse (figure 2-1).

Tableau 2.1 - Composition chimique habituelle du ciment Portland [Neville, 00].

Principaux oxydes	Teneur (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0
MgO	0.5-4.0
Alcalis (Na ₂ O éq.)	0.3-1.2
SO ₃	2.0-3.5



Figure 2-1 : Représentation schématique du procédé de fabrication des ciments

Le produit final est constitué essentiellement de quatre phases minérales : le silicate tricalcique (C₃S) qui représente 40 à 70 % de la masse du ciment, le silicate bicalcique (C₂S) qui représente 5 à 35 % de la masse du ciment, l'aluminat tricalcique (C₃A) et le ferroaluminat tétracalcique (C₄AF) qui représentent chacun entre 0 de 15 % de la masse du ciment [Neville 00].

2.2.2 Caractéristiques chimiques du ciment portland

Un grain de ciment est en fait un assemblage de ces quatre différentes phases (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) dont les propriétés chimiques et physiques sont différentes.

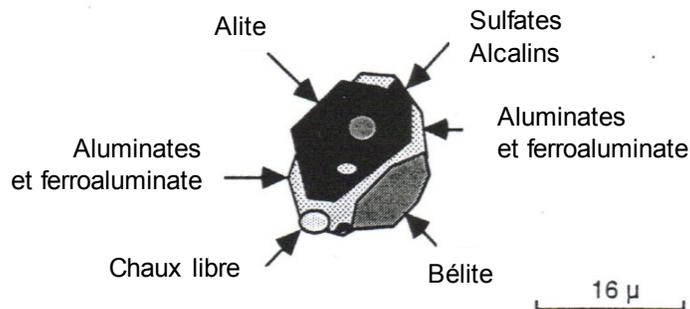


Figure 2-2 : Vue schématique d'un grain de ciment Portland [tiré de Garcia 99]

La détermination des pourcentages de chacune de ces phases est souvent réalisée avec les équations proposées par Bogue [Bogue 55]. Ce dernier a montré que la portion de chaque phase au sein du grain de ciment peut être déterminée en fonction des proportions des oxydes. Les compositions peuvent être estimées au moyen des équations empiriques suivantes :

$$C_3S = 4.07 (CaO) - 7.60 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Fe_2O_3) - 2.85 (SO_3)$$

$$C_2S = 2.87 (SiO_2) - 0.75 (CaOSiO_2)$$

$$C_3A = 2.65 (Al_2O_3) - 1.69 (Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.04 (Fe_2O_3)$$

Bogue suppose que la réaction de transformation des minéraux de base est complétée dans le four lors de la fabrication du clinker. Il ne prend pas en considération la présence potentielle de solutions solides entre les phases ou même la présence d'oxydes mineurs. Bien que cette méthode demeure peu précise (par exemple, elle sous-estime la teneur en C_3S et surestime celle de C_2S) elle est largement utilisée pour obtenir une évaluation des caractéristiques chimiques prédominantes du ciment [Neville 2000]. Les formulations chimiques de chacune de ces phases sont illustrées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Composition chimique du ciment

Constituant	Formule chimique	Abréviation
Silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S (bélite)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S (alite)
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A (célite)
Ferroatluminat tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF (célite)
Chaux libre	CaO	C
Magnésie	MgO	
Alcalis	Na_2O et K_2O	

2.3 Hydratation du ciment

La réaction par laquelle une pâte de ciment Portland (un mélange d'eau et de ciment Portland) fait prise et durcit au cours du temps est conventionnellement nommée « une réaction d'hydratation ». De nouveaux composés hydratés et insolubles dans l'eau se forment avec le temps et produisent une masse rigide. Le processus d'hydratation est influencé par plusieurs facteurs. Le type du ciment, sa finesse et le rapport eau/ciment (E/C) semblent être les premiers paramètres influents.

2.3.1 Les séquences de l'hydratation d'un ciment portland

Comme le montre la figure 2.3, la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment peut être subdivisée en cinq étapes : la pré-induction, l'induction, l'accélération, la décélération initiale et la décélération finale [Gartner et coll. 88].

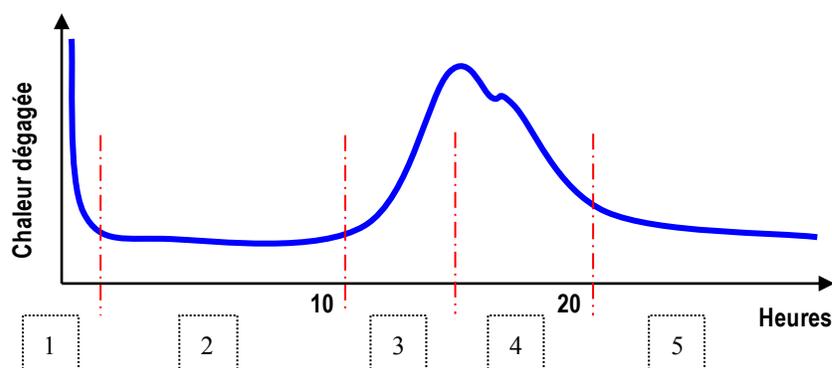


Figure 2-3 : Dégagement de chaleur issu de l'évolution de la réaction d'hydratation : [1] Préinduction, [2] Induction, [3] Accélération / début de prise, [4] Décélération, [5] Évolution de la réaction d'hydratation avec une cinétique presque constante [Gartner et coll. 88]

2.3.1.1 La pré-induction

Cette étape (pré-induction) dure quelques minutes seulement après le contact eau/ciment. À ce moment, il se développe au sein de la pâte une intense activité chimique et un grand dégagement de chaleur. Dès les premières minutes, il se forme des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de l'ettringite [Baroghel-Bouny 94]. La formation d'une mince couche d'hydrates autour des grains nuit à la dissolution ultérieure des phases du ciment et réduit significativement la cinétique d'hydratation [Gartner et coll., 88]. Par conséquent, la deuxième étape s'amorce.

2.3.1.2 L'induction

Cette deuxième étape, connue aussi sous le nom de « période dormante », se poursuit pendant quelques heures. Durant cette période, le béton est plastique et maniable. Une mince couche de C-S-H instable est formée autour des grains de ciment et par conséquent nuit à la dissolution ultérieure des composantes du ciment et ralentit significativement la progression de l'hydratation [Gartner et coll. 88]. Durant cette période, la dissolution des phases s'effectue toujours, mais à un rythme beaucoup plus lent [Baroghel-Bouny 94]. La concentration en ions calcium (Ca^{2+}) et hydroxyde (OH^-) augmente progressivement dans la solution aqueuse. Une fois que la concentration de ces composés atteint un seuil, la phase d'accélération débute [Gartner et coll. 88]. La sursaturation en ions calcium et hydroxyde provoque leur précipitation sous forme de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et induit une diminution soudaine de la concentration d'ions calcium en solution. La couche des hydrates à la surface des grains de ciment est ainsi éclatée et la réaction d'hydratation est accélérée [Gartner et coll. 88]. Aucune élévation de chaleur dégagée n'est observée au cours de cette phase.

2.3.1.3 L'accélération

La brutale consommation d'ions Ca^{2+} et OH^- par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ accélère la dissolution de tous les constituants du ciment. Un dégagement de chaleur est observé au début de cette phase [Baroghel-Bouny 94]. Une activité chimique intense reprend. A ce stade, les hydrates formés autour des grains de ciment se déploient et établissent certains contacts entre eux. C'est le début de la prise [Neville 00].

2.3.1.4 La décélération initiale

Cette quatrième étape (la décélération initiale) débute lorsque le dégagement de chaleur commence à diminuer à l'intérieur du matériau. La densité grandissante des couches de C-S-H nuit à la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydre [Vernet et coll. 91]. Cela ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle [Baroghel-Bouny 94]. La cinétique d'évolution de la réaction d'hydratation commence à s'atténuer à nouveau.

2.3.1.5 La décélération finale

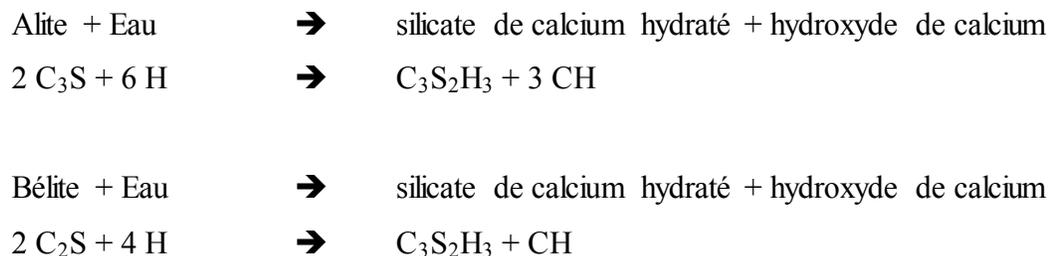
La dernière étape de la réaction d'hydratation nécessite plusieurs années. Graduellement, les produits d'hydratation remplissent l'espace entre les grains de ciment. La pâte de ciment devient de plus en plus dense et résistante.

2.3.2 Les produits d'hydratation

La réaction chimique du ciment portland est très complexe et ne peut être illustrée par de simples équations chimiques [Tasawa et coll., 95]. Les produits de l'hydratation des composants minéraux du clinker sont, essentiellement, les hydrates de silicate de calcium (C-S-H), la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (appelée aussi « portlandite » ou « hydroxyde de calcium ») et les aluminates hydratés. Ces éléments résultent essentiellement des différentes réactions chimiques des quatre phases principales composants le ciment : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF .

2.3.2.1 Les hydrates de silicate de calcium (C-S-H)

L'hydratation de l'alite (C_3S) et de la bélite (C_2S) produit un silicate de calcium hydraté ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) et de l'hydroxyde de calcium (CH). Les réactions chimiques sont décrites par les équations suivantes [Tasawa et coll., 95] :



Les C-S-H occupent 50% à 70% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydraté [Baroghel-Bouny 94]. Ils constituent la phase liante de la pâte de ciment. Les propriétés fondamentales de l'ensemble des hydrates dépendent, en bonne partie, des propriétés de ces silicates hydratés. Bien que les C-S-H ne possèdent pas une forme géométrique bien spécifique, les observations nanoscopiques montrent que leur structure semble être en feuillets. Les C-S-H mesurent de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}$ à $2 \times 10^{-6} \text{ m}$ de long et moins de $0,2 \times 10^{-6} \text{ m}$ d'épaisseur et sont caractérisés par une porosité intrinsèque qui est de l'ordre de 28% [Neville 00].

2.3.2.2 La portlandite (CaOH_2)

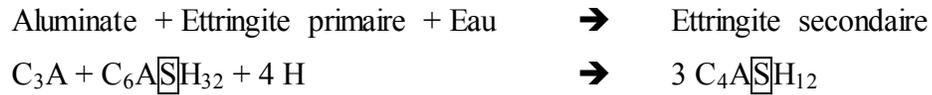
En moyenne, la portlandite libérée par l'hydratation des silicates de calcium occupe 25% à 27% du volume des solides d'une pâte de ciment complètement hydraté [Baroghel-Bouny 94]. Elle possède une morphologie hexagonale prismatique, souvent de quelques dizaines de micromètres de large, mais se fusionnant par la suite en un dépôt massif [Diamond 76]. La chaux hydratée (ou la portlandite) possède une bonne adhérence avec les C-S-H et elle joue le rôle d'un bon granulat. Cependant, elle devient instable (lessivage) lorsque le PH de la solution interstitielle diminue (inférieur à environ 12,5) [Neville 00]. Dans de telles situations, une porosité supplémentaire apparaîtra, réduisant ainsi les performances mécaniques de la matrice cimentaire et la durabilité.

2.3.2.3 Les aluminates

La réaction d'hydratation de l'aluminate tricalcique avec l'eau est violente et très rapide ; elle peut causer une prise éclair (une prise très rapide). La présence du gypse dans le ciment est indispensable pour atténuer cette réaction et la retarder. En premier lieu, l'hydratation des aluminates produit de l'ettringite primaire :



L'ettringite primaire devient une source d'ions sulfates (SO_4^{2-}) qui réagiront avec les aluminates excédentaires pour former une nouvelle forme d'ettringite plus stable (le monosulfato-aluminate de calcium hydraté) :



Notons que la présence des aluminates n'est pas indispensable à la prise, mais elle permet d'accélérer le durcissement de la pâte particulièrement durant les premières heures d'hydratation [Baroghel-Bouny 94].

2.3.3 Les conséquences structurales du processus d'hydratation

Le processus d'hydratation permet de transformer graduellement une pâte de ciment de sa phase liquide vers une phase solide. Au cours de cette transformation, la microstructure de la pâte de ciment évolue considérablement, plus particulièrement au très jeune âge. La quantité de gel produite est insuffisante pour remplir tout l'espace initialement occupé par les phases liquide et solide. Cette réduction du volume du produit final par rapport au volume initial a été identifiée par Le Chatelier [Le Chatelier, 1900] (figure 2-4).

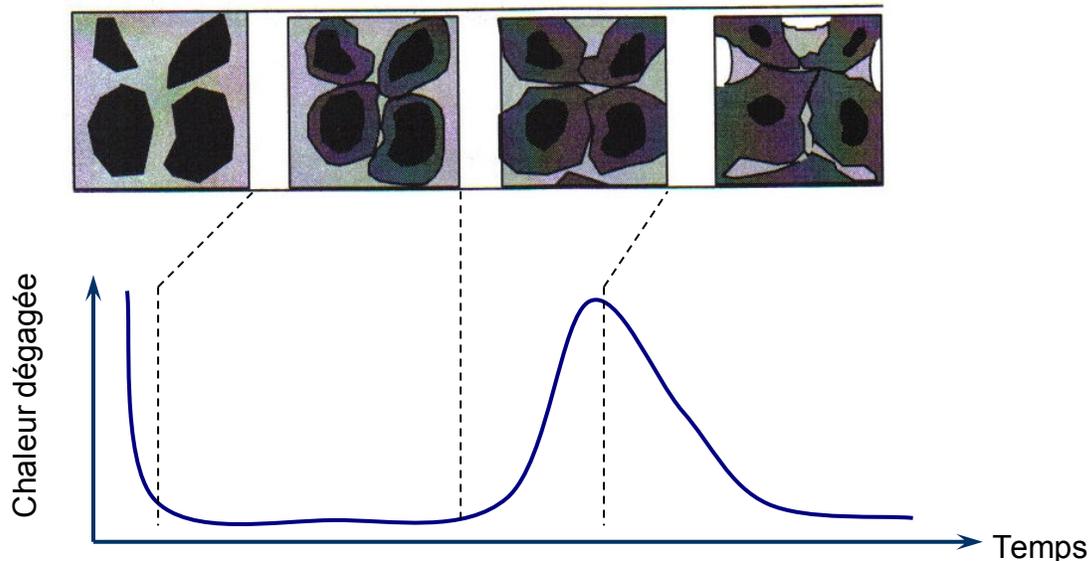


Figure 2-4 : Évolution schématique de l'hydratation d'une pâte de ciment en système scellé
[Basé sur les travaux de Gartner et coll. 88 et Gagné, GCI-714]

La réaction d'hydratation des silicates et des aluminates est caractérisée par un déficit volumétrique. Un réseau de pores capillaires prend place ainsi comme remplacement de ce déficit

volumétrique. La structure du réseau capillaire a une grande influence sur les propriétés finales des matériaux cimentaires. Plus le réseau poreux est raffiné, meilleurs sont les propriétés mécaniques, physiques, chimiques et thermiques des bétons [Nechnech, 00].

2.4 Les propriétés déformationnelles des bétons

Selon les conditions d'expositions et de service, les matériaux cimentaires subissent différents genres de variations volumétriques et dimensionnelles. Les variations volumétriques du produit d'hydratation peuvent résulter de plusieurs mécanismes qui se manifestent soit suite à un gain ou une perte en eau, soit suite à des efforts externes agissant sur la matrice cimentaire rigide. La perte en eau peut être d'origine interne suite à l'évolution de la réaction d'hydratation, ou même d'origine externe comme dans le cas de l'évaporation de l'eau suite au séchage. Si le matériau est sollicité par des efforts physiques externes, d'autres types de variations volumétriques sont induits, tels que le fluage et les déformations élastiques. Lange (2000) propose la schématisation de la figure 2-5 pour distinguer les changements volumétriques au sein des matériaux cimentaires :

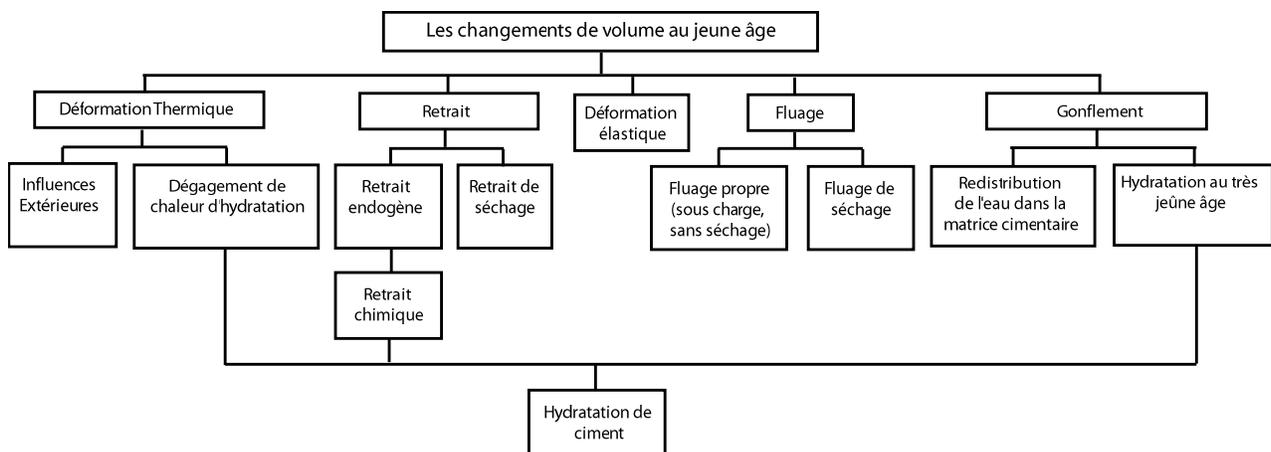


Figure 2-5 : Un sommaire des changements volumétriques dans les matériaux cimentaires au jeune âge [Lange 00]

Les déformations endogènes (DE) représentent les variations dimensionnelles macroscopiques du matériau qui ont eu lieu dans des conditions scellées et après avoir soustrait la part des déformations thermiques (DT) [Bjøntegaard, 99]. Elles peuvent se manifester sous forme de retrait ou même de gonflement.

2.4.1 Le retrait chimique

Le chimiste Le Chatelier (1900) a montré que la réaction d'hydratation est caractérisée par une importante diminution du volume absolu de la pâte de ciment. Le volume des hydrates formés suite à la réaction d'hydratation est réduit de 8 à 10 % par rapport à la somme des volumes des constituants qui ont participé à la réaction. Le Chatelier fut le premier à différencier entre les changements volumétriques absolus (totaux) et celui apparent (figure 2-6). La réduction volumétrique absolue est connue sous le nom de retrait chimique. Les variations de volumes observables (ou apparentes) correspondent au retrait externe (ou retrait endogène). Pour une pâte de ciment, le retrait chimique correspond à la somme des retraits chimique de chacune des composantes minérales du ciment (C_3S , C_2S , C_4AF , C_3A , ..) [Aitcin, P.-C 98]. La variation volumétrique résultante dépend fortement du type du ciment et des ajouts minéraux [Toma 00].

L'influence des ajouts minéraux sur le retrait chimique se manifeste généralement d'une façon tant physique que chimique [Neville 00]. Sur le plan physique ils contribuent à améliorer la maniabilité du mélange (ex. cendres volantes) et à densifier la microstructure (ex. fumées de silices, laitier de haut fourneau). Le rôle chimique des ajouts minéraux est essentiellement attribué à leur activité pouzzolanique, en effet, ces ajouts réagissent avec la portlandite pour produire des C-S-H [Baroghel-Bouny 94]. L'activité chimique du mélange sera ainsi amplifiée par la production additionnelle des silicates de calcium hydratés (C-S-H) issues des réactions pouzzolaniques.

Bissonnette et coll. (2002a) ont montré que le dosage des adjuvants (en particulier les superplastifiants) ont une influence directe sur le retrait chimique. Avant le seuil de percolation (point de séparation des courbes de retrait externe et chimique figure 2-7), la cinétique du retrait chimique est inversement proportionnelle au dosage des superplastifiants, alors qu'après ce seuil, le dosage en superplastifiant amplifie davantage la cinétique des déformations.

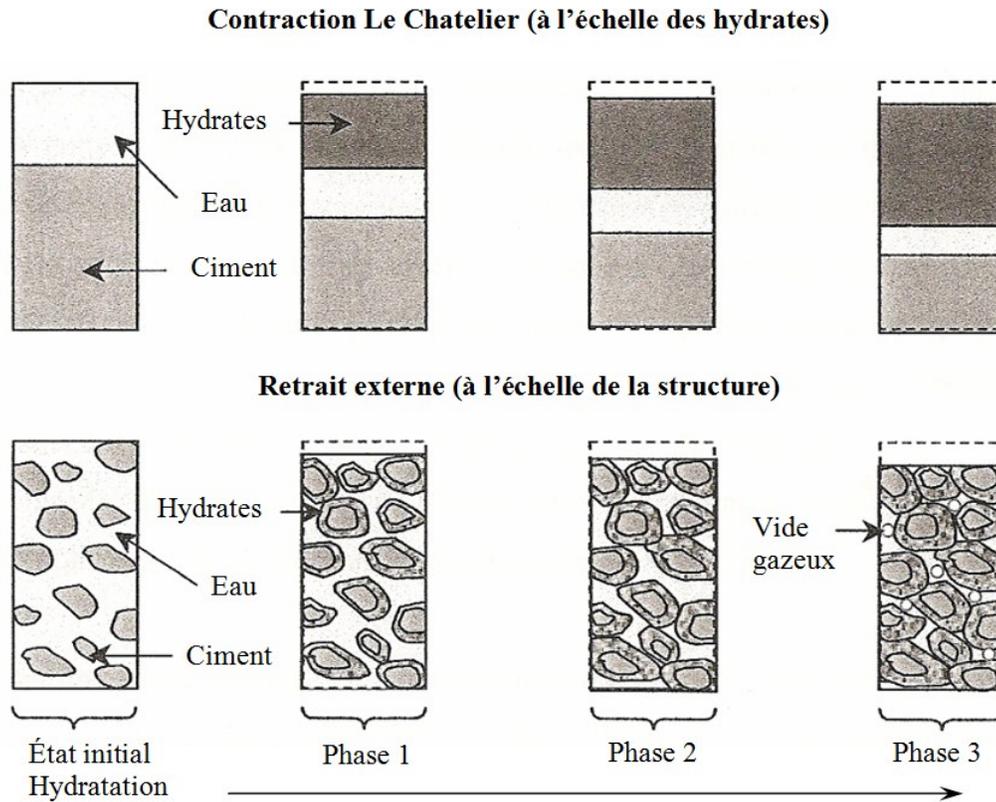


Figure 2-6 : Représentation schématique des variations volumétriques au sein d'une pâte de ciment.

2.4.2 Le retrait externe

Le retrait externe n'est en réalité qu'une conséquence du retrait chimique associé à la réaction d'hydratation du ciment. En absence d'apport d'eau, l'évolution de la réaction d'hydratation génère des vides au sein de la matrice cimentaire durcissante. D'après la loi de Laplace, le remplissage partiel des pores donne naissance à des tensions capillaires. Ce mécanisme de dépression capillaire décrit l'équilibre mécanique d'un ménisque sous des pressions différentes de part et d'autre de celui-ci, et l'équilibre hygrométrique eau liquide - eau vapeur (figure 2-7). À l'échelle de la structure, cette sollicitation d'origine interne cause une contraction appelée «retrait externe». La figure 2-8 illustre la différence entre le retrait externe et le retrait chimique : avant le seuil de percolation (la prise), il n'est pas possible de différencier le retrait externe du retrait chimique. C'est uniquement après la prise qu'on commence à distinguer ces deux types de retrait [Bissonnette et coll. 02].

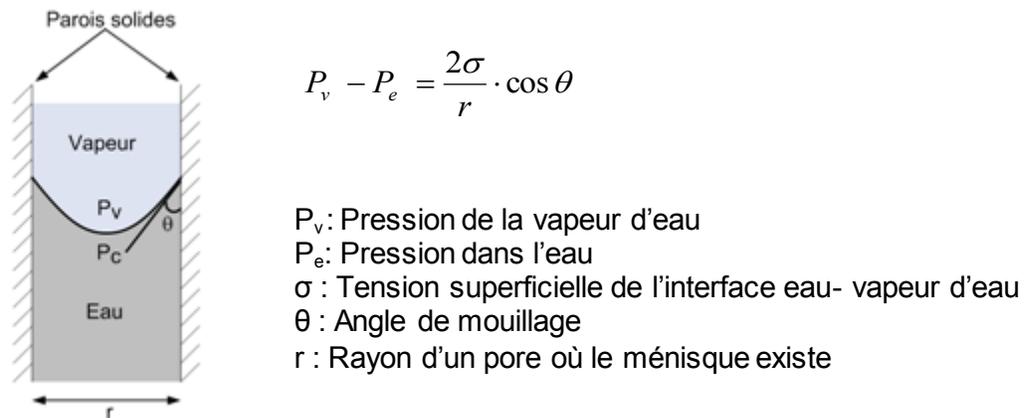


Figure 2-7 : Mécanisme de dépression capillaire [adapté de Hua et coll. 95]

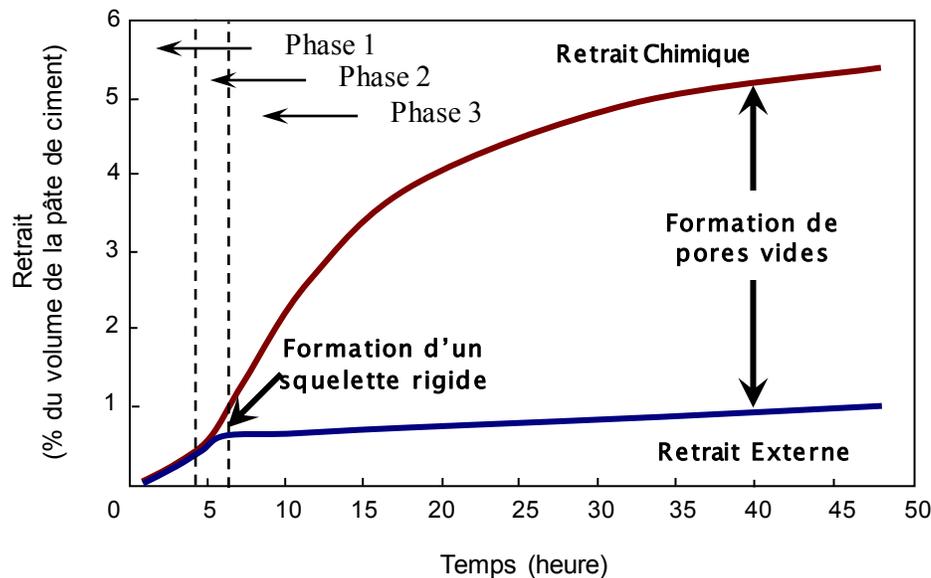


Figure 2-8 : Évolution du retrait externe et du retrait chimique au court du temps – cas des pâtes de ciment [Bissonnette et coll. 02]

2.4.2.1 Les paramètres influençant le retrait externe

Les principaux facteurs qui influencent le retrait externe sont : le rapport eau/ciment (E/C), la taille des particules de ciment et les ajouts minéraux, en particulier la fumée de silice (FS) [Tazawa et coll. 95, Toma 00]. L'influence du rapport eau/ciment (E/C) sur le retrait externe a été largement étudiée par plusieurs chercheurs [Justnes et coll. 96 ; Toma et coll. 00 ; Tazawa et coll. 95]. Il a été conclu qu'une réduction du rapport E/C tend à amplifier, à la fois, la cinétique et

l'amplitude du retrait externe (figure 2-9). Un rapport E/C plus faible implique un besoin en eau de gâchage plus faible. Ceci implique une réduction du volume des pores capillaires créés par autodessiccation ainsi que de leurs tailles.

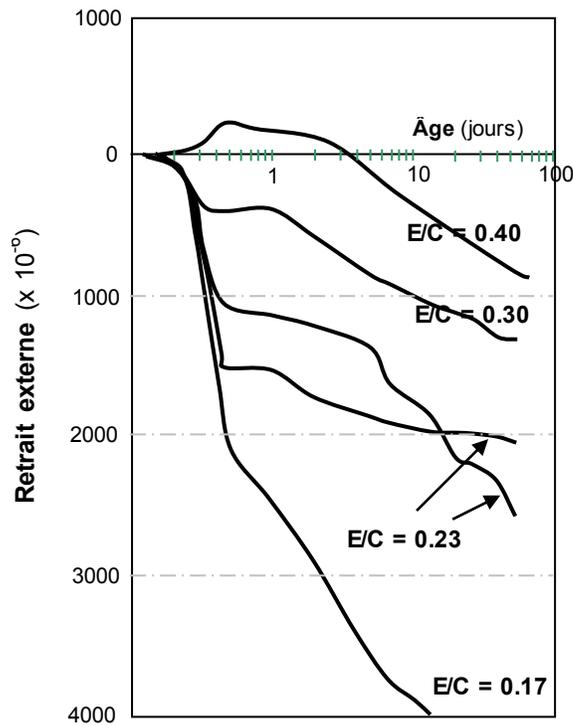


Figure 2-9 : Influence du rapport E/C sur le retrait externe des pâtes de ciment [Tazawa et coll. 95]

La finesse du ciment est un paramètre très important qui a une influence directe sur le retrait chimique et le retrait externe. En effet, l'hydratation est un phénomène de dissolution-précipitation et la vitesse de réaction est liée à la surface totale des grains de ciment exposée à l'eau de gâchage. Par conséquent, une augmentation de la finesse des grains de ciment induit une amplification du retrait externe [Neville 00]. Les travaux de Tazawa (1995) ont prouvé que la cinétique au jeune âge des déformations endogènes est largement affectée par la finesse des grains ; cependant à long terme, l'effet de la finesse est négligeable. Ces conclusions ont été confirmées par Bentz [Bentz et coll., 99].

L'ajout de la FS permet de raffiner le réseau poreux de la matrice cimentaire. Selon la loi de Laplace, ceci se traduit par des forces de tension capillaires plus élevées. De plus, la réaction pouzzolanique de la fumée de silice implique une contraction similaire à la contraction Le Chatelier [Neville 00]. Les déformations endogènes seront par conséquent amplifiées. La figure 2-10, issue des travaux de Jensen [Jensen et coll., 96], illustre cet aspect.

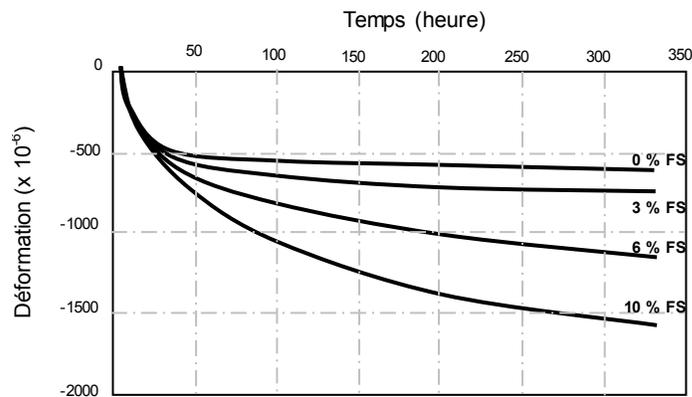


Figure 2-10 : Évolution du retrait externe d'une pâte de ciment (E/C=0.35) avec des ajouts en FS (0% à 10%) [Jensen et coll. 96]

2.4.3 Le fluage

Dans des conditions isothermes, dès l'application d'une charge, le béton affiche une réponse élastique. Si cette charge demeure constante, le matériau sollicité continue à se déformer après sa réponse élastique. Réciproquement, lorsqu'une déformation imposée subsiste, la force nécessaire au maintien de cette déformation diminue dans le temps. Ces deux phénomènes, connus respectivement sous les noms de fluage et de relaxation, reflètent la composante viscoélastique des matériaux cimentaires.

Généralement, les éléments en béton ne sont pas complètement libres de se déformer. Cette restriction des déformations commence dès la prise et se manifeste en grande partie au jeune âge. Cela induit le développement de contraintes au sein du matériau et par conséquent, la manifestation des propriétés viscoélastiques des bétons. Selon les conditions d'exposition, le fluage est généralement décomposé en fluage propre et fluage de séchage. Le premier (fluage propre) est celui mesuré dans des conditions où il n'y a aucun échange hydrique avec le milieu environnant [Lange et coll. 00]. Le deuxième, appelé aussi « effet Pickett », est la déformation supplémentaire qui survient lorsque le béton est exposé au séchage pendant le chargement

[Bissonnette 96] (figure 2-11). Généralement, les chercheurs supposent que ces deux types de déformations sont découplés. Toutefois, ce découplage n'est pas rigoureusement exact. En effet en cours de séchage, la teneur en eau évaporable, et par conséquent l'humidité relative de la matrice cimentaire, diminue. Ceci affectera directement le mécanisme du fluage propre [Acker et coll., 92].

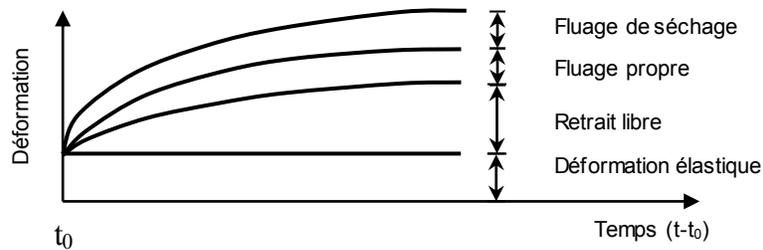


Figure 2-11 : Représentation schématique des déformations d'un élément chargé en compression et exposé au séchage [Brooks 01]

Dans le cadre de cette étude, les essais ont été réalisés sans échange hydrique. Ainsi, l'effet du séchage ne sera pas pris en considération. C'est uniquement le fluage propre qui sera étudié. Par conséquent, le terme « fluage » désignera dans cette étude le « fluage propre ». Le fluage observé en compression, comme en traction, est partiellement réversible. Au moment de l'annulation de la contrainte, la réponse de l'élément suit une recouvrance décomposée en deux parties : une déformation instantanée puis une déformation différée (figure 2-11).

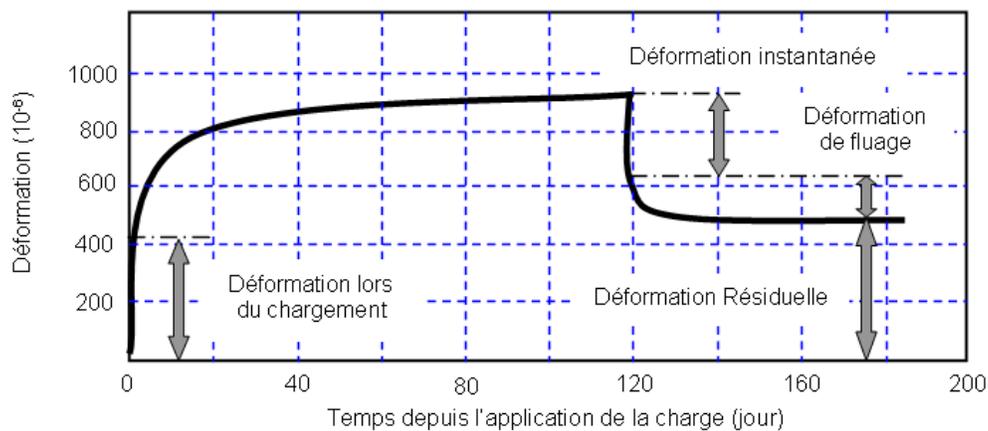


Figure 2-12 : Fluage et retour de fluage d'une éprouvette de mortier, conservée dans l'air à une humidité relative de 95%, soumise à une contrainte de 14,8 MPa puis déchargée [Neville 59]

La cinétique de la déformation différée permet de distinguer deux types de fluage : un fluage à court terme et un fluage à long terme. Le premier peut durer quelques jours. Il est caractérisé par une grande cinétique d'évolution des déformations. Le deuxième est caractérisé par un vieillissement prononcé sans aucune asymptote (figures, 2-12), du moins sur une échelle de 3 ans dans une représentation semi-logarithmique [Ulm et coll. 98]. Cette distinction entre ces deux types de fluage met en évidence l'existence de différents mécanismes en jeu. L'identification de ces mécanismes devrait débiter à l'échelle des hydrates.

2.4.3.1 Mécanismes du fluage

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer l'origine de cette réponse viscoélastique à court et à long terme. Certaines de ces théories concordent parfaitement avec certains résultats expérimentaux. Cependant, une seule théorie ne peut pas expliquer tout le phénomène de fluage. Ainsi, il se peut que plusieurs mécanismes interviennent à différentes échelles [Lange 00]. Selon Ulm et coll. (1998), c'est principalement la théorie de micro-diffusion et la théorie d'écoulement visqueux qui contribueraient en grande partie au développement des déformations de fluage, respectivement, à court terme et à long terme. Un aperçu de ces deux théories est présenté dans la suite.

2.4.3.1.1 Théorie de la microdiffusion

La théorie de la microdiffusion, appelée aussi « la théorie de la migration d'eau », suppose que le fluage résulte de la migration de l'eau des gels sous pression : Lorsque le squelette rigide de béton est soumis à une charge externe, la phase liquide est expulsée des pores du squelette sous pression vers des zones de moindre pression (figure 2-13). La notion d'écoulement de l'eau de gel dans les capillaires est cohérente avec l'influence de l'humidité sur le fluage. Lorsque le béton est exposé au séchage, l'évaporation à l'extrémité des capillaires met l'eau en traction, ce qui contribue à amplifier l'écoulement. Progressivement, les gradients d'humidité dans le réseau poreux s'amenuisent et la vitesse d'écoulement décroît [Bissonnette, 96]. Cette théorie peut expliquer en partie la portion réversible de la déformation viscoélastique. Cependant, la migration d'eau seule ne suffit pas pour expliquer l'amplitude des déformations de fluage [Ulm et coll. 98].

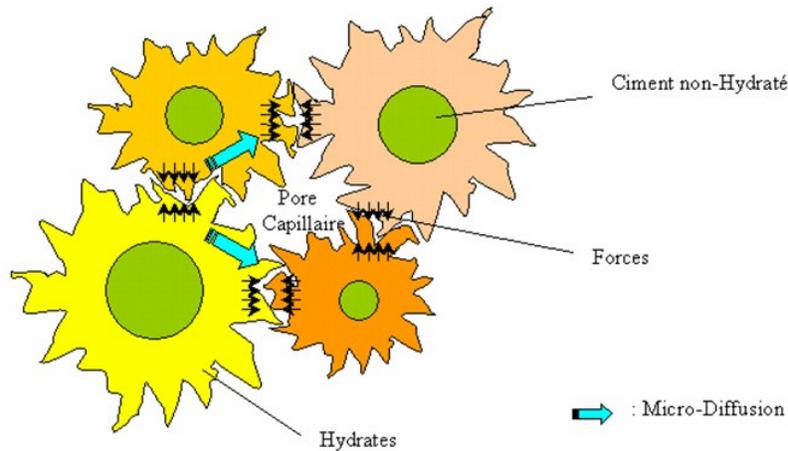


Figure 2-13 : Mécanisme de fluage à court terme : théorie de microdiffusion [Ulm 98].

2.4.3.1.2 Théorie de l'écoulement visqueux

La théorie d'écoulement visqueux suppose que le fluage résulte du mouvement des feuillets de CSH les uns par rapport aux autres (figure 2-14). Les liaisons entre les particules de C-S-H, instables et désordonnées, auraient tendance à se rompre localement et à se reformer après déplacement [Wittmann, 82]. Cette théorie n'apporte aucune compréhension de la portion réversible du fluage. Une part des déformations irréversibles du fluage serait attribuable au glissement relatif des feuillets de C-S-H et à l'endommagement progressif permanent de la structure hydratée [Hansen 60]. D'après Brooks, la déstabilisation des couches d'eau adsorbée, suite à une sollicitation externe, serait à l'origine de l'écoulement visqueux [Brooks, 77].

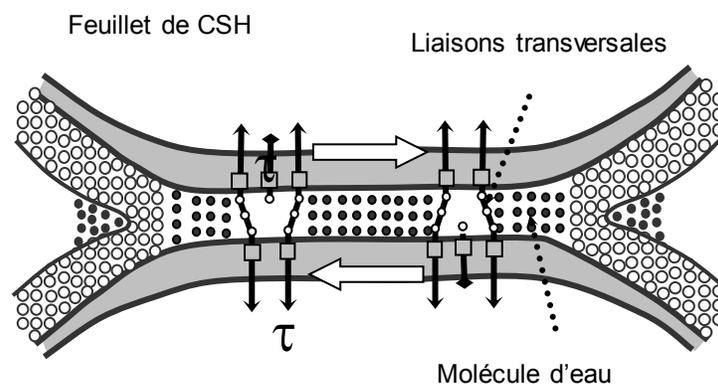


Figure 2-14 : Mécanisme de fluage de type dislocation dans les nano pores [ULM et coll. 98].

2.4.3.2 Paramètres influençant le fluage propre

Malgré sa simple définition, le fluage reste un phénomène complexe. Il est influencé par plusieurs facteurs, dont certains sont liés intrinsèquement aux propriétés du béton, les autres sont liés aux conditions externes :

- *Matériau* (granulats, E/C, type de ciment, les adjuvants.)
- *la géométrie de la structure*
- *Chargement* (le taux de chargement, vitesse de chargement)
- *Milieu extérieur* (température, humidité relative, conditions aux limites.)
- *Temps* (début / durée d'application de la contrainte, maturité)

Suite à cette complexité du fluage et à la dépendance des paramètres qui le pilotent, la majorité des études dans ce domaine se restreignent à des cas particuliers. Ce secteur de recherche est très vaste. Dans la suite, c'est uniquement l'influence des paramètres jugés les plus pertinents dans le cadre de cette étude qui sera présentée, à savoir le rapport E/C, le niveau de chargement, l'âge du matériau, l'humidité relative interne du matériau et la température.

2.4.3.2.1 Influence du rapport E/C et de l'âge du matériau

Des études expérimentales ont montrées que plus le rapport E/C est faible, plus le fluage est de moindre amplitude (figure 2-15). En effet, les déformations par microdiffusion de même que par l'écoulement visqueux sont d'autant plus importantes que le réseau capillaire présente de plus grandes tailles et présente plus de quantité en eau. Ceci est en parfaite concordance avec l'effet du rapport E/C sur la qualité du réseau capillaire. La même figure montre aussi que la maturité du matériau au moment de l'application de la charge influence la réponse du fluage. Plus la charge est appliquée tôt, plus les déformations de fluage sont importantes.

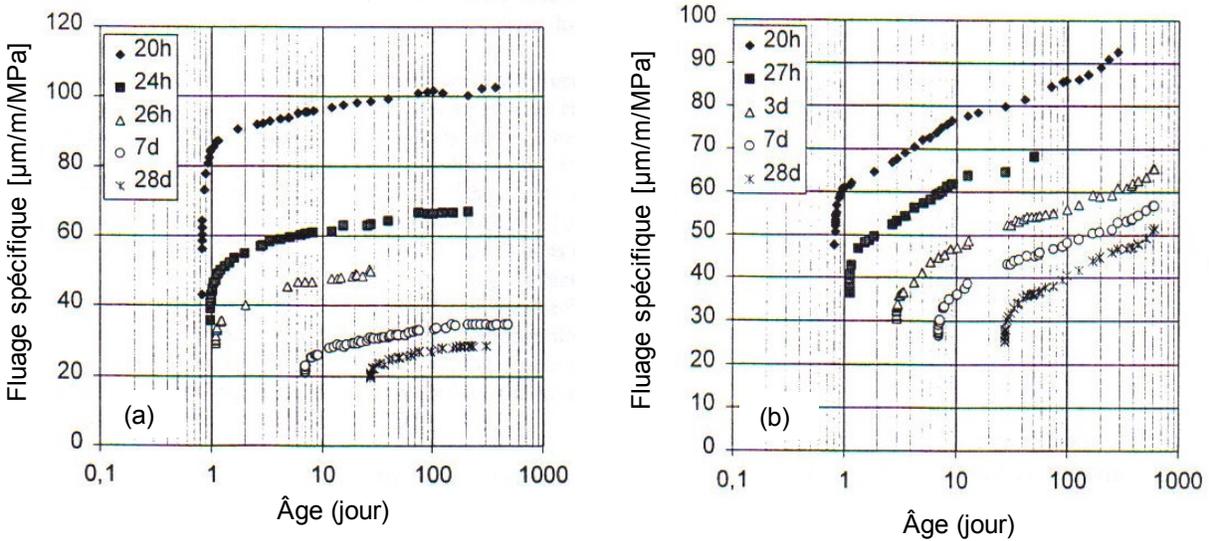


Figure 2-15 : (a) Fluage spécifique d'un béton ordinaire ($E/C = 0.5$) – (b) Fluage spécifique d'un béton à haute performance ($E/C = 0.33$) [Ulm et coll., 98]

2.4.3.2.2 Influence du niveau de chargement

Le niveau de chargement est défini comme le rapport entre la contrainte appliquée et la résistance ultime du matériau au moment de l'application de la charge. En examinant l'influence des contraintes sur le fluage, les expériences ont montré qu'il existe une relation de proportionnalité entre le fluage et le niveau de chargement qui ne dépasse pas habituellement 0.6 pour les bétons et 0.85 pour les mortiers (figure 2-16) [Neville 59]. Ces plages concordent avec les plages élastiques de déformation. En effet, la plage de contrainte-déformation considérée comme élastique est limitée à 0.6 pour les bétons et 0.9 pour les mortiers. Cette linéarité est valide tant pour le fluage propre que pour le fluage de séchage [L'Hermite, 1968]. Le fluage est ainsi inversement proportionnel à la résistance du béton. Plus le béton est de bonne résistance, plus le fluage est moindre.

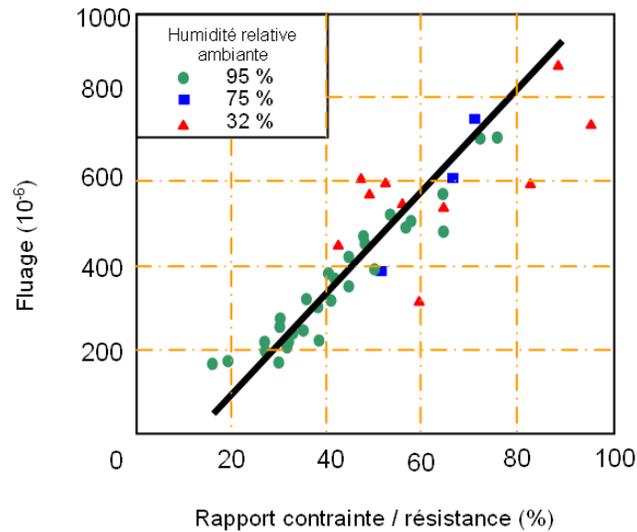


Figure 2-16 : Fluage d'éprouvettes de mortier conservées continuellement à différents degrés d'humidité relative [Neville 59].

2.4.3.2.3 Influence de l'humidité relative (HR)

Le niveau d'humidité relative à l'intérieur du matériau est un paramètre très important qui influence le fluage. Ce paramètre dépend de l'avancement de la réaction d'hydratation et des caractéristiques du réseau poreux. Dans des conditions de conservations hygrométriques, les matériaux cimentaires subissent un processus d'autodessiccation depuis le jeune âge. Ainsi, au fur et à mesure que la réaction d'hydratation évolue l'humidité relative interne diminue. La quantité d'eau évaporable sera réduite en conséquence. Dans des conditions d'échange hygrométrique avec le milieu extérieur, le béton se contracte en cas de perte d'humidité et se dilate en cas d'humidification. Si le matériau est exposé à un milieu relativement sec, le séchage progressif de la surface vers l'intérieur du béton, crée un gradient d'humidité non uniforme. Un profil non uniforme d'humidité interne a deux conséquences sur le béton : la création d'un champ de contraintes auto-équilibré du fait que le béton se déforme sous une variation d'humidité et la manifestation d'un retrait (ou d'un gonflement) apparent [Acker et coll. 04].

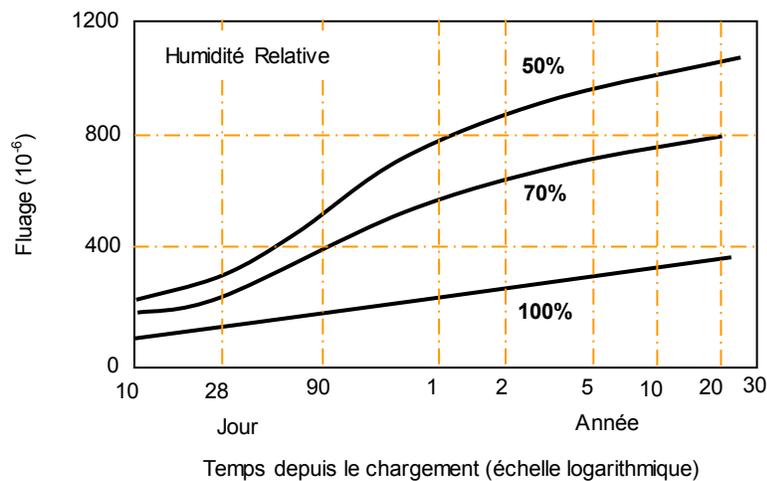


Figure 2-17 : Fluage d'éprouvettes de mortier conservées continuellement à différents degrés d'humidité [basé sur les travaux de Troxell et Coll. 1958]

Le fluage propre est fortement lié à la quantité d'eau évaporable au sein de la matrice cimentaire. Mullen (1964) a montré qu'un matériau dont toute l'eau évaporable a été retirée préalablement ne produit pratiquement aucun fluage. La figure 2-17 montre qu'un béton saturé (conservé à 100% d'humidité relative) présente une plus faible déformation de fluage comparativement à la déformation d'un béton conservé à 50% d'humidité relative. L'amplitude des déformations de fluage de ce dernier est 2 à 3 fois plus importante que celles mesurées dans des conditions de saturation.

2.4.3.2.4 Influence de la température

D'après Acker (2004), la température extérieure (ambiante ou imposée) semble affecter à la fois du processus d'hydratation et les propriétés structurales du matériau. Toutefois, la température est généralement moins influente que l'humidité relative. De plus, c'est la température interne du matériau qui affecte plus le fluage. Le dégagement de chaleur générée par la réaction d'hydratation au sein des bétons de masse peut perdurer assez longtemps en raison de la diffusion très lente de la chaleur; En cas d'éléments structuraux mince, la sensibilité aux variations de la température environnantes est plus importante [Bissonnette, 96].

Les travaux de Nasser (1965) et Maréchal (1969) (figure 2-18 et 2-19) montrent que la température d'exposition a une influence directe sur les mesures des déformations de fluage. En bas de 70 °C, plus la température est importante, plus le fluage est important. De même, au-delà 105 °C, température d'évaporation de l'eau interstitielle non liée chimiquement, le même effet a été observé. Entre 70 °C et 105 °C, l'eau interstitielle non liée chimiquement est toujours présente dans la matrice cimentaire. La réduction de l'amplitude de fluage à l'intérieur de cette plage de température si cette dernière augmente met en question le rôle de cette eau interstitielle. D'ailleurs, si l'éprouvette a été asséchée à 105 °C dès le début, une augmentation de la température aura comme effet d'amplifier d'avantage les déformations de fluage.

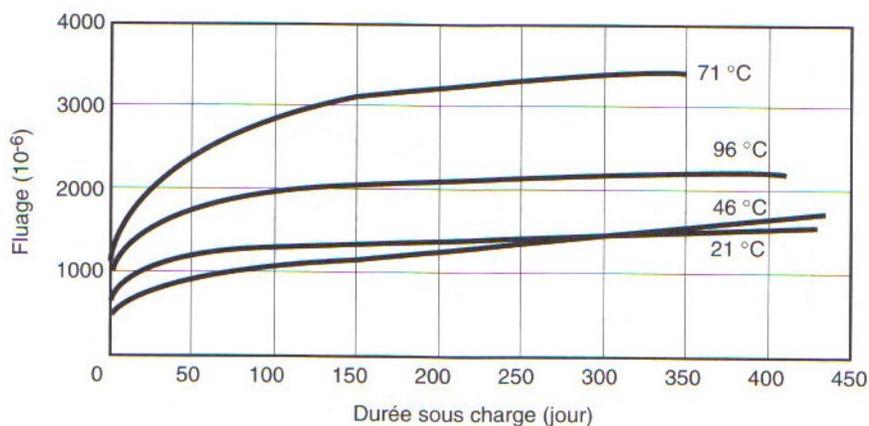


Figure 2-18 : Relation entre le fluage et la durée du chargement pour des bétons conservés à différentes températures (rapport contrainte/résistance de 0.7) [Nasser et Coll. 65].

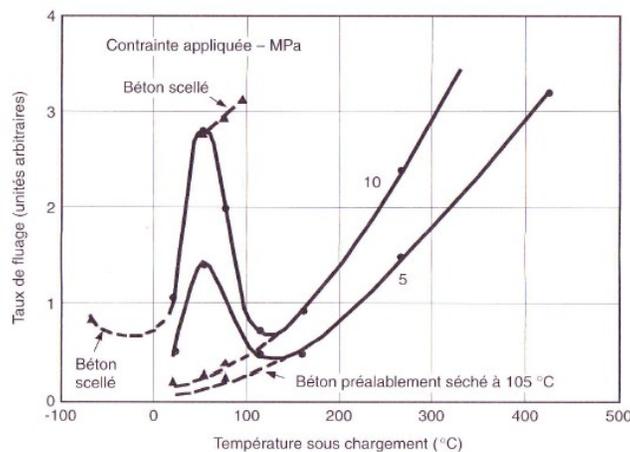


Figure 2-19 : Influence de la température sur le fluage d'un béton relativement au fluage à 20 °C [basé sur les travaux de Maréchal 69].

2.4.3.3 Généralités sur la modélisation du fluage

La prise en compte du fluage au jeune âge est importante en vue d'une prédiction quantitative des contraintes générées dans les structures et de la microfissuration pouvant être induite en conséquence [Acker, 04], d'où l'importance de modéliser et de prédire cet aspect viscoélastique. Puisque les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et thermiques des matériaux cimentaires dépendent de l'évolution de l'hydratation, les propriétés viscoélastiques en dépendent en conséquence. Cette dépendance avec le degré d'hydratation rend la modélisation de ce phénomène plus complexe.

La question de la modélisation macroscopique du fluage a été largement développée. Différentes approches ont été adoptées tel que la théorie de viscoélasticité linéaire et la théorie de solidification. L'approche la plus connue est celle de la théorie de la viscoélasticité linéaire. Cette approche attribue à un matériau viscoélastique à la fois les propriétés d'un solide élastique et d'un fluide visqueux. Cela traduit une combinaison entre **la loi de Hooke** (solide élastique) et **la loi de Newton** (fluide visqueux) (figure 2-20). La principale variable est le facteur temps. Le comportement d'un solide viscoélastique est ainsi généré par une équation de la forme :

$$\sigma = F[\varepsilon, t] \quad (\text{Eq. 2.1})$$

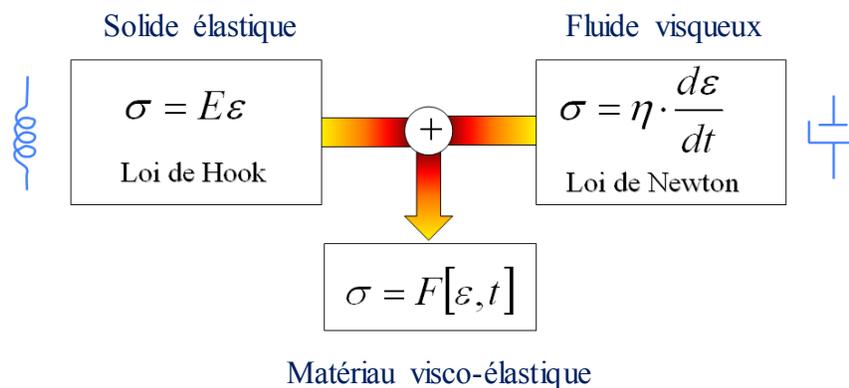


Figure 2-20 : Schématisation d'un matériau viscoélastique, d'un matériau élastique et d'un matériau visqueux.

Bien que les déformations de fluage soient difficiles à prédire avec précision, de nombreux travaux de recherche ont permis de montrer que la théorie de la viscoélasticité linéaire en a fourni une approximation satisfaisante pour des amplitudes de contraintes correspondant à ceux des ouvrages en service [Witasse, 00].

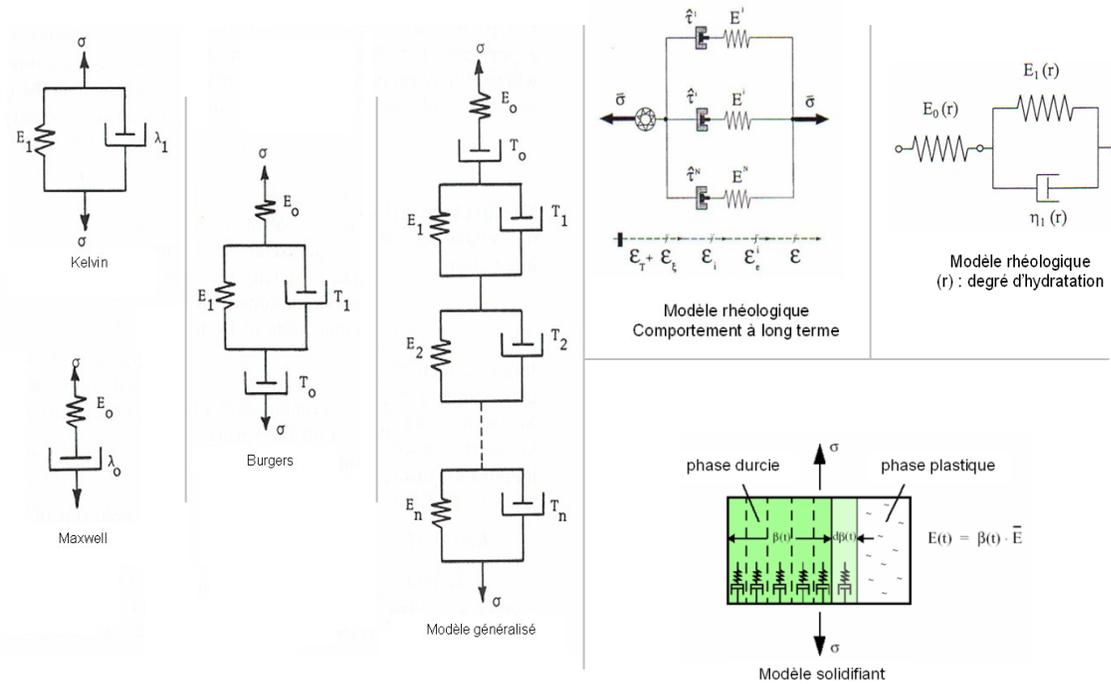


Figure 2-21 : Exemples de modèles rhéologiques simulant le fluage.

Cependant, l'expression du fluage en fonction de l'unique composante « temps » demeure contestée. En effet, le comportement différé du béton est piloté par plusieurs facteurs dont l'évolution de la réaction d'hydratation, la température et l'humidité relative. Le paramètre « temps » à lui seul ne permet ni de représenter l'effet des autres facteurs ni l'aspect vieillissant de la réaction d'hydratation. D'après Bazant (1989a et 1989b), le comportement viscoélastique demeure un phénomène plus complexe qu'un modèle combiné de ressorts et d'amortisseurs peut prédire. Il a proposé une nouvelle théorie, celle de la solidification, où il suppose que le vieillissement résulte d'un accroissement progressif de constituants élémentaires viscoélastiques non vieillissants (figure 2-21). En d'autres termes, la solidification exprime un accroissement de la rigidité du matériau. Le vieillissement se traduit ainsi par une introduction de nouveaux

ressorts libres. Le cas contraire (où la rigidité décroît), l'effet de détérioration ou d'endommagement se traduit par une élimination de ressorts chargés. L'effet de la solidification est significatif au jeune âge. Toutefois, dans le cas des bétons matures, son effet est négligeable. Dans le cadre de la mécanique des milieux continus, d'autres théories, telles que la théorie de la plasticité et la théorie d'endommagement, ont été développées. Cependant, aucune de ces théories n'est capable de donner une explication complète du phénomène viscoélastique.

2.4.3.4 Fluage en traction

Le fluage demeure un aspect largement étudié en compression. Cependant, il a été peu étudié en traction. Les quelques résultats publiés indiquent en général que le fluage en traction, avec ou sans échange hydrique, est à tout le moins du même ordre de grandeur que le fluage en compression sous une contrainte de même intensité [Bissonnette 96]. Les travaux de Davis (1937) ont montré que le fluage propre spécifique (*) en traction est plus important que le fluage propre spécifique en compression. (figure 2-22).

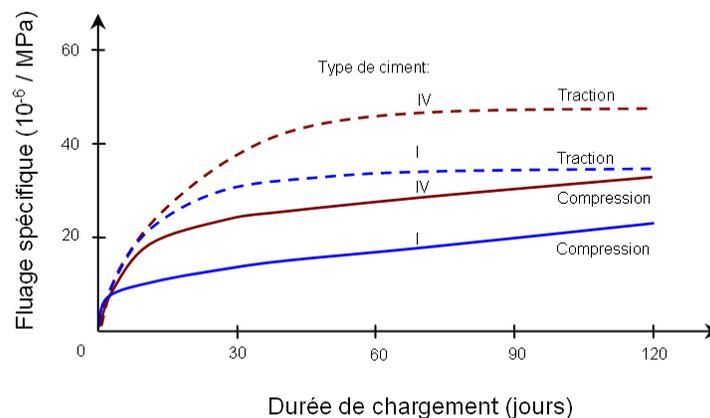


Figure 2-22 : Fluage propre spécifique en traction et en compression pour des bétons fabriqués avec différents liants chargés à 28 jours à une température de 27 °C [Davis et Coll. 1937]

(*) Le fluage spécifique représente le rapport des déformations viscoélastiques à la contrainte appliquée (ϵ/σ).

2.4.3.5 Conséquences du fluage

Le fluage peut s'avérer nuisible ou tout à fait souhaitable selon la configuration de l'élément structural considéré. Ainsi, le fluage doit être réduit dans les structures en béton où il peut générer l'apparition de flèches importantes. Dans le cas des réparations minces, le fluage a un effet bénéfique. Il soulage les contraintes générées par les variations dimensionnelles (d'origine hydrique et thermique) et diminue les risques de fissuration de la réparation [Bissonnette, 96]. En excluant l'effet de la température (qui sera étudié dans la prochaine section), le bilan final des déformations est représenté sur la figure 2-23.

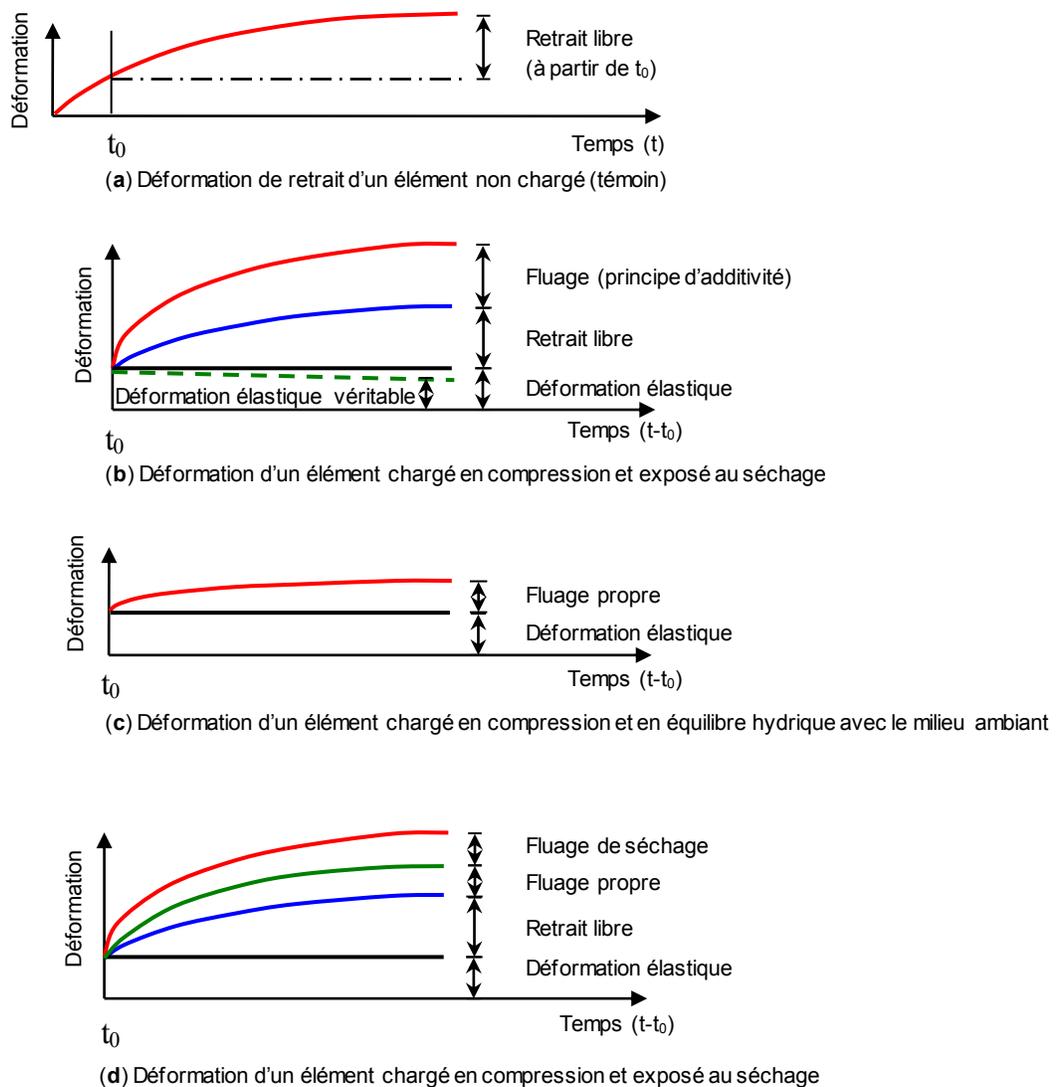


Figure 2-23 : Représentation schématique des déformations dans un élément de béton
[Neville 00]

2.4.4 Les déformations thermiques

Au jeune âge, la réaction d'hydratation est exothermique. Les déformations thermiques (DT) qui résultent de ce dégagement de chaleur se produisent en même temps que les déformations endogènes (DE) et s'expriment proportionnellement au coefficient de dilatation thermique du matériau :

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Où ε_T représente les DT, ΔT la variation de température correspondante et α_T le coefficient de dilatation thermique (CDT). Ce dernier permet de lier analytiquement les déformations thermiques aux variations de la température.

La simultanéité d'occurrence des déformations endogènes et des déformations thermiques met en évidence que ces deux types de déformation sont fortement couplées l'une à l'autre [Bjøntegaard et Coll., 02]. D'un point de vue analytique, la plus simple méthode pour découpler les deux types de déformation consiste à appliquer un historique de température à l'élément de béton, puis à soustraire les déformations thermiques des déformations totales (cas de déformations libres) [éq. 2.3].

$$\varepsilon_{Totale} = \varepsilon_{def_endogenes} + \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Bien que le principe de cette méthode demeure simple, elle nécessitera un grand nombre d'essais en laboratoire. Afin de minimiser le nombre de ces essais, il sera très utile de concevoir un modèle permettant de découpler les déformations endogènes et thermiques. Dans des conditions réelles de variation de température, le principe de découplage de ces deux types de déformation n'est pas facilement réalisable. En effet, d'une part, le coefficient de dilatation thermique varie en cours d'hydratation (voir section 2.4.4.1), d'autre part, quand la température du béton change brusquement, des déformations différées prennent place après que l'équilibre thermique soit établi. Cela résulte essentiellement de la redistribution interne des phases d'eau coexistantes dans les pores [Bjøntegaard et coll., 00]. De plus, les déformations endogènes sont mesurées habituellement dans des conditions isothermes et non pas dans des conditions de variation de la température [Bjøntegaard et coll., 01]. Afin de suivre l'évolution des déformations

thermiques dans des conditions non isothermes, il faut être en mesure de déterminer la part de cette déformation en temps réel tout en tenant en compte l'aspect évolutif du coefficient de dilatation thermique.

2.4.4.1 Le coefficient de dilatation thermique (CDT)

Le coefficient de dilatation thermique (CDT) a été peu étudié au jeune âge. L'accord général sur le CDT est qu'il dépend de l'état d'humidité du système poreux [Bjøntegaard 99, Neville 00] (figure 2-24). Plusieurs chercheurs ont étudié ce paramètre pour des pâtes de ciment et en ont conclu que le matériau poreux entièrement saturé ou entièrement sec est caractérisé par des petites valeurs du CDT de l'ordre de $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Cependant, un système de pore partiellement saturé est caractérisé par des valeurs plus importantes du CDT [Bjøntegaard, 99]. Dans ce cas, la valeur maximale du CDT peut atteindre $18 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ à $25 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [Altoubat 01].

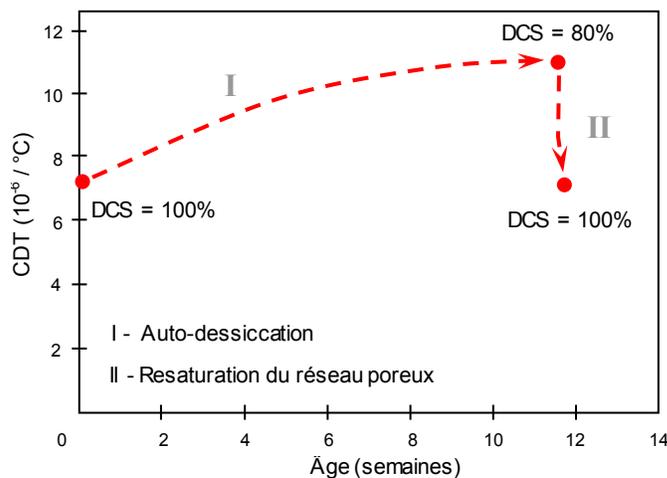


Figure 2-24 : Influence de l'état d'humidité du système poreux mature sur l'évolution du CDT [Bjøntegaard 99]

La valeur élevée du CDT dans le cas des matériaux partiellement saturés est éventuellement due à un effet hygrothermique (redistribution de l'eau interstitielle et changement de la tension capillaire) qui s'ajoute au véritable mouvement thermique [Powers et coll., 1947, Wittmann et Coll., 1974]. Helmuth corrobore cette constatation en admettant que le CDT dépend de la pression de vapeur régnant au sein du réseau poreux [Helmuth, 61].

Un autre facteur très déterminant est celui du type des granulats. Ces derniers constituent 65-75% du volume du béton. Puisque le CDT de différents minéraux peuvent varier sur une large gamme, le CDT des bétons varie selon le type des granulats utilisés dans le mélange [Bjøntegaard, 99] (figure 2-25).

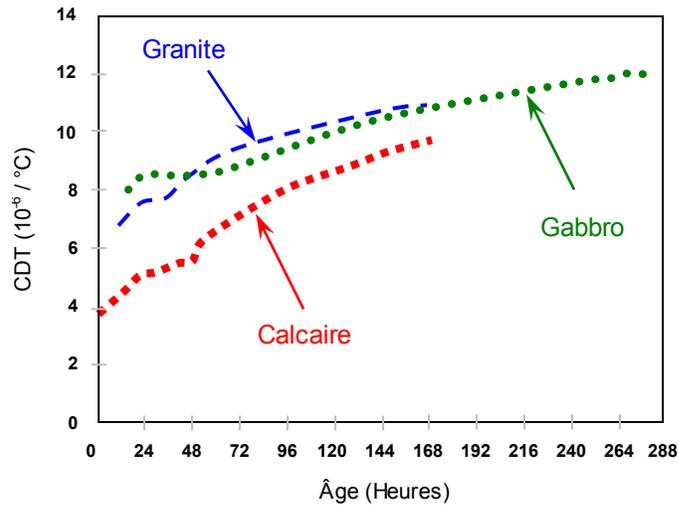


Figure 2-25 : Influence du type des granulats sur l'évolution du CDT [Bjøntegaard, 99]

L'observation générale est que le CDT dépend de la maturité du béton et commence à une valeur très élevée ($\sim 21 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) puis baisse de manière significative en cours de prise (jusqu'à 12-14 heures) (figure 2-26). Cette diminution est suivie d'une augmentation en cours de durcissement [Laplante et coll. 94, Bjøntegaard 99].

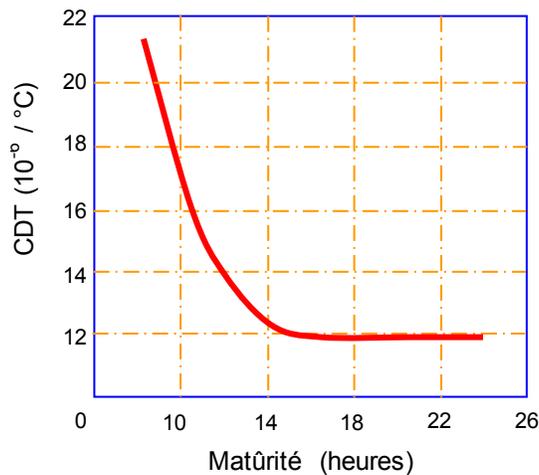


Figure 2-26 : Evolution du CDT en cours de prise- cas des bétons ordinaires au jeune âge [Laplante et coll. 94]

Ce comportement, à l'état frais, a été attribué à l'influence prépondérante de l'eau ayant un CDT plus élevé que ceux des solides. Quand le squelette est structuré, l'influence de la phase liquide sur le CDT est réduite. Le CDT n'est pas constant parce qu'il dépend entre autres de la pression de vapeur relative de l'eau contenue dans le réseau capillaire [Helmuth, 61].

2.4.4.2 Découplage des DE et des DT

Dans des conditions de variation de température rencontrées en pratique, seules les déformations totales peuvent être déterminées directement. Même si ce n'est pas simple, il est nécessaire de séparer de manière rigoureuse les deux composantes de déformation. Ce découplage peut être effectué soit expérimentalement en mesurant le CDT puis en en déduire les déformations thermiques soit par modélisation en considérant le concept de maturité.

2.4.4.2.1 Le concept de maturité

Le concept de maturité a été défini initialement par Saul comme suit : « *des mélanges de béton similaires ayant le même niveau de maturité ont approximativement la même résistance peu importe la combinaison du temps et de la température pour produire cette maturité* » [Saul 51]. Ce concept est basé sur l'hypothèse suivante : la température influence la cinétique de développement des DE et non pas l'amplitude [Bjøntegaard et coll. 00]. Il repose sur la loi d'Arrhenius (loi générale de cinétique des réactions chimiques, Eq. 2.4), exprimée de la façon suivante :

$$K = A \left(\exp \frac{-E_a}{RT} \right) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Où

K : constante de vitesse pour chaque état d'avancement

A : constante [1/s]

E_a : énergie d'activation [J/mol]

R : constante des gaz parfaits [J/mol.K]

T : température absolue [°K]

La loi d'Arrhenius est essentiellement basée sur des observations expérimentales et permet de décrire d'une façon simple la cinétique d'une réaction chimique. Il a été trouvé qu'elle permet de prédire le développement des propriétés des matériaux cimentaire suite à l'évolution de la réaction l'hydratation à différentes températures. Toutefois, l'application de cette loi demeure approximative uniquement puisque la réaction d'hydratation implique simultanément et inter dépendamment plusieurs réactions chimiques; l'énergie d'activation est ainsi mesurée d'une façon « apparente » [D'Aloia, 03]. Plus cette énergie d'activation apparente est importante, plus le matériau est sensible aux variations thermiques. La formulation mathématique de la loi d'Arrhenius est comme suit :

$$M(t, H(T)) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$M(t, H(T))$: maturité à l'âge t pour un historique de température $H(T)$,

$H(T)$: historique de température: $T(\tau)$, $\tau \in [0, t]$,

$K(T)$: constante de vitesse,

$T(t)$: température, K.

Le concept du temps équivalent a été introduit ultérieurement et a été défini comme suit : « *le temps équivalent représente l'âge de mûrissement à une température de référence qui permet d'avoir la même résistance que celle obtenue à une autre température* ». Généralement, la température de référence est de 20 °C. Le concept de maturité ainsi que le concept du temps équivalent sont reliés au moyen de la relation suivante :

$$M(t, H(T)) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau = \int_0^{t_{eq}} K(T_{ref}) d\tau = M(t_{eq}, T_{ref}) = K(T_{ref}) t_{eq} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

t_{eq} : âge équivalent à la température de référence T_{ref} , généralement égale à 20 °C (293K).

$$\text{D'où : } t_{eq} = \int_0^t \frac{K(T(\tau))}{K(T_{ref})} d\tau \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Le temps équivalent peut être exprimé aussi en fonction de l'énergie d'activation en combinant les équations 2.4 et 2.7 :

$$t_{eq} = \int_0^t \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) d\tau \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Au moyen de ce principe, une simple transformation du temps, en temps équivalent à 20 °C, suffit pour prédire les DE à différentes températures isothermes. Connaissant ces DE, la part des DT sera déduite des déformations totales. Toutefois, cette approche demeure un moyen simple pour découpler les DE des DT. Elle n'est pas rigoureusement exacte puisque l'évolution des DE est aussi fonction de la température [Bjøntegaard et coll.00]. De plus, la réaction d'hydratation, l'état d'humidité relative interne et la pression capillaire au sein de la matrice cimentaire dépendent fortement de l'amplitude et de l'historique de la température environnante. Ainsi, un simple changement de repère temps sous une autre température de référence ne produira pas les mêmes degrés d'hydratation ayant les mêmes distributions d'humidité relative, ni les mêmes distributions des pressions capillaires.

2.4.4.2.2 CDT constant

Une deuxième méthode de découplage des déformations endogènes de celles thermiques suppose que le CDT est constant durant tout le processus d'hydratation [Nagy 97]. Ceci permet d'évaluer en premier lieu les DT et par la suite en déduire les DE. Dans le cas des bétons mûrs, cette méthodologie demeure fiable. Toutefois, au jeune âge (objet de cette étude) elle ne peut donner des résultats réalistes puisque le CDT n'est pas constant, mais dépend de la pression de vapeur relative de l'eau contenue dans le réseau capillaire. Bien que les résultats ne puissent être satisfaisants, cette approche semble être plus robuste que la première méthode [Bjøntegaard et al. 00].

2.4.4.2.3 CDT évolutif

Une approche expérimentale tenant compte de l'évolution du CDT a été proposée par Sellevold et son équipe de NTNU afin de découpler les DE des DT [Bjøntegaard, 99]. Le principe consiste à imposer des cycles de température durant des petits incréments de temps, en supposant que le CDT demeure constant durant cette période. Cette méthode est influencée fortement par le pas de discrétisation de la température. Sellevold et coll. supposent que le cycle de température est appliqué assez rapidement pour admettre que le CDT demeure constant durant le cycle de température appliqué.

La figure 2-27 illustre un exemple de ce principe appliqué à deux historiques de température; un premier reproduisant l'évolution de la température en conditions semi-adiabatiques (profil (1)) et un second à température moyenne constante (profil (2)). Les résultats d'une telle procédure montrent que le CDT semble décroître rapidement au très jeune âge puis retrouver une forme croissante pour converger à long terme vers une asymptote tel qu'observé lors d'un essai en dents de scie ayant comme température de référence 20 °C (figure 2-28).

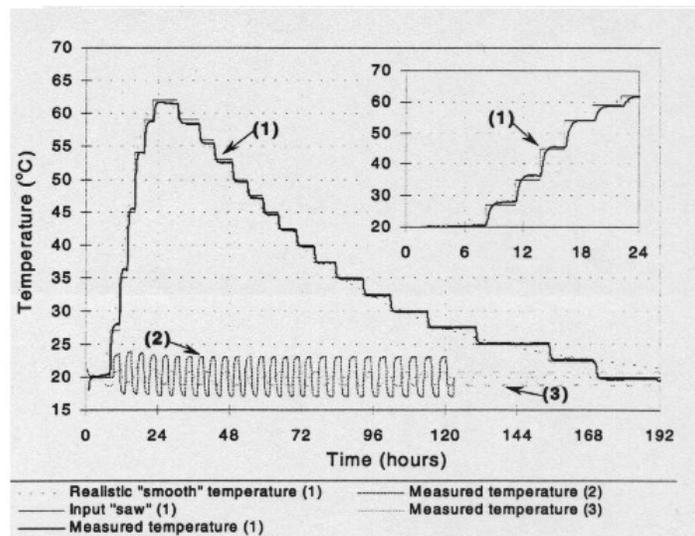


Figure 2-27 : Contrôle de la température par le montage pendant des tests « à dents de scies » [Bjontegaard 99]

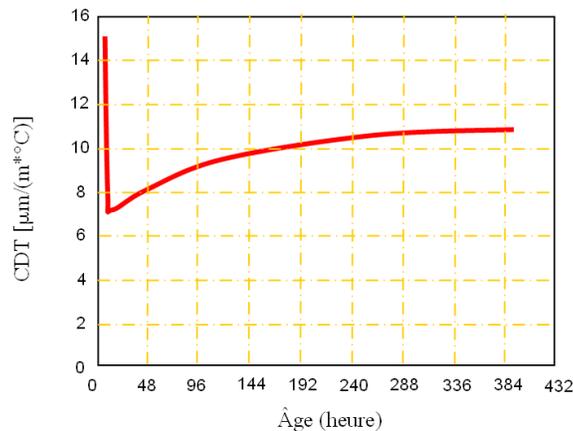


Figure 2-28 : CDT calculé durant un essai à dents de scie en conditions isotherme (20 °C) [Bjontegaard 99]

2.5 Conclusion

Dès la mise en contact du ciment avec de l'eau, la réaction d'hydratation est amorcée. Des hydrates commencent à se former et le mélange commence ainsi à développer de nouvelles propriétés que, ni le ciment seul, ni les granulats seuls, ni l'eau seul n'en possèdent. Le processus d'hydratation, qui conduit au développement des propriétés mécaniques, s'accompagne de divers phénomènes, tel que la contraction Le Chatelier, le retrait endogène et les déformations thermiques. Tous ces aspects conditionnent le comportement du matériau dans les structures qui sont souvent restreints en déformation et par conséquent soumises à des risques de fissuration.

Le souci d'obtenir à la fois une meilleure durabilité et une bonne résistance mécanique des matériaux cimentaires a incité les chercheurs à focaliser leurs études sur le comportement au jeune âge (depuis les premières heures d'hydratation). La compréhension des différents mécanismes interagissant pendant cette période très critique semble être le premier pas vers la garantie d'un matériau cimentaire de meilleure qualité. L'aspect évolutif des propriétés chimiques, mécaniques et physiques des matériaux cimentaires incite de plus les chercheurs à s'orienter vers l'axe de la modélisation renforçant la nécessité de développer une meilleure compréhension des mécanismes en jeu.

La présente recherche s'intéresse à l'étude du comportement de quelques bétons au cours de la première semaine d'hydratation. Les propriétés mécaniques, déformationnelles, viscoélastiques et thermiques seront examinées davantage au moyen d'un montage R^2D^2 conçu spécialement à cet effet.

Chapitre 3

Les essais de retrait restreint, *historique*

3.1 Introduction

Il n'existe pas véritablement d'essais adaptés spécifiquement à la caractérisation des propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction et en flexion ; module élastique ; fluage et relaxation) et thermiques (coefficient de dilatation thermique) au cours des premières 18 à 24 heures suivant le contact eau-ciment. C'est uniquement après que le démoulage du matériau que ces informations peuvent être obtenues au moyen de divers essais conventionnels. Une telle lacune a incité les chercheurs à développer d'autres techniques expérimentales permettant à la fois le suivi du comportement des bétons depuis le très jeune âge et la simulation des restrictions en déformations que les éléments structuraux subissent dans la réalité. C'est uniquement depuis la fin des années 80 que les chercheurs ont commencé à explorer le comportement des bétons au très jeune âge.

Les essais en déformation restreinte développés pour l'étude du béton au jeune âge peuvent être classifiés en deux familles : les essais à restriction passive et les essais à restriction active. Dans la première, on compte les essais de type banc de fissuration (Cracking frame), les essais sur prismes renforcés d'une barre d'armature instrumentée et les essais de retrait restreint annulaires. La seconde, inspirée du Cracking frame, comprend diverses variantes d'un essai de retrait restreint discrétisé. Puisque les essais à restriction passive ne permettent pas de contrôler de quelque façon que ce soit l'intensité de la contrainte, il n'est pas possible avec les seuls résultats qu'on en retire de distinguer la déformation élastique de la composante fluage. Dans la suite, c'est uniquement les essais à restriction active qui seront décrits.

3.2 Principe des essais à restriction active

La procédure expérimentale de la majorité des essais à restriction active est basée sur un même principe : dès le contact eau/ciment, le béton frais est placé à l'horizontal dans deux moules longilignes ayant des sections prismatiques de tailles constantes et des extrémités élargies pour permettre l'amarrage dans des mors rigides. Les moules ont été conçus de façon à ce que le frottement entre le béton et les parois soit minimisé et que la restriction soit générée exclusivement aux extrémités élargies (mors). La friction contre les parois, dans la partie centrale des éprouvettes, est généralement considérée négligeable.

Le premier moule, ayant une forme de « I », permet de restreindre l'éprouvette en déformation. Le premier mors est fixé au bâti du montage alors que le deuxième, mobile, permet d'assurer l'asservissement de l'éprouvette en déformation. Quand la déformation de l'éprouvette atteint une valeur prédéterminée (seuil de déformation prédéfini par l'utilisateur, généralement entre $\pm 1 \mu\text{m/m}$ et $\pm 5 \mu\text{m/m}$), une force est appliquée pour reconduire l'extrémité mobile de l'éprouvette à sa position initiale. La charge atteinte est ensuite maintenue tout au long du cycle subséquent jusqu'à ce que la déformation du matériau atteigne à nouveau la valeur seuil de déformation. À ce moment, un nouveau cycle recommence. Le principe d'asservissement est illustré à la figure 3-1. Puisque la charge augmente par palier, ce type d'essais est également appelé essai de retrait restreint discrétisé (RRD) [Acker et coll. 04].

L'enregistrement des déformations du deuxième moule, libre en déformation, fournit les déformations endogènes libres du matériau. Ces déformations libres ainsi que les déformations restreintes et les variations des contraintes sont enregistrées. L'analyse de ces résultats permet d'évaluer l'évolution de la rigidité du matériau testé ainsi que l'évolution de son comportement viscoélastique [Pigeon et coll. 00]. Certains des montages expérimentaux mis au point sont de plus munis de dispositifs de contrôle de la température [Bjøntegaard 01] et [Charron 02]. Ceci permet alors d'étudier la nature du couplage entre les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux cimentaires.

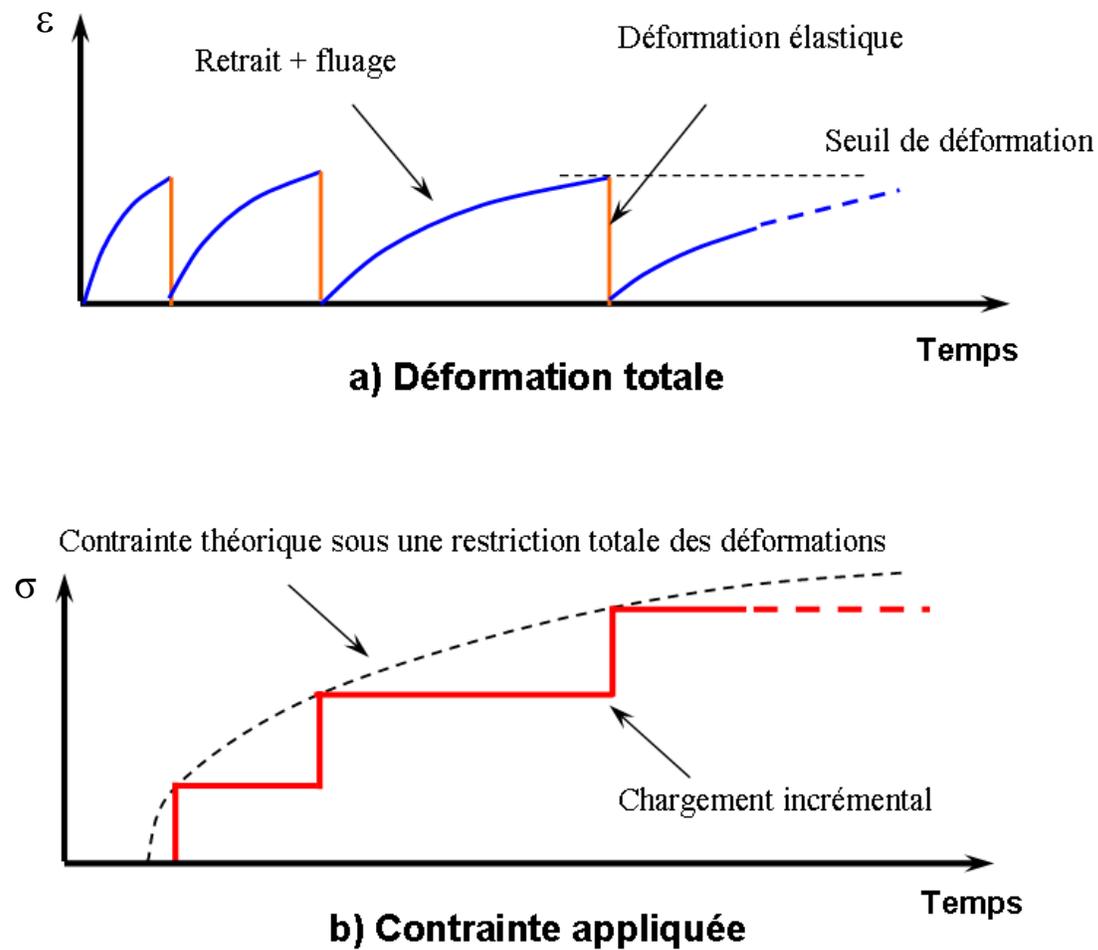


Figure 3-1 : Schéma opérationnel de l'essai de retrait restreint discrétisé [Acker et coll. 04]

Dans la suite, les principaux montages développés ces dernières années pour étudier le comportement du béton au jeune âge (dans des conditions de restriction des déformations) sont décrits. Le dispositif R²D² fera l'objet du chapitre 4.

3.3 Les principaux montages expérimentaux à restriction active

Depuis les années 80, les chercheurs ont investis pour développer des outils permettant la suivie du comportement des matériaux cimentaires au très jeune âge. Dans cette section, un bilan sommaire des premiers outils expérimentaux à restriction active sera dressé.

3.3.1 Montage expérimental utilisé par Paillère et coll. (1989)

Paillère et coll. (1989) ont été parmi les premiers à concevoir un montage expérimental permettant l'étude du comportement du béton au jeune âge dans des conditions de déformations restreintes. Il a été implanté au Laboratoire central des ponts et chaussées à Paris (LCPC). Cet essai s'appelait : « Essai d'auto-fissuration » (Self-cracking test). Le béton est placé dans deux moules en position horizontale. La section médiane des moules mesure 85mm x 120mm. L'appareil permet la réalisation d'essais en conditions de scellement ou de séchage. L'essai est réalisé à température ambiante (figure 3-2).

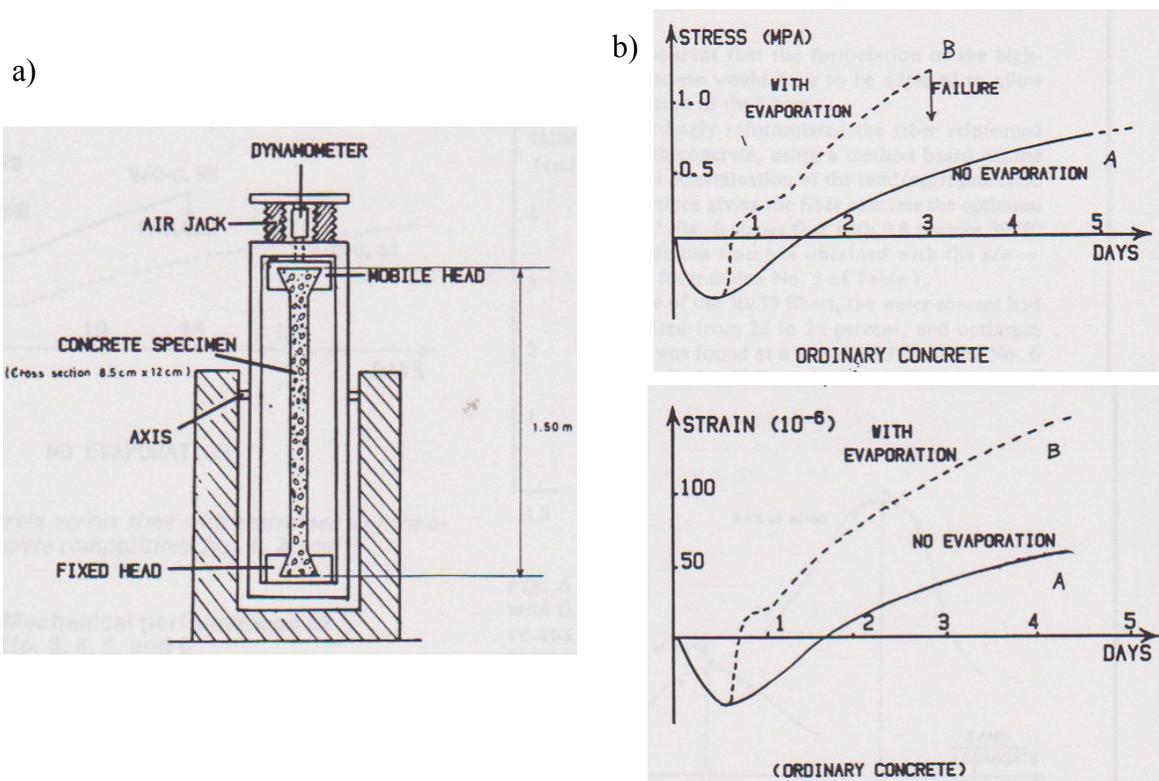


Figure 3-2 : a) Appareil « Essai d'auto-fissuration », b) Exemple de résultats [Paillère et coll. 89]

Dès la prise, une des deux éprouvettes est montée verticalement dans une presse. Les déformations sont ainsi enregistrées au fur et à mesure durant toute la période de l'essai à déformations discrétisées. La deuxième éprouvette (témoin) est instrumentée afin d'assurer la suivie des déformations endogène libres. Vers la fin, un essai de traction directe est appliqué à l'éprouvette. La rupture a été souvent localisée à la partie supérieure de l'éprouvette. Notons que le démarrage ne peut être réalisé qu'après développement d'une certaine rigidité. Ceci représente un handicap puisqu'une grande partie de l'information sur le comportement du béton au très jeune âge ne peut pas être mesurée.

3.3.2 Montage expérimental utilisé par Bloom et coll. (1995)

En se basant sur le même principe que Paillère (1989), Bloom et Bentur (1995) ont développé une version améliorée du montage d'« auto-fissuration ». Les deux éprouvettes, ayant des sections médianes de 40 mm x 40 mm, sont placées horizontalement (figure 3-3).

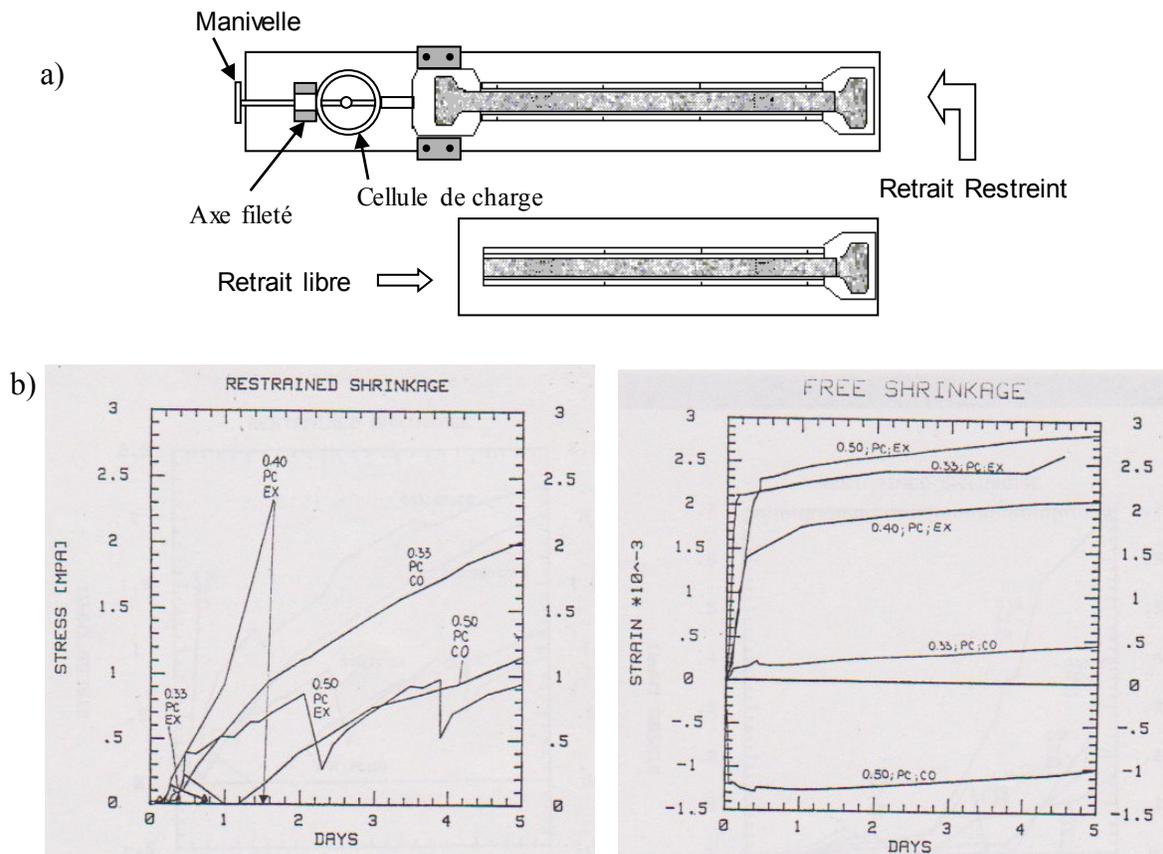


Figure 3-3 : a) Montage expérimental, b) Exemple de résultats [Bloom et Coll., 1995]

L'appareil peut être utilisé dans différentes conditions hygrométriques. L'essai est réalisé à température ambiante. La valeur seuil des déformations était de $2 \mu\text{m}$. La capacité de chargement maximale du système était de l'ordre de 5 kN , ce qui correspond à une contrainte de 3 MPa . Le contrôle de l'essai s'effectue manuellement au moyen d'une manivelle. Cela constitue une limitation considérable sur le contrôle et le déroulement des essais. Ce concept a été repris et amélioré ultérieurement par Kovler (1994).

3.3.3 Montage d'essai utilisé par Kovler (1994)

Tout en considérant les mêmes dimensions géométriques des éprouvettes en position horizontale que celles utilisées par Bloom et coll. (1995), Kovler a amélioré le système proposé en éliminant la manipulation manuelle par l'introduction d'un moteur asservi. Les deux moules (restreint et libre) présentent des géométries identiques (figure 3-4).

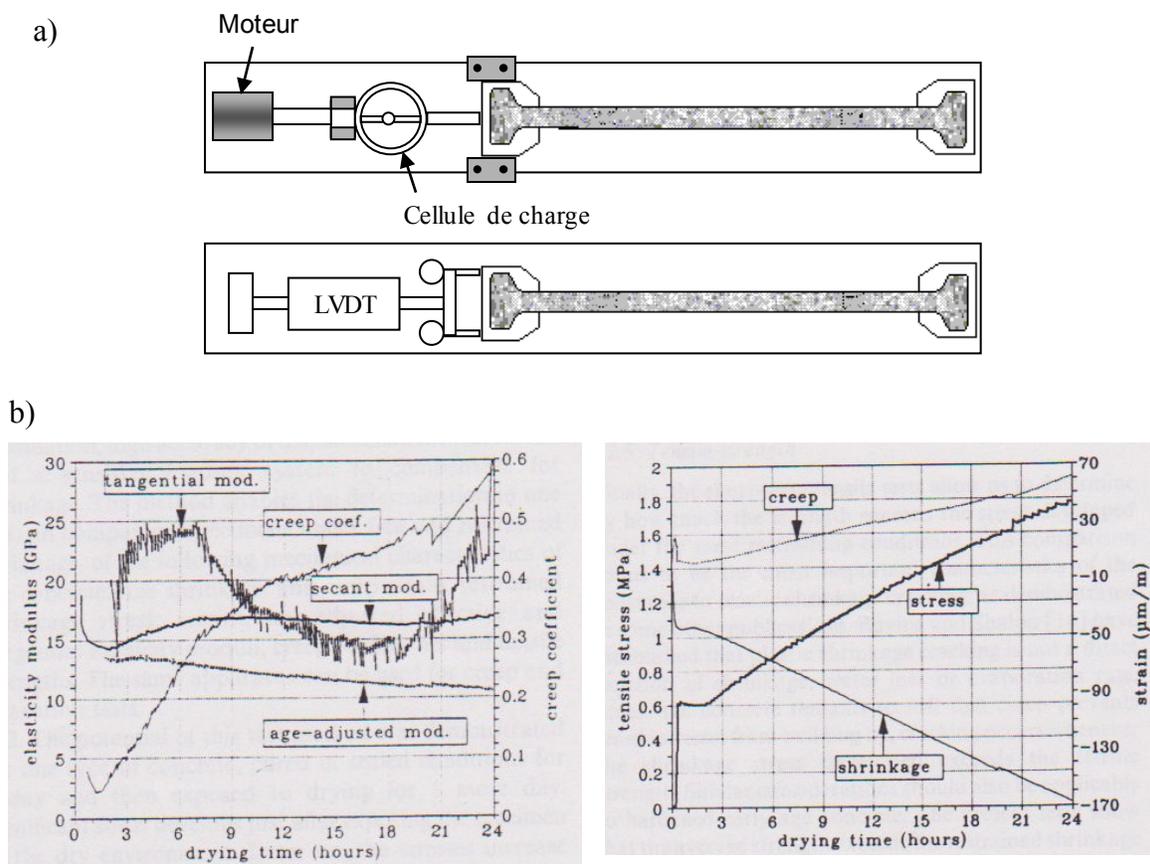


Figure 3-4 : a) Montage expérimental, b) Exemple de résultats obtenu par Kovler (1994)

La valeur seuil des déformations a été choisie égale à $5 \mu\text{m}$. L'essai est réalisé à température ambiante et en conditions de séchage symétriques (deux côtés). Vers la fin de l'essai, les deux éprouvettes sont conduites à la rupture en traction directe. Ceci a permis de mettre en évidence l'influence de l'historique des contraintes appliquées sur la résistance en traction du béton. La restriction des déformations n'est appliquée qu'après un jour de séchage [Kovler 94]. Cette longue période d'attente avant la mise en opération de la restriction des déformations constitue une faiblesse de cet essai. En effet, l'utilisation de ce genre de montage devrait permettre l'étude du comportement des bétons depuis le contact eau/ciment, ce qui n'était pas le cas dans la procédure adoptée par Kovler.

3.3.4 Montage expérimental utilisé par Altoubat (2001)

Les travaux d'Altoubat étaient focalisés particulièrement sur l'étude des déformations de retrait restreint des bétons de fibres en conditions de séchage. La section médiane des éprouvettes mesure $76 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$. Le seuil limite de restriction des déformations par palier est de $5 \mu\text{m}$. Les éprouvettes de béton sont mûries dans une chambre humide durant 18 heures, après quoi, une des deux éprouvettes est installée sur une machine d'essai universelle alors que l'autre est destinée à mesurer les déformations libres (figure 3-5).

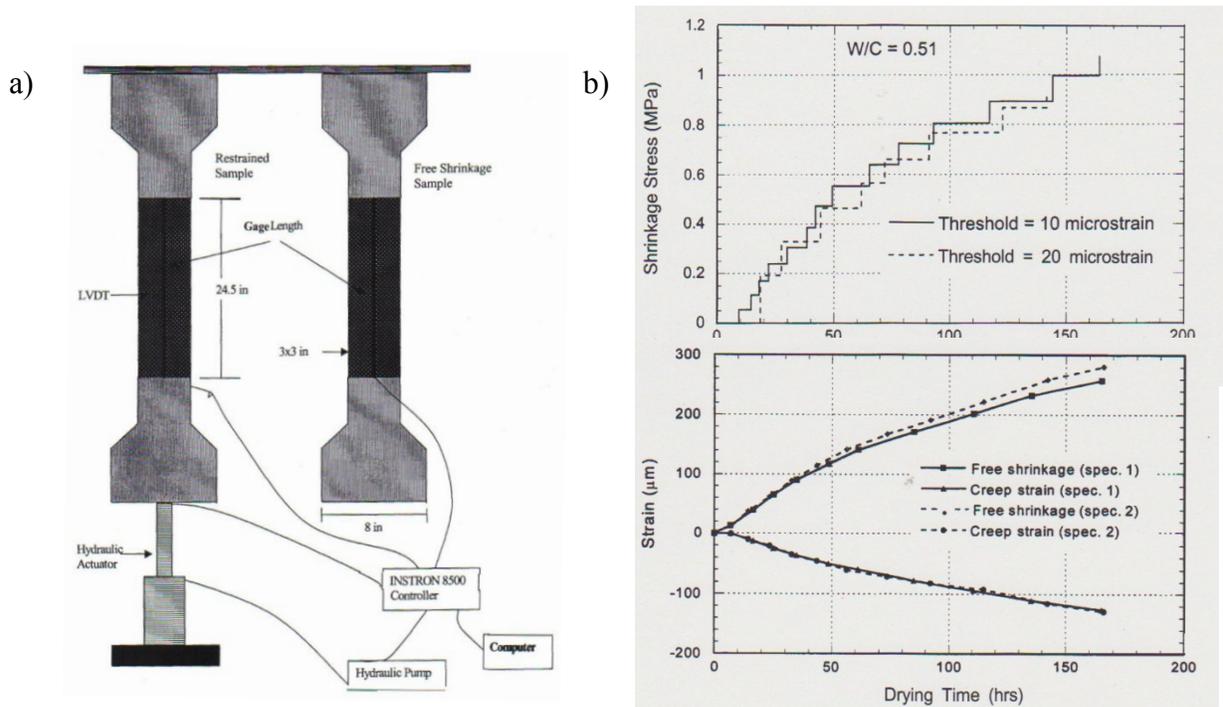


Figure 3-5 : a) Montage expérimental utilisé par, b) Exemple de résultats [Altoubat, 2001]

L'éprouvette restreinte en déformation est maintenue en position verticale dans des conditions de séchage. Cette longue durée de mûrissement avant le commencement de l'essai représente une limitation au niveau de l'étude du comportement du béton dès les premières heures après son gâchage.

3.3.5 Montage d'essai utilisé par Bjøntegaard (1999)

Les travaux de Bjøntegaard ont été dédiés plus spécifiquement à l'étude de l'influence de la température sur le comportement des bétons au jeune âge. De ce fait, son montage est conçu spécifiquement pour cette fin. Les parois des moules sont équipées de canalisations métalliques assurant la circulation de l'eau contrôlée en température au moyen d'un bain thermostaté. L'acquisition des résultats commençait dès la prise et les essais sont réalisés sans échange d'humidité. L'éprouvette désignée pour la mesure des déformations libres est de forme prismatique (parallélépipède). La section des éprouvettes mesure 100 mm x 100 mm (figure 3-6). Le critère de démarrage correspond au moment où une déformation de $0,4 \cdot 10^{-6}$ a été enregistrée par le système.

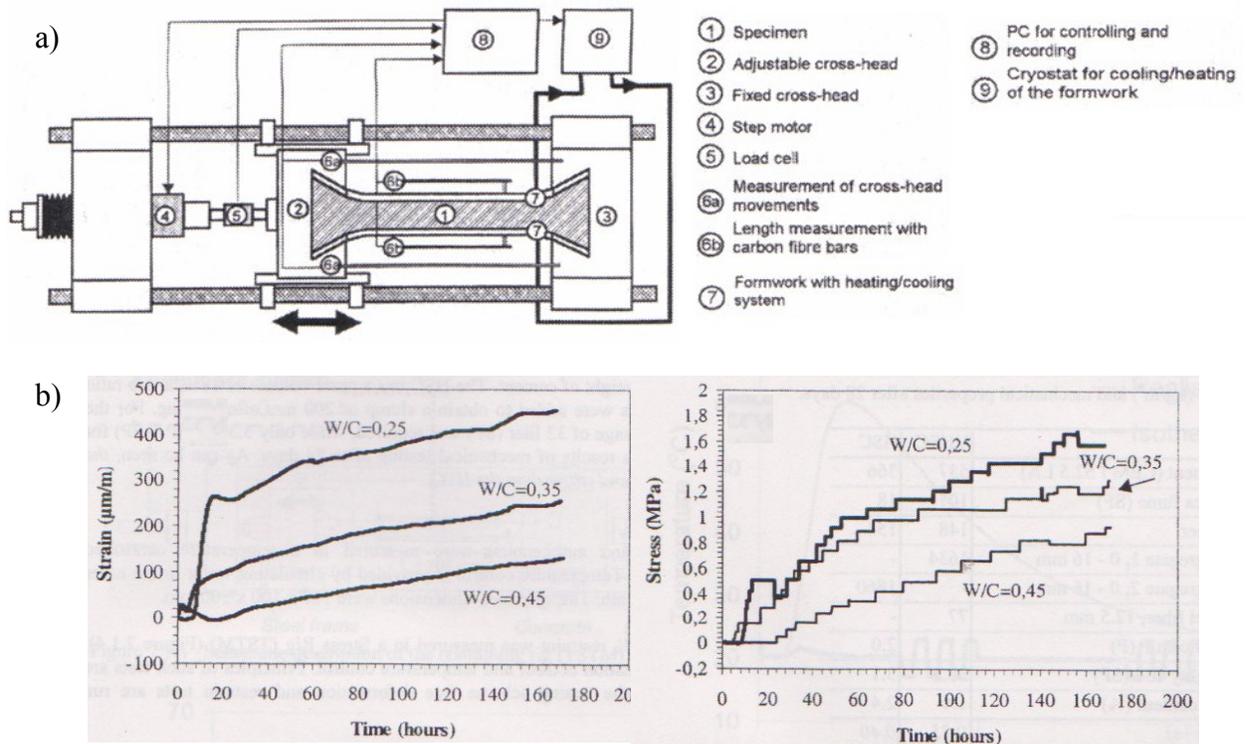


Figure 3-6 : a) Montage d'essai, b) Exemple de résultats [Bjøntegaard, 2001]

Cette technique expérimentale de contrôle en température depuis le très jeune âge constituait une première dans le cadre de l'étude du comportement thermique des bétons au jeune âge. Les profils de température appliqués sont programmés au moyen d'un ordinateur qui contrôle la température du bain thermostaté. Les résultats obtenus par Bjøntegaard s'avèrent très intéressants. Toutefois, cette approche présente la faiblesse de ne pas tenir compte de l'aspect exothermique de l'élément testé. En effet, la température est imposée en surface de l'éprouvette présentant une section non négligeable. La figure 3-7 montre que durant un essai isotherme à 20 °C, la température à travers la section n'a pu atteindre cette consigne qu'après seize heures.

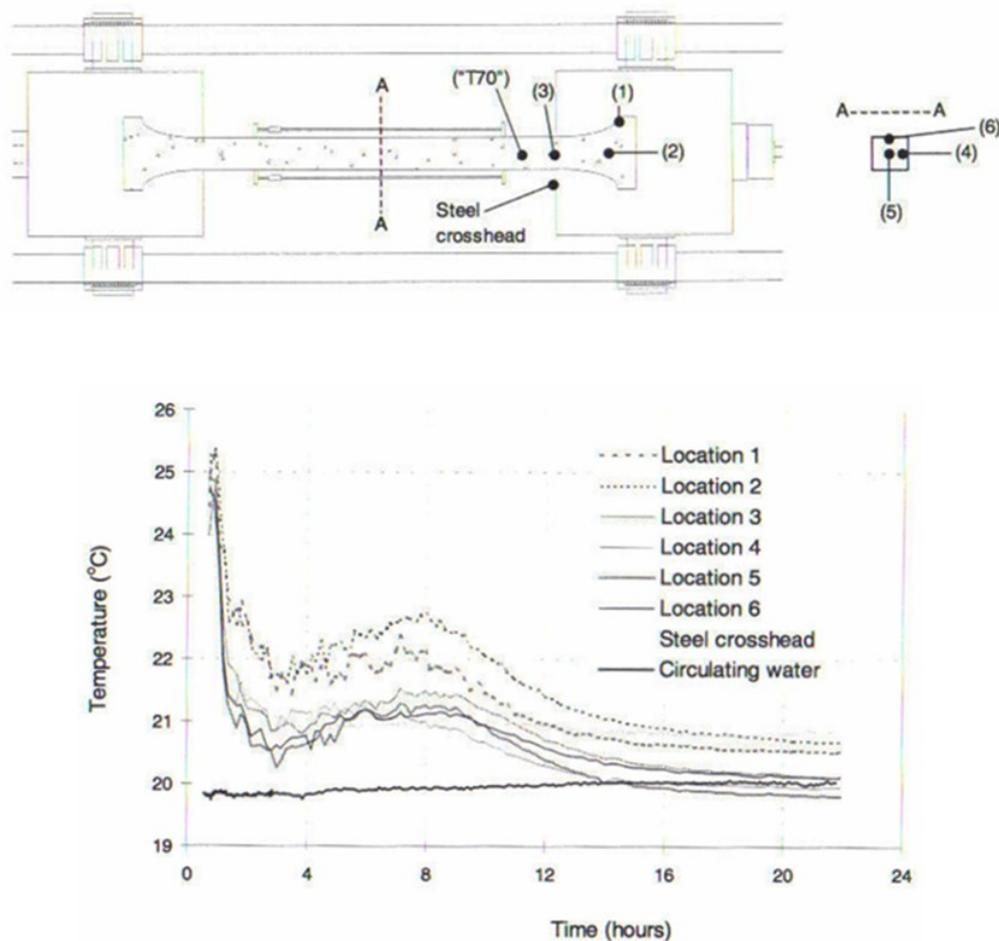


Figure 3-7 : Évaluation de la distribution thermique dans l'élément en béton conditionné à une température de 20 °C [Bjøntegaard 01]

3.4 Synthèse

En pratique, les éléments de structures sont souvent restreints en déformation. Cette restriction génère des effets mécaniques dont un simple essai en laboratoire (tel que l'essai de compression simple ou l'essai de traction simple) ne peut tenir compte. L'interaction entre les variations volumétriques, les variations thermiques et les propriétés viscoélastiques illustre cette complexité que les essais normalisés ne permettent pas d'étudier. Le manque d'information sur le comportement des bétons, en particulier entre le moment de contact eau-ciment et la prise, a incité les chercheurs à développer des appareils expérimentaux permettant de simuler le comportement des éléments structuraux dans des conditions de restriction.

Les montages utilisés pour examiner les propriétés des bétons depuis le très jeune âge ont été développés afin de répondre aux besoins des recherches. Le tableau suivant résume les principaux montages présentés précédemment :

Tableau 3.1 : Limitations des différents montages de retrait discrétisé

	Section (mm x mm)	Asservissement thermique	Limitation(s)
Paillère et coll (1989)	85x120	NON	Le démarrage est effectué après développement d'une certaine rigidité.
Bloom et coll. (1993)	40x40	NON	L'asservissement des déformations est contrôlé manuellement.
Kovler (1994)	40x40	NON	Le démarrage de l'essai est effectué après un jour de séchage
Bjøntegaard (1999)	100x100	OUI	Le contrôle thermique est effectué via la température du bain et non pas celle de l'éprouvette Certains essais ont été interrompus en raison de la rupture de l'éprouvette en cours d'essai.
Altoubat (2001)	76x76	NON	Le démarrage est effectué après 18 h de cure. Certains essais ont été interrompus en raison de la rupture de l'éprouvette en cours d'essai.

Un des aspects auquel cette étude s'y intéresse est l'influence de la température. Bjøntegaard est l'un des premiers à investir dans ce champ. Même si les résultats de ses travaux sont importants, l'approche choisie pour appliquer des profils thermiques peut être améliorée. En effet, imposer un profil thermique en surface de l'éprouvette donne une réponse qui ne tient pas compte de l'aspect exothermique de la réaction d'hydratation (figure 3-7).

Notons que plusieurs essais de retrait restreint discrétisé ont été interrompus suite à la rupture des éprouvettes en cours d'essai (Bjøntegaard 99, Altoubat 2001). Cette rupture résulte d'un dépassement de la résistance limite en traction de l'éprouvette en essai. La procédure des essais de retrait restreint sont contrôlés souvent par un seuil de déformation. Par conséquent, aucun contrôle de la contrainte au sein de l'élément de béton n'est effectué. Les risques de ruptures sont ainsi présents pour ce genre d'essais.

La nature technique dans la mise en œuvre de pareils essais met en évidence que tous ces montages expérimentaux font face à plusieurs difficultés techniques. La friction mesurée entre le béton et les parois des moules constitue une difficulté principale parmi d'autres qui induisent des mesures parasites sur les résultats obtenus. Dans des conditions de variations thermiques la réponse globale du montage ainsi que des dispositifs de retenus des capteurs de déformation représentent une autre problématique source de mesures parasites.

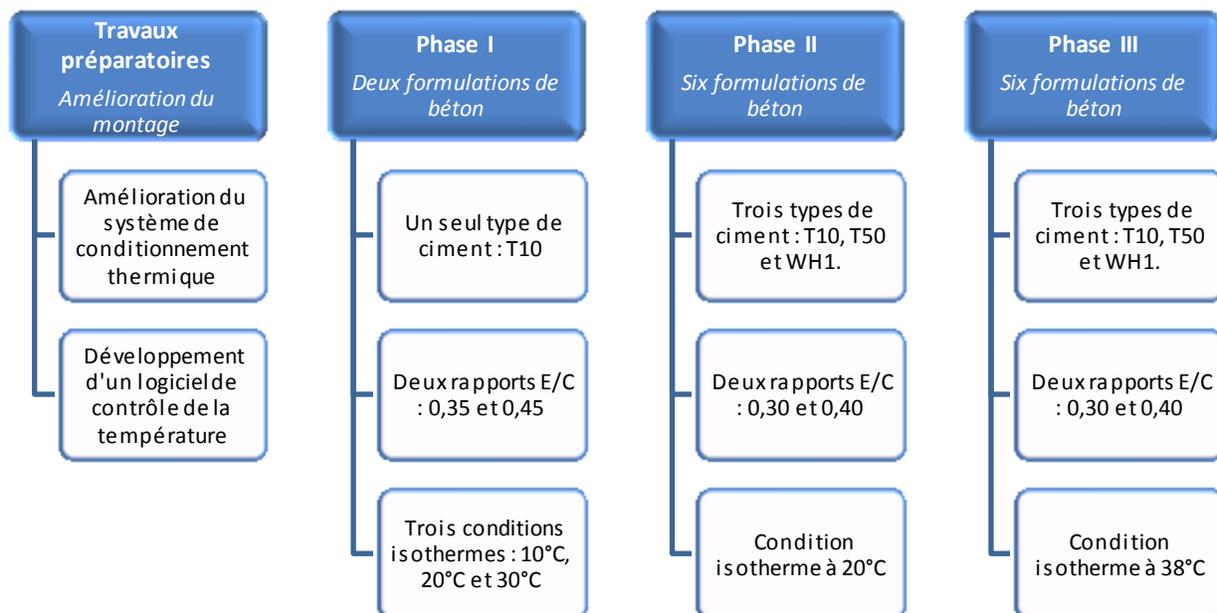
Le montage expérimental R²D² développé au CRIB (et qui sera présenté au chapitre 4) permet de contourner en bonne partie cette difficulté par la possibilité de contrôler la température au moyen d'une sonde de référence noyée dans le corps de l'éprouvette. Le chapitre suivant présente cet équipement de façon plus détaillée.

Chapitre 4

L'essai de retrait restreint R^2D^2

4.1 Introduction

Le montage expérimental R^2D^2 est une version améliorée des équipements développés au CRIB au début des années 90. Initialement conçu par Toma [2000], le montage de retrait restreint ne permettait pas d'étudier l'influence de la température sur le comportement des matériaux cimentaires. En se basant sur les travaux de Toma, Charron [2002] a conçu une version améliorée du montage expérimental. Équipée d'un système d'asservissement thermique, cette nouvelle version a permis d'élargir le champ d'étude en y ajoutant l'influence de la température sur le comportement des matériaux cimentaires au jeune âge. Cependant, la nouvelle version présentait quelques limitations qui se résumaient essentiellement en un problème d'étanchéité et une limitation dans le choix des profils thermiques pouvant être imposés. Ces deux limitations ont fait l'objet de la présente étude. Les différentes étapes principales de la présente recherche sont illustrées sur le diagramme suivant :



4.2 Déroulement des essais R²D²

Suite à sa confection, le matériau fluide est mis en place dans le moule puis scellé afin d'éviter tout échange d'humidité avec le milieu ambiant. Peu de temps après la mise en place, le matériau commence à développer une certaine rigidité. Le moment de démarrage de l'asservissement correspond au temps nécessaire pour développer une contrainte de 0,01 MPa. La restriction au mouvement étant assurée jusqu'alors de manière passive par blocage de la tête mobile. À ce moment, la contrainte sera maintenue constante et l'essai de retrait restreint démarrera. Les capteurs de déplacement permettent d'enregistrer en temps réel l'état de déformation du matériau.

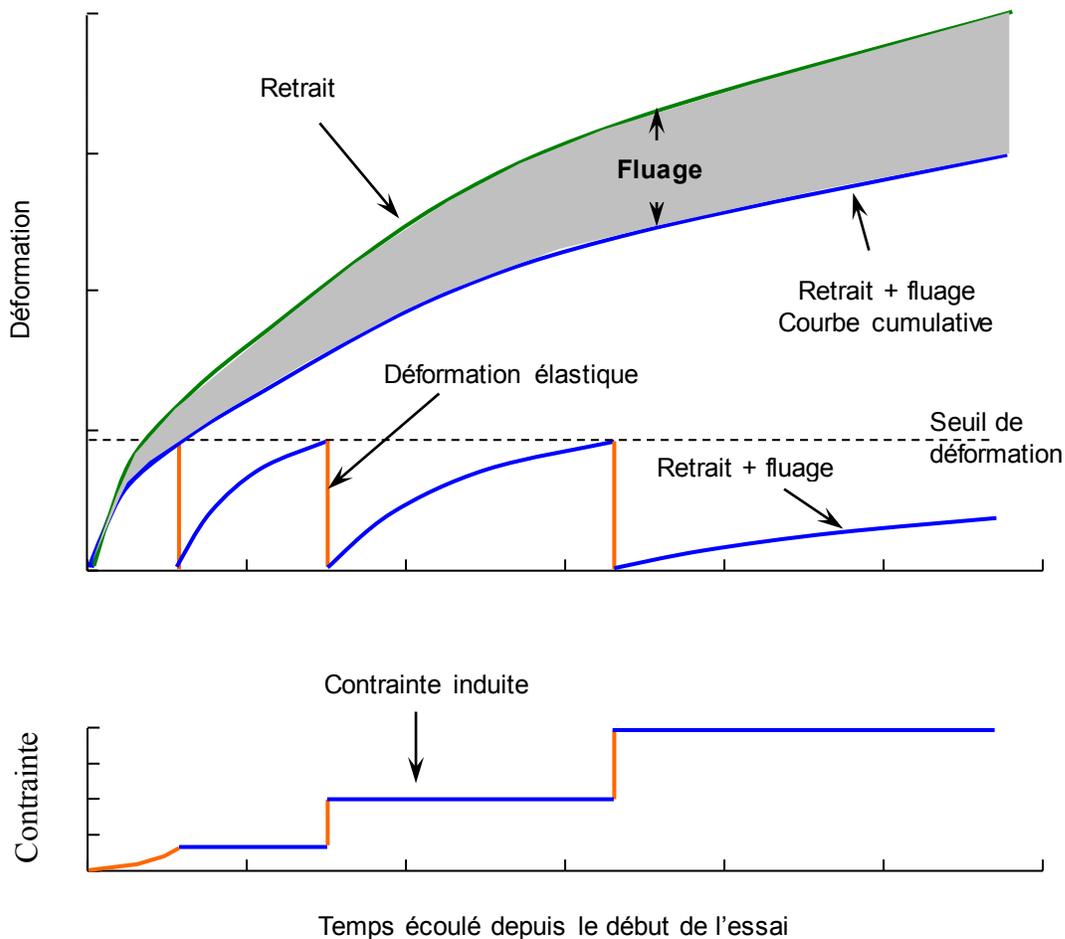


Figure 4-1 : Schéma type du déroulement d'un essai de retrait restreint

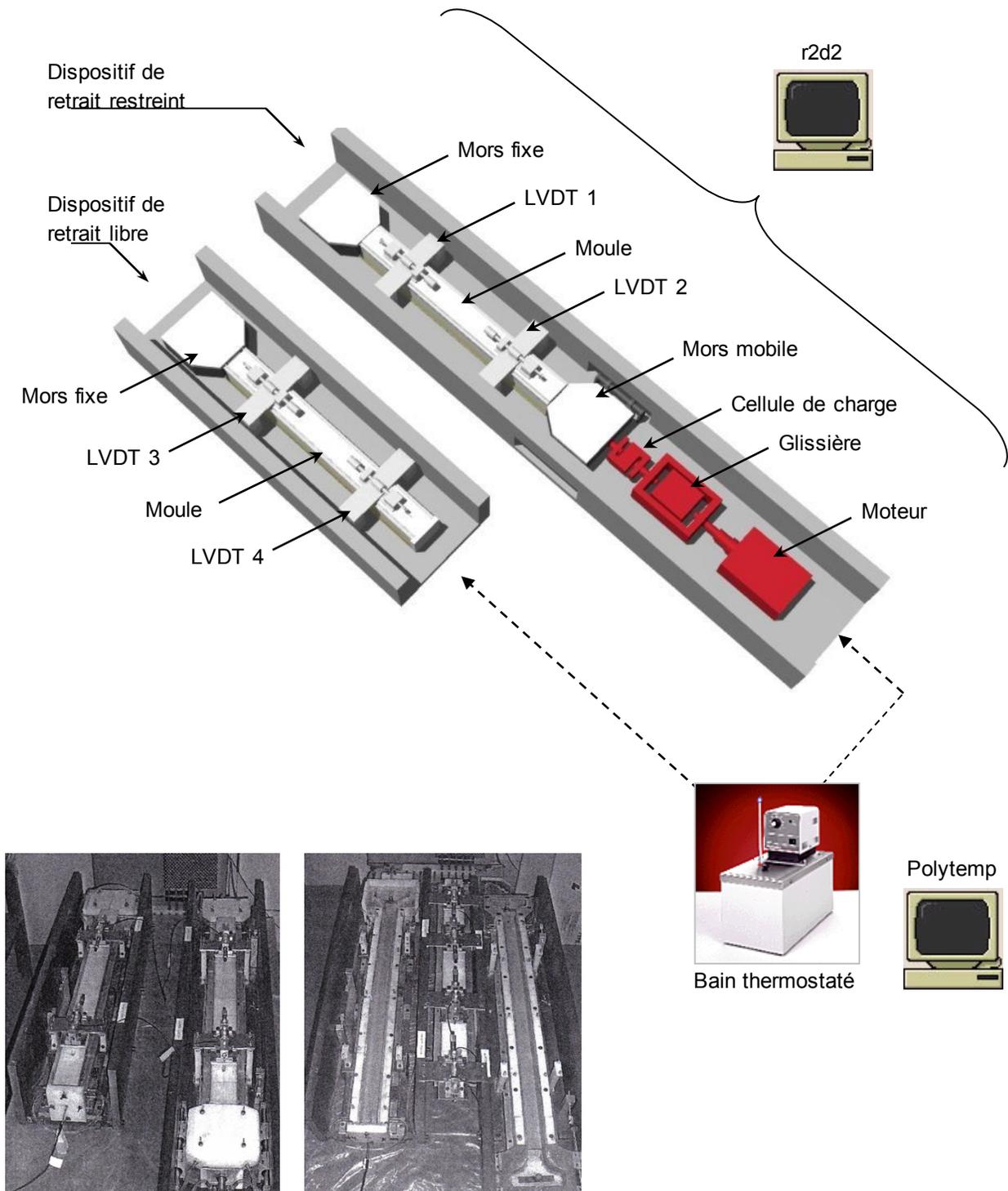
Lorsque le seuil de déformation prédéfini (typiquement $\pm 6\mu\text{m/m}$) est atteint, l'éprouvette est ramenée à sa longueur initiale (figure 4-1). Cette opération est effectuée au moyen du système d'asservissement mécanique (voir figure 4-4). La nouvelle contrainte atteinte sera ainsi maintenue constant tout au long du cycle de déformation subséquent. Lorsque le matériau atteint à nouveau le seuil de déformation limite, un second incrément de contrainte est appliqué pour le ramener à sa longueur initiale. Le nouveau niveau de chargement est de nouveau maintenu constant tout au long du cycle de déformation subséquent. Ces cycles se succèdent pendant toute la durée de l'essai.

Dans le cadre de cette étude expérimentale, un essai de retrait restreint dure une semaine. Cependant cette durée peut être modifiée selon des besoins très spécifiques. À la fin un essai de traction à la rupture est réalisé afin d'évaluer le degré de restriction effectif atteint. Ce dernier est obtenu en comparant la valeur de contrainte atteinte à la fin de l'essai R²D² avec la limite de résistance du béton issue des essais mécaniques.

4.3 Montage expérimental de retrait restreint (R²D²)

Le montage de retrait restreint R²D² développé au CRIB est représenté à la figure 4-2. Il est constitué de deux dispositifs : un dispositif de retrait libre et un autre de retrait restreint. Le premier dispositif permet d'évaluer les déformations libres du matériau tandis que le deuxième permet de restreindre les déformations de manière discrétisée. L'asservissement du montage est contrôlé par le logiciel « R²D² » développé spécifiquement pour le montage. Le logiciel traite en temps réel toutes les informations issues des différentes composantes du montage, à savoir, les déformations et la contrainte développée. Un second logiciel (Polytemp) permet d'asservir le dispositif en température.

Les déformations sont mesurées à partir des déplacements des quatre capteurs de déplacement (LVDT). À chaque point de mesure, le déplacement de la fourchette noyée dans le cœur de l'éprouvette cause le déplacement de la tige portant le noyau du LVDT. Le déplacement de ce dernier à l'intérieur de la bobine magnétique induit des variations de voltage qui seront converties en déplacements (figure 4-3). La résolution de ces capteurs dépend de la performance de la carte d'acquisition et permet d'atteindre des précisions de l'ordre de $0,1\ \mu\text{m}$.

Figure 4-2 : Montage expérimental R²D² [Pigeon et coll. 2002]

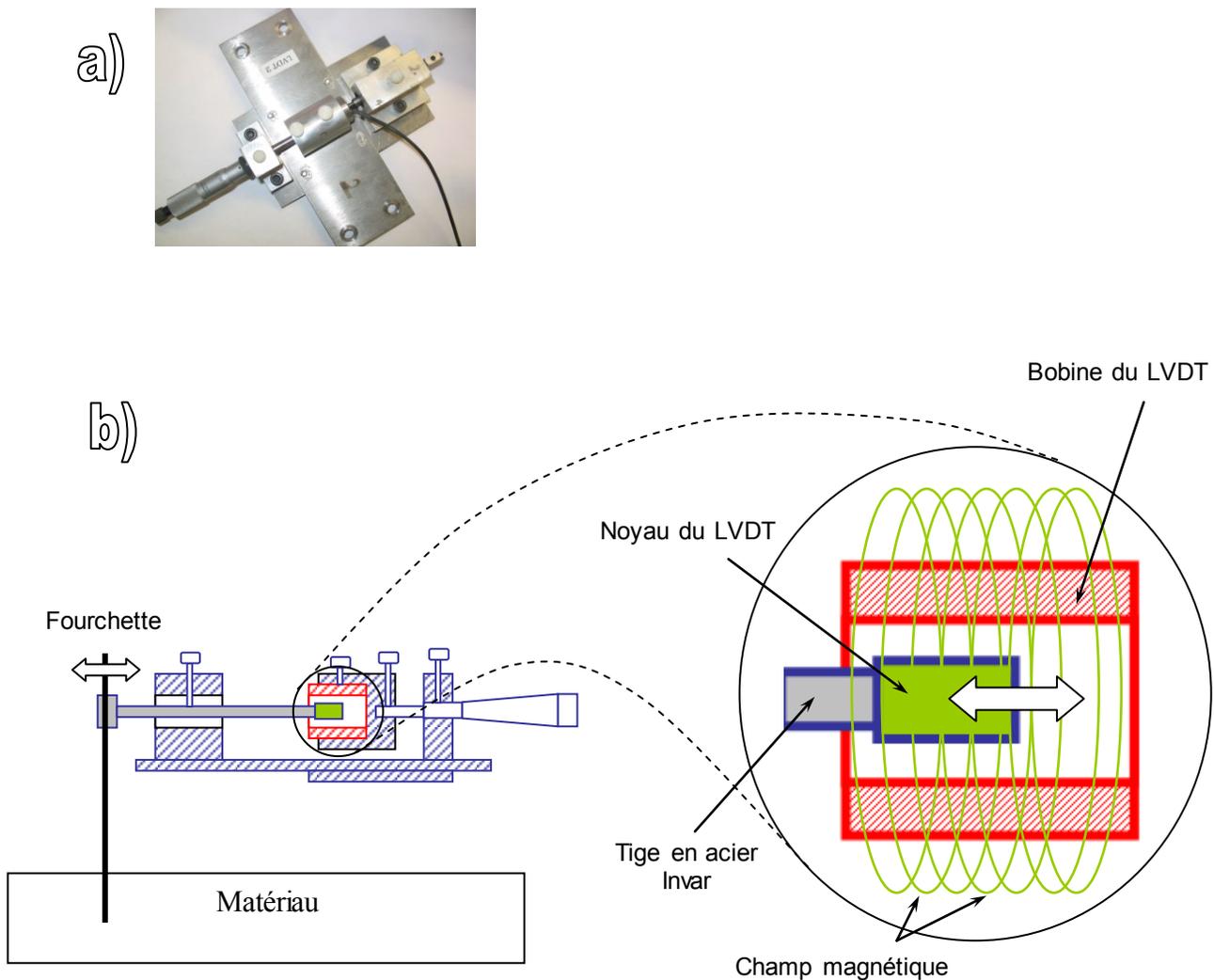


Figure 4-3 : (a) Photo d'un LVDT ; (b) Schéma d'un LVDT

Le système d'asservissement mécanique (figure 4-4) est formé d'un moteur pas-à-pas, d'un réducteur de vitesse, d'une glissière et d'une cellule de charge. Le réducteur de vitesse permet de réduire la vitesse et le déplacement imposé par le moteur d'un facteur 100. Le mouvement de rotation est transformé en un mouvement de translation par l'intermédiaire d'une glissière. Sachant la section de l'éprouvette testée, le logiciel R²D² permet de convertir les efforts

issus de la cellule de charge en contraintes et les enregistrer de façon continue tout au long de l'essai.

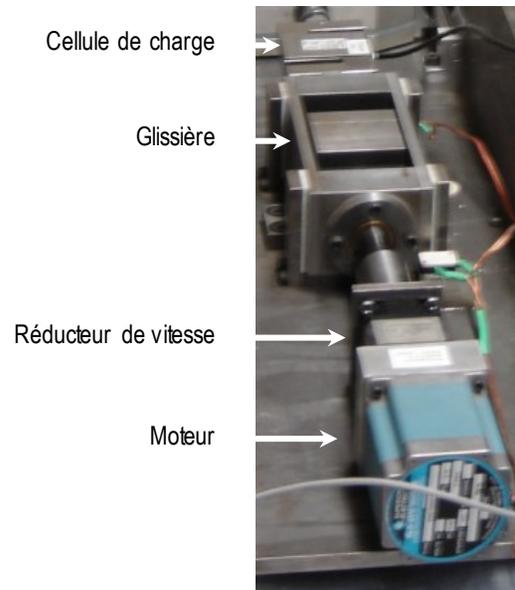


Figure 4-4 : Système d'asservissement mécanique

La température d'essai est imposée par le biais d'un bain thermostaté. Ce dernier permet l'écoulement continu d'eau à travers des canalisations présentes dans les parois des deux moules. L'asservissement en température est contrôlé par le logiciel « Polytemp » et peut être référencé soit à la sonde interne ou à la sonde externe. La sonde interne permet le contrôle de la température de l'eau du bain alors que la sonde externe contrôle la température au cœur de l'éprouvette. Cette dernière option (contrôler la température du matériau) est avantageuse par rapport au montage conçu par Bjøntegaard (1999) qui applique les profils thermiques uniquement par rapport à la température du bain.

Les figures 4-5 et 4-6 illustrent deux exemples d'application d'un profil isotherme à 38 °C. Le premier se réfère à la sonde interne du bain, tandis que le deuxième se réfère à la température du béton (sonde externe). La figure 4-5 montre qu'en utilisant la sonde interne du bain, la température du matériau demeurera, tout au long de l'essai, inférieure de quelques degrés Celsius à la température désirée. Ceci peut s'expliquer par des pertes d'énergie thermique transférée à travers les canalisations reliant le bain au montage. Le contrôle de l'essai par la sonde

externe permet de prendre en considération implicitement ces pertes thermiques ainsi que l'aspect exothermique de la réaction d'hydratation du ciment pour assurer une température du matériau à la fois constante et égale à la température désirée.

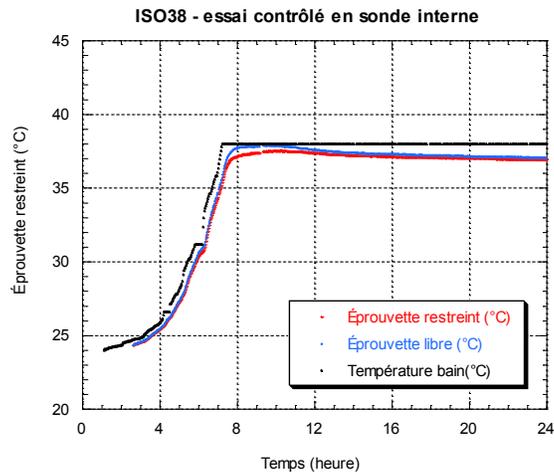


Figure 4-5 : Système d'asservissement thermique utilisant la sonde interne du bain

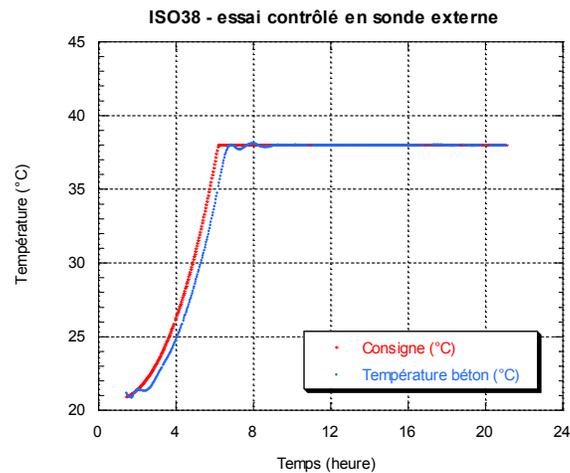


Figure 4-6 : Système d'asservissement thermique utilisant la sonde externe dans le béton

4.3.1 Améliorations fondamentales du montage R²D² pour le contrôle en température

Jusqu'à ce jour, le montage avait été utilisé pour réaliser essentiellement des essais isothermes. La limite de température appliquée par Charron (2002), concepteur du premier système de conditionnement thermique sur le montage R²D², n'a jamais dépassé 40°C. Au voisinage de cette température, des fuites d'eau ont été observées. Un autre aspect problématique a été soulevé lors de cette recherche. En effet, une consigne thermique non isotherme est très difficile à appliquer au moyen du programme d'asservissement Polytemp, voire impossible dans des cas très complexes. Ceci représente un besoin essentiel pour la réalisation du programme expérimental de la présente étude.

4.3.1.1 Amélioration de la plage de température

Initialement, la plage de température que le montage peut appliquer varie entre 5 °C et 40 °C (approximativement). Au-delà de 40 °C, le montage est sujet à des fuites d'eau. Cette problématique est une conséquence de la conception de la canalisation d'eau à travers les parois des moules du montage. En effet, les canalisations sont formées en collant une plaque en aluminium contre une autre plaque en plastique delrin rainurée (figure 4-7).

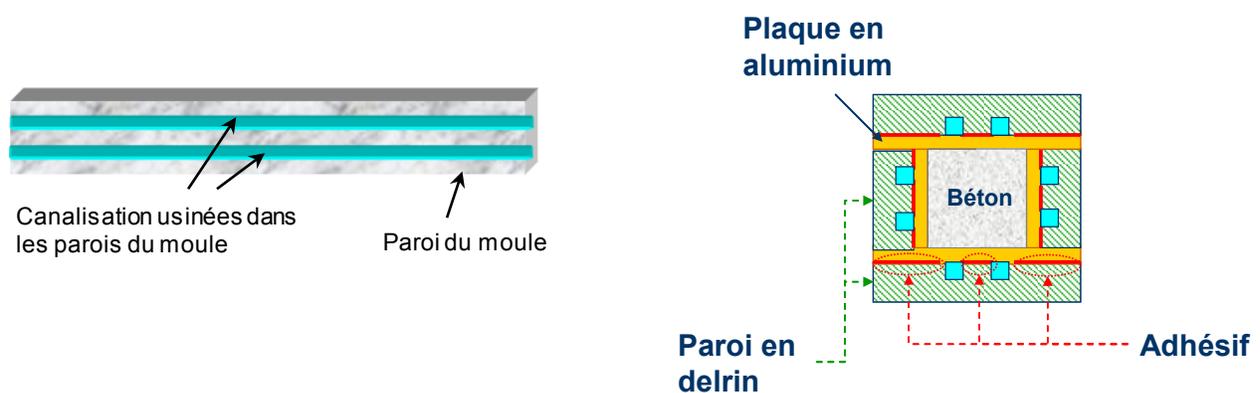


Figure 4-7 : Configuration initiale des conduites d'eau dans le moule

Les deux pièces sont assemblées au moyen d'une colle adhésive. Lorsque le fluide (eau) atteint des températures élevées (40 °C), la colle perd de ses propriétés et ne permet plus d'assurer un contact parfait et étanche entre la plaque en aluminium et la plaque en plastique. La solution choisie consiste à insérer dans les parois une canalisation métallique en cuivre (figure 4-8). Cette nouvelle conception permet d'atteindre facilement des températures élevées (60 °C) sans risque de fuite.



Figure 4-8 : Nouvelle conception des canalisations dans des parois du montage R²D²

4.3.1.2 Amélioration du programme d'asservissement du bain

Le deuxième défi consiste à assurer une meilleure flexibilité d'asservissement en vue d'imposer des profils thermiques complexes. Le programme initial d'asservissement en température, POLYTEMP, permet de spécifier au maximum un cycle de dix paliers de températures isothermes. Cependant, pour réaliser des profils de températures semi-adiabatiques durant une semaine, il faut programmer un peu plus d'une vingtaine de cycles puis veiller à piloter les séquences manuellement. La solution à cette problématique est soit d'acquérir un nouveau bain de contrôle de la température (avec le logiciel approprié), soit de développer un logiciel permettant de communiquer directement, et en temps réel, avec le bain disponible et permettre la mise en œuvre de profils thermiques variés avec asservissement entièrement automatisé.

Cette deuxième approche a été analysée en profondeur. Un nouveau programme d'asservissement, « R2D2TEMP », a été ainsi développé sous l'environnement de programmation Qbasic. L'idée consiste à demander, en temps réel, au bain d'atteindre une température définie par le profil thermique de l'essai. Le bain ajustera la température de l'eau pour atteindre le plus rapidement possible la température cible. Tout au long de l'essai, une telle communication entre le bain et le programme d'asservissement s'effectue régulièrement, conformément à la fréquence déjà spécifiée par l'utilisateur avant le démarrage de l'essai.

Dans la majorité des essais, cette fréquence de communication a été spécifiée à 2 minutes. Avec ce nouvel outil, aucune limitation théorique n'est exigée quant aux profils thermiques désirés. Cependant, la conduction thermique du matériau cimentaire à étudier demeure l'unique obstacle face à des consignes thermiques à taux de variation très prononcés. Le principe de fonctionnement du nouveau programme, R2D2TEMP, est illustré à la figure 4-9.

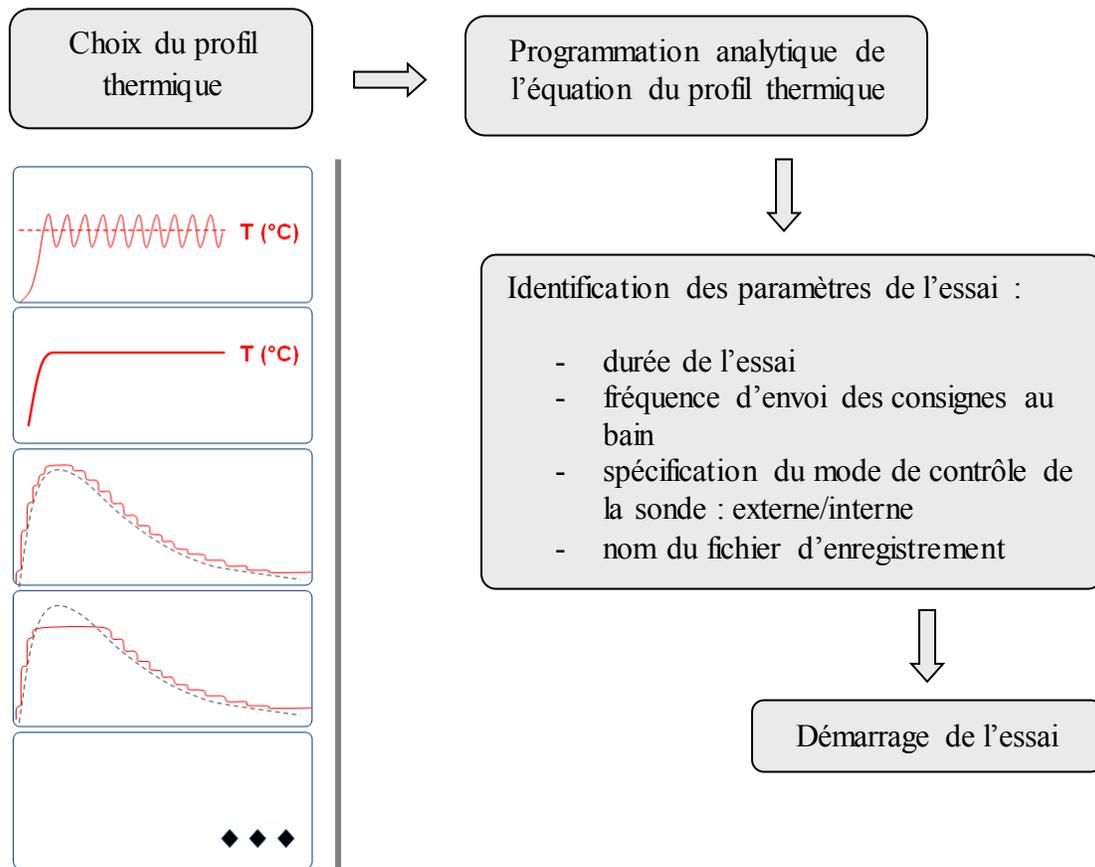


Figure 4-9 : Principe de fonctionnement du programme d'asservissement du bain

L'asservissement est nettement plus performant en utilisant R2D2TEMP plutôt que le logiciel d'origine POLYTEMP. La figure 4-10 illustre un exemple de profil semi-adiabatique appliqué R2D2TEMP; dont le profil ne peut être produit en utilisant POLYTEMP. L'avantage de R2D2TEMP est sa communication active avec le bain tout au long de la durée de l'essai qui permet, pour chaque envoi de signal, d'ajuster la température demandée à la consigne thermique désirée.

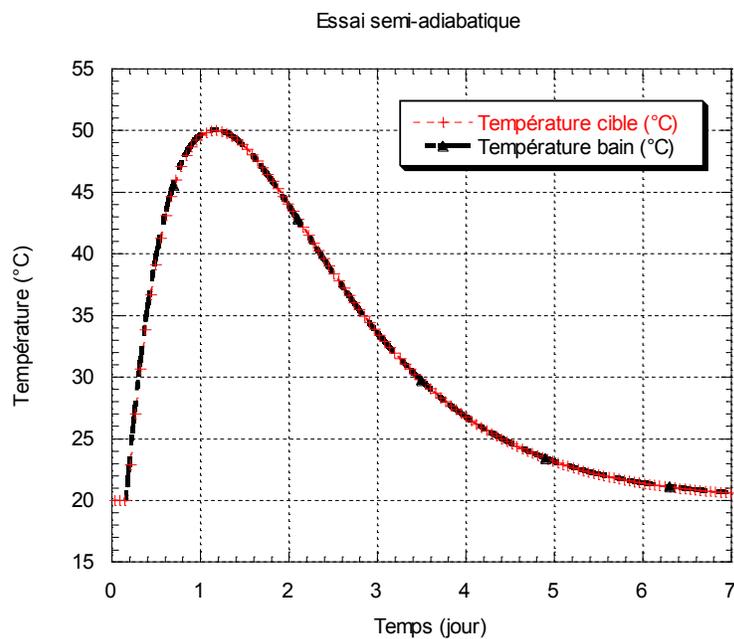


Figure 4-10 : Exemple d'application d'une consigne semi-adiabatique en utilisant la sonde interne.

4.3.1.3 Optimisation de la configuration du bain

Le bain est le premier équipement responsable du conditionnement thermique des essais de retrait restreint. L'optimisation des paramètres de configuration de cet outil favorise un meilleur rendement et un bon déroulement des essais.

Les deux paramètres les plus importantes sont :

- la vitesse de la pompe (*pump speed*)
- le débit (*flow rate*)

Des séries d'essais ont été menées afin d'optimiser l'ajustement de ces deux paramètres. Les figures 4-11 et 4-12 illustrent les résultats obtenus. En conclusion, l'utilisation d'une vitesse maximale de la pompe (*pump speed*= *full*), et d'un débit minimal (*flow rate* = *1*) assure un mode de fonctionnement optimal du bain. Ces deux valeurs ont ainsi été retenues pour tous les essais R²D².

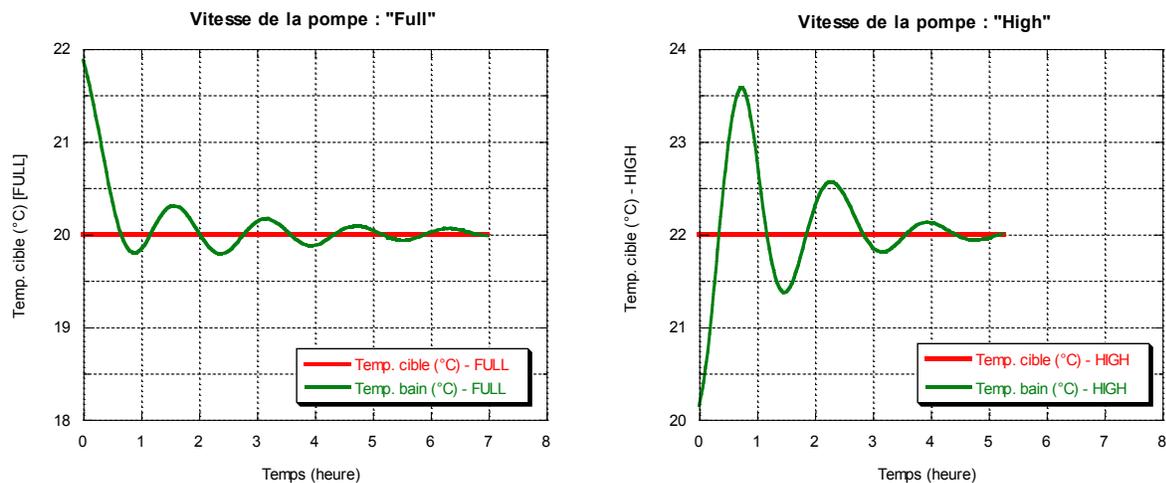


Figure 4-11 : Optimisation de la vitesse de la pompe

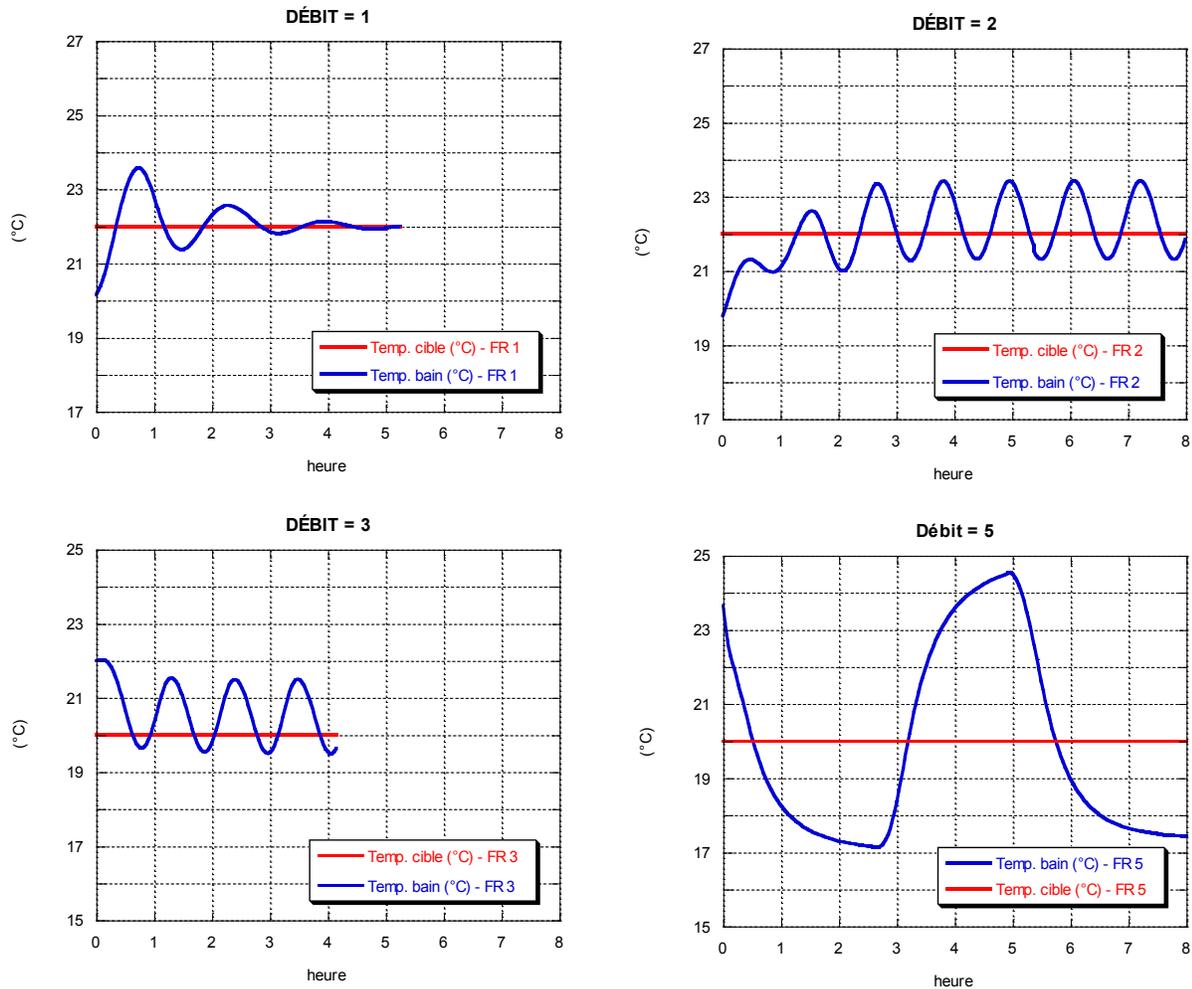


Figure 4-12 : Optimisation du débit

4.3.2 Étude de sensibilité des capteurs de déformations LVDT aux variations thermiques

Les précisions recherchées par ces essais sont de l'ordre du micromètre (1 μm). En cas de variations thermiques, il est nécessaire de vérifier s'il existe des effets parasites et, le cas échéant, de les éliminer. Le bon déroulement des essais contrôlés en température nécessite une optimisation du fonctionnement des différentes composantes électromécaniques qui seront influencées nécessairement par les variations thermiques. Dans le cas des essais isothermes, ce problème est moins présent. En effet, une fois l'équilibre thermique de toutes les composantes du montage atteint, les effets thermiques peuvent être négligés. Ceci est favorisé par le contrôle de la température environnante de la salle d'essai.

Dans le cas des essais non isothermes, les dilatations thermiques des différentes composantes du montage peuvent avoir une incidence non négligeable sur le déroulement des essais de retrait restreint. Généralement les coefficients de dilatation de l'acier sont de l'ordre de $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Autrement dit, une augmentation de la température 1°C , induit une dilatation au niveau du montage de l'ordre de $10 \mu\text{m}$. Par conséquent, une évaluation précise de la réponse thermique du montage est primordiale dans le but de remédier à cette problématique et de minimiser les déformations parasites. Au cours de cette section, des études préliminaires de sensibilités et de calibration de deux types de capteurs de déformation sous l'influence de la température sont présentées, à savoir, les capteurs de déformation LVDT et les capteurs à proximité inductifs (CPI).

4.3.2.1 Calibration des capteurs LVDT dans des conditions isothermes

Comme le montre la figure 4-13, les LVDT sont maintenus par des dispositifs métalliques. Or, comme dans tout autre matériau métallique, des variations thermiques induiront nécessairement des déformations.

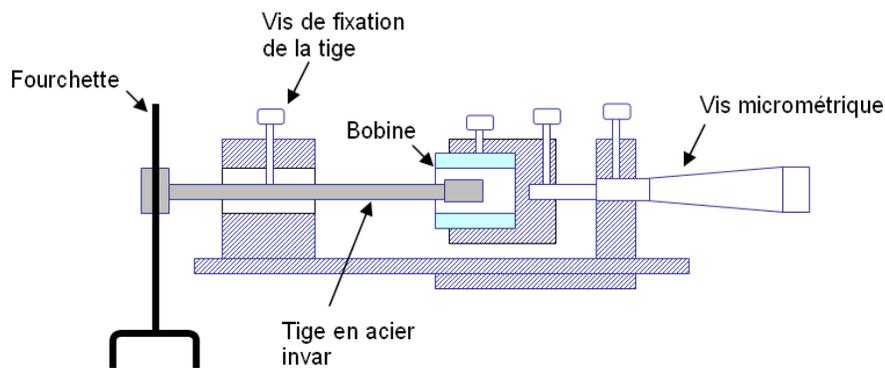


Figure 4-13 : Dispositif de maintien des capteurs LVDT sur le montage R^2D^2

Des essais dans des conditions isothermes ont été réalisés dans le but de quantifier de telles variations. Le dispositif expérimental est composé d'un banc de calibration introduit dans une enceinte contrôlée en température au moyen du bain thermostaté (figure 4-14). Différents niveaux de température isothermes sont appliqués à l'intérieur de l'enceinte isolée. Des pertes thermiques à travers la canalisation reliant l'enceinte au bain sont mises en évidence par les différences entre les mesures des températures du bain et de l'enceinte (tableau 4.1).

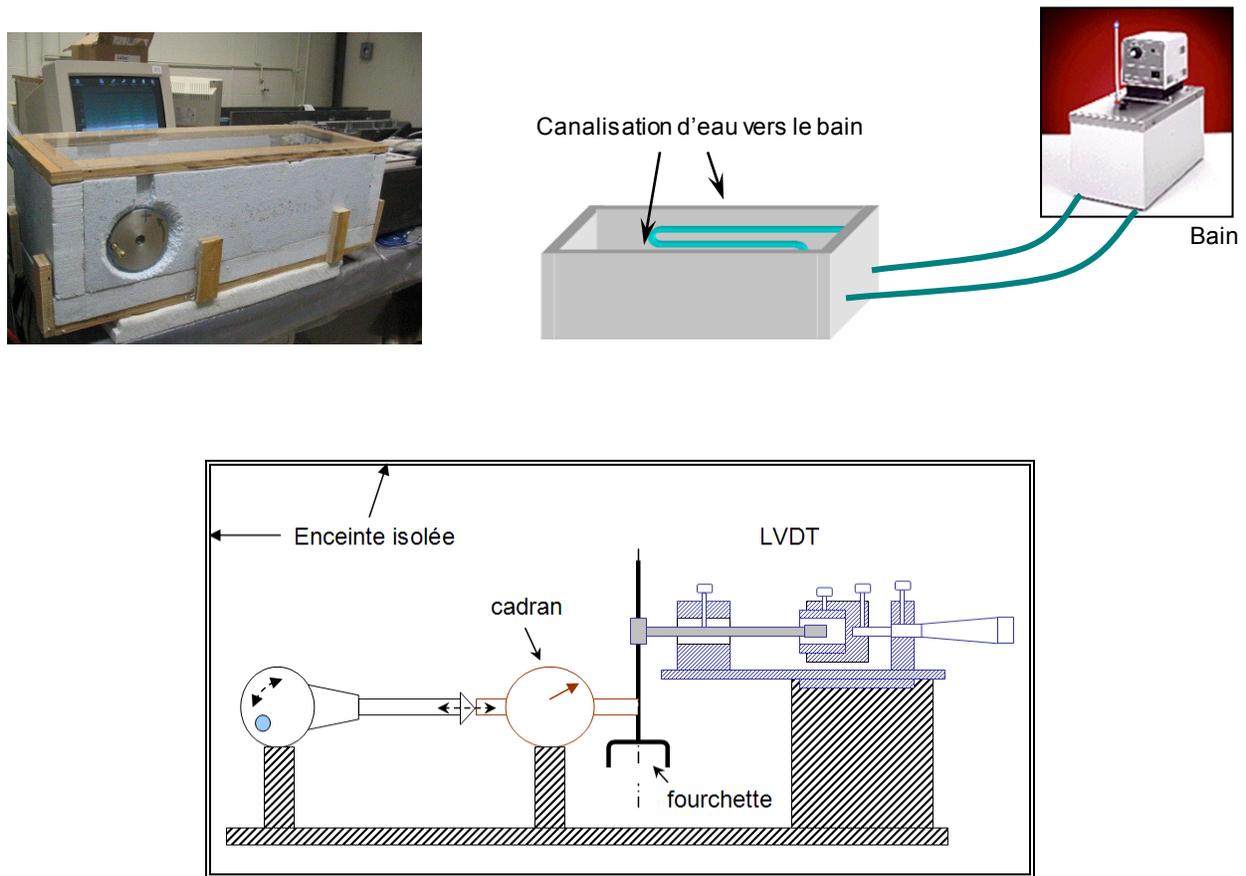


Figure 4-14 : Schématisation de la calibration d'un capteur LVDT dans l'enceinte contrôlée en température.

Tableau 4.1 : Consigne imposée vs températures mesurées dans l'enceinte de calibration.

Consigne imposée au bain	Température de l'enceinte
Aucun contrôle de température n'est imposé par le bain	Ambiante (~22 °C)
10.0 °C	19.6 °C
40.0 °C	28.4 °C
60.0 °C	35.5 °C

La température a été mesurée au moyen d'un thermocouple type «J» placé au voisinage du capteur de déformation. La température s'affiche continuellement sur un témoin digital. La figure 4-15 illustre les résultats de calibration d'un des quatre capteurs LVDT. Les résultats montrent que la calibration des capteurs LVDT demeure indépendante de la température environnante tant que celle-ci demeure constante. Ayant cette information, les essais R^2D^2 en conditions isothermes peuvent être réalisés en utilisant les capteurs LVDT.

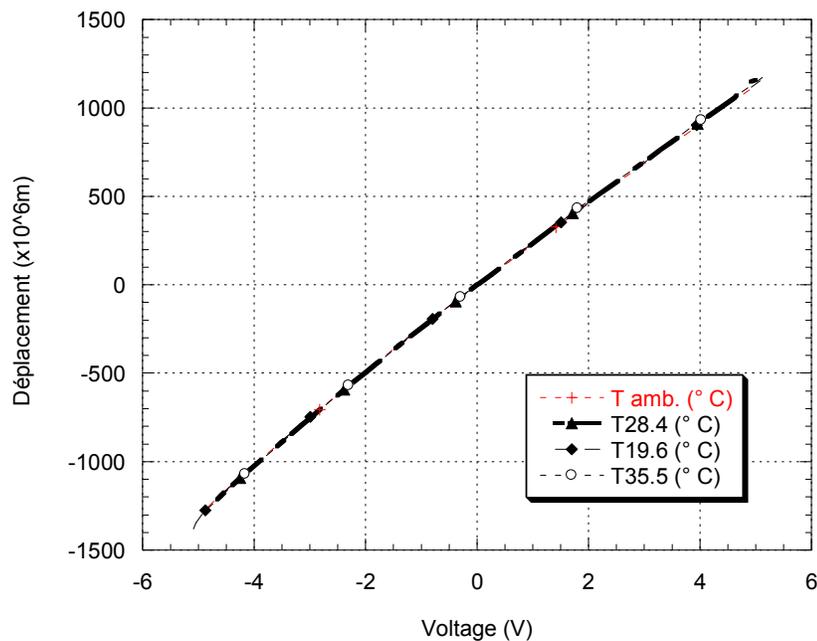


Figure 4-15 : Calibration d'un capteur LVDT à différentes températures environnantes isothermes

4.3.2.2 Réponse thermique des LVDT en conditions non-isothermes

Afin de vérifier le comportement des capteurs LVDT dans des conditions non-isothermes, les quatre LVDT sont placés à nouveau dans l'enceinte. Les tiges en acier invar ont été fixées au moyen des vis d'ajustement afin de bloquer tout mouvement du noyau du capteur LVDT par rapport à la bobine magnétique. Ainsi, toute variation de voltage enregistrée suite à une variation de la température environnante représentera nécessairement la réponse du dispositif de mesure.

du capteur LVDT. Le profil thermique de la figure 4-16 a été imposé. La température du bain a été maintenue constante successivement à 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 30 °C et 10 °C. Afin d'éviter tout changement brusque de température, la cinétique d'échauffement ou de refroidissement a été fixée à 5 °C par heure. Une durée minimale de huit heures a été appliquée à chaque palier de température constante. Vers la fin de chaque palier isotherme un profil thermique sinusoïdal d'une amplitude de ± 2 °C a été appliqué.

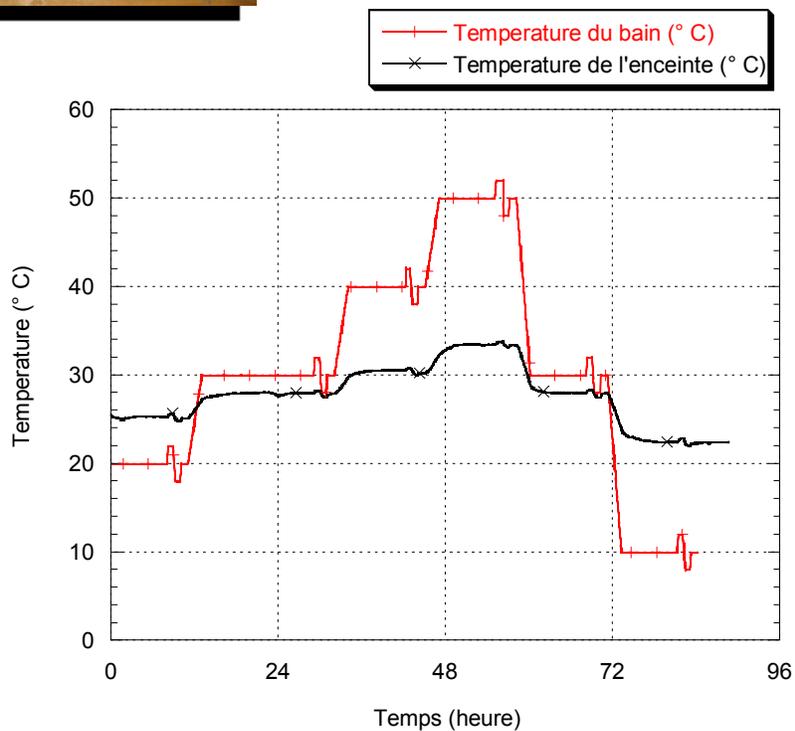
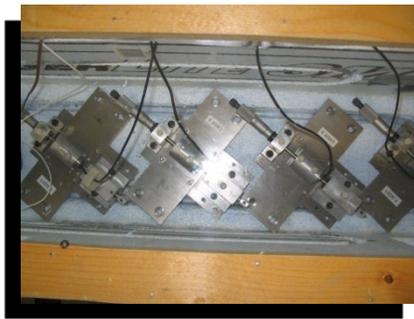


Figure 4-16 : Profil thermique imposé par le bain vs température mesurée dans l'enceinte

Les résultats de cet essai sont illustrés aux figures 4-17 et 4-18. Comme il a été constaté par des essais antérieurs (voir section 4.2.2.1), les résultats montrent encore une fois qu'en conditions isothermes les variations de voltage enregistrées sont quasiment nulles. En conditions non-isothermes la situation est totalement différente.

Afin de simuler l'effet d'un changement de température sur les mesures du montage R^2D^2 , les variations de voltages enregistrées par les capteurs de déformation du montage restreint (LVDT1 et LVDT2) ainsi que ceux du montage libre (LVDT3 et LVDT4) ont été convertis en déplacement au moyen des courbes de calibration obtenus en conditions isothermes. Sachant les distances séparant les capteurs de déformation, les déplacements ont été par la suite convertis en déformations « fictives ». Il a été montré ainsi qu'en conditions non-isothermes, une variation de température de 1 °C induit des déformations fictives de 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ dans le montage restreint et de 1,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ dans le montage libre. Autrement dit, une variation de 4 °C induira une erreur en déformation de l'ordre de 6 $\mu\text{m}/\text{m}$. Une fois détectée par la carte d'acquisition, cette erreur induit un faux message de retour à zéro. Ceci représente un handicap pour le bon déroulement des essais restreints et devrait être analysée de plus en profondeur afin de remédier à cette situation.

Il a été observé aussi que durant une phase de changement de température la réponse des capteurs LVDT ne sont pas linéaires, mais plutôt d'une allure parabolique. Ce comportement peut être expliqué par les différentes caractéristiques thermiques des pièces constitutives du dispositif de maintien, en particulier, le coefficient de dilation thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. La tige portant le noyau du capteur LVDT est en acier invar, alors que la bobine du LVDT est maintenue par des pièces en acier doux. Ces différentes propriétés thermiques font en sorte que l'acier doux et l'acier invar se déforment à des vitesses différentes (figure 4.19). Ceci pourrait expliquer en partie cette réponse non linéaire au cours d'un changement de température.

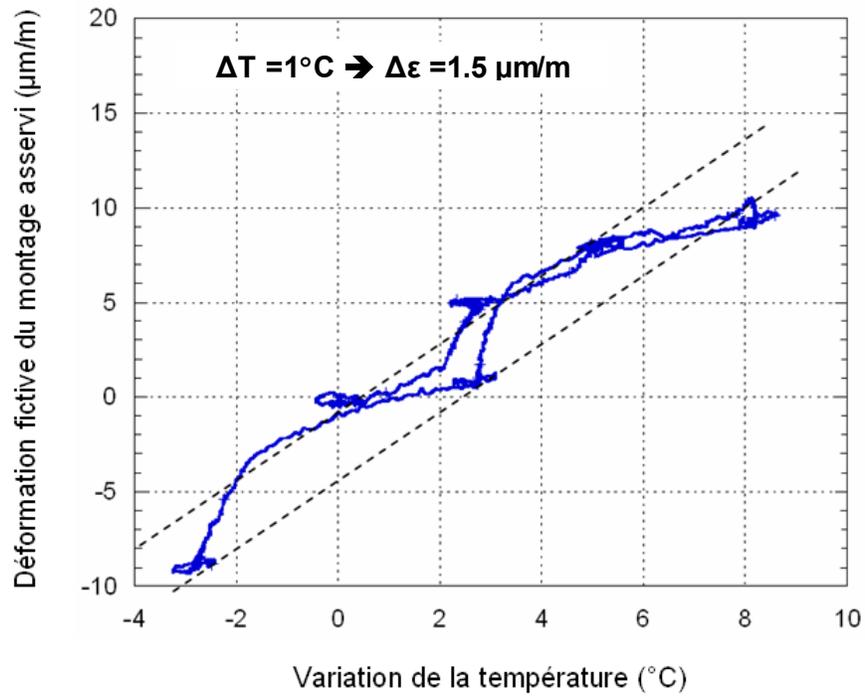


Figure 4-17 : Déformation fictive du montage asservi suite à une variation de la température

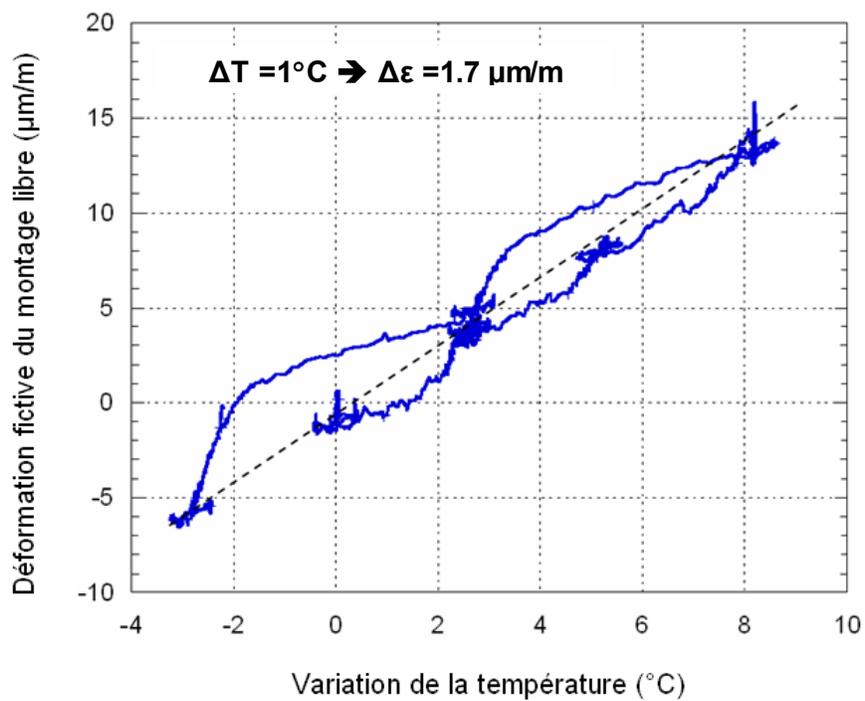


Figure 4-18 : Déformation fictive du montage libre suite à une variation de la température

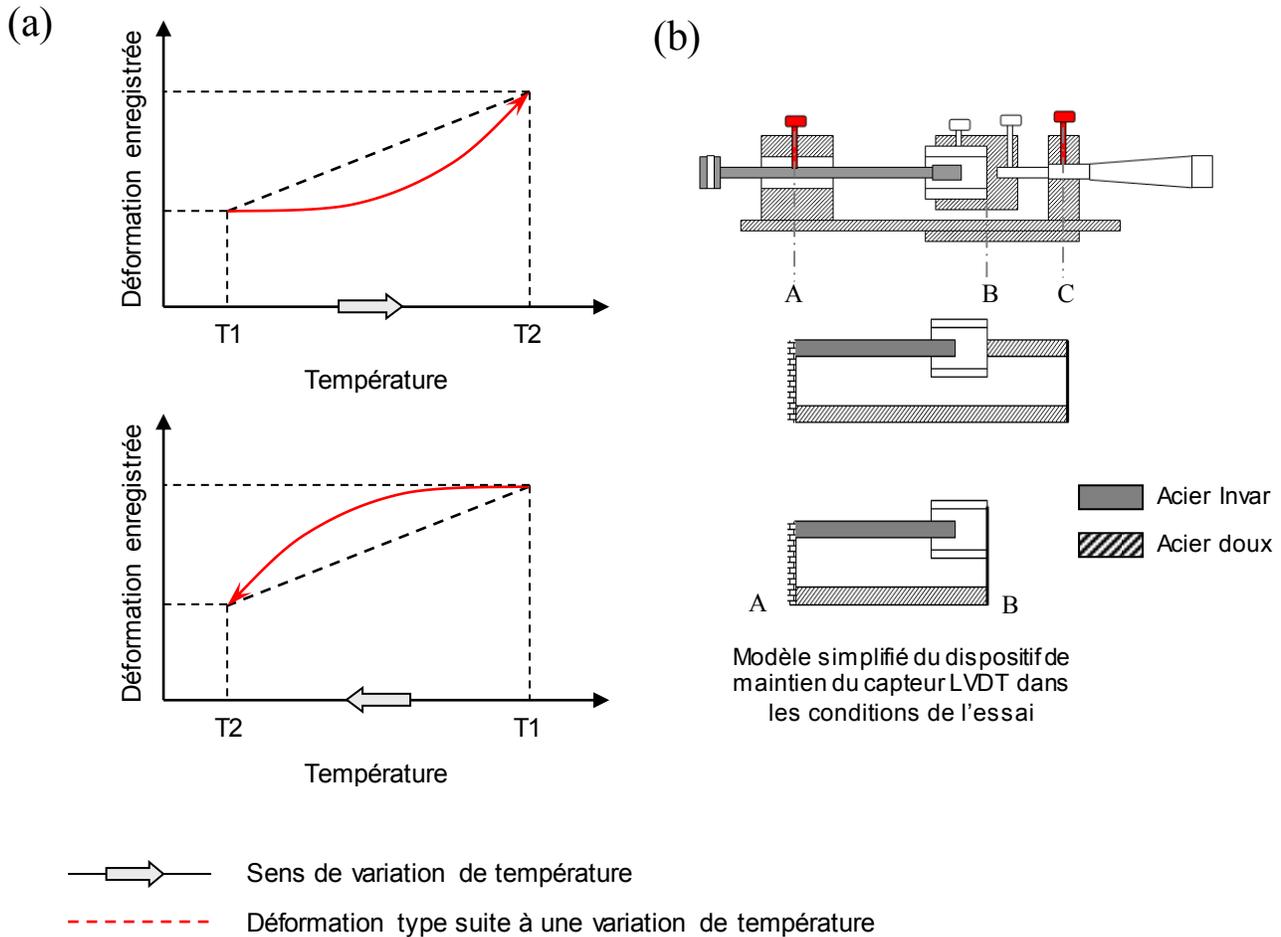


Figure 4-19 : (a) Représentation schématique de la déformation enregistrée par le logiciel r2d2 suite à une variation de température (b) modèle simplifié du dispositif de maintien d'un LVDT dans les conditions de l'essai

Une autre information semble être aussi intéressante que les précédentes : pour une température isotherme du bain donné, quelle serait la température correspondante du LVDT ? Pour répondre à cette question, un autre essai a été réalisé. Cette fois-ci, un seul capteur LVDT a été utilisé. Il a été positionné sur son support à l'intérieur du montage de l'essai R²D². Le but était de vérifier la température du LVDT ainsi que son dispositif de maintien pour différentes températures isothermes imposées par le bain. La température de l'eau du bain a été mesurée à son entrée ainsi qu'à sa sortie. Au niveau du LVDT, les thermocouples ont été installés à l'intérieur du boîtier de la bobine ainsi que sur sa périphérie et sur sa plaque support (figure 4-20).

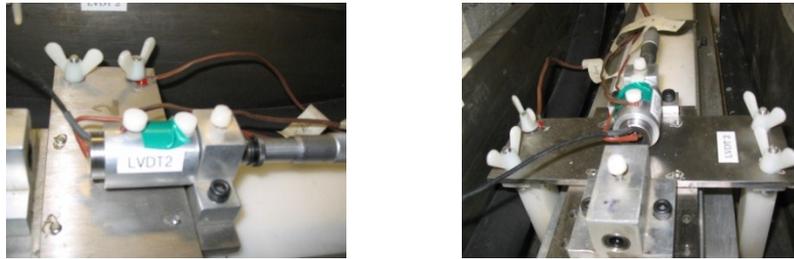


Figure 4-20 : Évaluation de la température des LVDT dans leurs supports

La figure 4-21 illustre à la fois le profil de température appliqué par le bain ainsi que les résultats de l'essai. Les résultats montrent que la température du dispositif de maintien du LVDT et celle de la bobine sont identiques. Le tableau 4.2 montre qu'une variation de 10 °C dans le bain induit une variation de température du capteur LVDT de l'ordre de 2 °C.

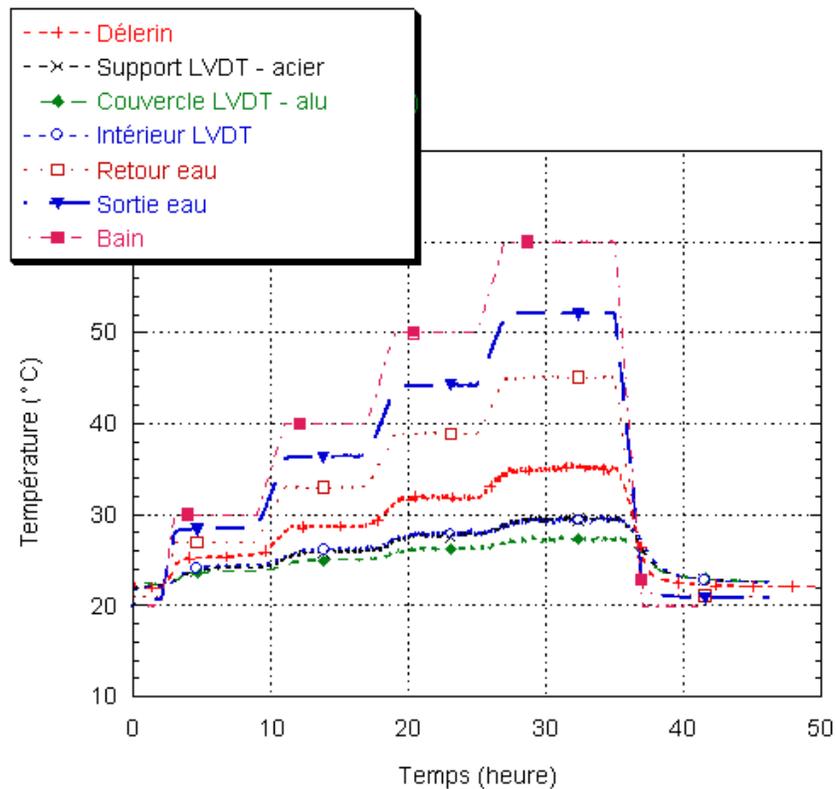


Figure 4-21 : Profil thermique appliqué vs température LVDT

Tableau 4.2 : Températures appliquées par le bain vs celles mesurées au niveau du LVDT

Température du Bain	Températures mesurées à l'intérieur du LVDT
20 °C	22 °C
30 °C	24 °C
40 °C	26 °C
50 °C	28 °C
60 °C	30 °C
20 °C	22 °C

4.3.2.3 Synthèse préliminaire du comportement thermique des LVDT

L'étude du comportement des capteurs LVDT a montré que leurs réponses demeurent fiables dans des conditions isothermes. Cependant, suite à une variation de température, des variations de voltage ont été enregistrées au niveau du capteur de déformation. Ces variations peuvent être interprétées comme une déformation du matériau et amorcer erroneement un cycle de chargement dans R^2D^2 . Afin de remédier à cette difficulté, différentes solutions peuvent être envisagées. La solution la plus réaliste consiste à concevoir d'autres dispositifs de maintien des LVDT à partir d'un matériau peu influencé par la température (tel que l'acier invar).

4.3.3 Étude de sensibilité des capteurs de proximité inductifs aux variations thermiques

Les capteurs de proximité inductifs (CPI), appelés aussi capteurs sans contact (CSC), produisent aux extrémités de leurs sondes de détection un champ magnétique oscillant. Ce dernier est créé par un circuit (bobine) alimenté par une source de tension sinusoïdale. Si un objet métallique (cible) s'approche de la surface active, des courants de Foucault sont générés. D'après la loi de Lenz, ces courants s'opposent à la cause qui leur a donné naissance. Les pertes qui en résultent causent une baisse d'énergie dans le circuit oscillant et une atténuation des oscillations (figure 4-22). Les capteurs à courants de Foucault sont sensibles à tout objet métallique.

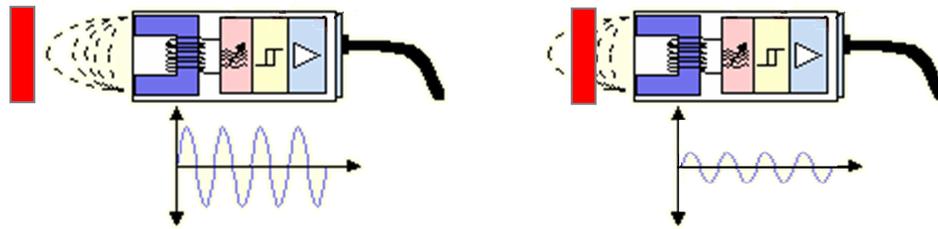


Figure 4-22 : Principe de fonctionnement d'un capteur de proximité inductif (CPI).

La réponse des capteurs de proximité inductifs est non linéaire. Elle dépend essentiellement de la forme, des dimensions et de la nature du matériau de la cible. Les faibles amplitudes des signaux sont la porte ouverte aux parasites et bruits électriques. Pour cette raison, les instruments de mesure nécessitent le recours à des techniques très poussées de filtrage de bruit.

4.3.3.1 Calibration des capteurs de proximité inductifs dans des conditions isothermes

Au cours des essais de calibration des capteurs LVDT à différentes températures, un capteur sans contact a été fixé par-dessus un LVDT. Les essais de calibration ont été effectués ainsi simultanément (figure 4-23). Les mêmes températures environnantes isothermes appliquées au capteur LVDT ont été appliquées au CPI (tableau 4.1). Les résultats montrent que, en conditions isothermes, les réponses des CPI sont indépendantes des températures environnantes (figure 4-24).

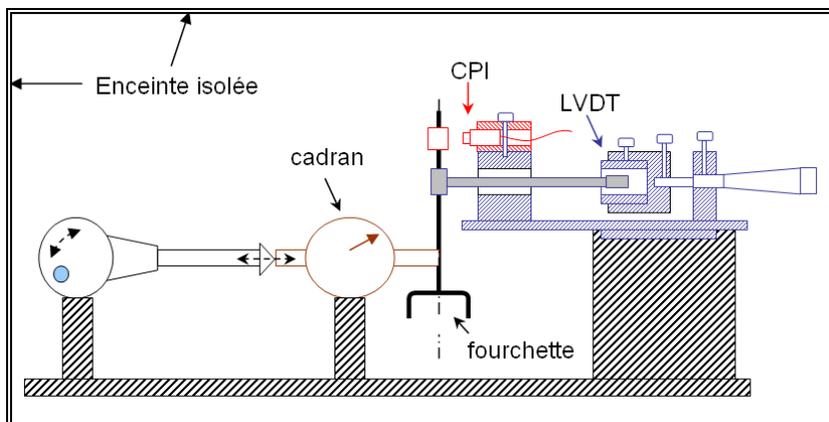


Figure 4-23 : Dispositif de calibration du capteur de proximité inductif.

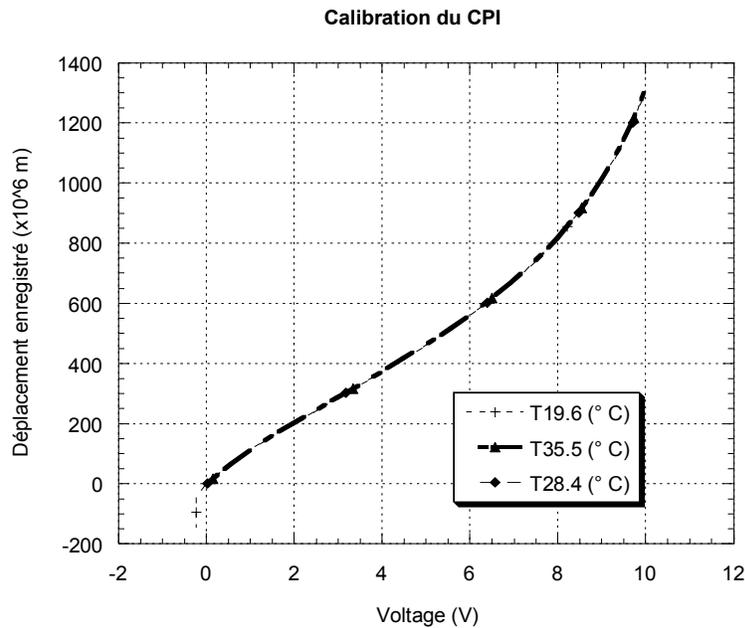


Figure 4-24 : Calibration d'un capteur à proximité inductif à différentes températures isothermes

La courbe de calibration des CPI est polynomiale d'ordre 5 :

$$y = 0.0395x^5 - 0.8346x^4 + 7.2833x^3 - 29.694x^2 + 139.4x - 1.8739$$

La variable « y » désigne le déplacement de la cible (multiplié par 10^6 m), la variable « x » désigne le voltage enregistré par le CPI (en volt).

4.3.3.2 Réponse thermique des CPI en conditions thermiques non isothermes

Les essais de calibration du CPI ont permis de confirmer la fiabilité de ce genre de capteurs dans des conditions isothermes. L'étape suivante consiste à vérifier son comportement dans des conditions non isothermes. Un support de maintien du CPI a été conçu de façon à réduire les déformations thermiques de ce dispositif de maintien. La cible en aluminium est fixée sur une tige en acier invar. Le CPI ainsi que la tige ont été fixés dans un support en acier. Afin d'atteindre des températures plus élevées que celles atteintes en utilisant l'enceinte de contrôle thermique, le moule du montage R²D² a été utilisé (figure 4-25). Le profil thermique imposé au CPI est représenté à la figure 4-26.

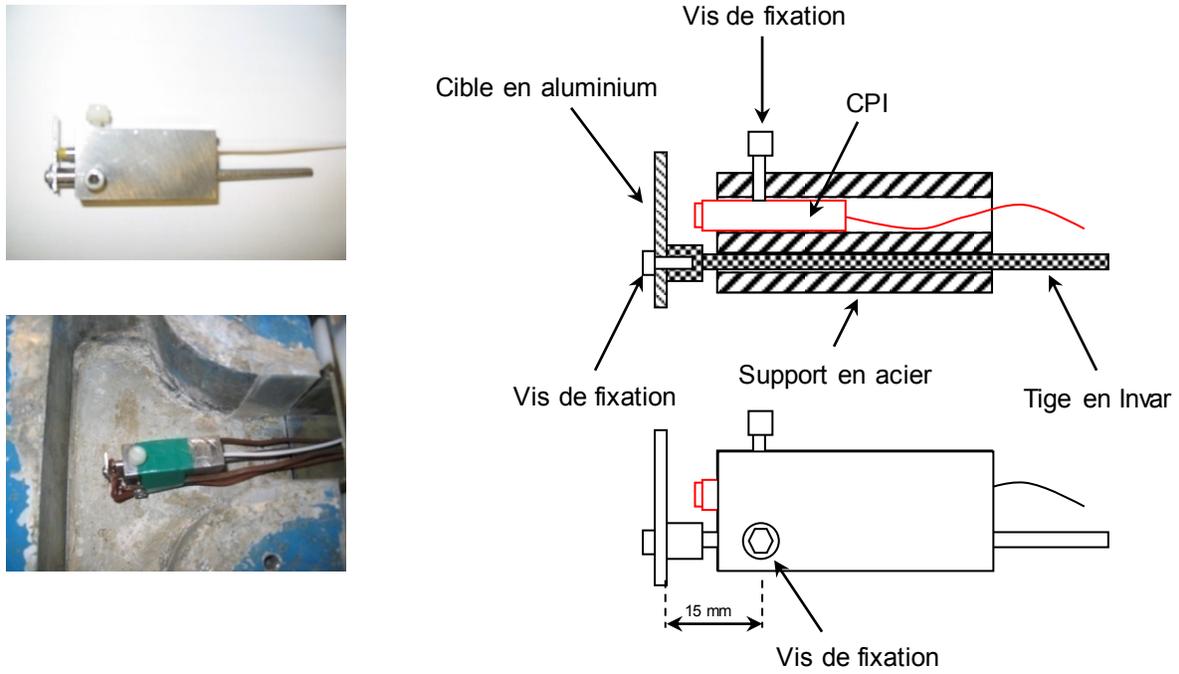


Figure 4-25 : Dispositif de maintien du capteur de proximité inductif

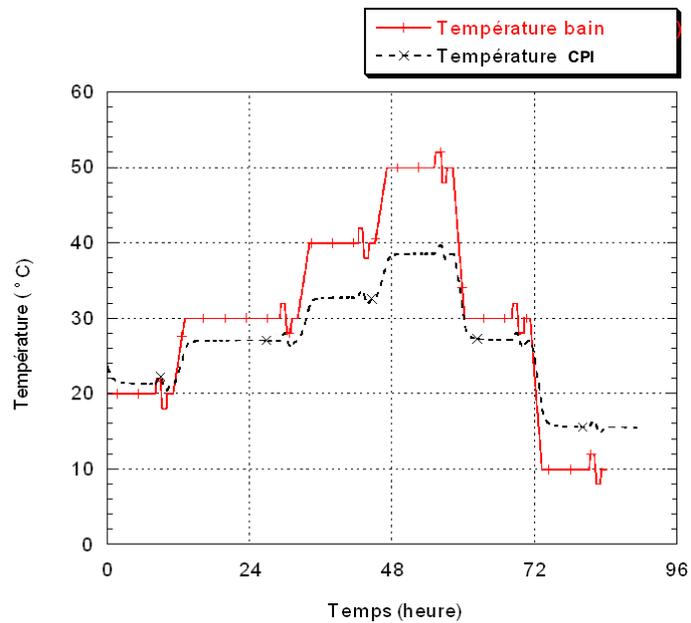


Figure 4-26 : Consigne appliquée au bain vs Température mesurée au CPI

Avec toutes les précautions prises afin de minimiser les déformations thermiques du dispositif de maintien du CPI, une variation de la température provoque une variation de voltage, qui convertie en déplacement, présente une allure quasi-linéaire (figure 4-27). La pente des déformations mesurées (pente = $0,8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$) est approximativement égale à la valeur du coefficient de dilatation thermique de l'invar ($\lambda = 1.0$ à $1.5 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$). Cela prouve que la réponse des dispositifs de maintien joue un rôle très important dans les mesures des CPI. Les mesures de déplacement au moyen des capteurs de proximité inductifs en conditions non-isothermes devraient être corrigées en cours du déroulement de l'essai R^2D^2 .

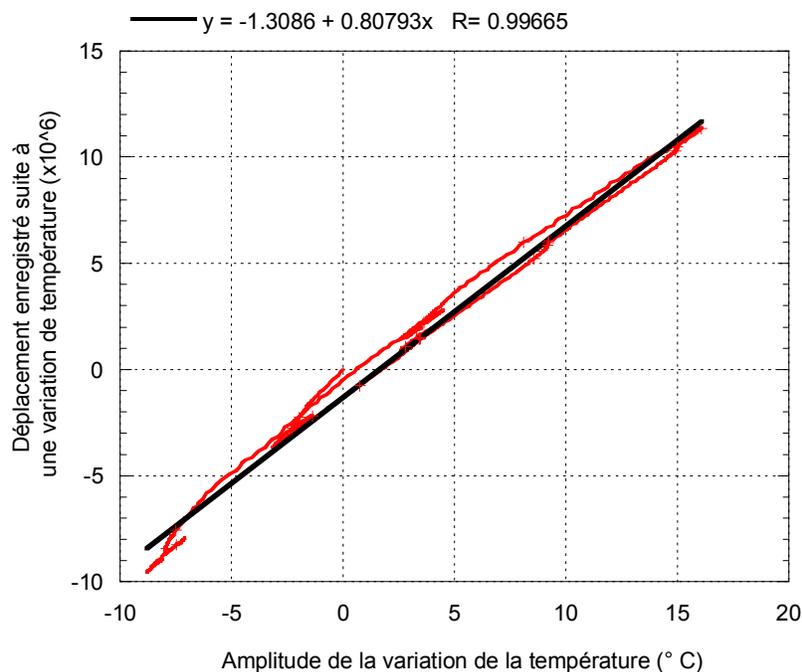


Figure 4-27 : Déplacement enregistré par le CPI suite à une variation de la température

4.3.4 Synthèse comparative : comportement des LVDT vs celui des CPI

D'après cette étude préliminaire, il a été conclu, qu'en conditions isothermes, les calibrations des capteurs LVDT et des CPI demeurent indépendantes de la température d'essai. Celles des LVDT présentent des réponses linéaires, alors que les CPI présentent des réponses

non linéaires (polynomiale d'ordre 5). L'utilisation des CPI nécessiterait une reprogrammation du logiciel R2D2TEMP afin de prendre en considération une courbe de calibration non linéaire.

Lors d'une variation thermique, les deux types de capteurs sont influencés par les variations thermiques : le CPI enregistre un déplacement de $0,8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ alors que les LVDT enregistrent un déplacement de $1,2 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Ces erreurs sont attribuées essentiellement aux comportements des dispositifs de maintien des capteurs. Moins ces dispositifs sont influencés par la température, plus les mesures seront indépendantes des variations thermiques. Le logiciel d'asservissement « r2d2 » devrait être amélioré afin de tenir compte de ces effets parasites.

4.3.5 Amélioration du montage R²D² par Bédard (2009)

L'une des recommandations qui ont découlé de cette étude a été la révision globale de la conception des dispositifs de retenue des capteurs de déplacement. En effet, ces derniers dans leurs configuration initiale ont été fixés sur une base d'acier. Ceci ne représente pas en soit un handicap dans le cas des essais conduits en conditions isothermes comme il a été le cas dans le cadre expérimental de la présente étude puisque le montage globalement atteint son équilibre thermique avant le démarrage de l'essai. Toutefois, dans le cas d'éventuels essais dans des conditions thermiques variables, tel que des essais de détermination du coefficient de dilatation thermique, la conception des dispositifs de maintien des capteurs de déplacement devra être améliorée dans le but de réduire les effets parasites enregistrés et de mesurer les déformations propres du matériau.

Entre 2005 et 2007, les travaux de Bédard (2009) ont été consacrés à l'amélioration de la conception du montage R²D² afin de surmonter les effets parasites sous des conditions thermiques variables. La figure 4-28 représente la conception originale ainsi que la nouvelle conception adaptée. Les LVDT ont été placés sur une plaque en invar, qui à son tour a été fixée sur la base en acier en un seul point, soit vers la section médiane de l'éprouvette de béton. Comme tout autre métal, l'invar se déforme suite à une variation thermique. L'avantage de ce choix est que ce métal présente un très faible coefficient de dilatation thermique ($1,4 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$). La déformation thermique du dispositif de maintien des capteurs de déplacement a été par la suite

introduite dans la démarche d'analyse des déformations afin de soustraire les effets thermiques parasites des résultats.

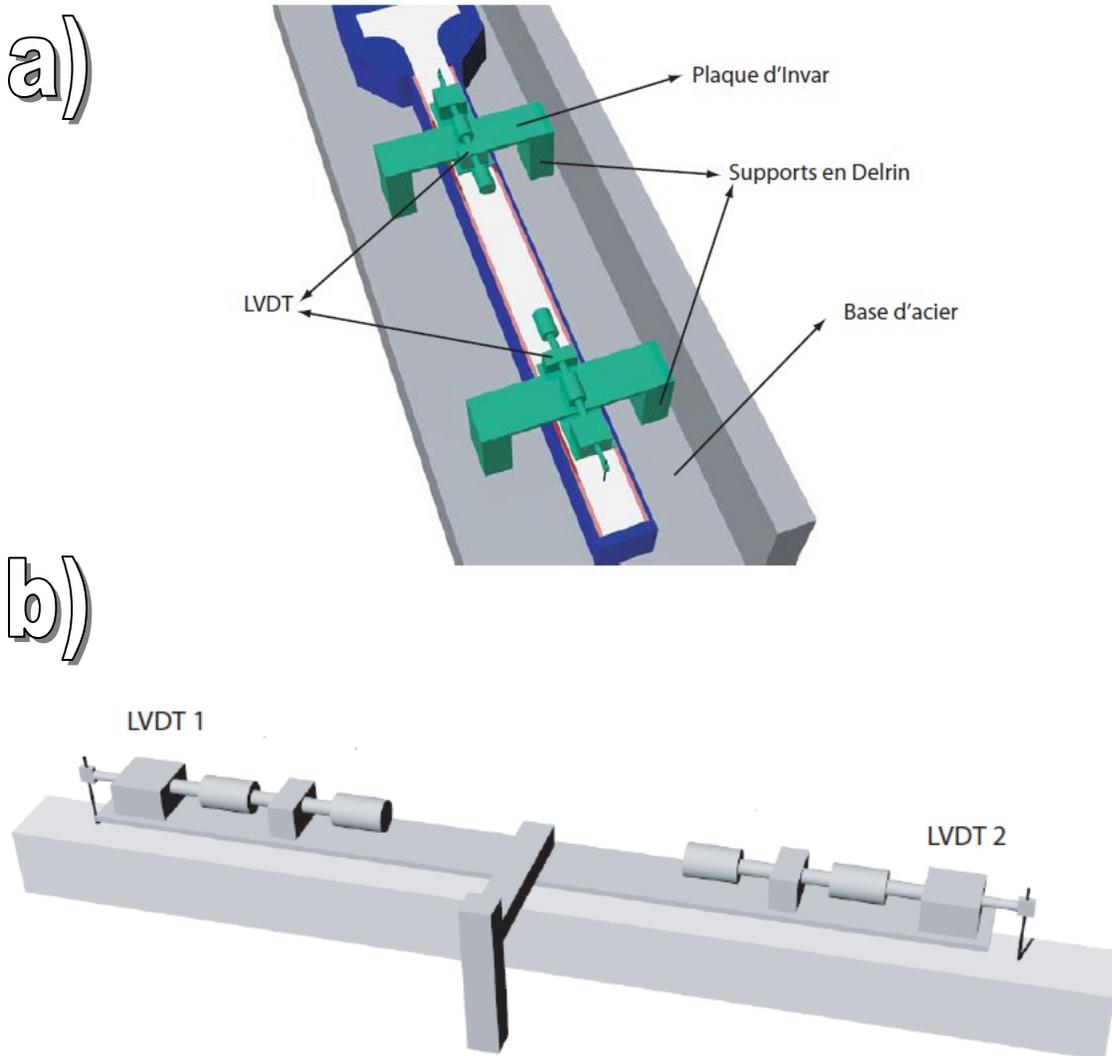


Figure 4-28 : a) configuration originale, b) configuration amélioré par Bédard (2009)

Suite à cette modification majeure, Bédard (2009) a put mener des essais de déterminations de CDT sur les bétons depuis le très jeune âge. Les résultats obtenus sont très intéressants. La figure 4-29 illustre un exemple de résultats obtenus suite à ces travaux.

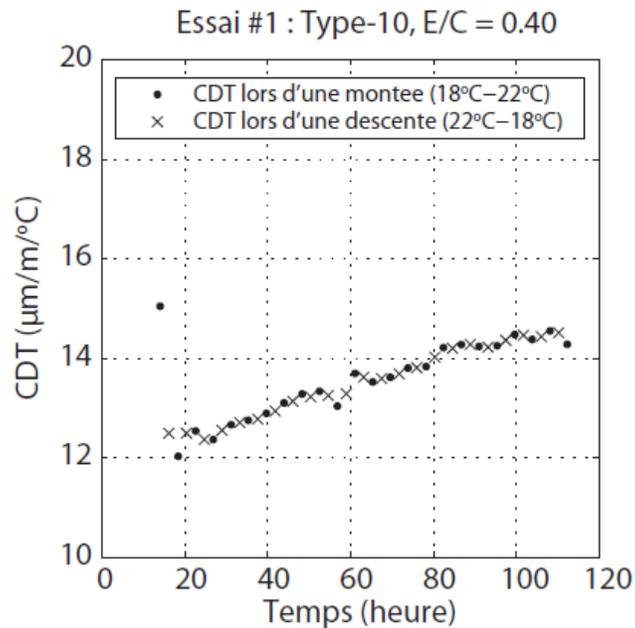


Figure 4-29 : Exemple de résultats de l'évolution du CDT d'un mélange B40T10 (Bédard, 2009)

4.4 Bilans des déformations

Le bilan des déformations propre à chaque dispositif du montage est exprimé différemment. L'équation générale du bilan déformationnel d'un béton s'exprime comme suit :

$$\varepsilon_{\text{Totale}} = \varepsilon_{\text{élastique}} + (\varepsilon_{\text{fluage}}^{\text{propre}} + \varepsilon_{\text{fluage}}^{\text{séchage}}) + (\varepsilon_{\text{retrait}} + \varepsilon_{\text{retrait}}^{\text{séchage}}) + \varepsilon_{\text{thermique}} + \varepsilon_{\text{endommagement}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Plusieurs composantes de déformation de cette équation peuvent être négligées selon les conditions d'exposition. En effet, en conditions isothermes et sans échange hygrométrique les termes reflétant le séchage (le fluage de séchage et le retrait de séchage) ainsi que la déformation due à des variations thermiques seront négligés. De plus, l'hypothèse que le béton se comporte élastiquement (pas endommagé) au cours de l'essai semble être réaliste. Ceci permettra d'éliminer un terme en plus, à savoir les déformations d'endommagement. À chaque incrément de chargement, la déformation totale sera nulle. Le bilan final réduit s'écrit ainsi :

$$\varepsilon_{Totale} = \varepsilon_{élastique} + \varepsilon_{fluage}^{propre} + \varepsilon_{retrait} = 0 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

D'après la loi de Hooke, la déformation élastique peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon_{élastique}(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Où $E(t)$ désigne le module élastique du béton et $\sigma(t)$ désigne la contrainte dans l'éprouvette qui sont fonction du temps.

La déformation de fluage peut être reliée à la déformation élastique au moyen du coefficient de fluage par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{fluage}^{propre}(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \varphi(t) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Où t_0 correspond au moment d'application de la charge externe.

$\varphi(t)$ désigne le coefficient de fluage, défini comme étant le rapport entre le fluage et la déformation élastique initiale. Les déformations élastiques et viscoélastiques peuvent être exprimées en un seul terme.

En combinant les équations 4.3 et 4.4, un module élastique effectif peut être obtenu :

$$\frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} (1 + \varphi(t)) + \varepsilon_{retrait}^{externe}(t) = 0 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\frac{\sigma(t_0)}{E_{eff}(t)} = -\varepsilon_{retrait}^{externe}(t) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$\text{Avec } E_{eff} = \frac{E(t_0)}{1 + \varphi(t)} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Au niveau du dispositif de retrait libre, dans des conditions de conservation hygrométrique, le bilan déformationnel s'écrit ainsi :

$$\varepsilon_{Totale} = \varepsilon_{retrait}^{externe} + \varepsilon_{thermique} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Ces deux termes sont couplés. Par conséquent, la validité des analyses dépend nécessairement de l'approche suivie pour découpler les déformations endogènes des déformations thermiques. L'approche proposée par Sellevold et son équipe sera considérée durant cette étude expérimentale afin de découpler ces deux types de déformation. Ainsi, les essais thermiques auront comme objectif de déterminer l'évolution du coefficient de dilatation thermique (CDT). Les déformations thermiques peuvent être décrites ainsi :

$$\varepsilon_{thermique} = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Par la suite, les déformations endogènes seront évaluées de la façon suivante :

$$\varepsilon_{retrait}^{externe} = \varepsilon_{Totale} - \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 4.10})$$

4.5 Bilans des modifications requises

Le montage R²D² initialement amélioré par Charron semble avoir besoin de quelques modifications pour assurer le bon fonctionnement des essais R²D². Certaines de ces modifications sont nécessaires et d'autres sont souhaitables. Dans la suite, une liste des modifications requises est présentée. Les trois premières semblent être nécessaires, alors que les autres semblent être souhaitables. Notons que les deux premières modifications ont été effectuées dans le cadre des travaux expérimentaux de la présente étude.

1. En raison des fuites d'eau à haute température environnant 40 °C, la conception du système de canalisation de l'eau à travers la paroi du moule devrait être améliorée afin d'assurer un meilleur contrôle du profil thermique à appliquer tout au long des essais R²D².
2. En raison des possibilités très limitées des profils thermiques disponibles au moyen du logiciel du fabricant du bain (Poytemp), le développement d'un autre logiciel de contrôle de la température de l'essai R²D² devrait être envisagé.
3. Les LVDT sont référencés par rapport au bâti du montage R²D² et non pas par rapport à l'éprouvette. En utilisant une telle conception, Altoubat [Altoubat 01] a mesuré de faibles

modules élastiques en comparaison avec ce qui existait dans la littérature. Il a corrigé sa conception tout en fixant cette fois-ci les LVDT directement sur l'éprouvette et non pas sur le bâti du montage. Dans le cas des essais R^2D^2 à des températures contrôlées, le bâti peut subir des déformations d'origine thermique en particulier durant des phases d'échauffement ou de refroidissement. Dans de telles situations, les mesures obtenues par les LVDT ne peuvent pas être interprétées directement sans prendre en considération les corrections nécessaires pour éliminer les déformations du bâti. La conception du montage R^2D^2 ne permet pas de référencer les LVDT directement par rapport à l'éprouvette de béton. Les référencer par rapport à un seul point du bâti localisé vis-à-vis le centre de l'éprouvette permettra d'éliminer cette source d'erreur. Notons que sous des conditions isothermes, le bâti ne développe pas de réponse thermique. Par conséquent, dans le cadre de cette étude, cette modification conceptuelle n'a pas été effectuée.

4. Le bain thermostaté utilise actuellement l'eau comme fluide. Selon les fiches techniques du bain, sa plage normale de variation de température est de [10 °C à 90 °C]. Ceci implique que si nous souhaitons de réaliser des essais à faibles températures (10 °C ou moins) le bain fonctionnera en dehors de sa plage normale. Par conséquent, le bon fonctionnement du bain ne sera plus garanti. L'eau n'est plus un bon choix comme fluide utilisé dans le bain. Par contre, un mélange d'Éthylène Glycol (50%) et d'eau (50%) permet d'assurer une marge de manœuvre entre -20 °C et 100 °C. De plus il est plus stable en termes de viscosité à haute température que l'eau seule.
-

Chapitre 5

Étude expérimentale

Cette étude a comme objectif de mieux comprendre le comportement des matériaux cimentaires dans des conditions réelles d'exploitation, où les conditions de retenue et d'exposition sont très diversifiées. Le volet expérimental a été amorcé par les travaux d'amélioration du montage de retrait restreint R²D² tel que décrit au chapitre précédent. Ainsi la conception du système de canalisation de l'eau du bain a été modifiée en utilisant des conduites en cuivre pour éliminer les risques de fuites. Le logiciel R2D2Temp a été développé sous le langage de programmation Qbasic afin de permettre d'appliquer des profils thermiques sans restriction.

5.1 Introduction

5.1.1 Convention et notations

Afin de faciliter l'identification des formulations, la notation suivante est utilisée : « BXX-YYY ». La première partie constituée par la lettre « B » suivie de deux chiffres symbolise un mélange de béton ayant un rapport eau/ciment égal à la valeur indiquée divisée par 100 « ex. B35 : béton ayant un rapport eau/ciment = 0,35 ». La deuxième partie « YYY » désigne le type de ciment utilisé. Ainsi, les abréviations T10, T50 et WH1 désignent respectivement un ciment de type 10, un ciment de type 50 et un ciment Whitehall1. La notation « ISOXX » désigne un essai isotherme à la température XX °C. Certaines nomenclatures seront suivies de la lettre « C » pour identifier les essais réalisés par Charron (2002). Certains essais de fendage ont été identifiés par la lettre « F » précédant l'identifiant de la formulation.

5.1.2 Programme expérimental

Les essais réalisés au cours de la présente étude sont présentés en trois phases. D'une façon sommaire, **la première phase expérimentale** expose des essais réalisés en conditions isothermes. Trois températures isothermes ont été considérées : 10 °C, 20 °C et 30 °C. Dans une optique de continuité des travaux de recherches antérieures, les deux formulations, B35T10 et B45T10 testées par Charron (2002), ont été reprises au moyen du montage R²D². Au cours de **la deuxième phase expérimentale**, les ciments type10 (T10), type 50 (T50) et Whitehall1 (WH1) ont été mis à l'essai. Ainsi, six formulations ont été expérimentées, à savoir B30T10, B40T10, B30WH1, B40WH1, B30T50 et B40T50. Tous les essais de cette phase ont été réalisés sous des conditions thermiques isothermes à 20 °C. **La troisième phase expérimentale** a été planifiée dans le but d'évaluer l'influence de la température de cure sur le comportement des bétons au jeune âge. Ainsi les formulations expérimentées durant la deuxième phase ont été réexaminées sous des conditions thermiques isothermes à 38 °C.

Il est à noter que d'autres essais ne faisant pas partie du présent programme expérimental ont été réalisés. Il s'agit essentiellement d'essais réalisés en collaboration avec d'autres centres de recherche à des fins de comparaison et de validation. La subdivision en phases reflète à la fois les divers objectifs poursuivis et la variété des paramètres et matériaux étudiés.

5.1.3 Méthode de fabrication

La procédure de préparation des mélanges a été inspirée des travaux de Charron (2002). Une mesure de la teneur en eau des granulats (pierre et sable) est en premier effectuée pour corriger les quantités d'eau et de granulats en conséquence. Une fois que tous les constituants ont été préparés, le ciment et le sable sont introduits dans un malaxeur ayant 20L de capacité puis malaxés dans un premier temps pendant une minute. Par la suite le trois quart du volume d'eau est ajouté graduellement. À la fin de la deuxième minute, la pierre est introduite et le mélange est malaxé pendant trois minutes. Tout de suite après, le malaxeur est arrêté puis couvert afin de réduire les pertes d'eau par évaporation. Cette attente se prolonge trois minutes. Le couvert est par la suite enlevé, et le malaxeur est remis en marche. À ce moment, le superplastifiant dilué

dans le quart restant d'eau est ajouté. Le malaxage se poursuit encore pour quatre minutes supplémentaires. Le tableau 5.1 résume les étapes de cette séquence de malaxage. Toute suite après, les propriétés à l'état frais du matériau sont déterminées. Ainsi, l'affaissement, la teneur en air et la masse volumique sont mesurés pour chaque mélange selon les normes ASTM C143, ASTM C138 et ASTM C231 (ASTM 2001) respectivement.

Tableau 5.1 : Différentes étapes de la séquence de malaxage

Séquence de malaxage	
Malaxer le ciment et le sable à l'état sec	1 mn
Ajouter graduellement 75% de l'eau et continuer le malaxage	1 mn
Ajouter la pierre et malaxer	3 mn
Arrêter le malaxeur et couvrir le mélange	3 mn
Redémarrer le malaxage en ajoutant le SP dilué dans les 25% restantes d'eau et continuer le malaxage	4 mn
Durée totale.....	12 mn

5.2 Étude expérimentale – Phase I

5.2.1 Matériaux

Dans un esprit de continuité des essais réalisés antérieurement par d'autres chercheurs, les mêmes formulations utilisées par Charron (2002) ont été testées. Par conséquent, au cours de cette première série d'essais, appelée phase I, un seul ciment portland ordinaire a été utilisé dans toutes les formulations (ciment type 10). Deux rapports eau/ciment ont été ciblés, soit 0,35 et 0,45. Ainsi, les deux formulations suivantes ont été reproduites : B35T10 et B45T10. Les propriétés physiques et chimiques du liant hydraulique sont présentées dans le tableau 5.2. La pierre ayant une granulométrie variant de 2,5 à 10 mm a été lavée, séchée à température ambiante puis conservée dans des bacs. De même, le sable a été conservé dans des bacs afin d'utiliser un même lot ayant les mêmes propriétés physiques pour tous les essais tout au long de cette première phase (tableau 5.3). Les deux mélanges ont des volumes de pâte identiques. Les compositions détaillées des formulations figurent dans le tableau 5.4. Les tableaux 5.5 et 5.6 illustrent respectivement les propriétés à l'état frais et les propriétés mécaniques des formulations en question. Notons que les propriétés mécaniques ont été déterminées par Charron (2002).

Les granulats (sable et pierre) ont été conservés à la température de l'essai (± 2 °C) durant une semaine avant la date prévue de réalisation de l'essai R²D². Cette approche, utilisée par Charron (2002), a permis d'atteindre les températures d'essais R²D² plus rapidement et de ne pas exposer le matériau à un choc thermique. Le superplastifiant à base de naphtalène a été utilisé afin d'assurer une bonne maniabilité et de favoriser une bonne dispersion des grains de ciment.

Tableau 5.2 : Propriétés physiques et chimiques du ciment type 10.

Composition chimique		Composition minéralogique	
SiO ₂ (%)	20,4	C ₃ S (%)	52
Al ₂ O ₃ (%)	5,5	C ₂ S (%)	20
Fe ₂ O ₃ (%)	2,3	C ₃ A (%)	11
CaO (%)	63,3	C ₄ AF (%)	7
MgO (%)	2,7		
SO ₃ (%)	3,7		
Alcalis	0,3		
		Propriétés physiques	
		Surface spécifique (m ² /kg)	382

Tableau 5.3 : Propriétés physiques des granulats

Propriétés physiques	Sable	Pierre
Densité à l'état saturé	2,63	2,75
Absorption (%)	0,81	0,95
Module de finesse	2,41	5,60

Tableau 5.4 : Formulations expérimentées

Constituant	B35T10	B45T10
Ciment (kg/m³)	464	405
Eau (kg/m³)	162	182
Sable (kg/m³)	875	875
Pierre (kg/m³)	875	875
Superplastifiant (SP) (ml/kg de ciment)	12	3

Tableau 5.5 : Propriétés à l'état frais

Caractéristiques	B35T10	B45T10
Masse vol. (kg/m³)	2401	2393
Affaissement (mm)	190	80
Teneur en air (%)	3,1	3,0
Température (°C)	25	23

Tableau 5.6 : Résistances mécaniques- Charron (2002)

Caractéristiques	B35T10	B45T10	B35T10	B45T10	B35T10	B45T10
	Iso 10 °C	Iso 10 °C	Iso 20 °C	Iso 20 °C	Iso 30 °C	Iso 30 °C
f_c 7 jours (MPa)	45,9	41,3	63,6	55,9	67,0	57,1
f_c 28 jours (MPa)	58,2	49,8	68,2	61,9	74,3	63,7
f_t 7 jours (MPa)	3,4	3,1	2,9	2,8	3,1	2,9
E_{7jours} (MPa)	25,1	20,6	27,1	24,1	30,4	28,8

Les essais réalisés au cours de cette portion de la première phase expérimentale sont présentés au tableau 5.7. Trois conditions thermiques isothermes ont été appliquées : 10 °C, 20 °C et 30 °C.

Tableau 5.7 : Profil thermiques isothermes

Formule du mélange	ISO10	ISO20	ISO30
B35T10	1 essai	3 essais	1 essai
B45T10	---	3 essais	1 essai

Afin de distinguer les essais de Charron, le suffixe « C » a été ajouté à la codification de ses essais (ex. B45-ISO30-C). Au moins trois jours avant la date de la réalisation de l'essai R²D², les matériaux de gâchage ont été maintenus à une température très proche de la température d'essai soit dans une chambre froide (dans le cas des essais isothermes à 10 °C), soit dans une chambre chauffée par des plaques chauffantes (dans le cas des essais isothermes à 30 °C). En procédant ainsi, le temps nécessaire pour atteindre la température d'essai avec le montage R²D² est largement réduit. Le critère de démarrage est par conséquent atteint plus rapidement.

Les résultats obtenus au cours de la première phase de cette étude ont été comparés à ceux obtenus par Charron (2002). Par la suite, ils ont été analysés, en considérant notamment l'influence du rapport eau/ciment et l'influence de la température.

5.2.2 Répétabilité des essais R²D²

Au cours de cette première phase expérimentale, la même procédure expérimentale ainsi que les mêmes lots de matériaux employés par la présente phase expérimentale ont été utilisés par Charron (2002). Il sera ainsi évident que toutes différences entre les résultats devraient être attribuées en premier lieu à la dépendance des résultats à l'utilisateur du montage expérimental. Rappelons que Charron a réalisé plusieurs essais R²D² pour un même mélange à plusieurs températures isothermes. D'après l'auteur, les résultats ont montré une reproductibilité intra gâchées satisfaisante (Charron, 2002). Par conséquent, un seul essai par mélange, par condition thermique isotherme a été pris en considération dans l'exercice de comparaison des résultats avec ceux de la présente étude. Les résultats à comparer sont essentiellement les déformations endogènes libres, les déformations de fluage, les contraintes enregistrées et les modules d'Young enregistrés.

Les mesures des déformations endogènes totales des essais à 10 °C et 30 °C semblent présenter un certain décalage entre les résultats obtenus par Charron (2002) et la présente étude, en particulier durant les premières heures d'hydratation (figures 5-1 et 5-2). Une autre différence a été observée en particulier à 30 °C, la phase de gonflement au début des essais est plus prononcée dans le cadre de cette étude. Ces constatations mettent en question en premier lieu la procédure d'échauffement ou de refroidissement avant d'atteindre le critère de démarrage à la température de l'essai. C'est uniquement après atteinte du critère de démarrage que les cinétiques d'évolution des déformations endogènes totales semblent être similaires.

Au bout de 7 jours, à l'exception des essais réalisés à 10 °C où les amplitudes des déformations endogènes semblent être similaires, la comparaison des mesures des déformations endogènes totales ne démontre pas de cohérence. Le tableau 5.8 illustre les variations des

amplitudes observées entre les essais de Charron et celles de la présente étude et ce pour les six formulations étudiées. Avant de conclure sur ces constatations, il faudra analyser les résultats des déformations endogènes décalées.

Tableau 5.8 : Écart des amplitudes des déformations totales au bout de 7 jours

Formule du mélange	ISO10	ISO20	ISO30
B35T10	0%	+ 40%	+ 120%
B45T10	0%	+ 30%	+ 200%

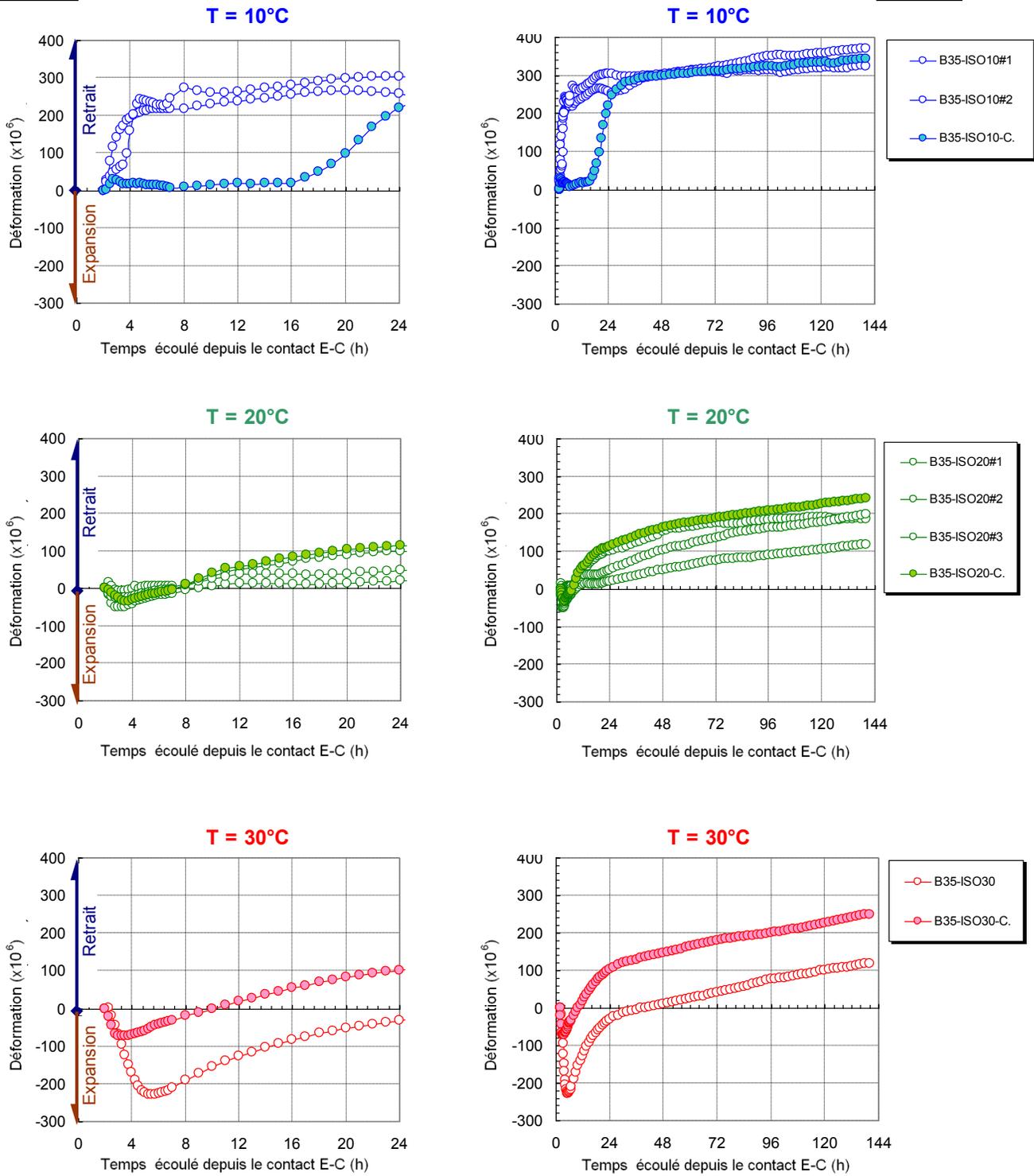


Figure 5-1 : Mesures des déformations endogènes totales pour un rapport E/C = 0,35 – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

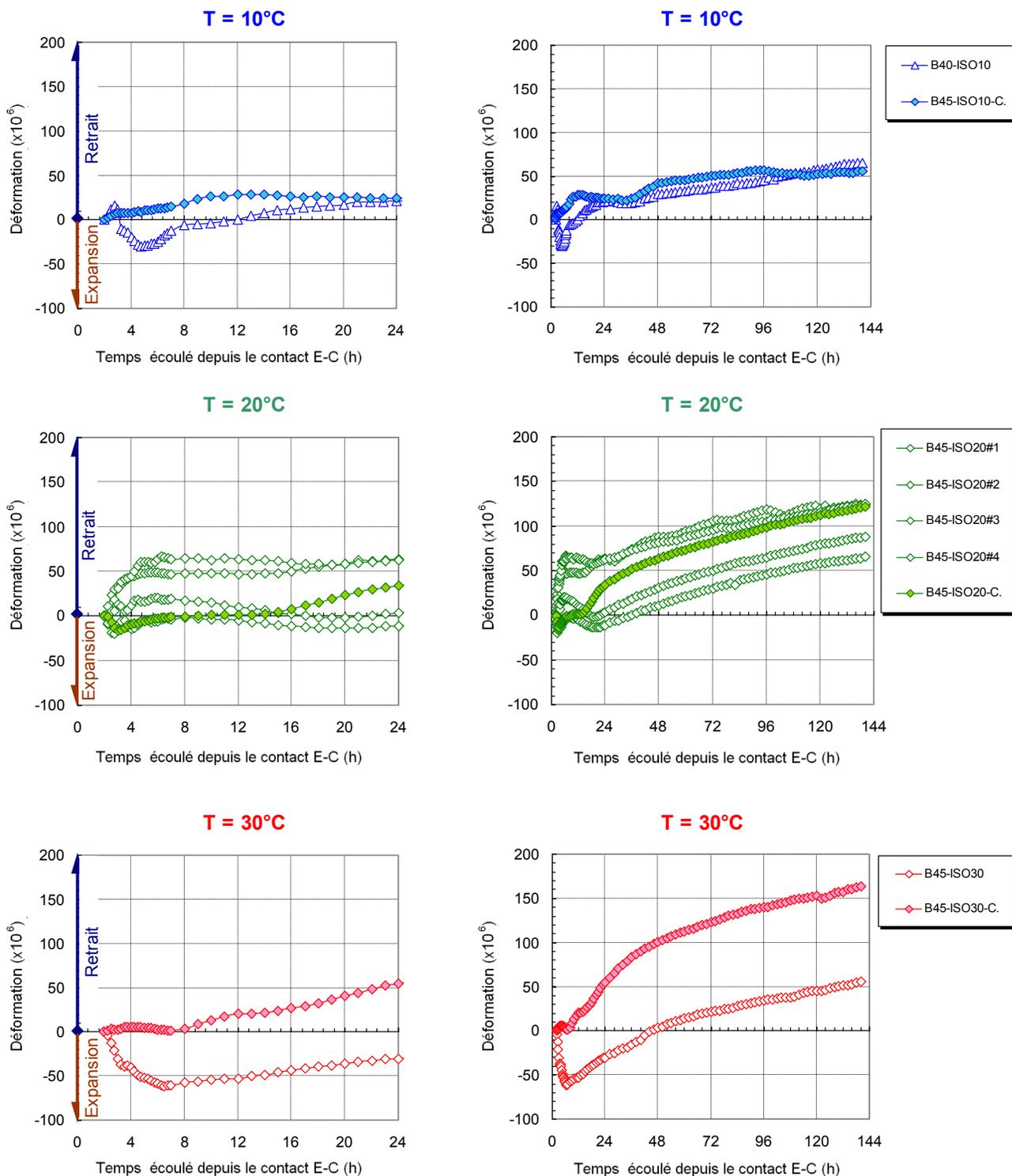


Figure 5-2 : Mesures des déformations endogènes totales pour un rapport E/C = 0,45 – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

Le zéro des déformations endogènes décalées correspond au moment de l'atteinte du critère de démarrage (contrainte = 0,01 MPa) tout en s'assurant que la température de l'essai a été obtenue. Les résultats sont présentés sur les figures 5-3 et 5-4. À l'exception de la formulation B35-ISO10, les déformations endogènes décalées, présentent des profils très similaires en termes de cinétiques. Toutefois, les mesures des amplitudes ne semblent pas présenter la même tendance. Le tableau 5.9 résume en termes de pourcentage les écarts des mesures des amplitudes entre les essais de Charron et ceux de la présente étude.

Tableau 5.9 : Écart des amplitudes des déformations totales au bout de 7 jours

Formule du mélange	ISO10	ISO20	ISO30
B35T10	+ 220%	+ 25%	- 15%
B45T10	- 100%	+ 65%	+ 40%

Notons que dans le cadre de cette étude, le critère de démarrage du mélange B35-ISO10 a été atteint au bout de six heures, alors que le démarrage de l'essai de Charron (2002) a été effectué dix-sept heures après le contact eau/ciment. Une telle durée est très longue. En examinant le comportement d'ensemble du mélange en question, la courbe de déformation endogène présente une phase de retrait très prononcée au début de son essai B35-ISO10-C. Ceci semble être attribué essentiellement à la phase de refroidissement pour atteindre la température de l'essai de 10 °C. Malgré que le montage R²D² soit capable d'atteindre une telle température dans un délai beaucoup plus court, au cours de cet essai, Charron [2002] n'a pas pu atteindre la température de l'essai (10 °C) qu'au bout de dix-sept heures. Il se peut qu'une erreur d'ordre technique soit la cause de ce retard en asservissement thermique. Les résultats des amplitudes des autres formulations ne montrent pas une marge d'écarts cohérents.

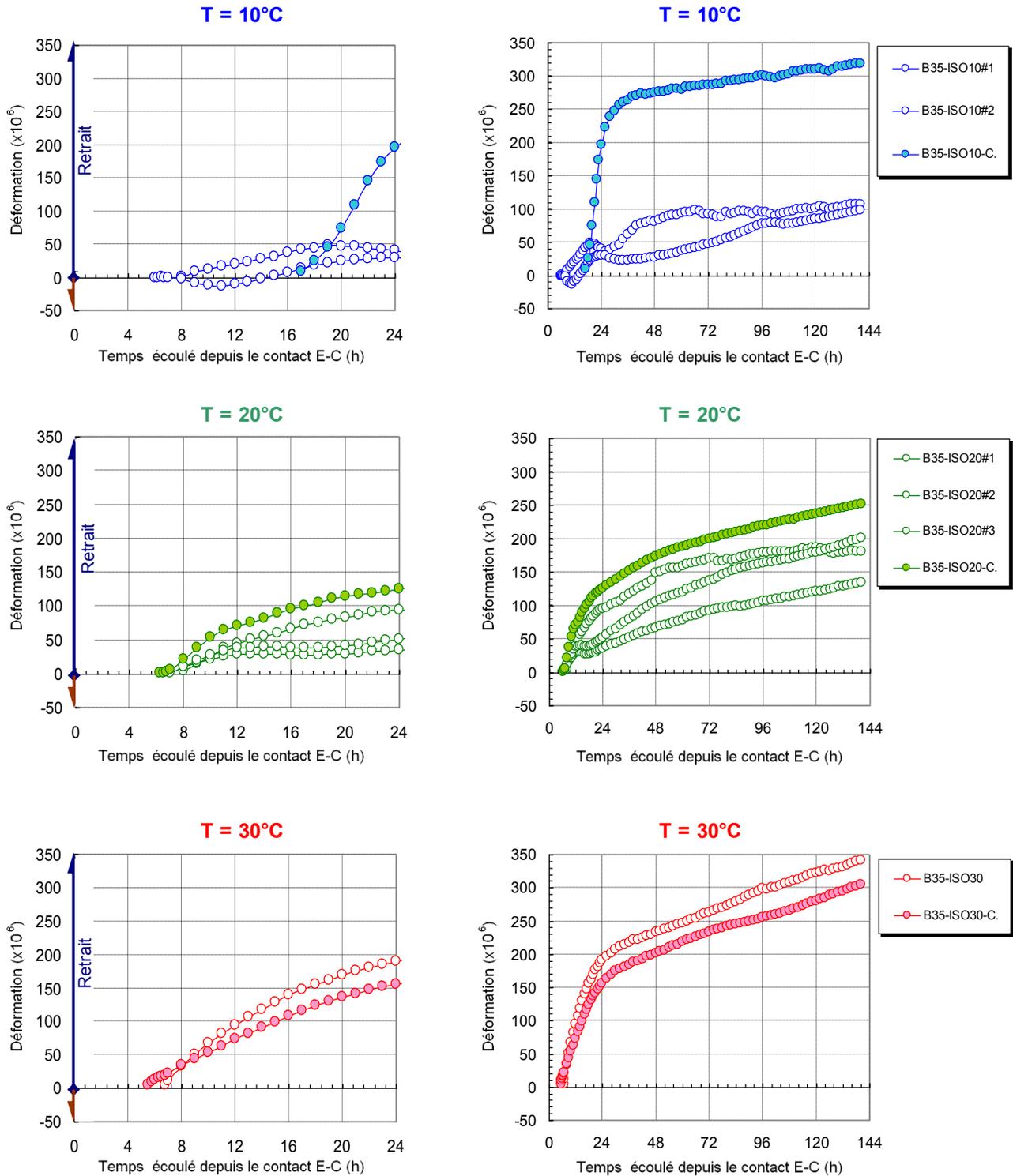


Figure 5-3 : Mesures des déformations endogènes décalées pour un rapport $E/C = 0,35$ – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

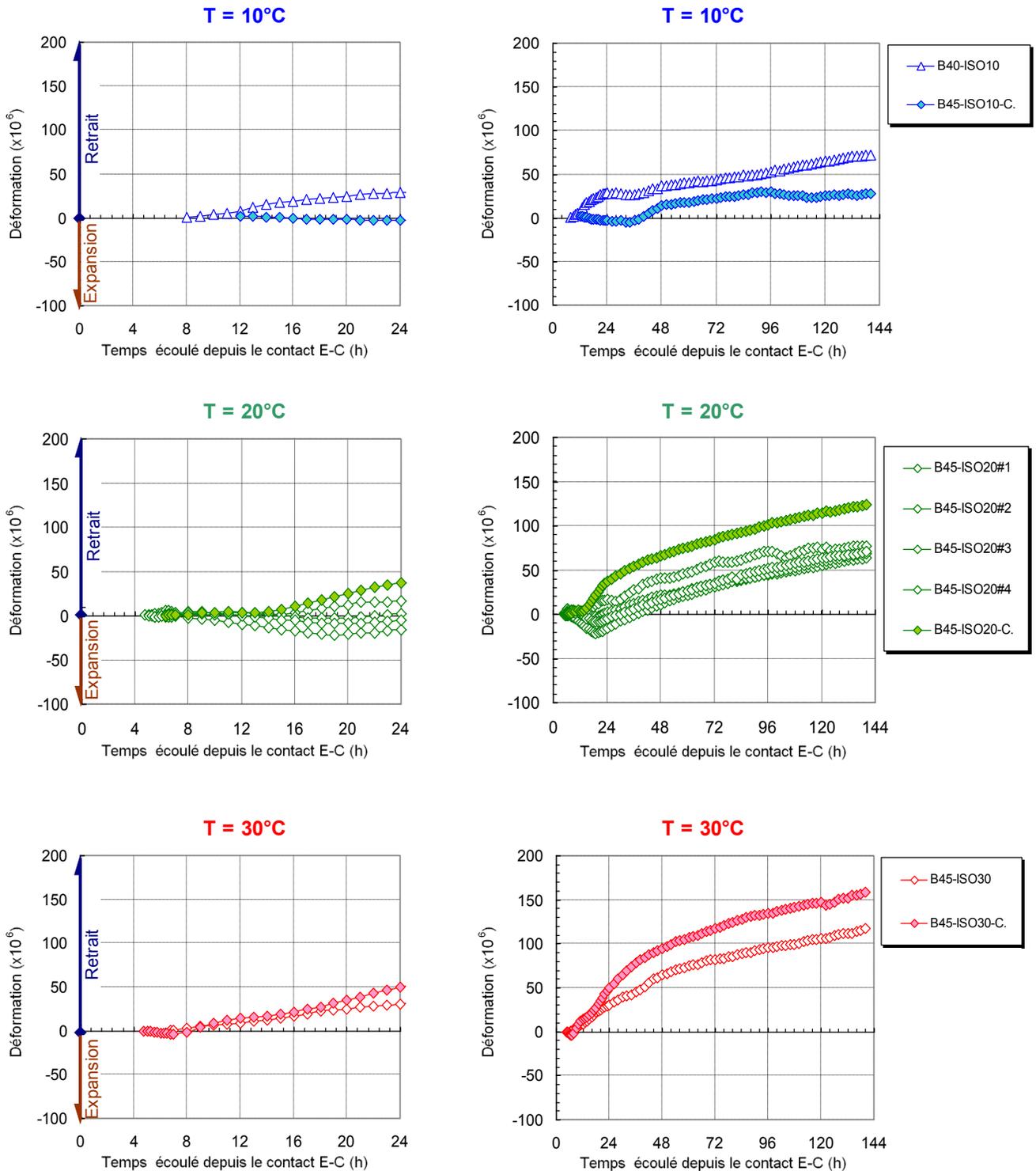


Figure 5-4 : Mesures des déformations endogènes décalées pour un rapport E/C = 0,45 – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

Les mesures des contraintes développées sont représentées sur les figures 5-5 et 5-6. Il est très difficile de comparer ces données expérimentales point par point puisque les moments de changement des paliers correspondants aux retours des déformations à zéro ne se produisent pas nécessairement aux mêmes moments entre tous les essais. Encore une fois, les courbes des contraintes présentent des allures globales semblables, mais en termes d'amplitudes, les mesures de Charron présentent des écarts avec les résultats de cette recherche. Les mesures des modules élastiques (figure 5-7) ont été déduites analytiquement en se basant sur les mesures des déformations élastiques et celles des contraintes aux moments de changement des paliers. Vu que les mesures des contraintes présentent certains écarts, il est évident que les modules élastiques présenteront par conséquent des écarts. Bien que les allures globales des courbes des modules soient similaires, les amplitudes présentent des marges d'écarts importants. Comme pour les mesures des modules élastiques, les mesures des déformations de fluage (figures 5-8 et 5-9) ont été obtenues analytiquement en se référant aux mesures des déformations endogènes libres mesurées par le montage libre et les déformations totales mesurées par le montage asservi. Les résultats permettent de montrer des allures et des cinétiques similaires des courbes de déformations, toutefois les amplitudes présentent des écarts très variables.

Lorsqu'on compare les courbes de déformation de Charron et celles du présent programme, on constate un assez bon accord de comportement après une période pouvant varier de quelques heures à 24, voire 36 heures selon le cas. De plus, bien que les amplitudes des contraintes présentent certains écarts, les courbes d'évolution montrent une relativement bonne reproductibilité. Il est évident que les fines mesures au très jeune âge au moyen du montage R^2D^2 sont très sensibles à plusieurs paramètres matériaux et expérimentaux. Les écarts de mesures durant les premières heures d'hydratation peuvent s'expliquer par des biais expérimentaux encore non parfaitement contrôlés tels que la procédure de pré-conditionnement thermiques des granulats et la procédure d'atteinte de la température cible des essais isothermes avant d'atteindre le critère de démarrage, comme ils peuvent s'expliquer par des différences sur le plan matériau telles que des lots d'approvisionnement des divers matériaux constitutifs non nécessairement identiques ou des différences au niveau des quantités d'adjuvants (superplastifiant) utilisées. Hormis les différences observées dans les premières heures suivant la mise en place, nous pouvons conclure que la répétabilité des essais inter-opérateurs est satisfaisante.

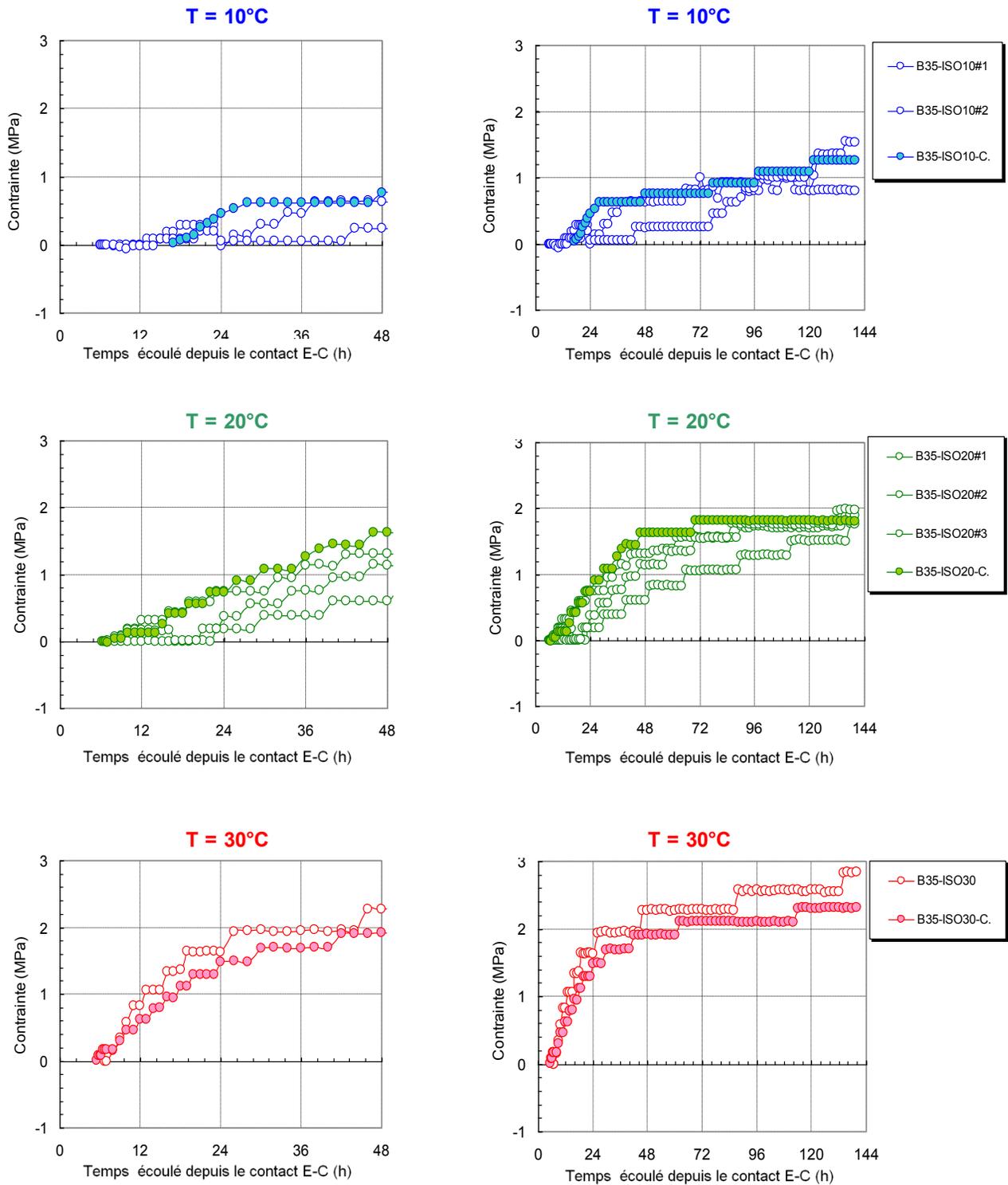


Figure 5-5 : Mesures des contraintes pour un rapport E/C = 0,35 – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

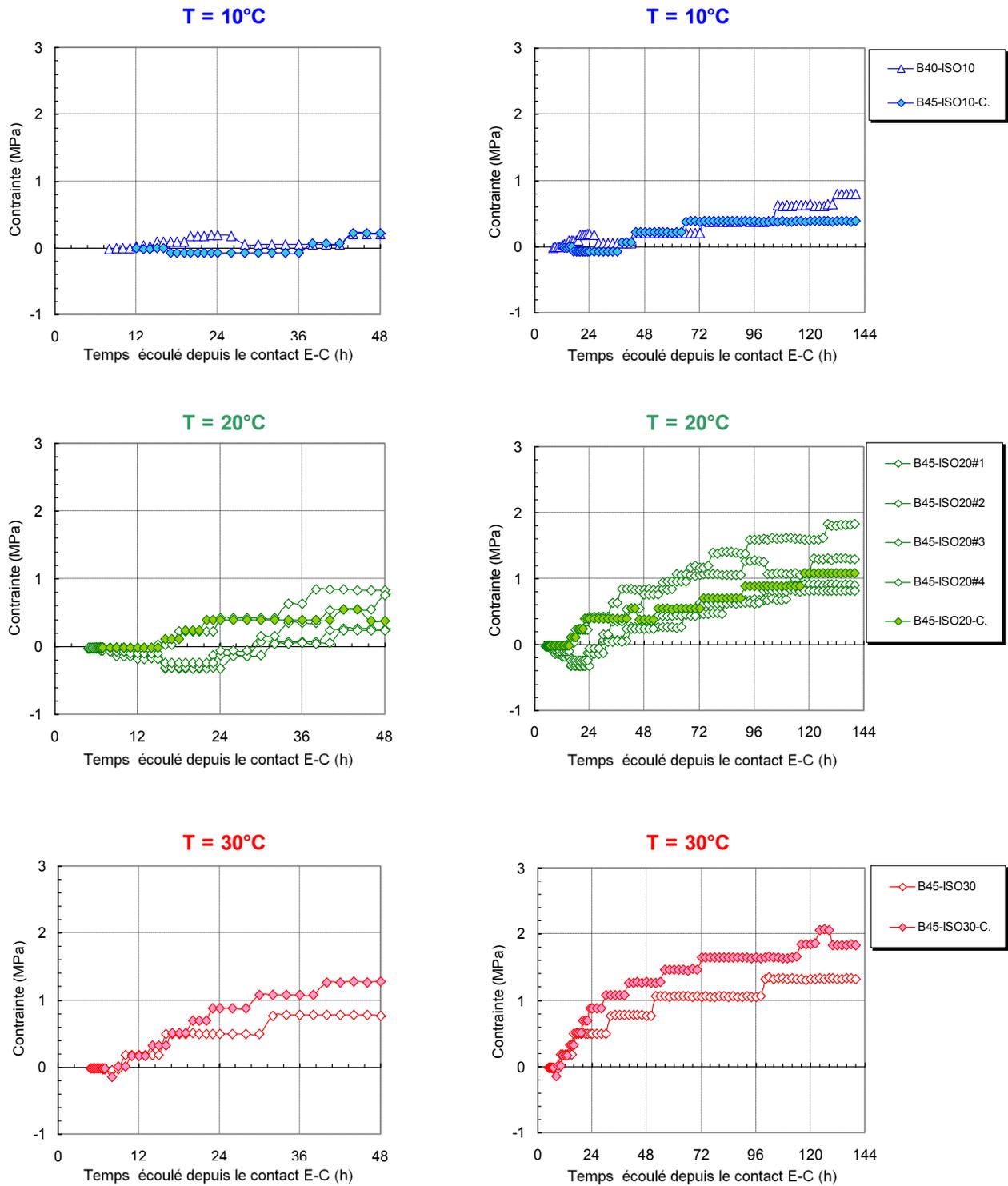


Figure 5-6 : Mesures des contraintes pour un rapport E/C = 0,45 – Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

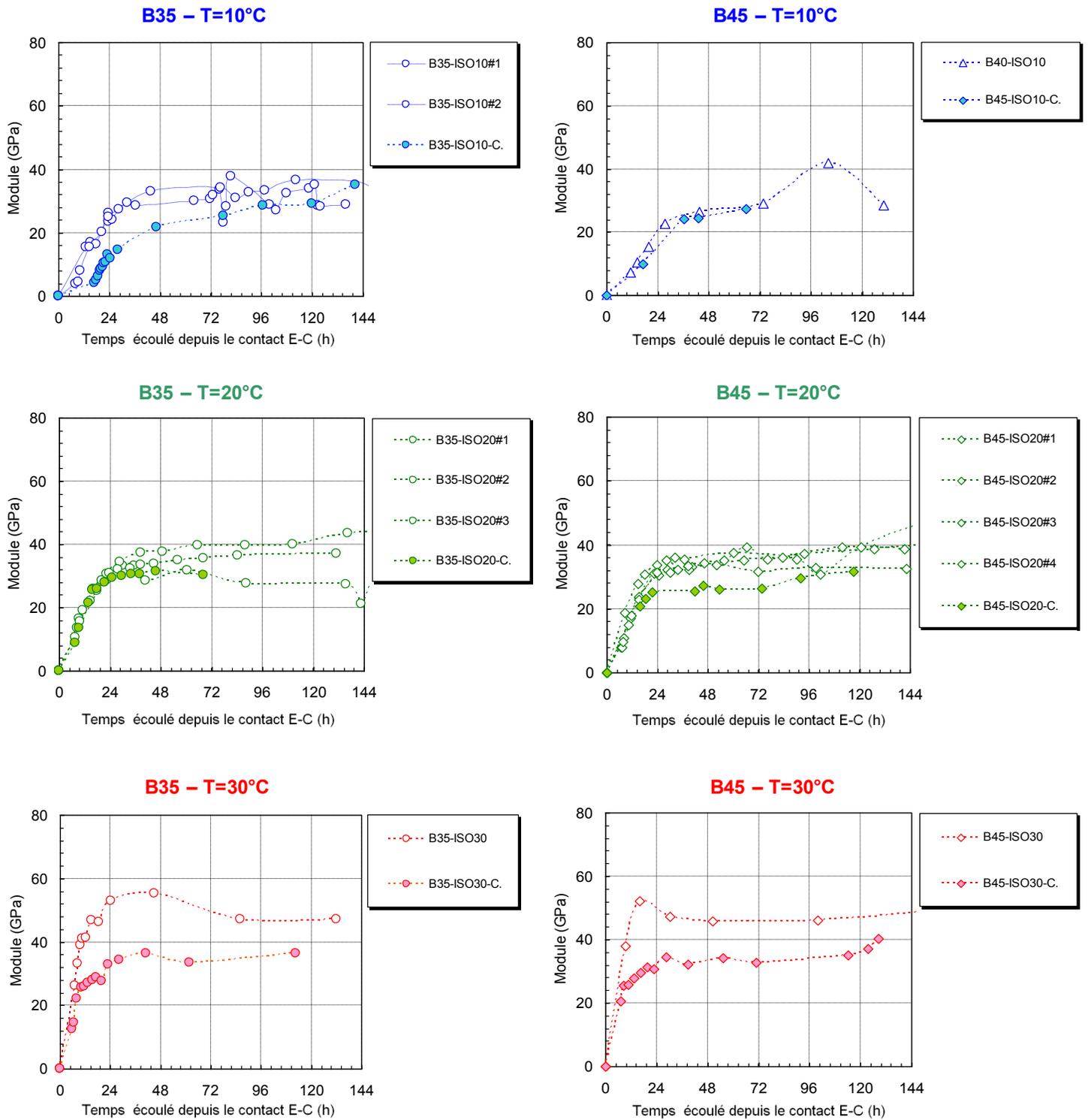


Figure 5-7 : Mesures des propriétés élastiques (module d'Young) - Comparaison avec les résultats obtenus par Charron [2002].

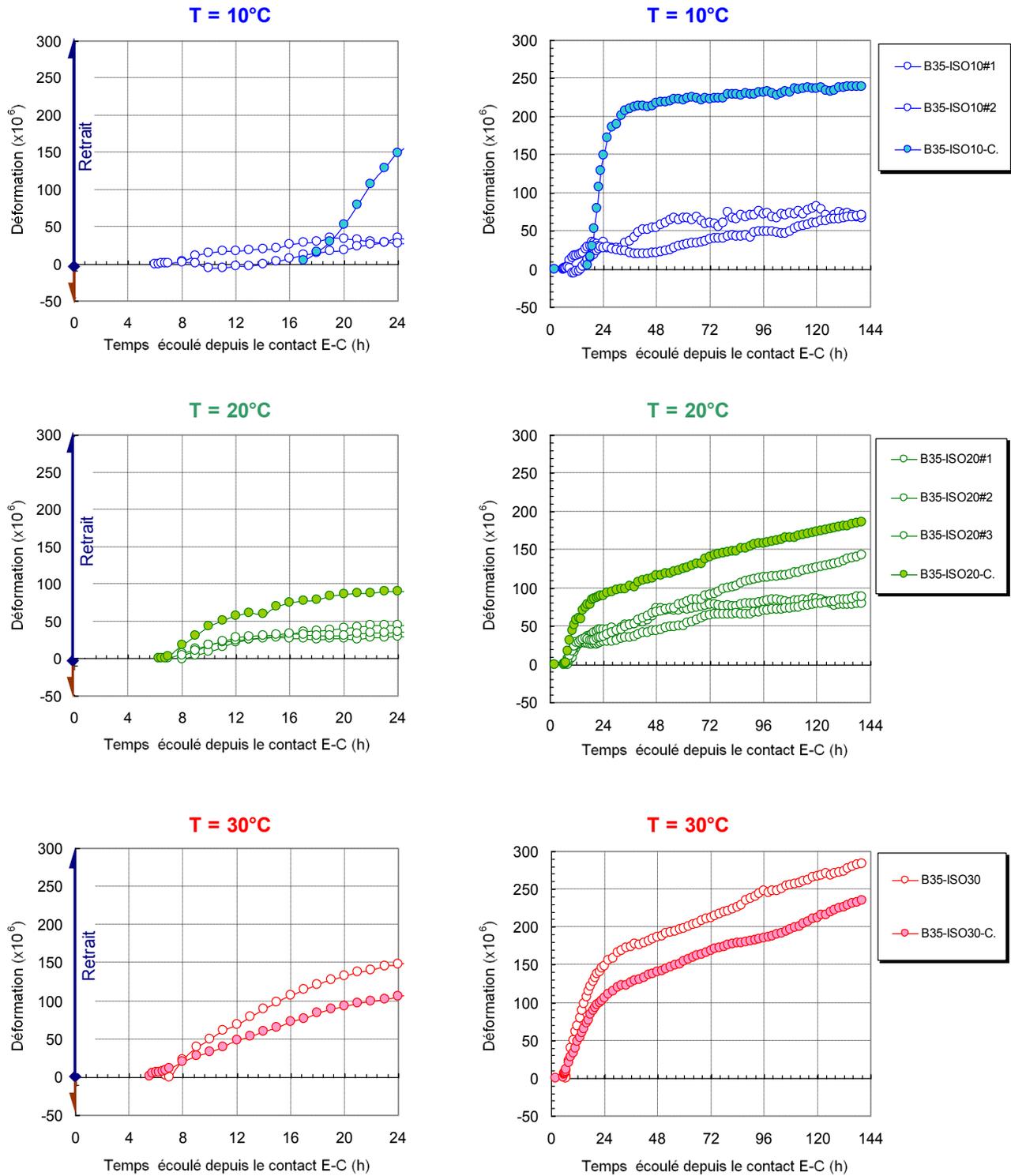


Figure 5-8 : Mesures des déformations de fluage pour un rapport E/C = 0,35 – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].

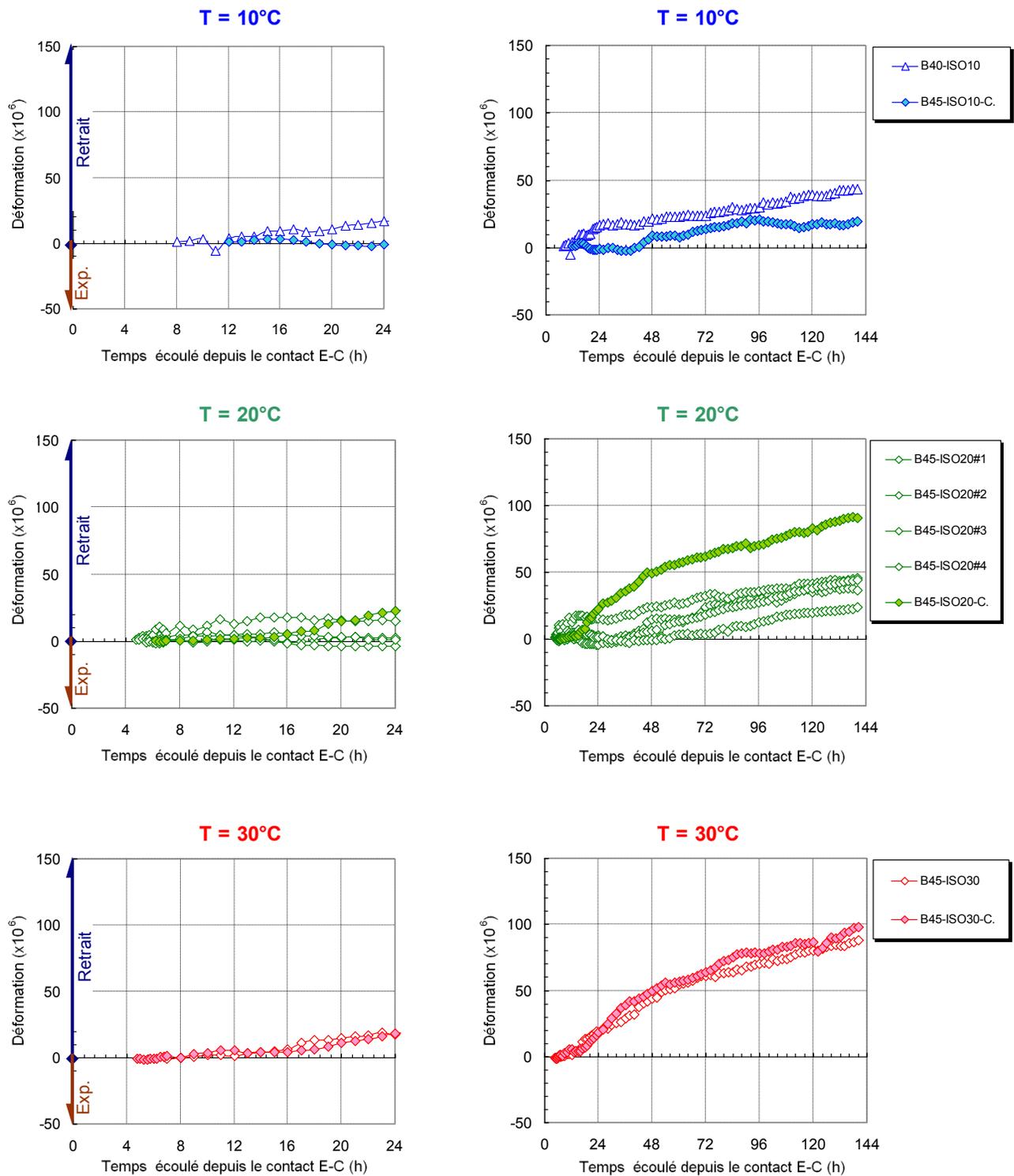


Figure 5-9 : Mesures des déformations de fluage pour un rapport E/C = 0,45 – Comparaison avec les résultats obtenues par Charron [2002].

5.2.3 Influence du rapport E/C

Plusieurs recherches ont démontré que le rapport eau/liant joue un rôle primordial dans le processus d'hydratation ainsi que dans l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires [Justnes et coll. 96 ; Toma et coll. 00 ; Tazawa et coll. 95]. La notion de la durabilité est intimement liée à ce paramètre. Dans la présente section, l'influence du rapport eau/ciment sur le comportement des bétons au jeune âge est examinée en analysant les résultats des essais R²D². Dans cette section, le rôle du rapport eau/ciment est examiné pour les trois régimes thermiques isothermes suivants: 10 °C, 20 °C et 30 °C. Seulement deux rapports eau/ciment ont été utilisés au cours de cette première phase expérimentale, à savoir E/C= 0,35 et E/C= 0,45.

Les résultats issus des essais R²D² démontrent que dans des conditions isothermes à 10 °C, 20 °C et 30 °C, les déformations endogènes totales des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,35 sont plus importantes que celles produites par les bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,45 (figure 5-10). Ces résultats sont concordants avec les résultats de la documentation [Justnes et coll. 96 ; Tazawa et coll. 95 ; Charron 02]. Plus le rapport eau/ciment est faible, plus la matrice cimentaire est dense, dû à un réseau capillaire plus fin. L'auto-dessiccation résultante de la consommation de l'eau interstitielle par réaction d'hydratation est par conséquent plus importante. Selon la théorie de Laplace, plus les rayons des pores capillaires sont faibles, plus les tensions capillaires sont importantes. Ceci permet d'expliquer en grande partie les fortes déformations endogènes observées pour les bétons à faible rapport eau/ciment (E/C=0,35) par comparaison à celles enregistrées pour les bétons à fort rapport eau/ciment (E/C=0,45).

Les mesures des déformations totales ont présenté un gonflement pour les essais menés à 30 °C (figure 5-1 et 5-2). Ce gonflement n'a pas été observé sur les courbes des déformations décalées. Ceci signifie que cette expansion s'est développée durant la période d'échauffement avant d'atteindre le critère de démarrage et par conséquent avant d'atteindre la température cible de l'essai à 30 °C. Cette expansion est probablement due à une réponse thermique du béton. En effet, comme tout matériau, une augmentation de la température génère une expansion qui varie en amplitude selon le coefficient de dilatation du matériau en question. Si l'on considère un coefficient de dilatation thermique du béton au très jeune âge entre 12 et 20 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, une variation de 10 °C devrait induire approximativement une déformation de l'ordre de 120 à 200

$\mu\text{m/m}$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les mesures des gonflements observés expérimentalement. Le mécanisme d'absorption de l'eau de ressuage permet à lui aussi de contribuer en partie au développement de cette phase de gonflement [Bjøntegaard, 99]. Toutefois, le premier mécanisme semble être prédominant.

Les mesures montrent que pour les trois régimes thermiques isothermes, plus le rapport eau/ciment est faible, plus les amplitudes des contraintes sont élevées (figure 5-5 et 5-6). Cependant, les mesures des modules d'Young ne semblent pas être affectées par le rapport eau/ciment, et ce pour les différentes conditions isothermes 10 °C, 20 °C et 30 °C (figure 5-7). Ceci est en contradiction avec les travaux d'autres chercheurs. Pertué (2008) a montré au moyen d'essais mécaniques qu'un rapport eau/ciment élevé a comme effet de réduire les mesures des modules élastiques. Selon l'auteur, avec un rapport eau/ciment élevé, la distance inter-granulaire est plus importante et les liaisons entre les grains et les hydrates seront plus lentes à se produire. Sachant que ces liaisons sont directement liées à l'évolution de la rigidité du matériau, un rapport eau/ciment élevé engendre ainsi un module élastique plus faible. De ce fait, il faudra analyser avec précaution les mesures des modules élastiques issus des essais R^2D^2 .

Tout changement du rapport eau/ciment affecte nécessairement les modules élastiques et la rigidité du béton. Selon Atrushi (2003), sous l'effet de la même contrainte appliquée, un faible rapport eau/ciment induira de plus importants modules élastiques et résistances. Ceci induira nécessairement une réduction du fluage. Cette observation est cohérente avec les mesures issues des essais R^2D^2 . En effet, il a été constaté que plus le rapport eau/ciment est important plus la composante de fluage est réduite. De plus, les résultats démontrent que, pour les deux rapports eau/ciment, l'évolution de fluage est similaire à celle des déformations endogènes (figure 5-8 et 5-9). Ces résultats sont sans doute attribuables au fait que ces deux phénomènes ne sont pas indépendants [Neville 00].

5.2.4 Influence de la température

Afin d'évaluer l'effet de la température sur les mesures des déformations endogènes totales, les résultats de chaque formulation de béton ayant des rapports eau/ciment identiques ont été représentés sur un seul graphique, et ce pour les trois régimes thermiques isothermes 10 °C, 20 °C et 30 °C (figure 5-10). Afin de chiffrer les variations des amplitudes, les mesures relatives des déformations ont été représentées en termes de pourcentages par rapport aux déformations mesurées à 20 °C (figure 5-11). Les résultats montrent que les bétons ayant un faible rapport eau/ciment sont les plus sensibles aux variations thermiques. De même, plus le rapport eau/ciment est important (0,45), plus l'influence des variations thermiques sur les mesures des déformations endogènes libres est moindre par rapport à celles observées pour les bétons ayant un plus faible rapport eau/ciment (0,35).

Au cours des premières 24 heures, la phase de refroidissement de 20 °C à 10 °C pour mener les essais en isothermes 10 °C favorise un retrait thermique. De même, la phase d'échauffement de 20 °C à 30 °C dans le cas des essais isothermes à 30 °C favorise une expansion thermique. Le caractère symétrique des résultats enregistrés durant les six premières heures obtenus à 10 °C et 30 °C laisse à penser à un effet prédominant de la réponse thermique du matériau et/ou du dispositif. Pour les bétons ayant un faible rapport eau/ciment (0,35), après six jours, les déformations totales mesurées à 10 °C représentent 207% de la valeur moyenne des déformations à 20 °C. À 30 °C, pour la même échéance, l'amplitude des déformations totales est de l'ordre de 71% de la valeur moyenne des déformations à 20 °C.

Après les premières 24 heures, les cinétiques des déformations endogènes sont très similaires pour chaque formulation et ce pour les trois températures isothermes expérimentées. Ce comportement, en particulier durant les premières 24 heures, devrait être analysé selon différents aspects tel que, l'influence de la température sur la cinétique des réactions d'hydratations des différents constituants du ciment type 10, sur la morphologie des hydrates formés dans différentes conditions thermiques ou même sur la réponse thermique du béton en tant que masse rigide et poreuse. Parmi les éléments clés dans la compréhension de ce phénomène citons la traînée du réseau capillaire ainsi que sa distribution. Les bétons ayant des faibles rapports eau/ciment sont caractérisés par un réseau capillaire raffiné comparé aux bétons à

fort rapport eau/ciment. De plus, à des températures élevées, la réaction d'hydratation est accélérée et les hydrates formés sont moins denses et présentent dans ce cas un réseau capillaire plus poreux. Dans le cas contraire, de faibles température ralentissent la réaction d'hydratation et favorise une matrice cimentaire plus dense. Ainsi pour un même gradient thermique, la pression interstitielle est plus importante quand le réseau capillaire est plus fin. Ceci induit macroscopiquement des déformations thermiques tout au long du processus de variation du gradient de température. Toutefois, une fois l'équilibre thermique est atteint, et qu'aucun gradient thermique n'est appliqué à la matrice cimentaire, l'effet thermique sur les pressions interstitielles devrait disparaître. Ceci peut être décelé en examinant les cinétiques des déformations à différentes températures isothermes après les premières 24 heures.

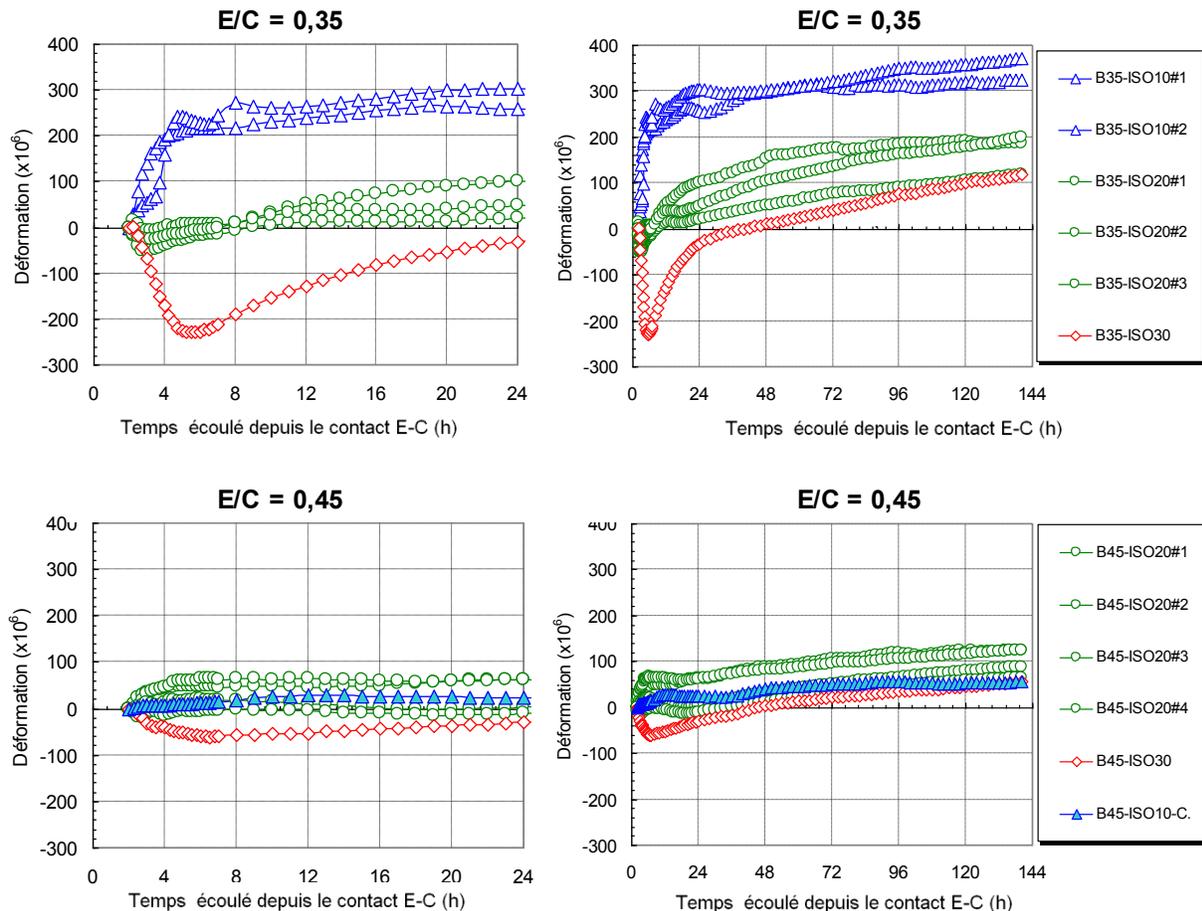


Figure 5-10 : Mesures des déformations endogènes totales (le zéro des déformations correspond au moment de contact eau-ciment)

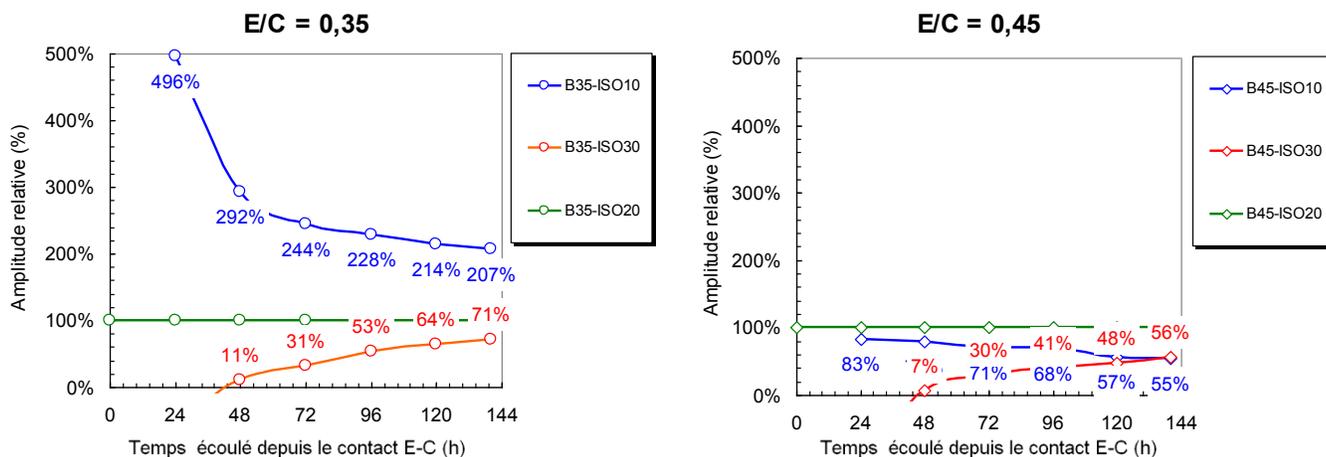


Figure 5-11 : Amplitudes relatives des déformations endogènes totales à 10 °C et 30 °C mesurées par rapport aux déformations endogènes totales à 20 °C.

Les déformations endogènes décalées permettent de soustraire les mesures précédents l'atteinte du critère de démarrage. Par conséquent la phase d'échauffement dans le cas des essais à 30 °C ou celle de refroidissement dans le cas des essais à 10 °C ne sera pas incluse dans l'analyse. L'effet de la température est prédominant durant les premières 24 heures. Plus la température de cure est importante plus la cinétique des déformations est importante (figure 5-12). Au bout de 24 heures d'hydratation, l'amplitude des déformations à 30 °C est presque le double de celle mesurée à 20 °C. De même, les déformations à 10 °C sont de l'ordre de la moitié des mesures observées à 20 °C. Bien que cette tendance dans le comportement soit générale pour tous les essais, ce sont les bétons ayant un faible rapport eau/ciment qui sont plus influencés par les variations thermiques.

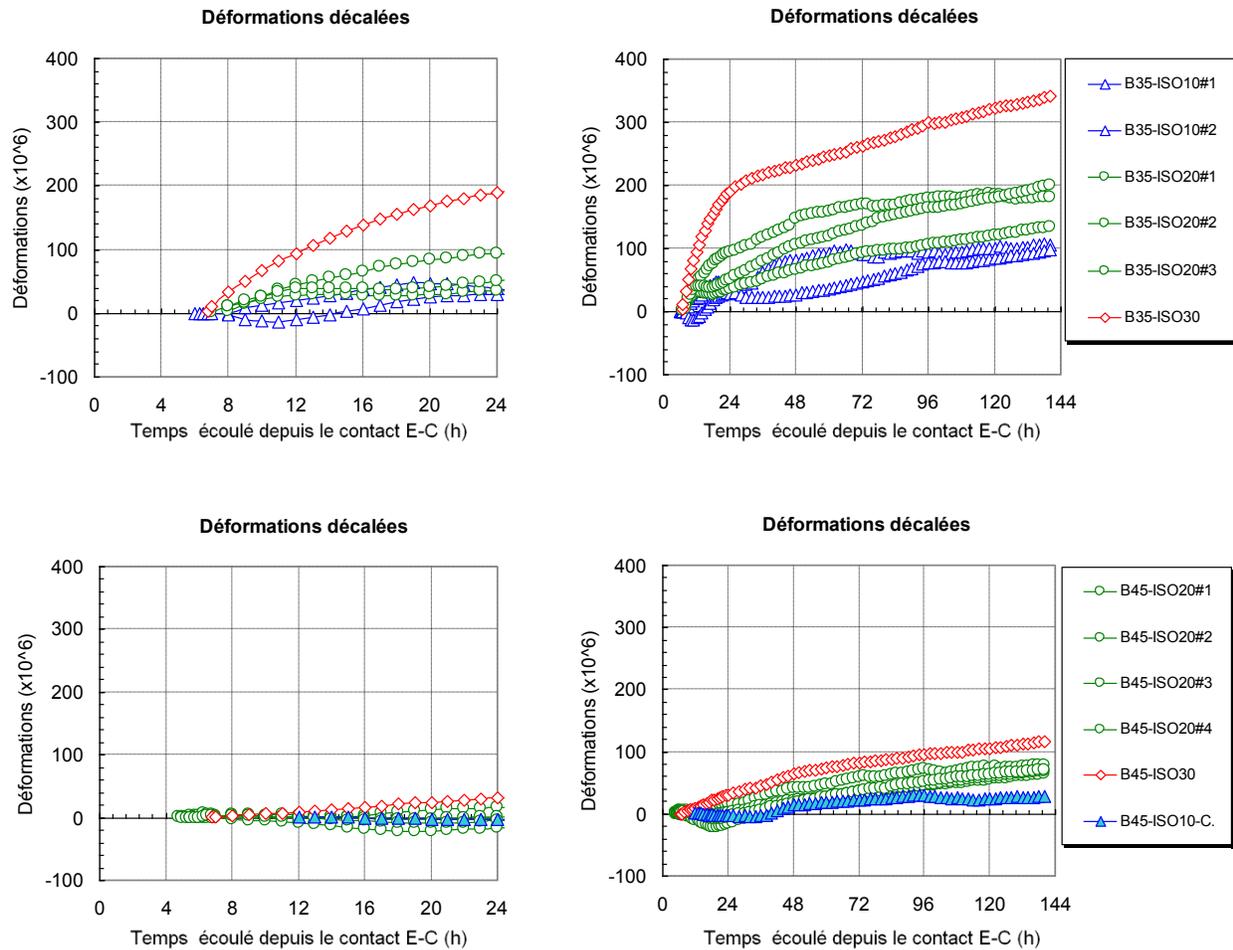


Figure 5-12 : Influence de la température sur les déformations libres décalées (le zéro des déformations correspond au moment de lancement de l'essai selon le critère de démarrage)

La figure 5-13 illustre l'amplitude relative des déformations endogènes décalées obtenues à 10 °C et 30 °C par rapport à la moyenne des déformations endogènes mesurées à 20 °C. Les mesures sont exprimées en pourcentage. Notons qu'au-delà de 72 heures, les amplitudes des déformations mesurées tendent à converger vers une asymptote. En d'autre terme, la cinétique des déformations deviennent après quelques jours similaires pour les trois régimes thermiques isothermes. Il semble que durant les premières 24 à 72 heures, l'avancement de la réaction d'hydratation est fortement influencé par les conditions thermiques de l'essai. Mais du moment que la structure de la matrice cimentaire développe une certaine rigidité, la cinétique des déformations du même béton tend à se développer d'une façon très similaires pour trois conditions isothermes expérimentées.

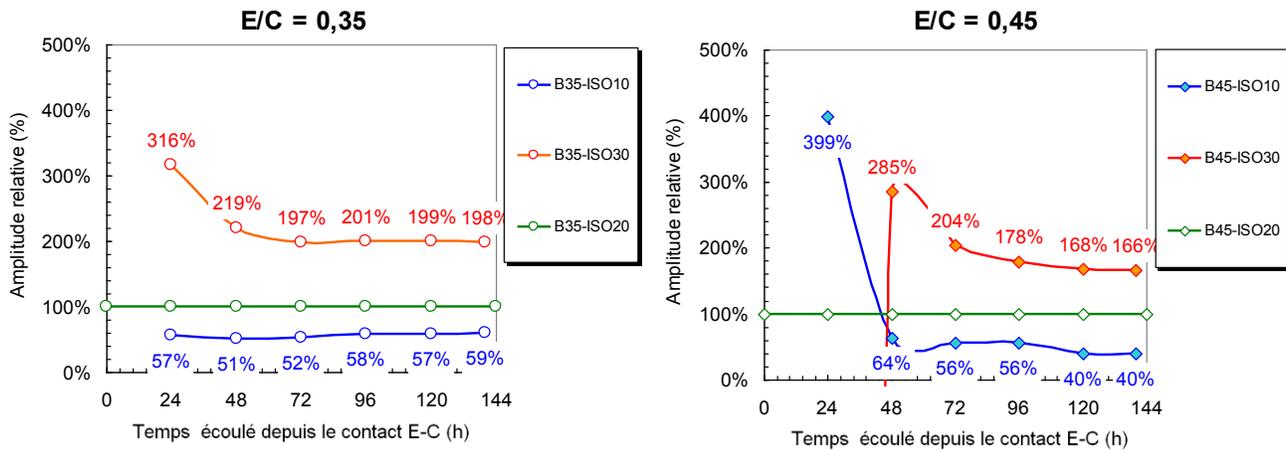


Figure 5-13 : Amplitudes des déformations endogènes à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des déformations endogènes à 20 °C.

L'effet de la température sur le fluage est très similaire à celui sur les déformations endogènes décalées. La figure 5-14 illustre les courbes de fluages par classe de rapport eau/ciment. Il est clair que plus le rapport eau/ciment est faible, plus le béton est sensible aux variations thermiques. C'est principalement durant les premières 24 heures que la cinétique des déformations de fluage est fortement affectée par les conditions thermiques. Plus la température est élevée, plus la réponse viscoélastique du béton est importante et vice versa. La figure 5-15 illustre l'amplitude relative des déformations de fluage obtenues à 10 °C et 30 °C par rapport à la moyenne des déformations mesurées à 20 °C. Les mesures ont été exprimées en pourcentage. Vers la fin des essais, les mesures des amplitudes relatives tendent toutes vers des asymptotes constantes. Ceci signifie qu'après les premières cinq jours d'hydratation la cinétique des déformations viscoélastiques sera similaire pour toutes les températures isothermes testées. Les déformations de fluage des bétons à faible rapport eau/ciment atteignent ce seuil bien avant ceux des bétons ayant un fort rapport eau/ciment.

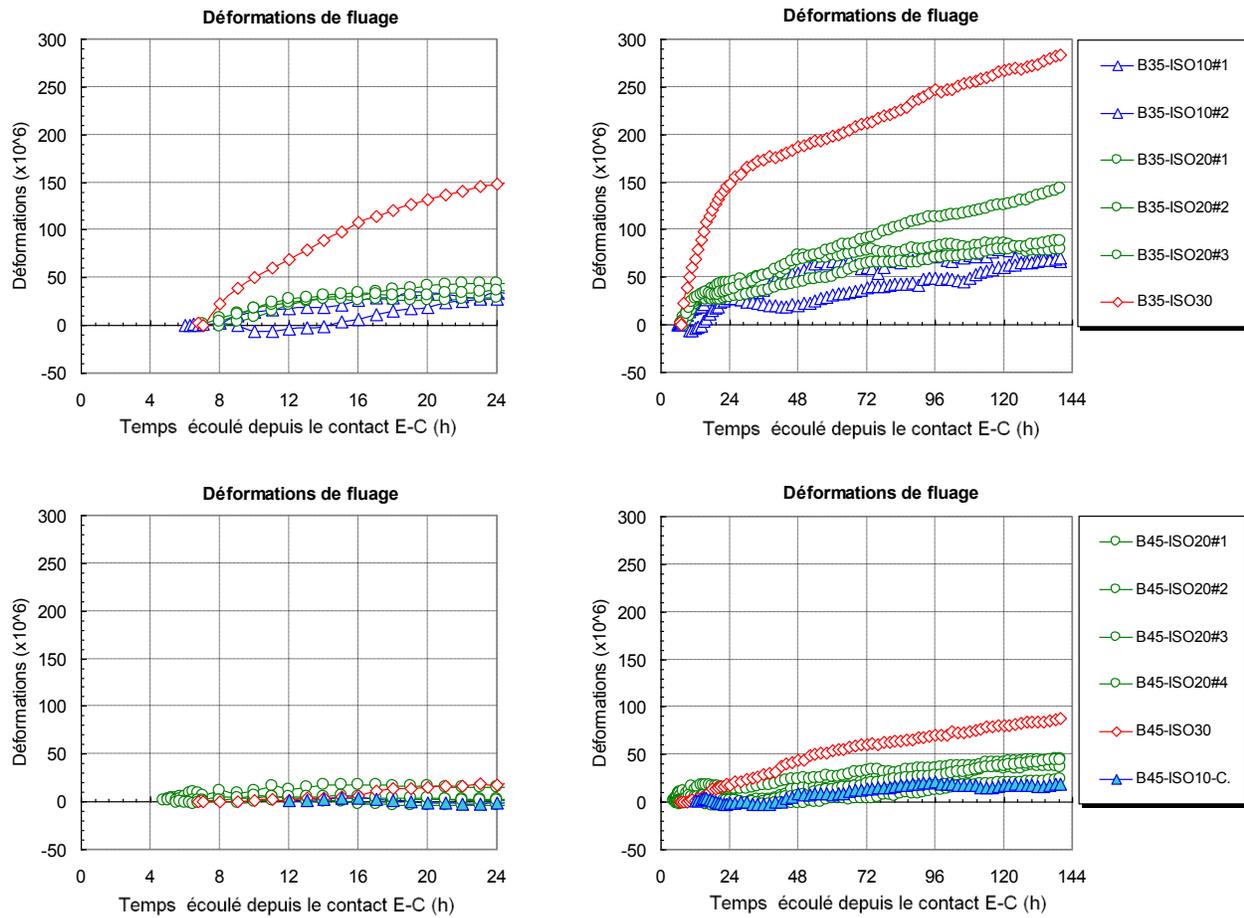


Figure 5-14 : Influence de la température sur les déformations de fluage

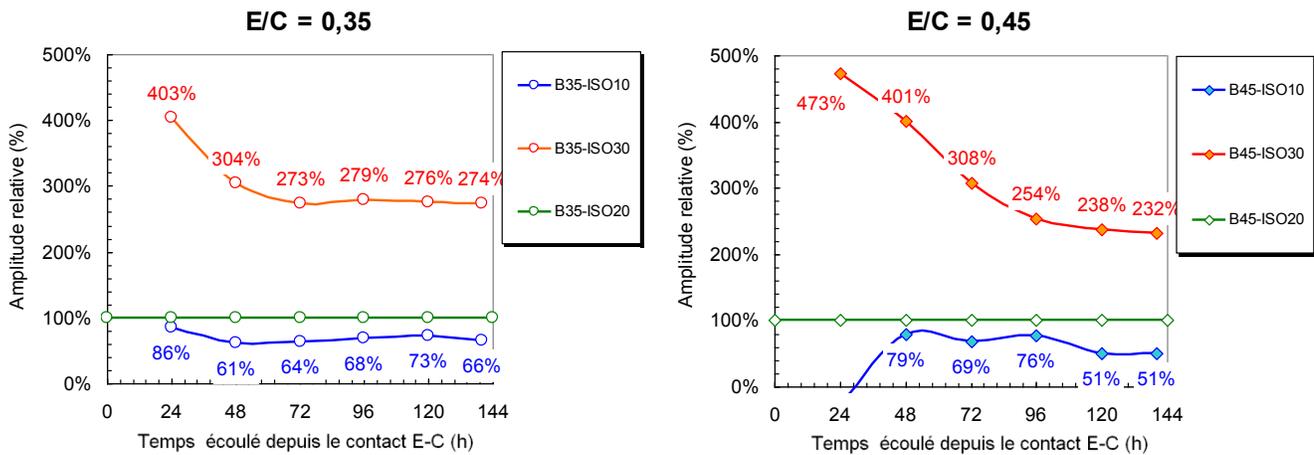


Figure 5-15 : Amplitudes des déformations de fluage à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des déformations de fluage à 20 °C.

La figure 5-16 illustre les profils des contraintes développées pour tous les essais classés, et ce par groupe de rapport eau/ciment. Encore une fois, les bétons ayant un faible rapport eau/ciment sont les plus affectés par les variations thermiques, en particulier durant les premières 24 heures. Plus la température est élevée, plus les mesures des contraintes sont amplifiées. Après cette période, la cinétique des mesures des contraintes semblent être évoluer d'une façon similaire. L'effet de la température sur la cinétique semble diminuer.

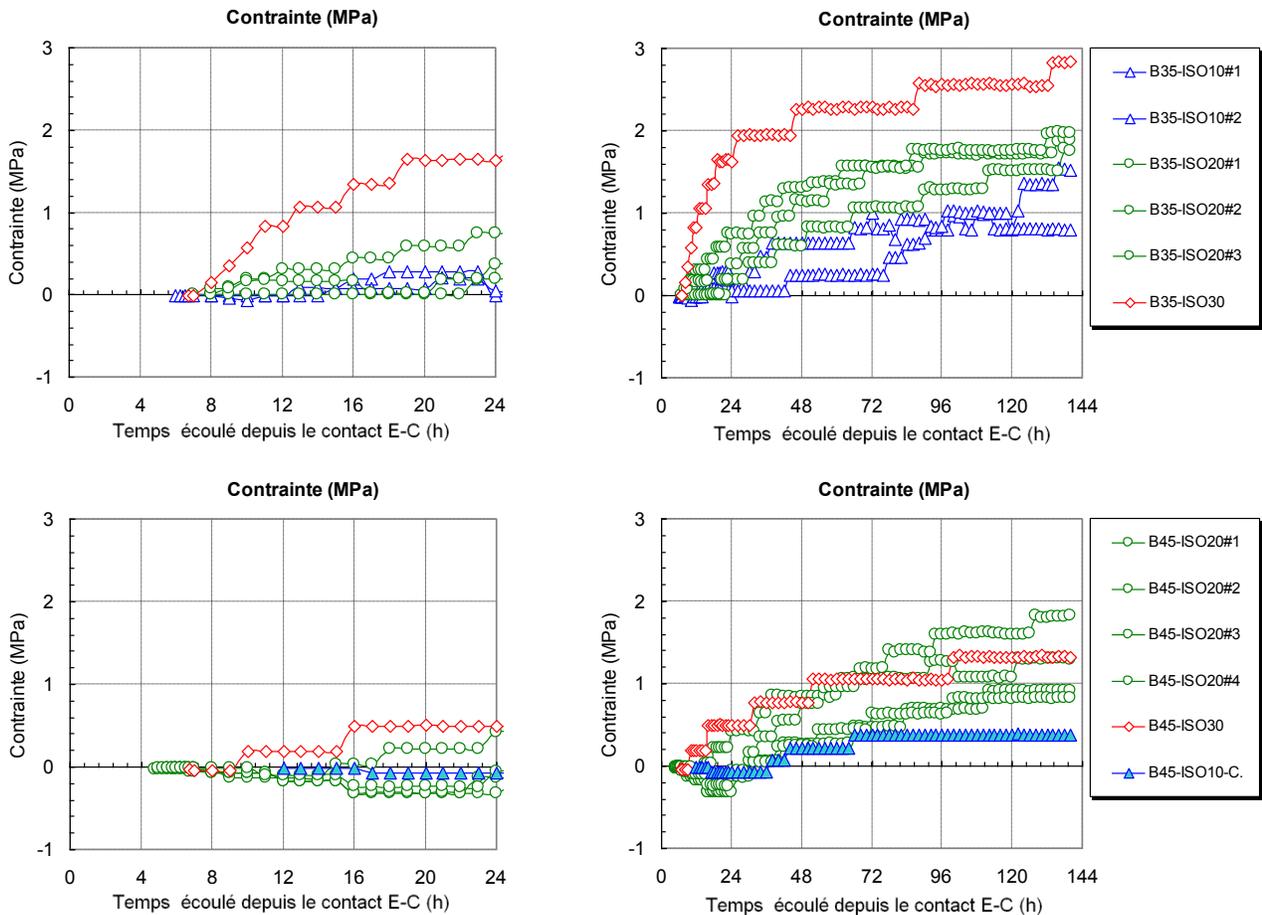


Figure 5-16 : Influence de la température sur les contraintes développées

Les amplitudes relatives des contraintes mesurées à 10 °C et 30 °C par rapports à celles obtenues à 20 °C sont représentées sur la figure 5-17. Les résultats sont exprimées en pourcentage. Encore une fois, on remarque la convergence des mesures relatives vers une asymptote de pente nulle. Ceci montre que la température affecte le comportement des bétons au

très jeune âge, soit durant les premières 24 à 72 heures d'hydratation. Par la suite l'effet de la température devient négligeable.

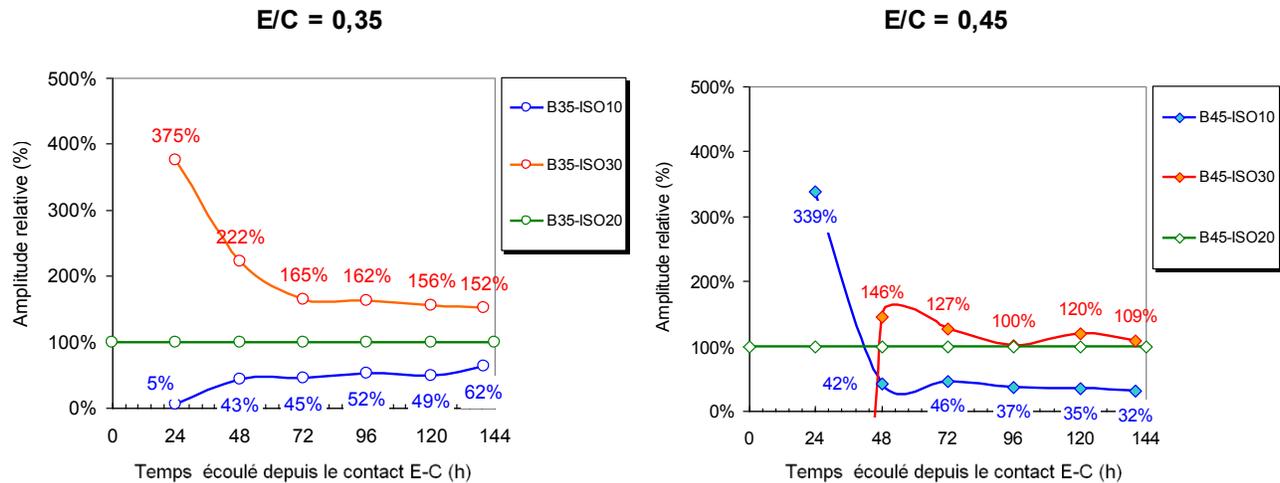


Figure 5-17 : Amplitudes des contraintes à 10 °C et 30 °C vs amplitudes des contraintes à 20 °C.

Pour un rapport eau/ciment de 0,45, les contraintes développées après 6 jours d'essais sous des conditions isothermes à 30 °C représentent 109% des contraintes développées à 20 °C. Pour un même rapport eau/ciment et sous des conditions isothermes de 10 °C, l'amplitude de contrainte atteinte au bout de six jours représente 32% de celle observée en condition isotherme 20 °C. L'effet de la température est plus marquant dans le cas d'un béton ayant un faible rapport eau/ciment ($E/C=0,35$). En effet, les contraintes développées à 30 °C et 10 °C après 6 jours d'essais représentent respectivement 152% et 62% des amplitudes des contraintes développées à 20 °C.

Les mesures des contraintes expriment en d'autres termes la résistance développée par la matrice cimentaire pour contrer l'effort exercé par le montage. Il est clair que le même béton développe des contraintes plus importantes pour des températures plus élevées et vice versa. Ceci est en particulier plus évident au très jeune âge, soit durant les premières 24 à 72 heures. Après cette période, la cinétique de développement de la résistance évolue d'une façon très similaire pour toutes les températures expérimentées.

Les figures 5-18 illustre l'évolution des mesures des modules élastiques. Durant les premières 24 heures, une augmentation de la température a comme effet d'amplifier les mesures du module d'Young. Cette constatation au très jeune âge est valide pour les deux rapports eau/ciment expérimentés. Vers la fin de l'essai, les cinétiques de l'évolution ainsi que les amplitudes des modules élastiques s'atténuent considérablement. Ceci est plus marquant sur la figure 5-19 qui représente les mesures des modules d'Young en termes de pourcentage par rapport aux mesures effectuées à 20 °C.

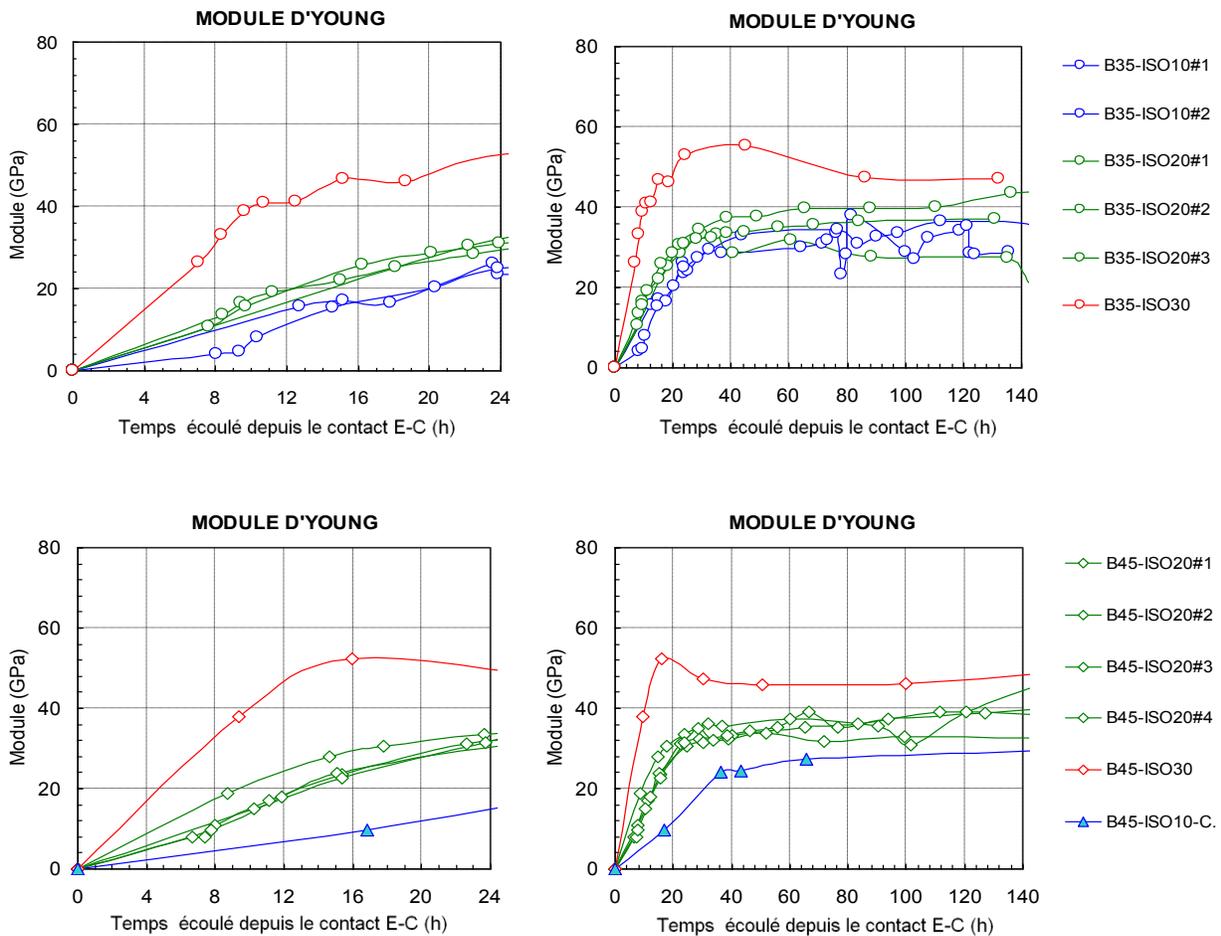


Figure 5-18 : Amplitudes des modules élastiques à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des modules élastiques à 20 °C.

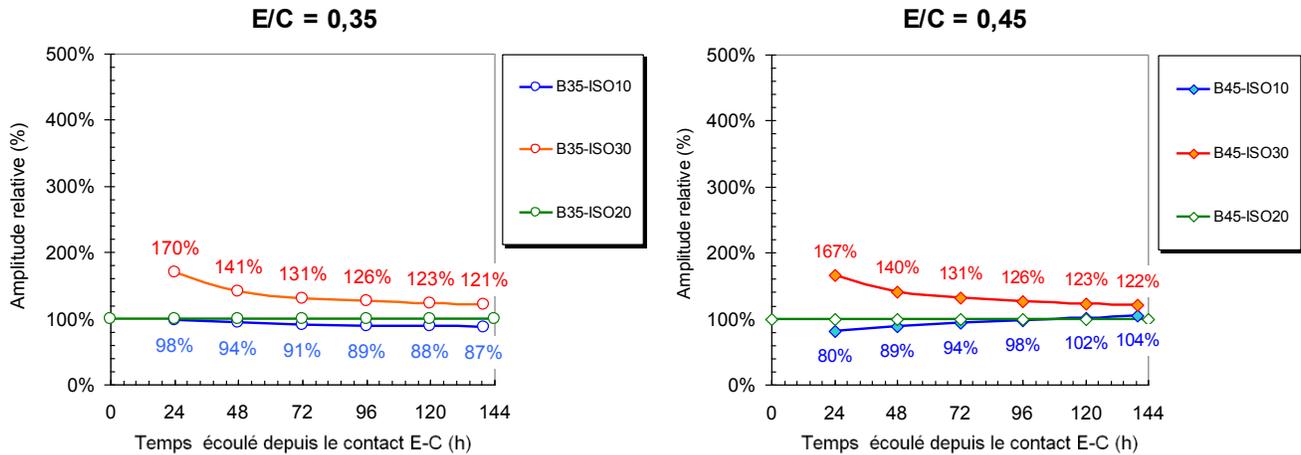


Figure 5-19 : Amplitudes des modules élastiques à 10 °C et 30 °C Vs amplitudes des modules élastiques à 20 °C.

5.2.5 Synthèse des résultats

Au cours de cette première série d'essais, deux formulations utilisant un seul type de ciment (type 10) ont été étudiées (B35T10 & B45T10). Trois conditions thermiques isothermes ont été appliquées : 10 °C, 20 °C et 30 °C. Les essais R^2D^2 ont permis d'examiner différentes propriétés des matériaux cimentaires dès les premières heures d'hydratation. Ainsi, les déformations endogènes, les déformations de fluage, les contraintes développées ainsi que les propriétés élastiques (modules d'Young) ont été analysées.

En premier lieu, les résultats obtenus durant cette phase expérimentale ont été comparés à ceux obtenus par des recherches antérieures dans le cadre du même programme expérimental. Bien que les résultats présentent globalement des tendances similaires en termes de profils et de cinétiques des mesures, certaines divergences ont été décelées sur les différentes mesures expérimentales issues des essais R^2D^2 . Ces différences peuvent être attribuées dans certains cas à une différence dans l'application du profil thermique, et par conséquent dans la procédure même de démarrage de l'essai. Par conséquent, l'hypothèse que la même procédure expérimentale dans les deux campagnes expérimentales semble ne pas être respectée, du moins dans certains cas. La répétabilité des essais R^2D^2 a été montrée pour un seul opérateur du montage R^2D^2 , toutefois celle inter-opérateurs n'est pas évidente.

Les résultats issus des essais R^2D^2 démontre que dans des conditions isothermes à 10 °C, 20 °C et 30 °C, plus le rapport eau/ciment est faible, plus les déformations endogènes libres sont amplifiées en termes de cinétiques et d'amplitudes, en particulier durant les premières 24 heures. Ces résultats sont concordants avec les résultats de la documentation (Baroghel-Bouny et al., 2006 ; Pertué, 2008). Plus le rapport eau/ciment est faible, plus la matrice cimentaire est dense, dû à un réseau capillaire plus fin. La théorie de Laplace permet d'expliquer l'amplification des tensions capillaires dans un réseau capillaire non saturé plus fin.

Il a été constaté aussi l'apparition d'un gonflement relativement important durant les première 24 heures d'hydratation. Ce gonflement a été signalé bien avant l'atteinte du critère de démarrage et la température cible de l'essai à 30 °C. La cause probable est la réponse thermique du béton. Comme tout matériau, une augmentation de la température génère une expansion qui varie en amplitude selon le coefficient de dilatation du matériau en question. Si l'on considère un coefficient de dilatation thermique du béton au très jeune âge entre 12 et 20 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, une variation de 10 °C devrait induire approximativement une déformation de l'ordre de 120 à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les mesures des gonflements observés expérimentalement. Le mécanisme d'absorption de l'eau de ressuage pourrait également avoir contribué au développement de cette phase de gonflement [Bjøntegaard, 99]. Toutefois, le premier mécanisme semble être prédominant.

Les mesures des contraintes développées par un béton ayant un faible rapport eau/ciment sont plus importantes que celles mesurées avec un béton ayant un plus important rapport eau/ciment et ce pour les trois conditions isothermes 10 °C, 20 °C et 30 °C. Ceci est en relation directe avec le développement déformationnel et structural de la matrice cimentaire puisque plus le rapport eau/ciment est faible, plus la matrice cimentaire est dense et plus la rigidité est plus importante. Par conséquent, la contrainte à appliquer pour ramener les déformations à leurs états d'origine au cours des essais R^2D^2 sera nécessairement plus importante.

Les résultats issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de donner une idée claire à propos de l'influence du paramètre eau/ciment sur les mesures des modules élastiques. Toutefois, la tendance est que plus le rapport eau/ciment est faible, plus le module est important. En particulier

durant les première 24 heures d'hydratation. Cette constatation a été confirmée par des études menées récemment par Pertué (2008) sur le comportement au très jeune âge des bétons. L'auteur a montré que le module d'Young est plus important pour les bétons ayant un rapport eau/ciment plus faible.

D'une façon très similaire aux mesures des déformations endogènes, les déformations de fluage sont influencées par le rapport eau/ciment. Au très jeune âge, c'est le mécanisme de la microdiffusion qui prime sur les autres mécanismes pour expliquer le phénomène de fluage. Ce mécanisme, dont le siège d'action est le réseau capillaire, dépend fortement des dimensions et de la dispersion de ce réseau. Ainsi, plus ce dernier est fin, comme est le cas pour les formulations ayant des faibles rapports eau/ciment, plus la microdiffusion de la phase liquide à travers les pores est amplifiée.

Enfin, en examinant l'influence de la température de cure sur le comportement d'ensemble des matériaux cimentaires, nous remarquons que les bétons les plus sensibles aux variations thermiques sont ceux qui présentent des faibles rapports eau/ciment, en particulier durant les premières 24 heures d'hydratation. Ceci a été observé tant pour les déformations mesurées (déformations endogènes libres et déformations de fluage) que pour contraintes. En termes de chiffres, les tableaux 5.10 et 5.11 illustrent les amplitudes des résultats atteintes par rapport à la moyenne des résultats obtenus à 20 °C.

Tableau 5.10 : Influence de la température sur les mesures relatives (par rapport à celles mesurées à 20 °C) au bout de six jours. Rapport eau/ciment =0,35

Eau/Ciment = 0,35	ISO-10 °C	ISO-20 °C	ISO-30 °C
Déf. Endogène totale (%)	207	100	71
Déf. endogène décalée (%)	59	100	198
Déf. de fluage (%)	66	100	274
Contrainte induite (%)	62	100	152
Module d'Young (%)	87	100	121

Tableau 5.11 : Influence de la température sur les mesures relatives (par rapport à celles mesurée à 20 °C) au bout de six jours. Rapport eau/ciment =0,45

Eau/Ciment = 0,45	ISO-10 °C	ISO-20 °C	ISO-30 °C
Déf. endogènes totale (%)	55	100	56
Déf. endogène décalée (%)	40	100	166
Déf. de fluage (%)	51	100	232
Contrainte induite (%)	32	100	109
Module d'Young (%)	104	100	122

Les informations les plus significatives sont celles mesurées à partir du moment de lancement de l'essai R^2D^2 , soit les déformations endogènes décalées, les déformations de fluage, les contraintes développées et les modules élastiques (modules d'Young). Les valeurs relatives de ces paramètres sont représentées graphiquement sur les figures 5-20 et 5-21.

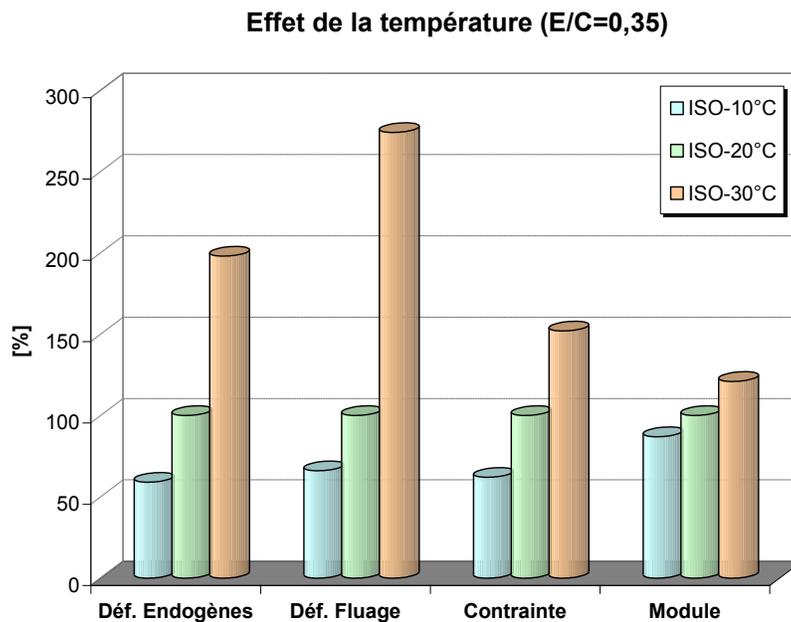


Figure 5-20 : Représentation graphique de l'effet de la température sur le comportement au jeune âge du B35T10 au bout de six jours- Valeurs relatives par rapport aux résultats à 20 °C

Notons que les bétons ayant les plus faibles rapports eau/ciment ont été les plus affectés par des variations de la température. Parmi les quatre paramètres examinés, les déformations de fluage semblent être les plus amplifiées par une augmentation de la température et ce pour les deux rapports eau/ciment étudiés. En effet les amplifications mesurées au bout de six jours pour les rapports eau/ciment 0,35 et 0,45 sont respectivement 274% et 232%

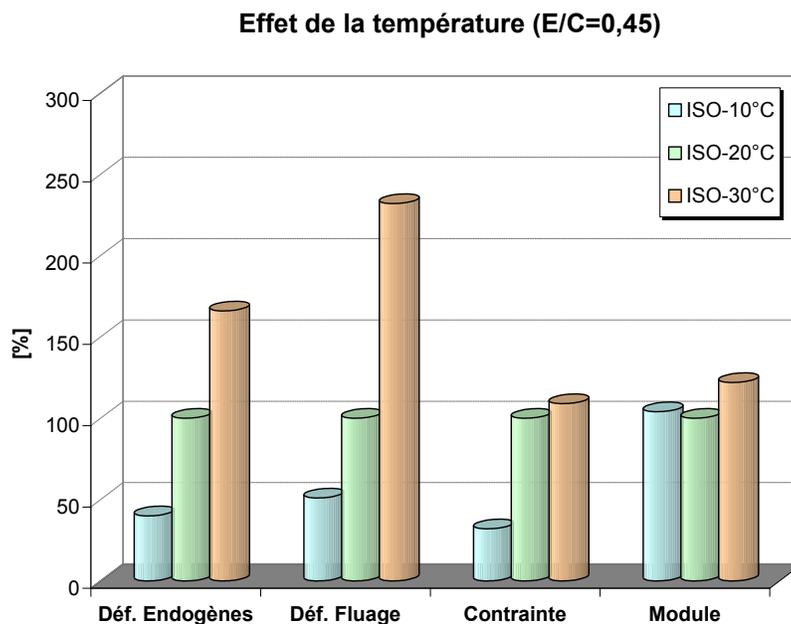


Figure 5-21 : Représentation graphique de l'effet de la température sur le comportement au jeune âge du B45T10 au bout de six jours- Valeurs relatives par rapport aux résultats à 20 °C

Toutefois à faible température (10 °C), les déformations de fluage relatives des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,35 et 0,45 sont réduites à 66% et 51% respectivement. D'après ces résultats, les bétons ayant un fort rapport eau/ciment (0,45) sont les plus affectées par une diminution de la température, alors que les bétons à faible rapport eau/ciment (0,35) sont les plus affectés par une augmentation de la température. Un effet similaire est facilement remarquable en examinant l'effet de la température sur les mesures des déformations endogènes décalées (figures 5-20 et 5-21). Toutefois, les variations de ces déformations par rapport aux mesures des déformations de fluage sont moindres.

Les déformations endogènes décalées mesurées à haute température (30 °C) pour les bétons ayant des rapports eau/ciment de 0,35 et 0,45 représentent 198% et 166% respectivement de celles mesurées à 20 °C. À faible température (10 °C), l'effet est inversé. Les bétons ayant un fort rapport eau/ciment (0,45) développent 40% des déformations endogènes mesurées à 20 °C par comparaison à 59% pour les bétons à faible rapport eau/ciment (0,35). Cette similitude d'effet des variations thermiques observées au niveau des déformations endogènes et les déformations de fluage tend encore une fois à démontrer que leurs mécanismes d'actions sont inter reliés.

En examinant l'influence de la température sur les mesures des contraintes (figures 5-20 et 5-21), nous constatons que cette grandeur a été influencée d'une façon aussi similaire à ce qu'on observe pour les déformations de fluage et les déformations endogènes. À haute températures, plus le rapport eau/ciment est faible plus les contraintes sont importantes. L'effet inverse se produit pour des faibles températures. Ainsi, plus le rapport est fort plus les contraintes développées par rapport à celles mesurées à 20 °C sont faibles.

Les mesures expérimentales montrent que durant les premières 24 heures d'hydratation, les modules élastiques sont amplifiés par une augmentation de la température et de même réduites par une réduction de la température de cure. En d'autres termes, pour un niveau de contrainte donnée, une faible température de cure permet au béton une plus grande marge de déformation, donc moins de risque de fissuration. Dans le cas contraire ou la cure se fait sous des températures élevée, le béton est plus à risque pour fissurer.

5.3 Étude expérimentale – Phase II

5.3.1 Matériaux

Durant cette phase expérimentale, le même protocole expérimental utilisé durant la première phase a été appliqué. A ceci s'ajoute la réalisation des essais de caractérisation normalisés des matériaux et de calorimétrie. Trois types de ciments ont été testés, soit un ciment type 10, un ciment Whitehall et un ciment type 50. Le choix des deux premiers types de liants hydrauliques, classifiés ciment type I selon ASTM, a été identifié afin de rencontrer une vaste marge des produits cimentaires utilisés au nord de l'Amérique. Le troisième type de liant hydraulique, le ciment type 50, se distingue par rapport aux deux autres types essentiellement par sa faible teneur en C_3A et en aluminates. Ainsi il présente une forte résistance aux sulfates. Cette phase expérimentale permettra d'étudier chaque formulation individuellement, d'examiner l'influence de la teneur en C_3A et de comparer les propriétés de deux ciments ordinaires.

Les compositions chimiques et minéralogiques de ces liants sont illustrées dans les tableaux 5.12 et 5.13. Les mêmes types de granulats (sable et pierres) utilisés lors de la première phase expérimentale ont été utilisés pour les formulations. Le tableau 5.14 illustre les propriétés physiques des granulats utilisés. Les formulations ont été mises au point pour deux rapports eau/ciment, 0,30 et 0,40. Notons que la première phase expérimentale avait comme objectif de vérifier la répétabilité des essais, en particulier la dépendance des résultats aux opérateurs. Pour ces raisons, les rapports eau/ciment ont été choisis suivant les travaux effectués par des recherches antérieures. Durant cette deuxième phase expérimentale, la marge cible des rapports eau/ciment a été révisée dans le but de rencontrer la majorité des formulations des bétons qui se trouvent sur le marché de nos jours. Un superplastifiant à base de naphthalène a été utilisé fin d'assurer une bonne maniabilité et de favoriser une bonne dispersion des grains de ciment. Le tableau 5.15 illustre les proportions des matériaux utilisées pour chaque formulation.

Au cours de cette phase expérimentale, six formulations de bétons ont été testées au moyen du montage R²D² à la température isotherme de 20 °C (tableau 5.15). Des essais mécaniques ainsi que des mesures calorimétriques ont été effectués en parallèle.

Tableau 5.12 : Propriétés chimiques des ciments type 10, type 50 et Whitehall1

Compositions chimiques	T10	T50	WH1
CaO (%)	61,65	63,16	61,70
SiO₂ (%)	19,09	22,04	19,19
Al₂O₃ (%)	5,05	3,57	5,74
SO₃ (%)	4,05	2,15	4,90
Fe₂O₃ (%)	2,33	3,73	2,44
MgO (%)	2,58	2,97	2,28
LOI (%)	2,89	1,11	1,64
Na₂O Eq (%)	0,86	0,37	0,88
K₂O (%)	0,87	0,42	0,99
Na₂O (%)	0,29	0,10	0,23
SrO (%)	0,24	0,03	0,29
TiO₂	0,25	0,20	0,25
P₂O₅	0,22	0,03	0,23
Mn₂O₃ (%)	0,06	0,07	0,07
Total (%)	99,57	99,56	99,95

Tableau 5.13 : Propriétés minéralogiques des ciments type 10, type 50 et Whitehall1

Compositions minéralogiques	T10	T50	WH1
C₃S (%)	57	54	49
C₂S (%)	12	22	18
C₃A (%)	9	3	11
C₄AF (%)	7	11	7
Surface spécifique (m²/kg)	393	376	380

Tableau 5.14 : Propriétés physiques des granulats

Propriétés physiques	Sable	Pierre
Densité à l'état saturé	2,63	2,75
Absorption (%)	0,81	0,95
Module de finesse	2,41	---

Tableau 5.15 : Formulations finales des bétons étudiés

Constituant	B30T10	B40T10	B30T50	B40T50	B30WH1	B40WH1
Rapport E/C	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
Ciment (kg/m³)	500	435	500	435	500	435
Eau (kg/m³)	150	174	150	174	150	175
Sable (kg/m³)	875	875	875	875	875	875
Pierre (kg/m³)	875	875	875	875	875	875
SP (ml/kg de C)	31,0	8,0	11,6	7,5	30,0	8,7

5.3.2 Influence du rapport E/C

La série des essais R²D² réalisés au cours de cette deuxième phase expérimentale ont permis d'analyser l'influence de plusieurs facteurs sur le comportement des bétons au jeune âge, en particulier celle du rapport eau/ciment sur le comportement des bétons au jeune âge. Il est admis que ce paramètre influence à la fois la dispersion et la taille du réseau capillaire de la matrice cimentaire. Plus le rapport eau/ciment est faible, plus la matrice est dense et plus les tensions capillaires à l'intérieur des pores capillaires sont importantes. Les figures 5-22 à 5-28 mettent en évidence l'influence du rapport eau/ciment sur les propriétés déformationnelles ainsi que sur les propriétés structurales des différents bétons.

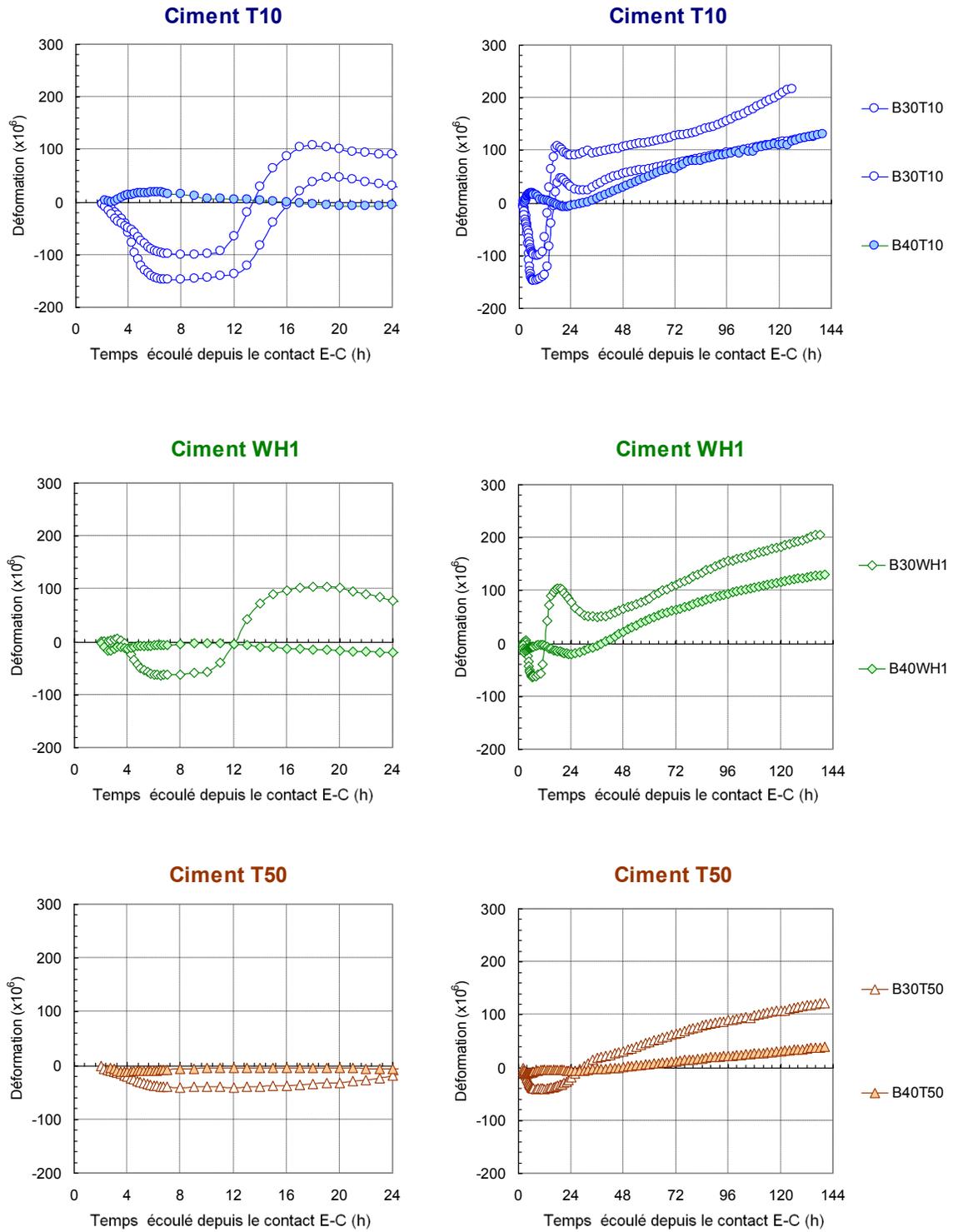


Figure 5-22 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations endogènes totales.

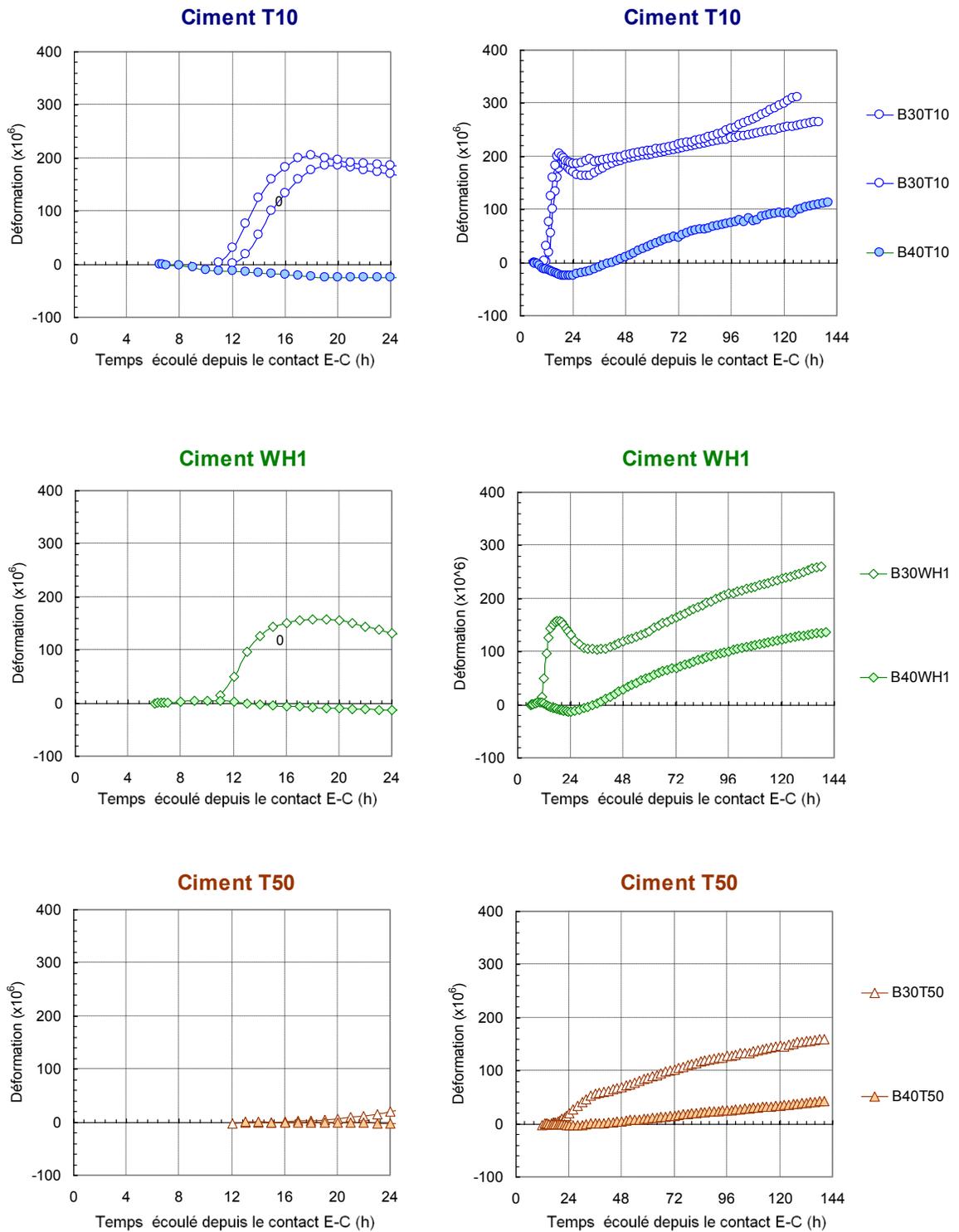


Figure 5-23 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations endogènes décalées.

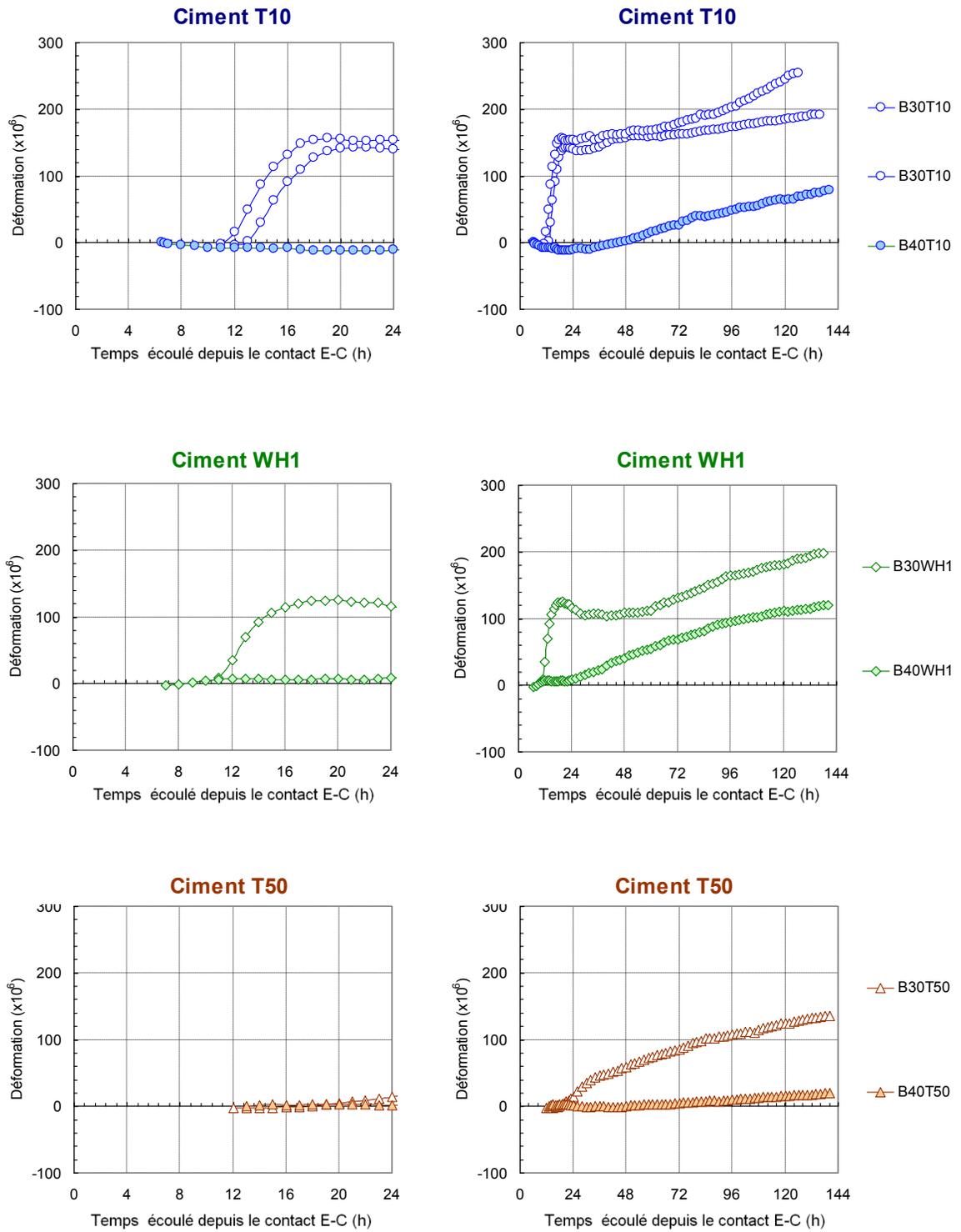


Figure 5-24 : Influence du rapport E/C sur mesures des déformations de fluage.

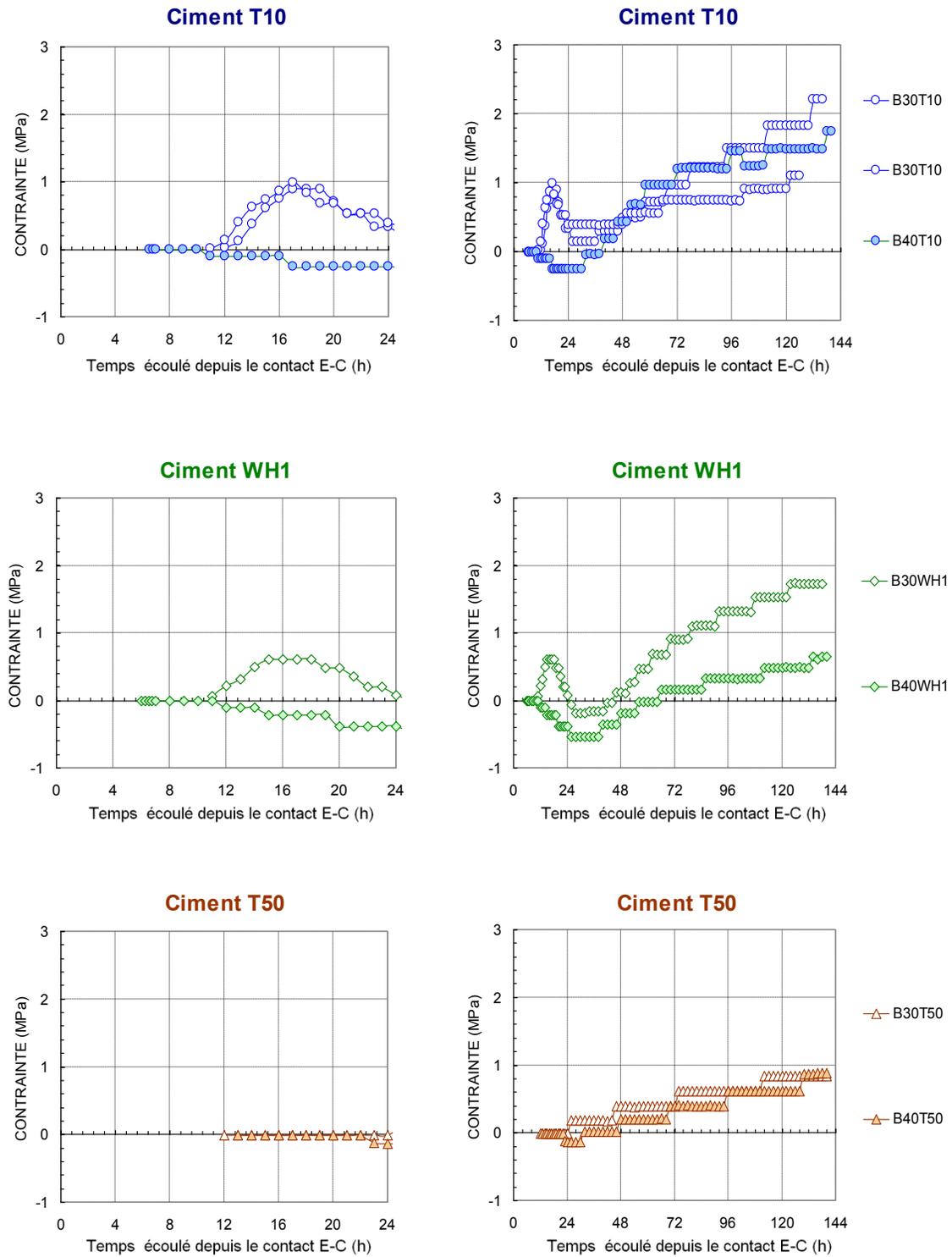


Figure 5-25 : Influence du rapport E/C sur les mesures des contraintes induites.

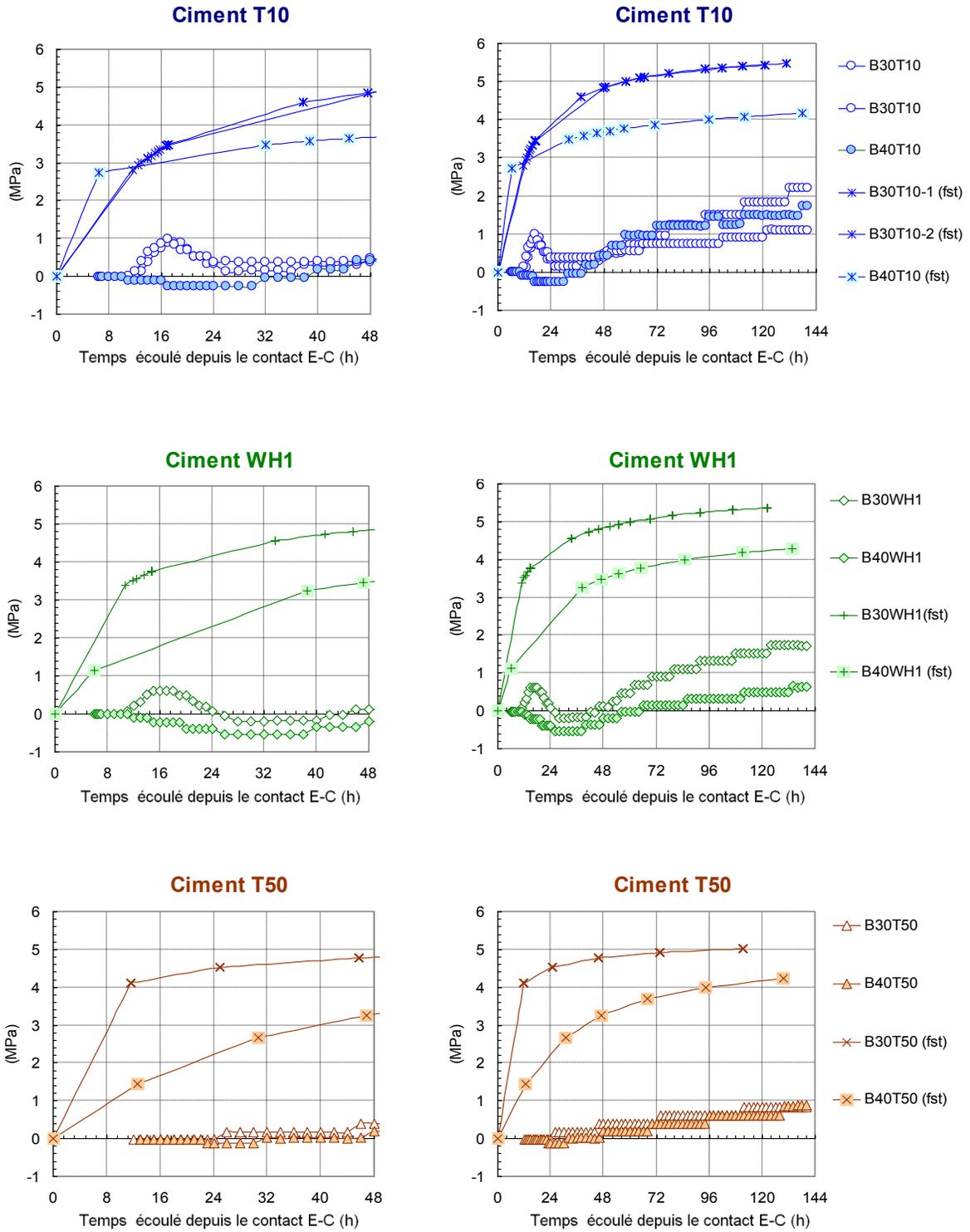


Figure 5-26 : Influence du rapport E/C sur les mesures des enveloppes des résistances en traction (essais de fendage).

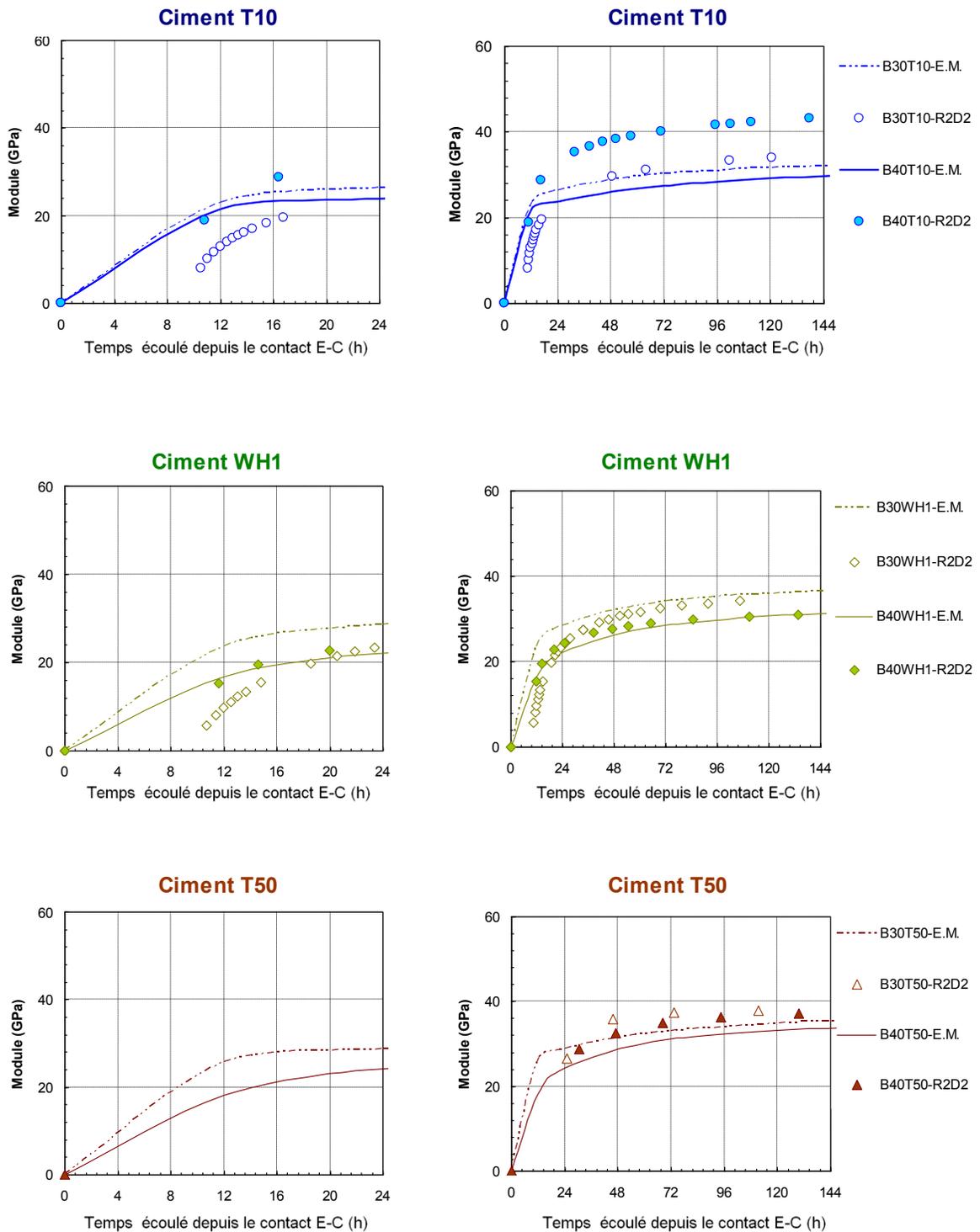


Figure 5-27 : Influence du rapport E/C sur les mesures des modules élastiques.

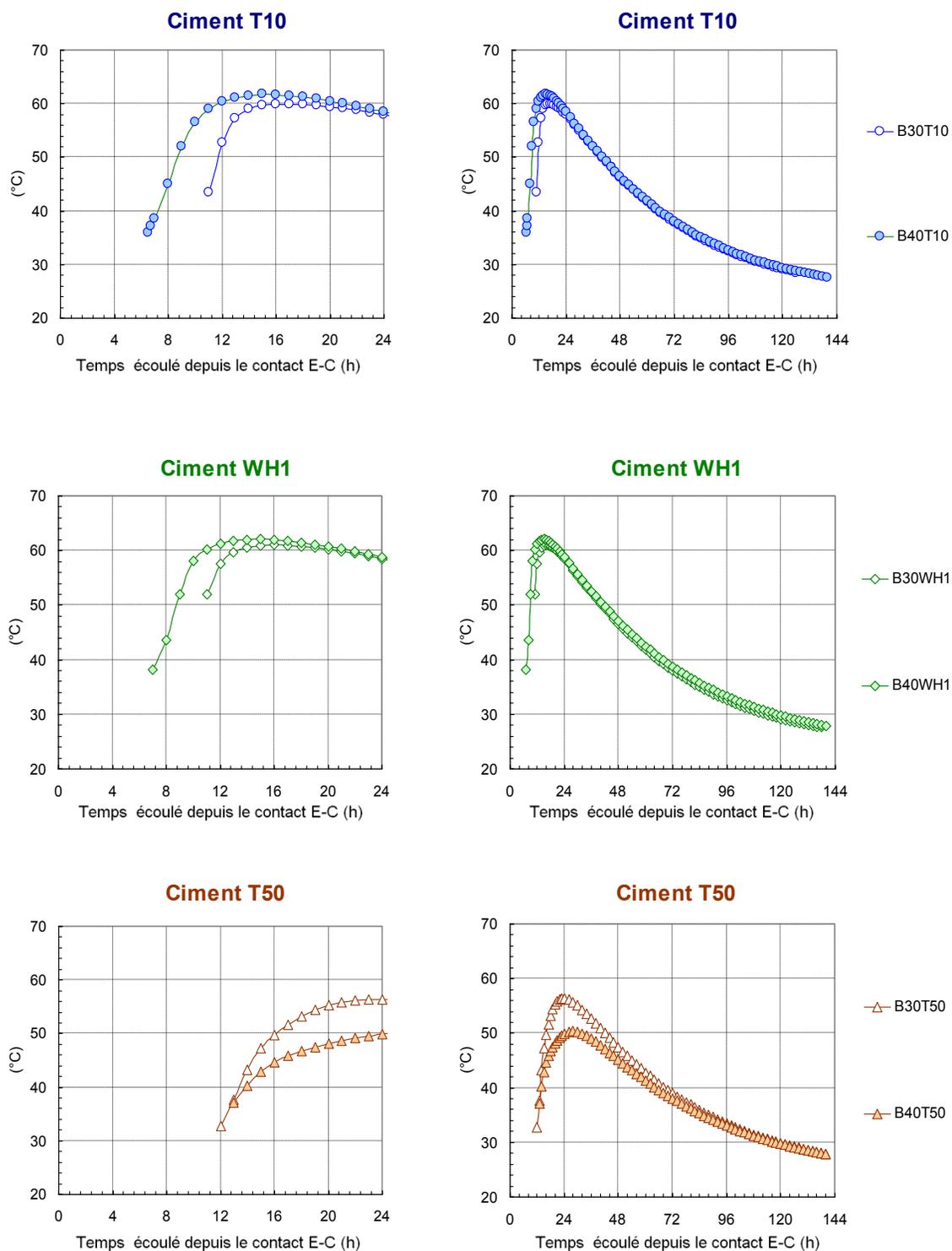


Figure 5-28 : Influence du rapport E/C sur les mesures semi-adiabatiques.

Les résultats obtenus dans des conditions isothermes à 20 °C concordent avec la documentation sur le sujet (Justnes et coll. 96 ; Toma et coll. 00 ; Tazawa et coll. 95). En effet,

pour tous les bétons étudiés en isotherme à 20 °C, plus le rapport eau/ciment est faible, plus les déformations endogènes sont importantes (figures 5-22, 5-23 et 5-24). Ceci peut être attribué à la formation d'un réseau capillaire plus dense. Selon la théorie de Laplace, plus les rayons des pores capillaires sont faibles, plus les tensions capillaires sont importantes. L'auto-dessiccation résultante de la consommation de l'eau interstitielle par réaction d'hydratation est par conséquent plus importante. La rigidité et le module élastique sont par conséquent affectés, ce qui implique que les mesures de fluage le sont aussi (Atrushi, 2003). Les mesures des déformations de fluage concordent avec cette constatation. Plus le rapport eau/ciment est important plus la composante de fluage est réduite.

Les figures 5-25 et 5-26 montrent aussi que plus le rapport eau/ciment est faible, plus les contraintes enregistrées sont importantes. Cet effet est moins marquant pour les ciments type 50. Les mesures des modules élastiques au moyen du montage R^2D^2 ne semblent pas donner une idée claire quant à l'influence du rapport eau/ciment sur les modules d'Young (figure 5-27). Finalement, la figure 5-28 montre que le dégagement de chaleur enregistré au cours des essais calorimétriques semble être peu influencé par le rapport eau/ciment pour les ciments types 10 et Whitehall1. Ceci n'est pas le cas du ciment type 50, pour lequel la température mesurée au pic de la courbe semi-adiabatique est plus importante avec un rapport E/C plus faible.

5.3.3 Influence de la composition minéralogique

Au cours de cette partie expérimentale, nous avons testés trois types de ciments : un ciment type 10 (considéré comme le ciment ordinaire du nord de l'Amérique), le ciment Whitehall1 et un ciment type 50. Les compositions minéralogiques du ciment type 10 et du ciment Whitehall1 sont très similaires. Le ciment type 50, dont le pourcentage en C_3A est faible par rapport aux deux autres types de ciment, est utilisé généralement dans des milieux chimiquement agressifs. Ce ciment est caractérisé par une bonne résistance aux attaques des sulfates de calcium, des sulfates de sodium ou des sulfates de magnésium. Les sulfates de calcium attaquent les aluminates de calcium hydratés pour former un sulfoaluminate de calcium connu sous le nom d'ettringite [Neville, 2000]. La formation de cette ettringite expansive au sein de la matrice cimentaire durci a des effets potentiellement néfastes et destructifs sur les éléments de bétons. La durabilité est par conséquent mise en question aussitôt que ce genre de réaction

s'amorce. Les sulfates de sodium attaquent les silicates de calcium hydraté ainsi que la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), causant son lessivage. L'effet des sulfates de magnésium est encore plus délétère du fait que la portlandite, les aluminates de calcium hydratés et les silicates de calcium hydratés sont attaqués [Neville 2000]. L'utilisation du ciment type 50 dans des milieux agressifs permet de réduire les risques de réaction des ions sulfates avec les aluminates de calcium hydraté, vu la faible teneur en C_3A de ce ciment. À travers la présente série expérimentale, l'influence de la composition minéralogique de ces trois types de ciments sera étudiée. En particulier, les réponses des ciments type 10 et Whitehall1 seront comparées à celles du ciment type 50 et ce, pour les mêmes rapports eau/ciment.

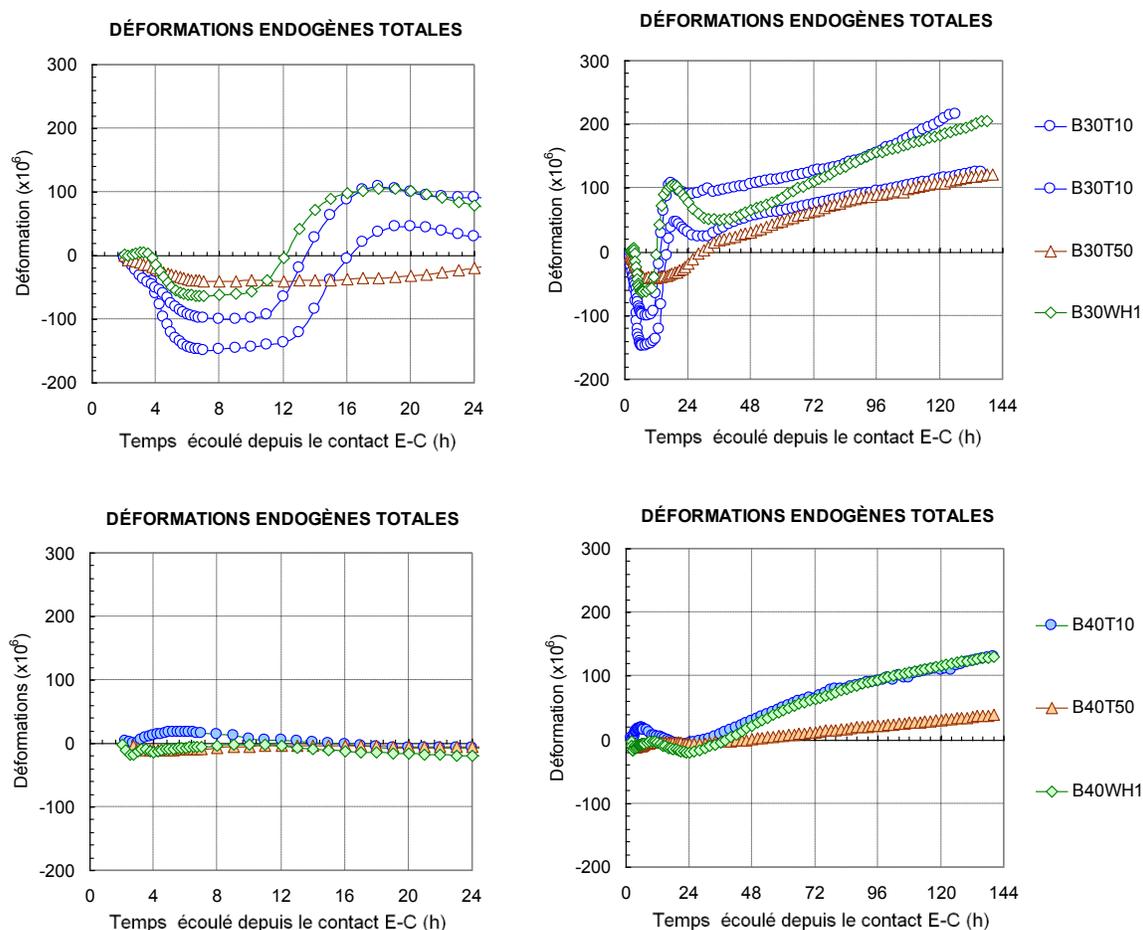


Figure 5-29 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations endogènes totales en isotherme 20 °C.

En examinant les déformations endogènes totales et les déformations endogènes décalées (figures 5-29 et 5-30) nous remarquons que pour des faibles rapports eau/ciment (0,30), les

bétons fabriqués à partir des ciments type 10 et Whitehall1 exhibent deux gonflements. Le premier gonflement est enregistré après environ deux heures du démarrage de l'essai R^2D^2 et dure un peu plus de six heures. Le deuxième commence après environ dix-huit heures du lancement de l'essai et dure entre dix et dix huit heure. Un comportement similaire est observé pour ces deux types de béton pour un rapport eau/ciment de 0,40, mais avec des amplitudes beaucoup plus faibles que celles observées avec les bétons à faible rapport eau/ciment.

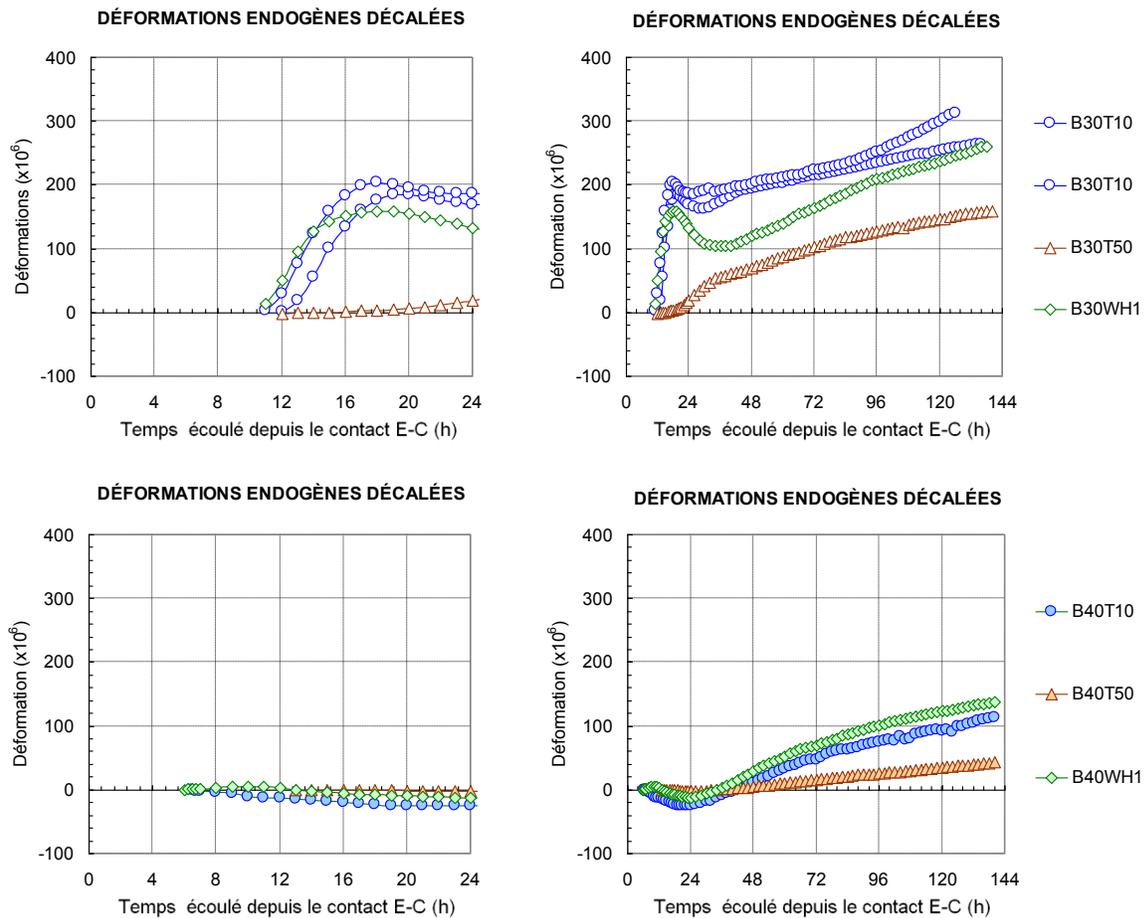


Figure 5-30 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations endogènes décalées en isotherme 20 °C.

Il a été constaté aussi que le ciment type 50 développe une seule phase de gonflement. L'absence d'une deuxième phase de gonflement par comparaison aux résultats obtenus pour les

ciments type 10 et Whitehall1 laisse croire que la composition minéralogique semble être le facteur responsable de différence. D'après le tableau 5.13, la grande différence en composition minéralogique concerne la proportion en cérites (C_3A et C_4AF). Le processus d'hydratation de ces derniers pourrait expliquer, du moins en partie, l'origine de cette deuxième phase de gonflement. Cette hypothèse sera discutée avec d'autres vers la fin de cette section. Pour des formulations à faibles rapport eau/ciment, la quantité de ciment est plus importante. Par conséquent, la deuxième phase de gonflement sera plus prononcée dans le cas des formulations à faible rapport eau/ciment.

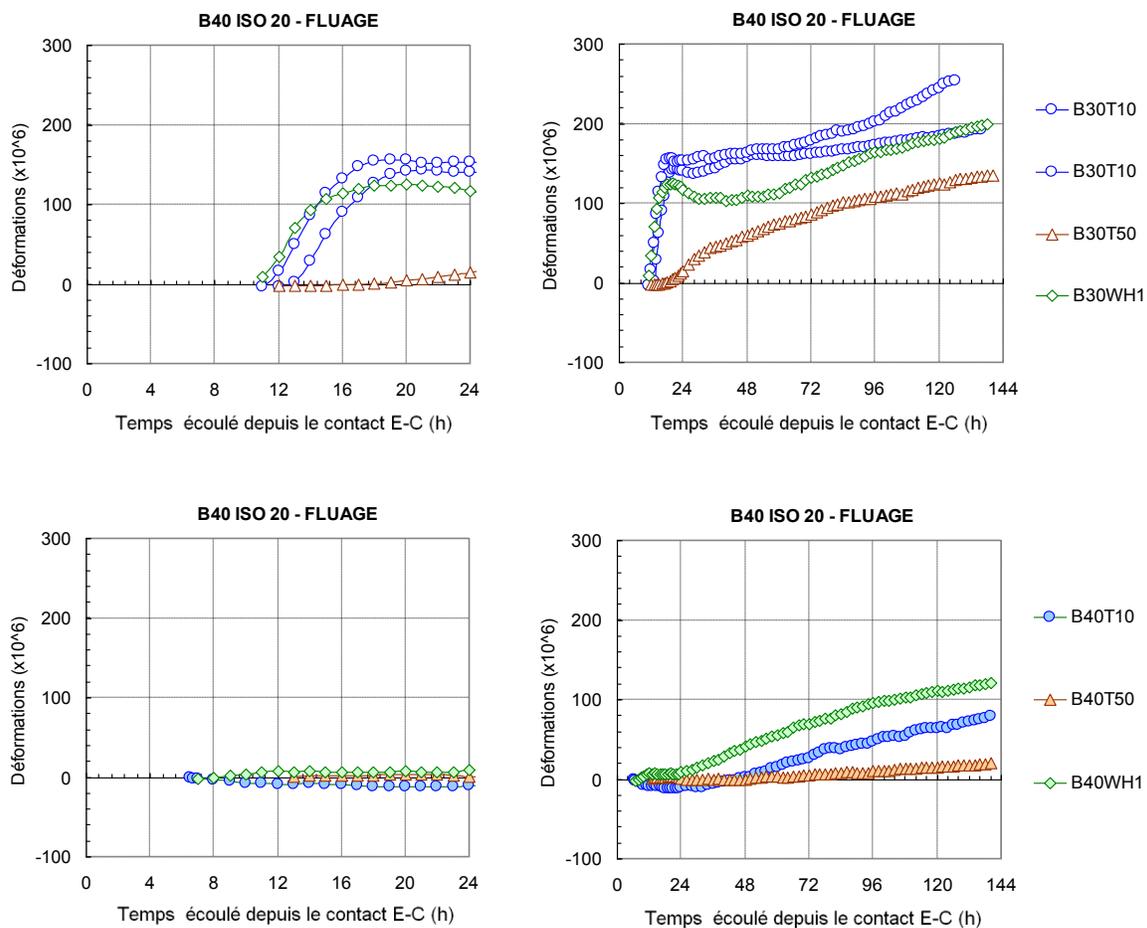


Figure 5-31 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des déformations de fluage en isotherme 20 °C.

La figure 5-31 montre que les déformations de fluage en traction sont plus importantes pour les bétons ayant une forte teneur en C_3A . Le deuxième gonflement observé pour les

déformations endogènes génère un fluage en compression à cause des contraintes de compression qui en résultent (figure 5-32). Le ciment type 50 est le seul qui ne développe pas un fluage de compression. Les déformations de fluage sont encore une fois très similaires aux déformations endogènes pour les trois types de ciment.

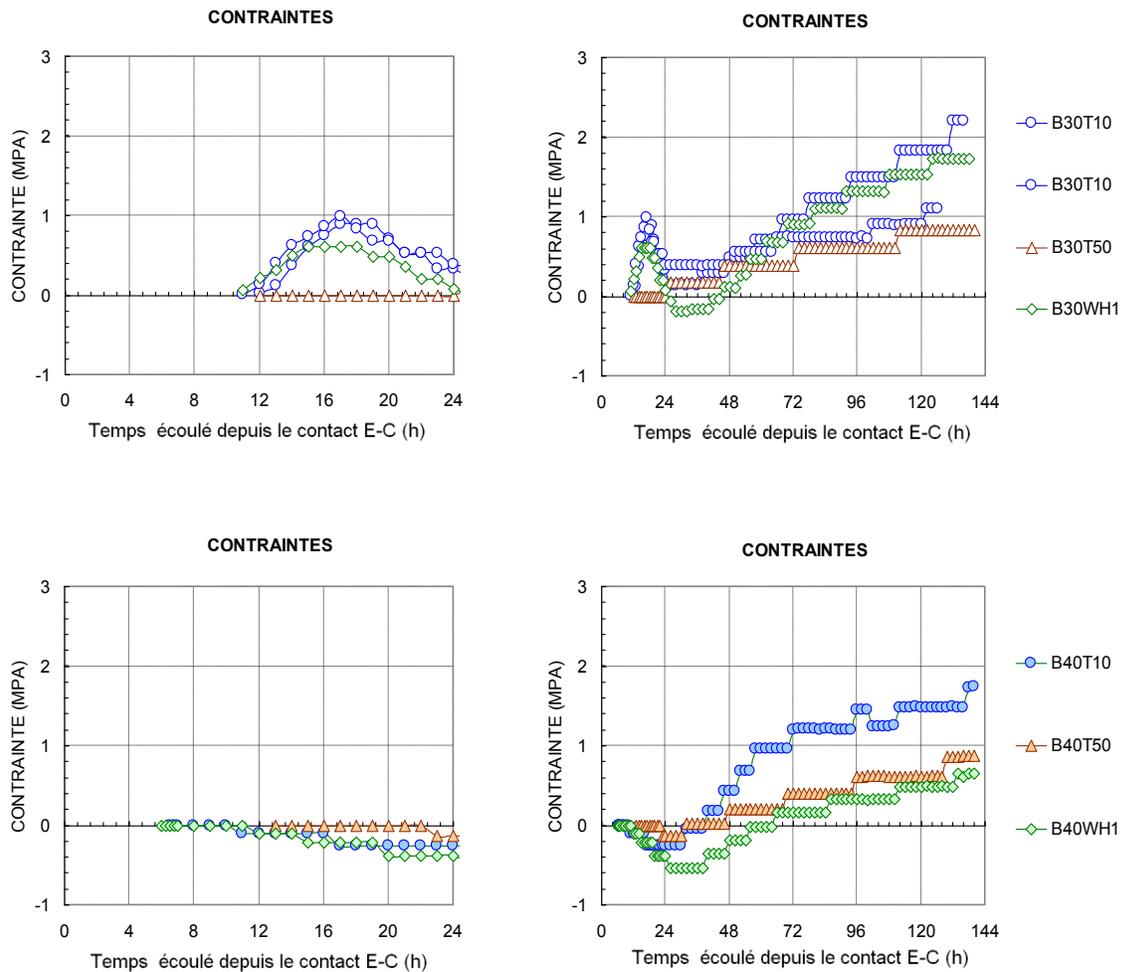


Figure 5-32 : Influence de la formulation du béton sur les mesures des contraintes en isotherme 20 °C.

La figure 5-33 illustre les mesures de contraintes ainsi que les courbes de résistances en traction issues des essais mécaniques. Ces dernières ont été identifiées par la lettre « F » afin de désigner les essais de fendage. Les niveaux de contrainte enregistrés (contrainte mesurée divisée par la contrainte de rupture) vers la fin des essais R^2D^2 ne dépassent pas 45% des résistances limites en traction pour toutes les formulations testées. Avec un tel maximum, il est admissible

que les bétons expérimentés dans cette étude au moyen des essais R^2D^2 ne sont vraisemblablement pas endommagés et se comportent élastiquement.

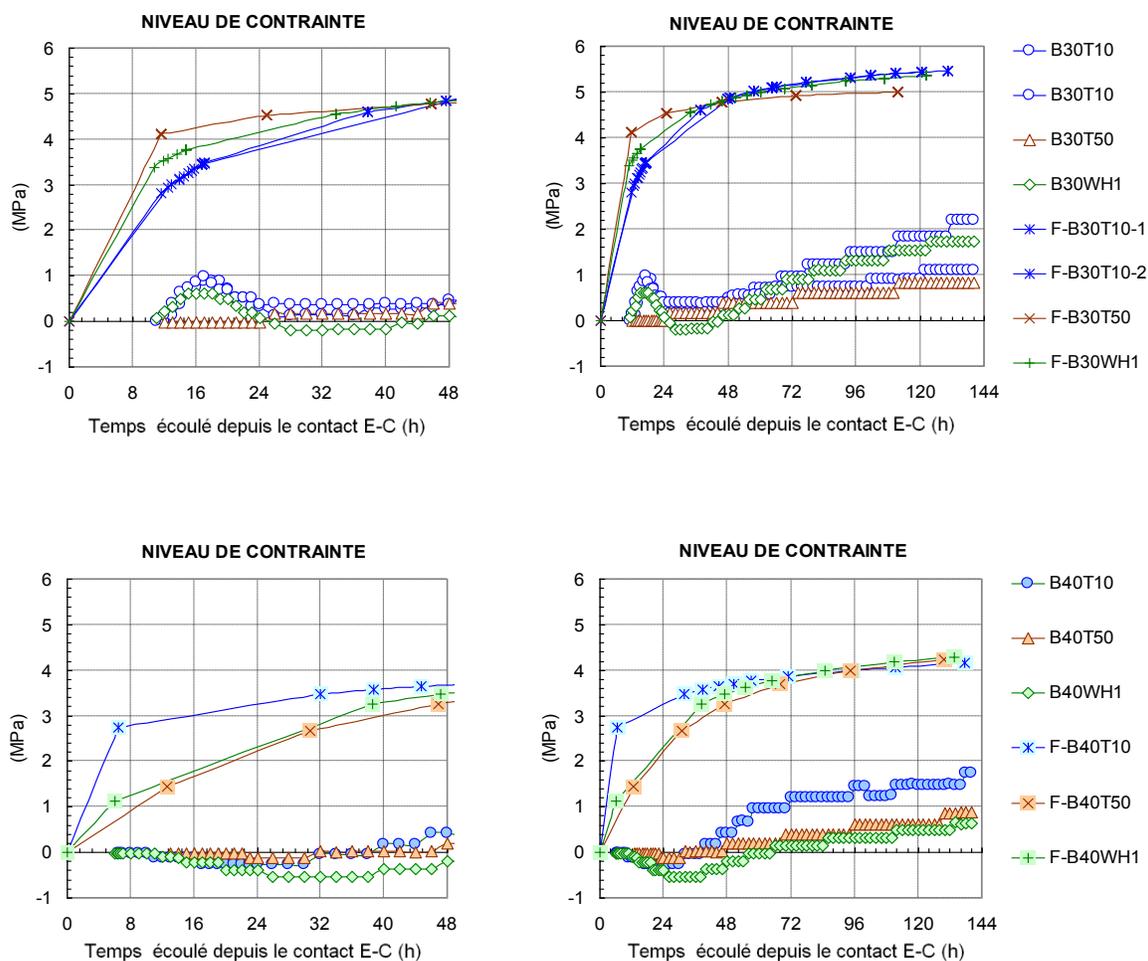


Figure 5-33 : Influence de la formulation des bétons sur les enveloppes de résistance en traction en isotherme 20 °C.

La figure 5-35 montre que les formulations de béton à base de ciment Whitehall1 et type 50 présentent des modules élastiques très similaires peu importe le rapport eau/ciment (0,30 ou 0,40). Toutefois, les formulations de béton à base de ciment type 10 ne permet pas de donner une information claire à propos du rôle de la composante C_3A , ou le type de ciment, sur les modules élastiques.

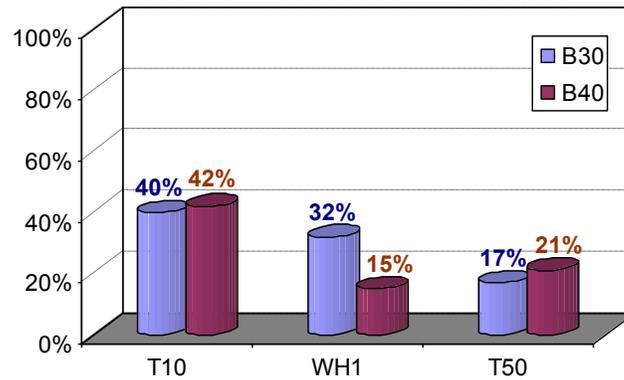


Figure 5-34 : Degrés de restriction atteint vers la fin des essais R^2D^2 en isotherme 20 °C.

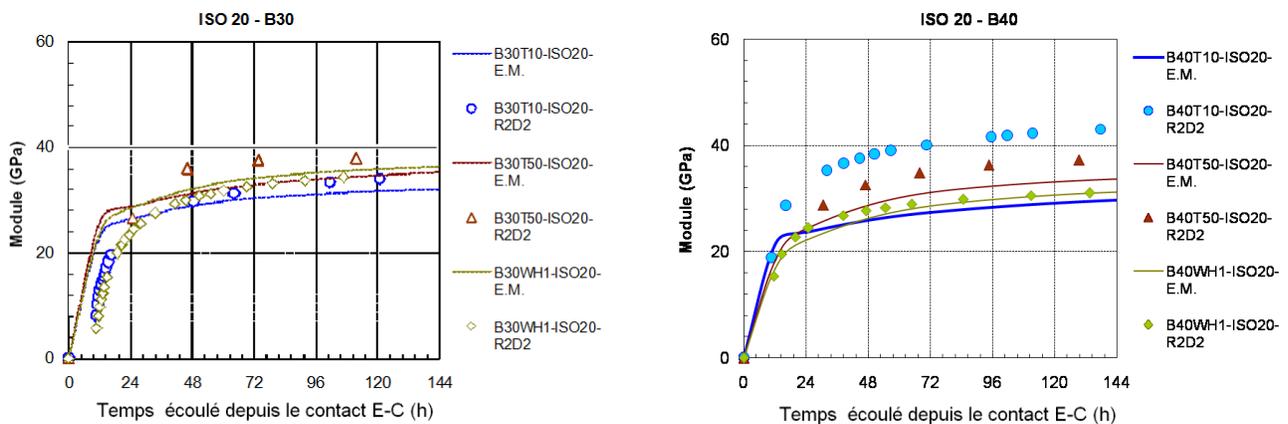


Figure 5-35 : Influence de la composition minéralogique sur les mesures des modules élastiques en isotherme 20 °C.

Les mesures semi-adiabatiques permettent de caractériser l'évolution de la réaction d'hydratation de ces trois types de ciment. Ces mesures montrent que les ciments à forte teneur en C_3A (ciments type 10 et Whitehall) sont caractérisés par des dégagements de chaleur plus importants que ceux d'un ciment à faible teneur en C_3A (ciment type 50). Les pics observés pour les ciments type 10 et Whitehall se produisent bien plus rapidement que celui du ciment type 50 (figure 5-36). Ceci peut être attribué à une hydratation des cérites plus intenses dans le cas des ciments à fort teneurs en C_3A .

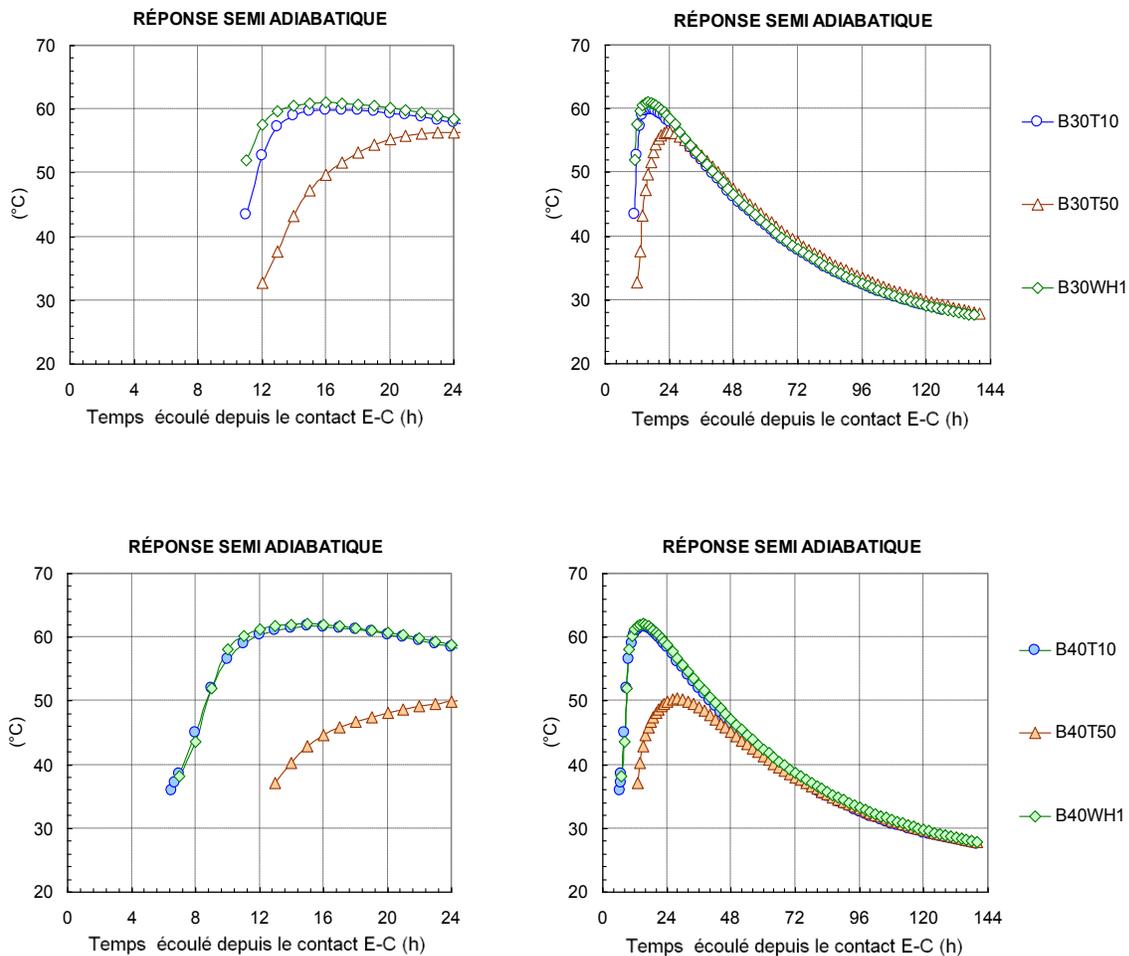


Figure 5-36 : Influence de la formulation des bétons sur les mesures des essais de calorimétrie semi-adiabatiques en isotherme 20 °C.

5.3.4 Synthèse des résultats

Au cours de cette deuxième phase expérimentale, Trois types de ciments ont été considérés. Les ciments type 10 et Whitehall1 sont très similaires en termes de composition minéralogique. Le ciment type 50, caractérisé par une bonne résistance aux attaques des sulfates, et comportant une faible teneur en C_3A par comparaison aux deux autres ciments. Ce choix nous a permis d'évaluer l'influence de la composition minéralogique sur le comportement d'ensemble des formulations de bétons au très jeune âge. Deux rapports eau/ciment ont été choisis. La plage ciblée était entre 0,30 et 0,40 qui correspond à la pluparts des rapports eau/ciment exigées par les normes et codes sur le marché de l'industrie. Ce choix nous a permit d'évaluer son influence sur le comportement d'une large gamme de bétons existants sur le marché industriel. Au total, six formules de bétons on été mises à l'épreuve au moyen du montage R^2D^2 , à savoir le B30T10, B40T10, B30T50, B40T50, B30WH1 et B40WH1. Tous les essais de cette phase expérimentale ont été réalisés en conditions isothermes à 20 °C.

L'utilisation d'une nouvelle technique expérimentale, tel que les essais R^2D^2 , nous a permis en plus de valider les constatations expérimentales antérieures, d'évaluer le comportement des bétons durant les premières 24 heures. Cette période très critique, qui a demeuré la zone grise dans la plupart des essais normalisés, est devenue au moyen des essais R^2D^2 une plage exploitable expérimentalement. C'est une des plus importantes contributions de cette nouvelle technologie dans le domaine des essais sur le comportement des matériaux au très jeune âge.

Le rapport eau/ciment est un des facteurs principaux qui affecte à la fois la dispersion et la taille du réseau capillaire au sein de la matrice cimentaire. Plus ce rapport est faible, plus la matrice est dense, plus la résistance ainsi que la durabilité sont améliorées. Les études réalisées sur l'influence de ce facteur concordent sur le fait que plus le rapport eau/ciment est faible, plus il est susceptible à des variations volumétriques plus importantes. Par conséquent, dans des conditions de restriction des déformations, un tel béton présente plus de risque de fissurations qu'une formulation ayant un fort rapport eau/ciment. Les résultats obtenus sur l'évolution des déformations endogènes au cours de cette phase expérimentale concorde parfaitement avec les résultats obtenus par des recherches antérieurs. Ceci nous rassure de la fiabilité de cette nouvelle technique expérimentale R^2D^2 .

Tel que mentionné précédemment, les premières vingt-quatre heures semblent être une période très critique. La compréhension des mécanismes qui régissent durant cette plage aidera à mieux comprendre le comportement le béton au très jeune âge et au jeune âge. Il a été constaté que plus le rapport eau/ciment est faible, plus les déformations sont importantes en particulier durant les premières vingt-quatre heures. Ceci est très marquant pour les mélanges à base de ciments types 10 et Whitehall1. Les déformations développées pour ces deux formulations au bout de vingt-quatre heures représentent entre 50% et 60% des déformations endogènes mesurées à la fin de l'essai. Au-delà de ces vingt-quatre heures, le rapport eau/ciment semble ne pas affecter la cinétique des déformations endogènes.

Le montage R^2D^2 nous a permis de constater une autre information aussi importante. En effet, d'après les mesures obtenues on est en mesure d'identifier le moment à partir duquel le rapport eau/ciment commence à avoir une influence sur le comportement des bétons au jeune âge. Ainsi les moments correspondants au début d'influence du rapport eau/ciment pour les formulations à base de ciments T10, WH1 et T50 sont respectivement 10h, 10h et 20h. Cette information représente un indice sur l'évolution de la rigidité de la matrice cimentaire, et par conséquent sur l'évolution de la réaction d'hydratation. Ceci est en parfaite cohérence avec les constatations de Bresson (2006). En effet, les travaux réalisés par Bresson (2006) dans le cadre de ce projet stratégique ont permis d'identifier les temps de prises pour chacune des formulations expérimentées. Les résultats obtenus ont montrés que les temps nécessaires pour la structuration de la matrice cimentaire des mélanges est indépendante du rapport eau/ciment, de plus, le passage d'une teneur en C_3A de 3 à 11% diminue le temps de prise de moitié. Le temps de prise des mélanges à base des ciments type 10 et Whitehall1 sont de l'ordre de 10 heures, celui des mélanges à base de ciment type 50 est de l'ordre de 20 heures (Bresson, 2006).

En se basant sur ces constatations, les essais issus du montage R^2D^2 montrent que le moment à partir duquel le rapport eau/ciment aura une incidence sur le comportement des bétons au jeune âge correspond à la fin de la période de prise du béton. Ainsi, un autre avantage issu de la technique R^2D^2 consiste à estimer le moment de prise indirectement tout en comparant les courbes des déformations endogènes de deux formulations ayant deux rapports différents, soit 0,30 et 0,40.

Contrairement à d'autres essais conventionnels, le montage R^2D^2 nous a permis d'évaluer le comportement d'ensemble des formulations expérimentées, en particulier au très jeune âge, soit durant les premières vingt-quatre heures d'hydratation. C'est cette période qui démontre plus clairement l'influence du rapport eau/ciment sur le comportement des formulations de bétons expérimentées. En effet, plus ce rapport est faible plus les bétons manifestent des déformations (endogènes et de fluage) importantes. Dans des conditions de restrictions, les contraintes développées sont par conséquent plus importantes. Bien que les déformations de fluage permettent d'atténuer les déformations restreintes et par conséquent l'effet de la restriction, les bétons à faible rapport eau/ciment demeurent les formations les plus à risque face à la fissuration.

Les résultats issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de donner une idée claire à propos de l'influence du rapport eau/ciment sur les mesures des modules élastiques. Toutefois, la tendance est que plus le rapport eau/ciment est faible, plus le module est soit légèrement important soit similaire, en particulier durant les première 24 heures d'hydratation.

Les essais calorimétriques ont montré que les réponses semi-adiabatiques des formulations à base des ciments types 10 et Whitehall1 ne sont pas influencé par le rapport eau/ciment. En d'autres mots, au jeune âge, la chaleur dégagée suite à l'hydratation de ces deux types de ciments ne dépend pas de la quantité d'eau utilisée dans la formulation. Ceci n'est pas le cas du ciment type 50 qui dégage plus de chaleur pour un rapport eau/ciment plus faible. Toutefois, les maximums de chaleur enregistrés pour les formulations utilisant le ciment type 50 sont obtenus au même moment peu importe le rapport eau/ciment utilisé. Cette observation ne peut pas être expliquée à l'échelle macroscopique mais permet de donner un indice sur l'influence de la composition minéralogique des ciments sur le dégagement de la chaleur d'hydratation des différentes formulations de béton expérimentées.

Les résultats issus des essais R^2D^2 au cours de cette deuxième phase expérimentale ont permis d'évaluer l'influence de la composition minéralogique des ciments sur le comportement d'ensemble des formulations expérimentées. Encore une fois, les premières vingt-quatre heures ont été identifiées comme la période la plus critique et la plus marquante pour analyser ces résultats. Les mesures des déformations ont montré que plus la teneur en C_3A est importante, plus

les déformations le sont aussi. Les formulations à base de ciment type 50 (B30T50 et B40T50) démontrent une évolution des déformations endogènes presque nulle durant les premières vingt-quatre heures. C'est uniquement après cette période que les déformations endogènes de ces deux mélanges commencent à évoluer avec des cinétiques beaucoup moins importantes que celles des formulations à base des ciments types 10 et Whitehall.

Le fait que la prise des mélanges à base de ciments caractérisés par de fortes teneurs en C_3A (T10 et WH1) a été atteinte plus rapidement que celle des mélanges à faible teneur en C_3A (T50) donne une indication que la réaction d'hydratation des ciments est pilotée au très jeune âge par la réaction d'hydratation des cérites. Plus la portion des C_3A est faible, plus la cinétique de la réaction d'hydratation est décélérée et vice versa.

5.4 Étude expérimentale – Phase III

Au cours de cette troisième partie expérimentale, les mêmes formulations étudiées au cours de la deuxième phase ont été réexpérimentées sous des conditions thermiques isothermes à 38 °C. Ceci a permis de réévaluer l'influence du rapport eau/ciment ainsi que celle de la composition minéralogique sur le comportement au jeune âge des bétons à haute température. Le choix de la température 38 °C et non pas 40 °C par exemple découle du fait que plusieurs essais normalisés se déroulent à 38 °C tel que les essais alcali-granulats. Par conséquent, tous ses essais ont été réalisés à 38 °C.

La procédure de démarrage a été ajustée pour assurer le bon déroulement des essais R²D². La préparation du béton se fait comme dans le cas des essais isothermes à 20 °C, sous des conditions thermiques ambiantes (environnant 22 °C). Une fois le béton est introduit dans les éprouvettes du montage R²D², la température de cure commence à augmenter graduellement en suivant les profils semi-adiabatiques déjà obtenus lors de la deuxième phase expérimentale (figure 5-37).

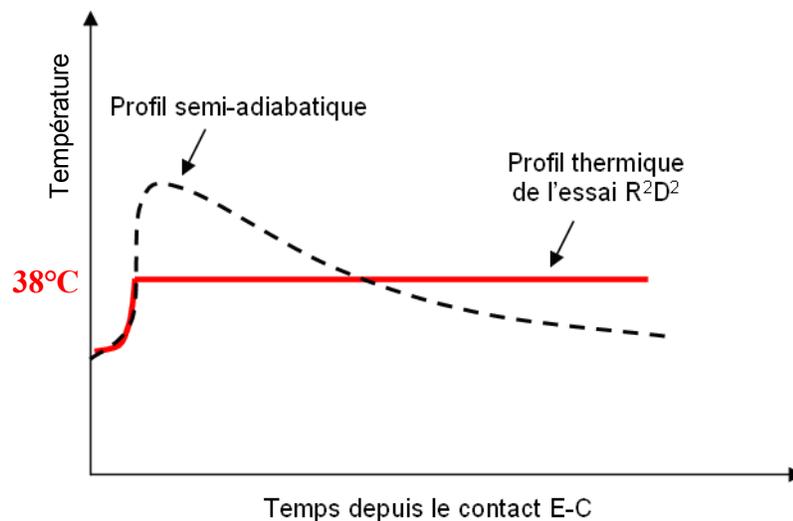


Figure 5-37 : Profil thermique appliquée durant la phase III

Les profils semi-adiabatiques des bétons en étude ont été programmés dans le logiciel R2D2TEMP. Une fois que le béton a atteint la température de l'essai (38 °C), le nouveau critère de démarrage de l'essai R^2D^2 correspond au moment où la contrainte développée atteint 0,01 MPa tout en s'assurant que les capteurs de déplacement enregistrent des mesures « cohérentes » en termes de déformations. Le terme « consistant » signifie que les deux capteurs de déplacement développent des réponses cohérentes, si le LVDT1 démontre un gonflement il faudra que le LVDT2 démontre lui aussi un pareil comportement.

Des éprouvettes destinées à des essais mécaniques ont été préparées en parallèle. Le but est d'évaluer les propriétés mécaniques des mélanges et les combiner par la suite aux résultats des essais de retrait restreint afin d'avoir le maximum d'informations. Nous allons analyser, dans la suite, l'influence du rapport eau/ciment ainsi que de la composition minéralogique des ciments.

5.4.1 Influence du rapport E/C

Dans cette section, nous allons réexaminer l'influence du rapport eau/ciment sur le comportement des bétons au jeune âge sous des conditions isothermes à 38 °C. Les figures 5-38 à 5-43 illustrent l'influence de ce paramètre sur le comportement des bétons à 38 °C. Au moment du lancement des essais R^2D^2 , le béton est encore à la température ambiante. La première phase d'échauffement du béton avant d'atteindre la température de l'essai (38 °C) engendre du gonflement au sein du matériau. Les mesures des déformations endogènes libres mesurées durant cette étape critique de conditionnement thermique ne peuvent pas être exploitées ni interprétées correctement (figure 5-38). Par contre, les déformations endogènes décalées permettent de donner des résultats plus exploitables du fait qu'elles se développent à une température constante durant tout l'essai (figure 5-39).

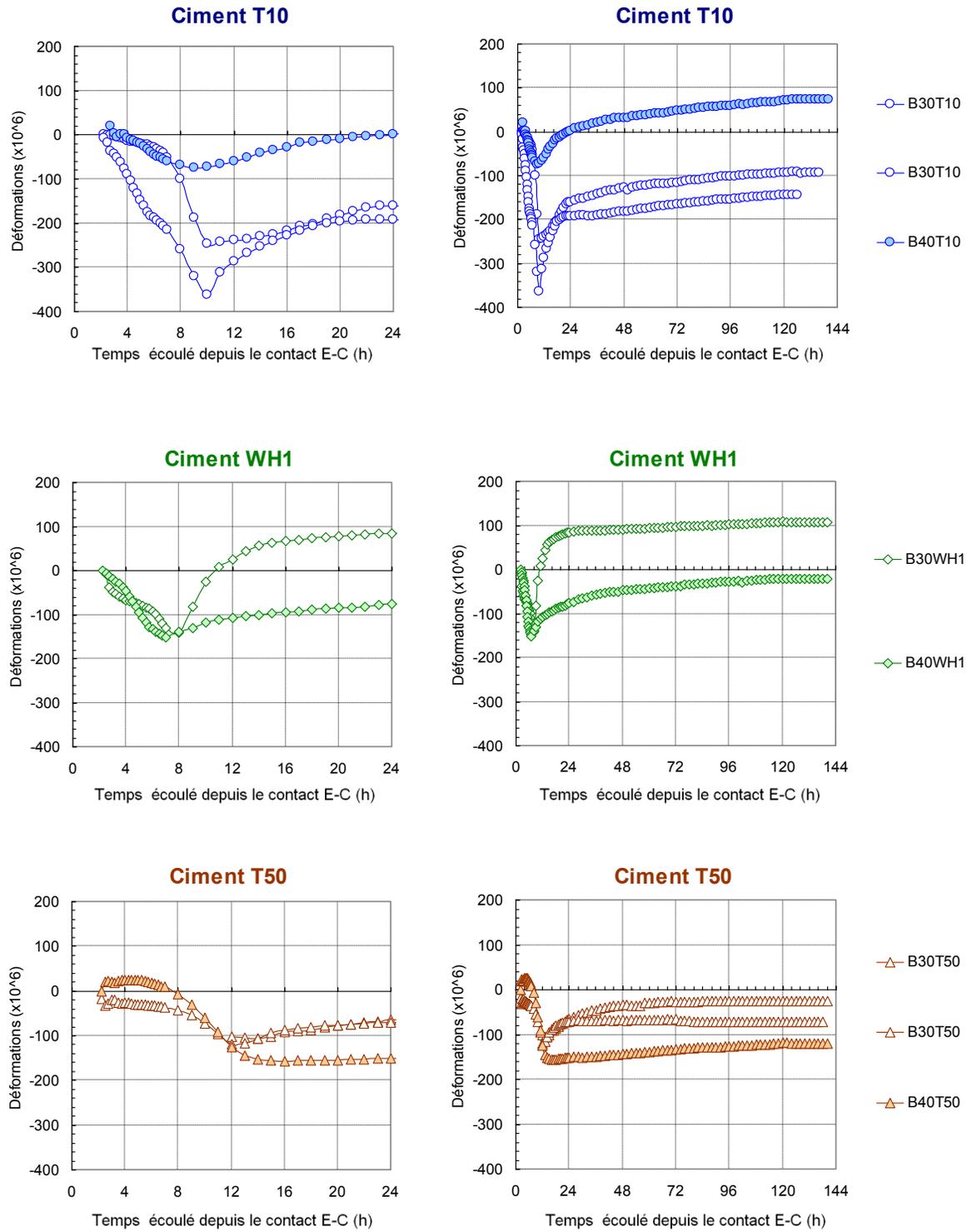


Figure 5-38 : Déformations endogènes totales en isotherme 38°C . - Influence du rapport E/C

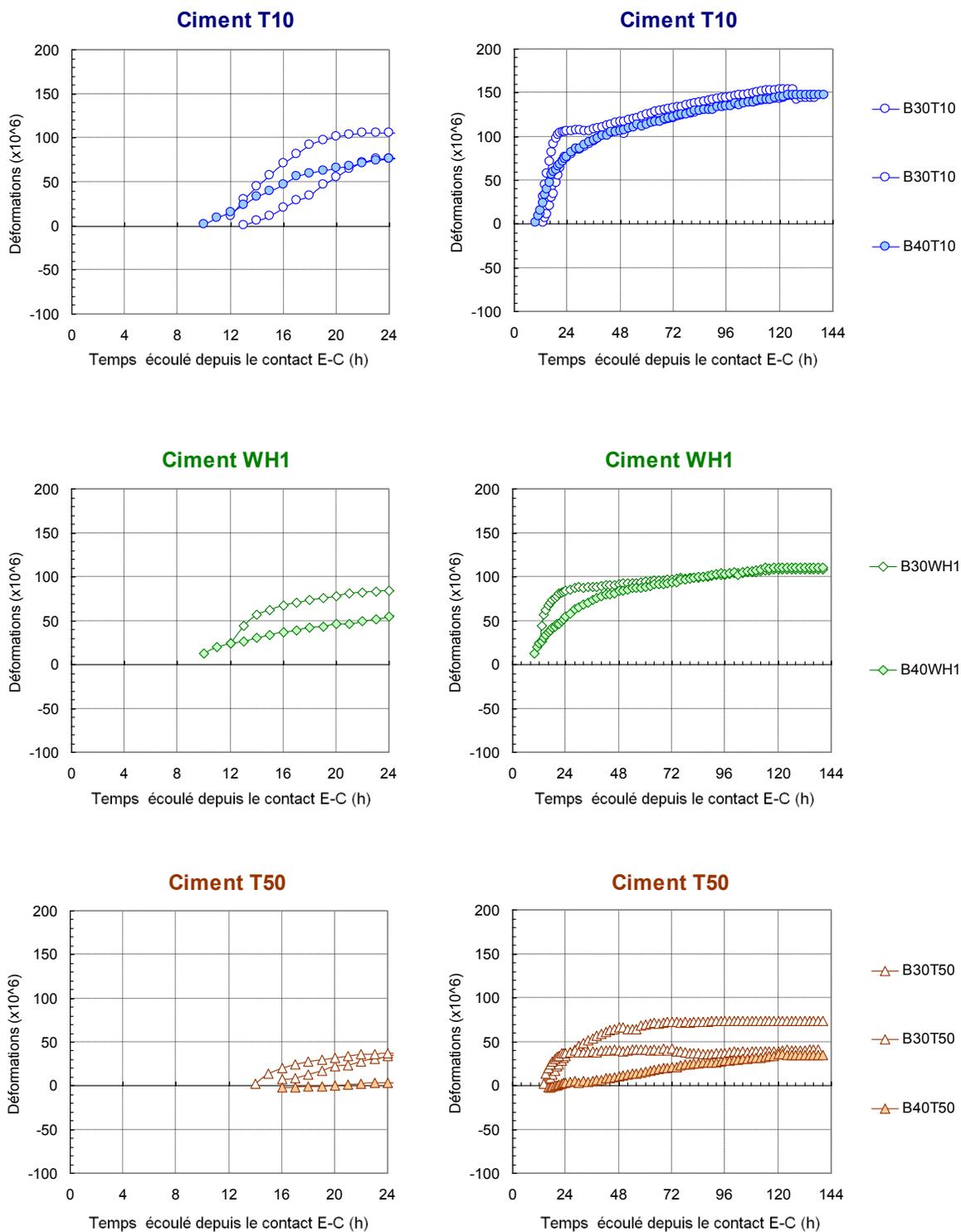


Figure 5-39 : Déformations endogènes décalées en isotherme 38 °C- Influence du rapport E/C

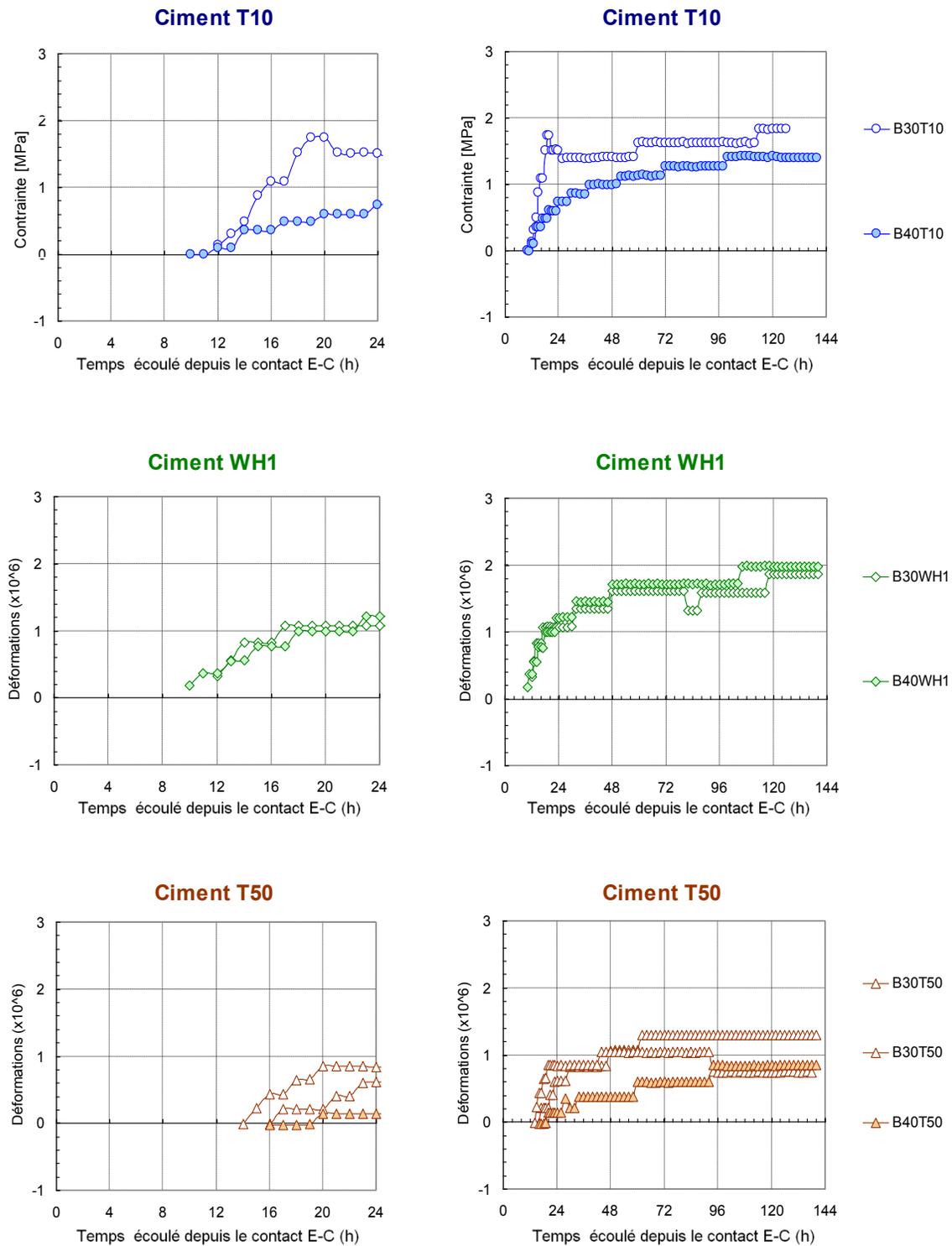


Figure 5-40 : Mesures des contraintes en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C

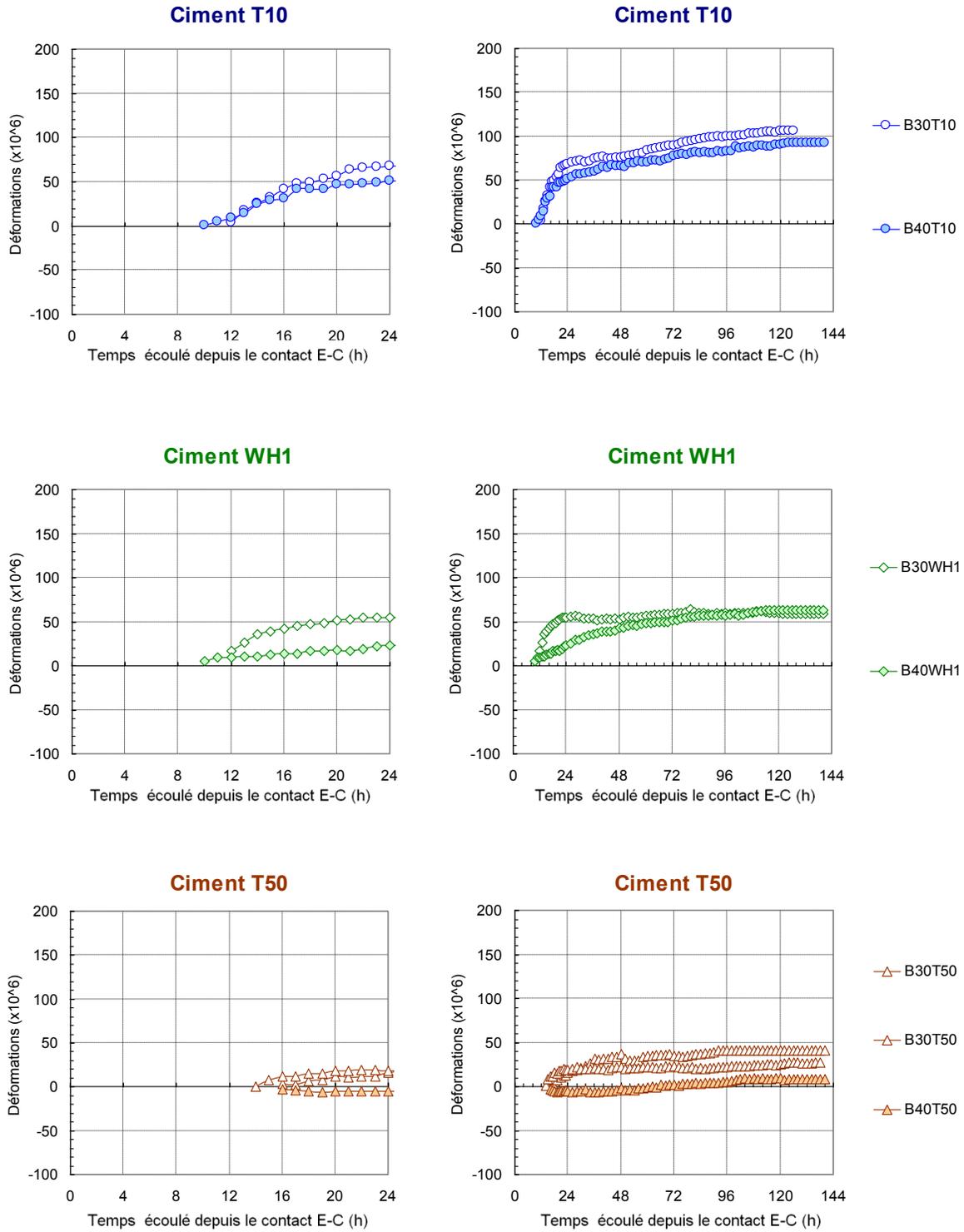


Figure 5-41 : Déformations de fluage en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C

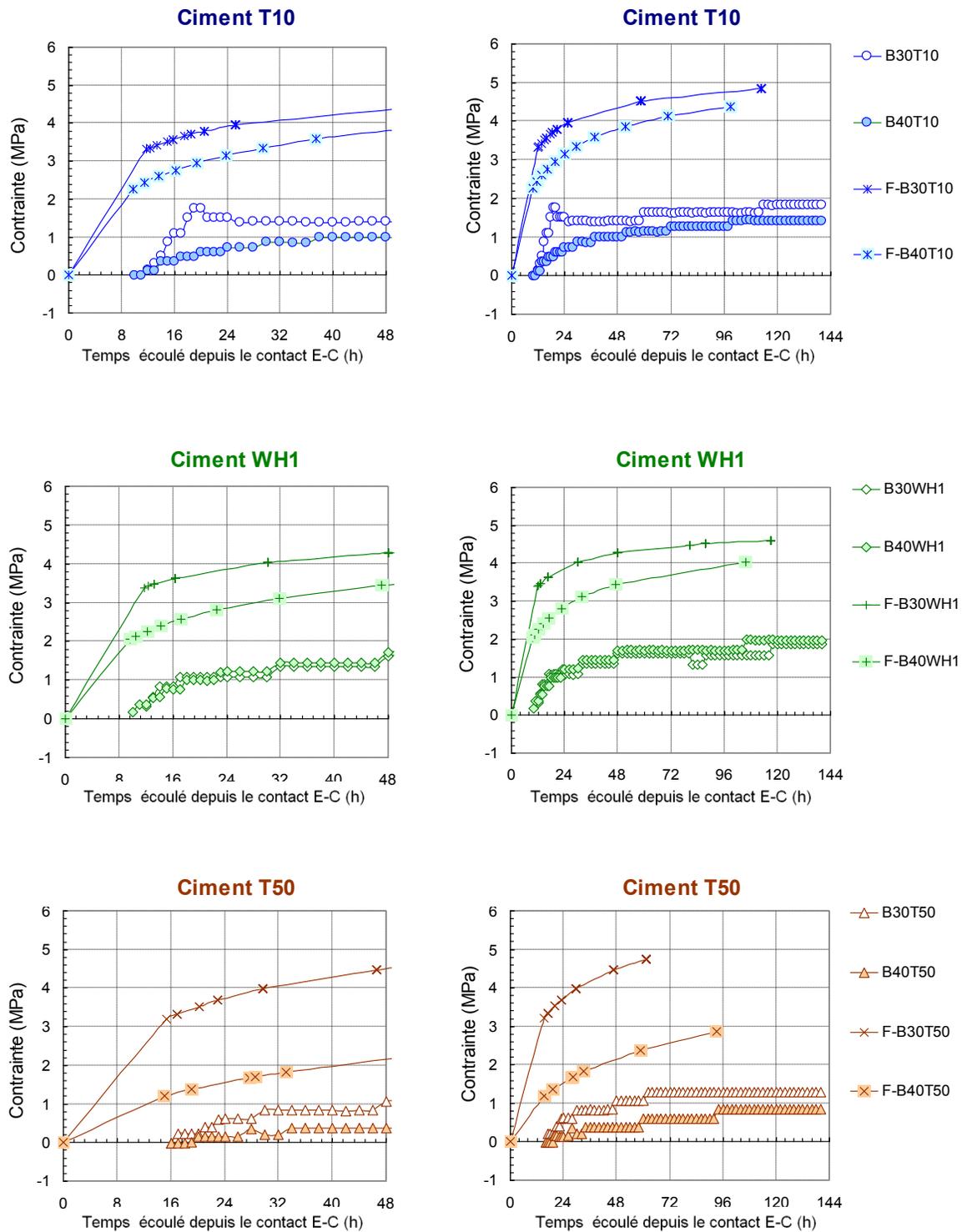


Figure 5-42 : Courbes d'évolution comparatives de la contrainte induite et de la résistance en traction en conditions isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C

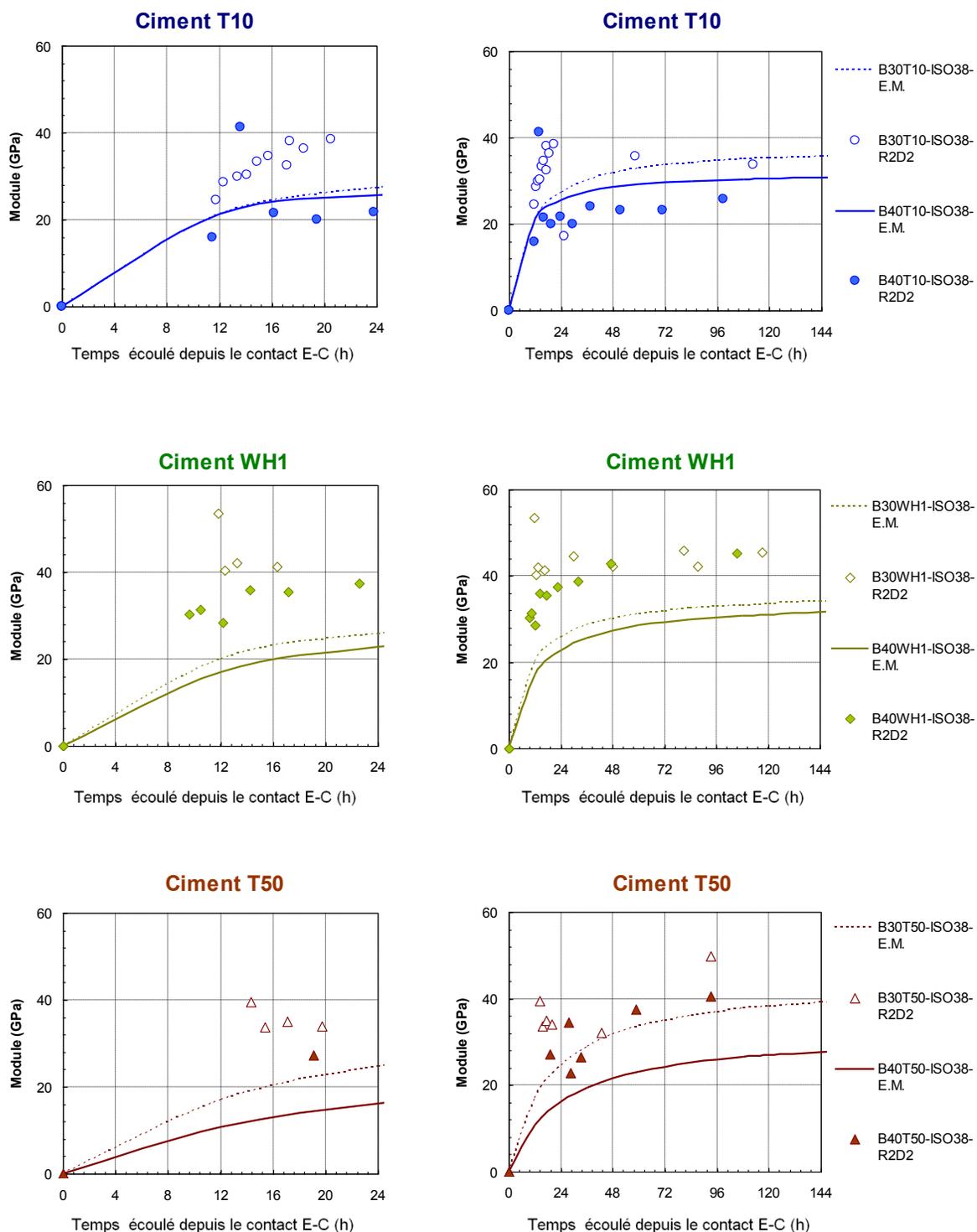


Figure 5-43 : Mesures des modules élastiques en isotherme 38 °C - Influence du rapport E/C

Dans des conditions de cure de 38 °C, dans une plage de 0,30 à 0,40, le rapport eau/ciment semble avoir un impact majeur sur la cinétique des déformations endogènes décalées

et de fluage plus particulièrement durant les premières vingt-quatre heures, et ce pour les trois types de ciments expérimentés. Après cette période, la cinétique de ces déformations semble ne pas être affectée par le rapport eau/ciment pour les bétons ayant de fortes teneurs en C_3A . Dans le cas des formulations à base de ciment type 50, plus le rapport eau/ciment est faible, plus l'amplitude ainsi que la cinétique des déformations sont amplifiées durant les premiers jours d'hydratation. C'est uniquement à partir du cinquième jour d'hydratation que la cinétique de l'évolution des déformations évolue similairement et que le rapport eau/ciment n'aura pas d'influence sur les mesures. Les temps de début d'influence du rapport eau/ciment sur les mesures des déformations endogènes pour les formulations à base de ciments type 10, Whitehall1 et Type 50 sont respectivement 12h, 12h et 16h (figure 5-39).

En examinant les mesures des contraintes développées, nous constatons que les contraintes développées par les bétons à base des ciments type 10 et Whitehall1 sont très similaires pour les deux rapports eau/ciment (figure 5-40). Toutefois, le béton B30T10 démontre une forte amplitude en contrainte par rapport au B40T10 durant les premières vingt-quatre heures. Les bétons formulés à partir du ciment type 50 semblent être les plus influencés par le rapport eau/ciment puisque pour un rapport eau/ciment de 0,30 les contraintes enregistrées sont nettement plus importantes que celles enregistrées pour un rapport eau/ciment de 0,40. La figure 5-42 montre que, bien que les contraintes développées soient amplifiées à des faibles rapports eau/ciment, elles demeurent plus faibles que les enveloppes de résistance à la rupture en traction.

À 38 °C, les mesures des modules élastiques au moyen du montage R^2D^2 ne permettent pas de distinguer une idée claire sur l'influence du rapport eau/ciment. Toutefois les mesures des modules au moyen des essais mécaniques montrent que plus le rapport eau/ciment est faible, plus les modules élastiques sont importants (figure 5-43). Ces résultats concordent avec les travaux de Pertué (2008) qui a expérimenté des pâtes de ciment type CEM I (équivalent au ciment type 10) ayant des rapports eau/ciment 0,30 et 0,40 sous des conditions thermiques isothermes à 20 et 40 °C.

Il faut mentionner ici que les modules élastiques issus des essais R^2D^2 sont obtenus avec une éprouvette ayant subi un historique de chargement, alors que les essais mécaniques normalisés déterminent le module élastique sur des éprouvettes qui n'ont subies aucun historique de

chargement. Ceci remet en question la validité de la comparaison que nous venons de faire puisque la procédure des essais de module ainsi que la forme des éprouvettes et l'historique de chargement ne sont pas pareils.

5.4.2 Influence de la composition minéralogique

Comme il a été mentionné précédemment, les mesures des déformations endogènes totales ne peuvent pas donner des résultats facilement exploitables puisque, durant les premières heures d'enregistrement, la température de l'essai n'a pas atteint 38 °C. Par conséquent, le critère de démarrage de l'essai R^2D^2 n'a pas été satisfait encore.

Comme est le cas dans des conditions isothermes à 20 °C, sous des conditions isothermes à 38 °C, les mesures des déformations endogènes décalées démontrent que les formulations à base des ciments caractérisés par une forte teneur en C_3A (ciments type 10 et Whitehall) développent des amplitudes ainsi que des cinétiques plus importantes que celles mesurées avec les formulations à base de ciment type 50, ayant une faible teneur en C_3A , plus particulièrement durant les premières vingt-quatre heures (figure 5-44). Il est à noter que le ciment type 10 démontre un peu plus de déformations endogènes par comparaison au ciment Whitehall. Un écart de l'ordre de 50 $\mu\text{m/m}$ a été observé entre les mesures expérimentale et ce pour les deux rapports eau/ciment expérimentés. Toutefois, et contrairement aux résultats obtenus sous des conditions isothermes à 20 °C, les bétons formulés à base des ciments type 10 et Whitehall ne présentent pas un deuxième gonflement sous des conditions isothermes à 38 °C. Nous analyserons cette observation dans la section de synthèse des résultats.

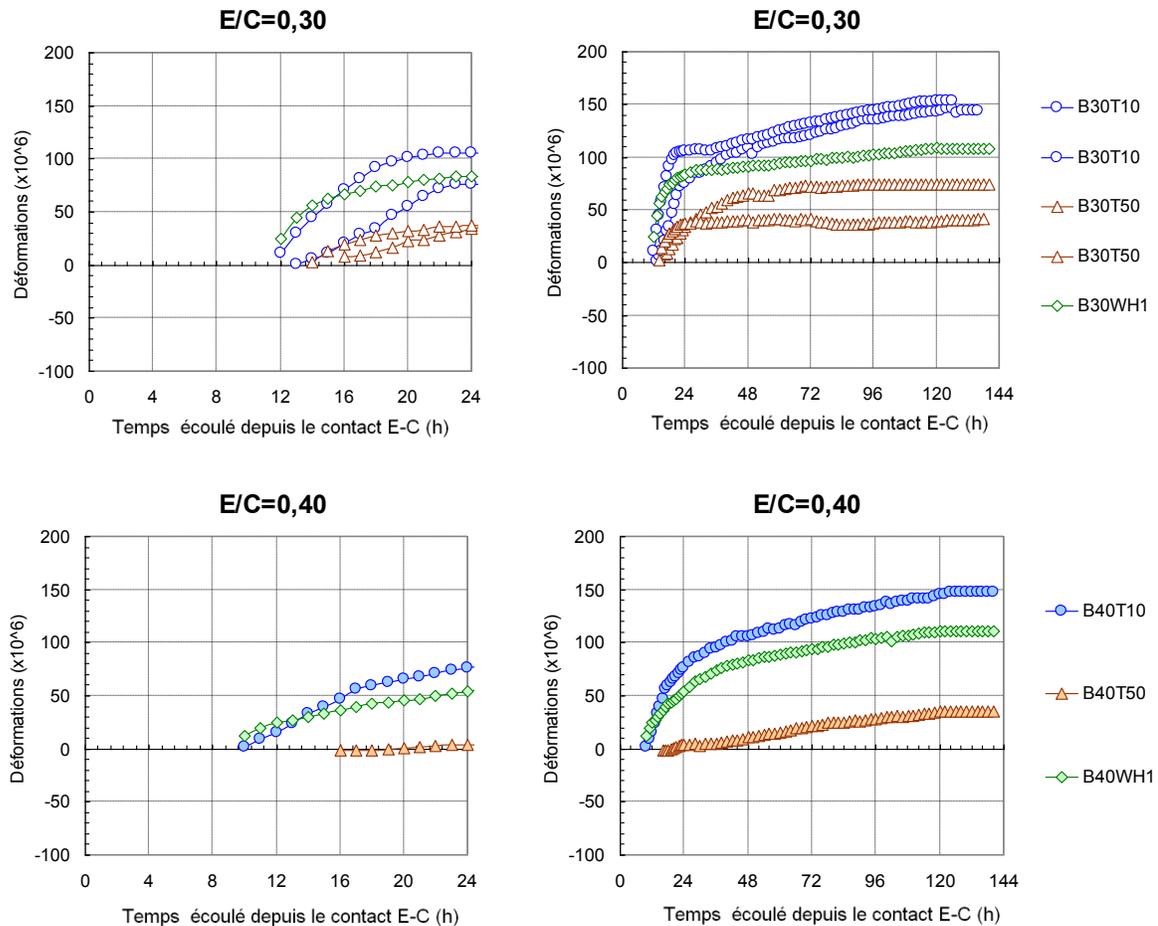


Figure 5-44 : Déformations endogènes décalées en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment.

À 38 °C, l'évolution des déformations de fluage est très similaire à celle des déformations endogènes décalées (figure 5-45). Les formulations utilisant des ciments ayant une forte teneur en C_3A (ciments type 10 et Whitehall) développent des amplitudes ainsi que des cinétiques plus importantes que celles mesurées avec les formulations à base de ciment type 50. Cette affectation est prédominante durant les premières vingt-quatre heures. Par la suite, les cinétiques de développement semblent être similaires pour toutes les formulations.

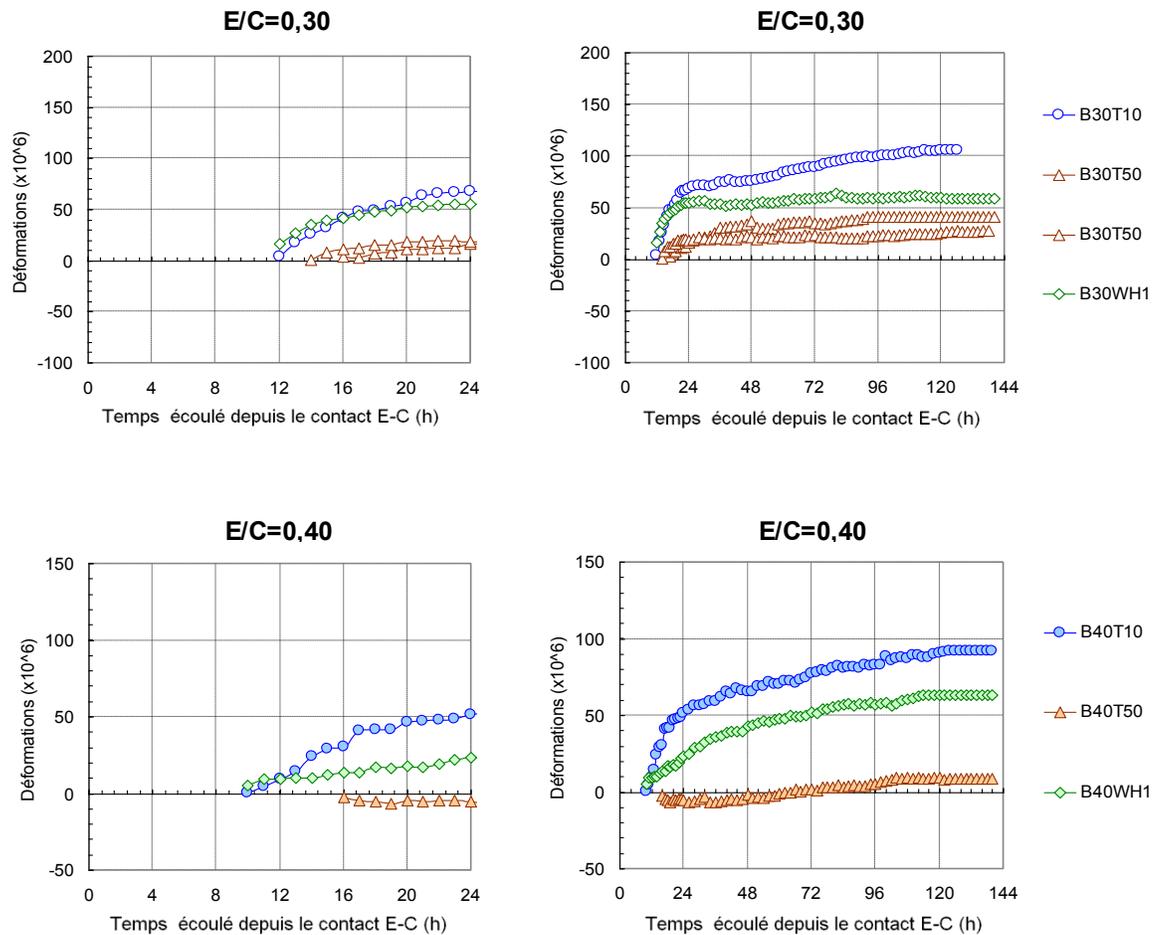


Figure 5-45 : Déformations de fluage en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment

Les figures 5-46 et 5-47 montrent l'influence de la composition minéralogique des ciments sur les mesures des contraintes ainsi que sur l'évolution de la résistance à la traction des différentes formulations expérimentées. Dans des conditions isothermes à 38 °C, il a été constaté que plus la teneur en C_3A est importante, plus les contraintes développées sont élevées. Cette constatation est d'autant plus évidente dans le cas des formulations à fort rapport eau/ciment. Les courbes de résistances en traction issues des essais mécaniques normalisés mesurées sur les bétons ayant une plus forte teneur en C_3A sont supérieures à celles obtenues avec les ciments ayant une plus faible teneur en C_3A .

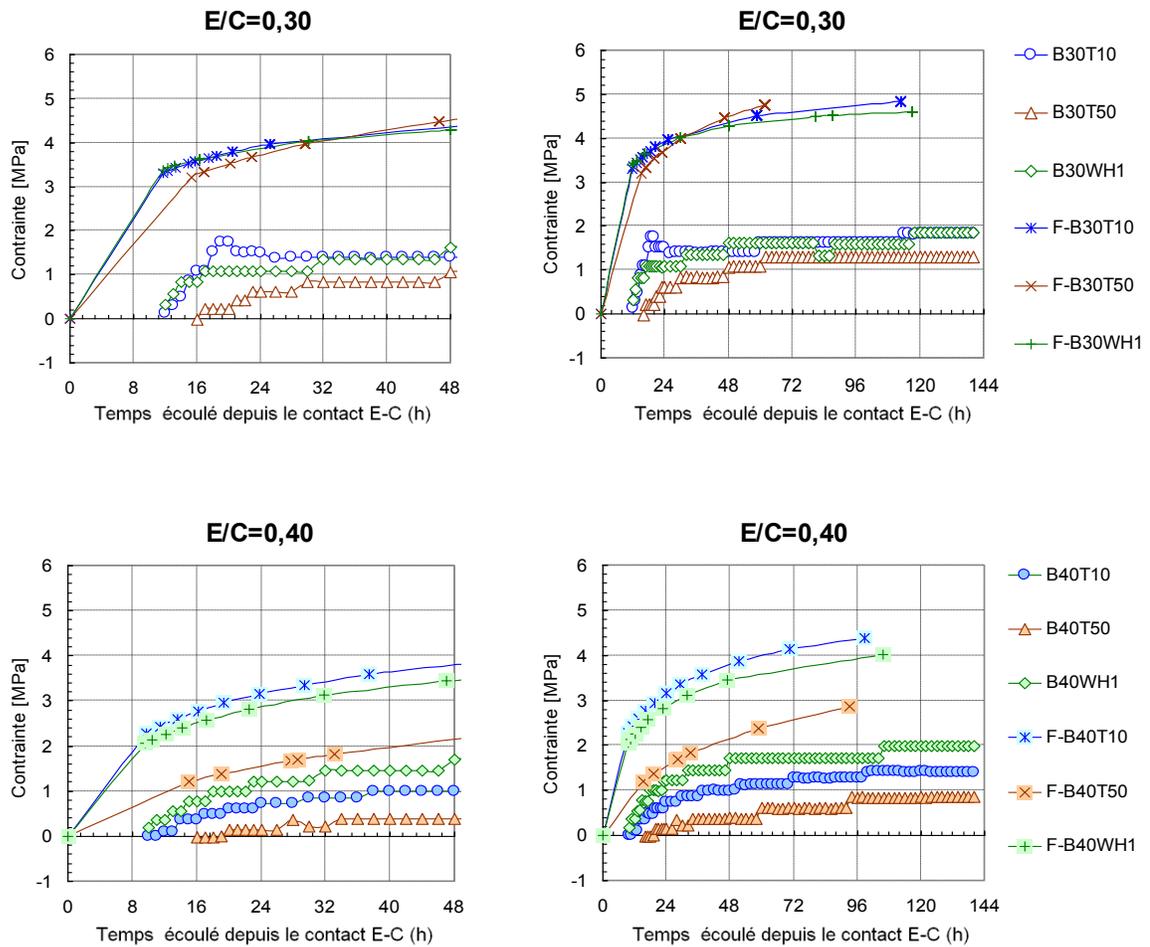


Figure 5-46 : Enveloppes de résistance en traction en isotherme 38 °C - Influence du type de ciment.

Notons que le degré de restriction maximal atteint au cours des essais R^2D^2 était celui du B40WH1 (figure 5-47). Ce dernier a atteint un niveau de 50% de sa résistance en traction. Ainsi, on peut admettre qu'en isotherme 38 °C, les bétons étudiés n'ont pas été endommagés tout au long de la durée des essais R^2D^2 .

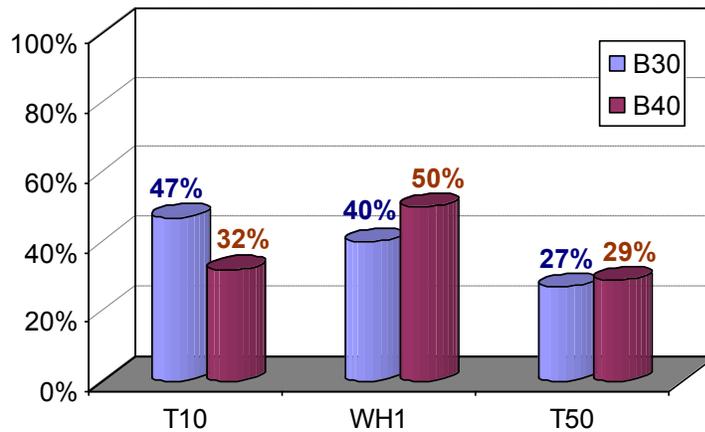


Figure 5-47 : Degrés de restriction atteints vers à la fin des essais R^2D^2 en isotherme 38 °C.

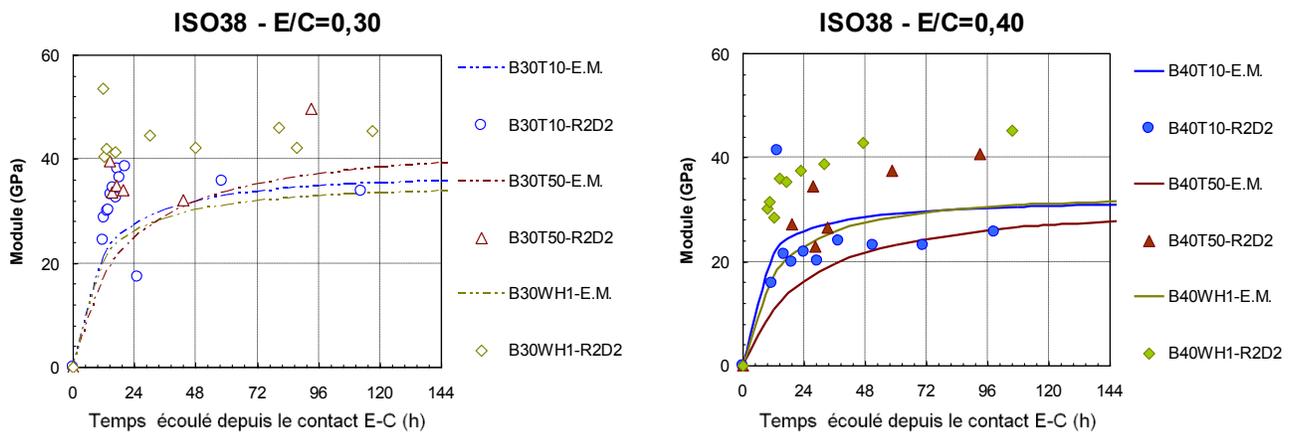


Figure 5-48 : Influence de la composition minéralogique sur les mesures des modules élastiques en isotherme 38 °C

La figure 5-48 illustre les résultats des modules élastiques à 38 °C issus des essais mécaniques (identifiés par le suffixe EM) ainsi que ceux des essais R^2D^2 . Pour les deux rapports eau/ciment testés, les modules des formulations utilisant les ciments T10 et WH1 obtenus avec les essais mécaniques sont très similaires. Une telle tendance n'est pas évidente en examinant les résultats issus des essais R^2D^2 . Au contraire, dans le cas des formulations utilisant les ciments type 10 et type WH1, la figure 5-48 montre une grande divergence entre les modules élastiques

obtenus avec les essais R^2D^2 en particulier pour un rapport eau/ciment de 0,40. De plus, la tendance des modules issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de distinguer une allure propre au cours du temps en particulier pour des faibles rapports eau/ciment ($E/C=0,30$).

Les essais mécaniques montrent, entre autres, que pour des rapports eau/ciment de 0,40, les modules élastiques des formulations ayant de faibles teneurs en C_3A sont plus faibles que ceux mesurés pour les formulations ayant plus importants teneurs en C_3A . Ceci n'est pas le cas pour des faibles rapports eau/ciment où la formulation B30T50 semble présenter des modules plus importants, en particulier à partir de 48 heures d'hydratation. En examinant les divergences entre les mesures issues des essais mécaniques et celles issues des essais R^2D^2 , il semble qu'aucune concordance n'est évidente. Il est à noter que les modules élastiques obtenus des essais R^2D^2 sont déterminés à chaque incrément de retour à zéro des déformations. Ces résultats sont donc obtenus avec des éprouvettes qui ont subi un historique de chargement, un historique de fluage et un historique thermique tout au long de l'essai. De plus, la forme de l'éprouvette et la procédure expérimentale de l'essai R^2D^2 pour déterminer les modules élastiques sont différents de celles des essais normalisés. Pour ces raisons, les mesures issues du montage R^2D^2 pourrait être différentes de celles des essais mécaniques standardisés.

5.4.3 Synthèse des résultats

Au cours de cette troisième phase expérimentale, six mélanges de bétons ont été testés au moyen du montage R^2D^2 . Tous les essais ont été réalisés dans des conditions isothermes à 38 °C. L'influence du rapport eau/ciment et de la composition minéralogiques sur le comportement au jeune âge de ces bétons a été évaluée. Les essais R^2D^2 ont montré encore une fois que les premières vingt-quatre heures constituent une période très critique qui influence le processus d'hydratation des matrices cimentaires et par conséquent le comportement des bétons depuis le très jeune âge. Cette nouvelle technique expérimentale (R^2D^2) a permis d'évaluer différentes mesures d'une façon continue sur les bétons, tel que les déformations endogènes, les déformations de fluage, les contraintes développées dans des conditions de restriction des déformations ainsi que les mesures des modules élastiques, au très jeune âge et durant les premiers jours d'hydratation. Durant la phase initiale d'échauffement (avant d'atteindre la température cible des essais à 38 °C) les déformations endogènes totales n'ont pas été menées dans des conditions isothermes. Par conséquent, durant cette phase qui dure approximativement huit heures, ces mesures ne sont pas exploitables. Les déformations endogènes décalées peuvent être plus facilement interprétées puisque le conditionnement thermique isotherme est satisfait.

Dans des conditions de cure de 38 °C, dans une plage de 0,30 à 0,40, le rapport eau/ciment semble avoir un impact sur la cinétique des déformations endogènes décalées et de fluage plus particulièrement durant les premières vingt-quatre heures, et ce pour les trois types de ciments expérimentés. Après cette période, la cinétique de ces déformations semble ne pas être affectée par le rapport eau/ciment pour les bétons ayant de fortes teneurs en C_3A . Dans le cas des formulations à base de ciment type 50, plus le rapport eau/ciment est faible, plus l'amplitude ainsi que la cinétique des déformations sont amplifiées durant les premiers jours d'hydratation. C'est uniquement à partir du cinquième jour d'hydratation que la cinétique de l'évolution des déformations évolue similairement et que le rapport eau/ciment n'aura plus d'influence sur les mesures. Notons que les temps de début d'influence du rapport eau/ciment sur les mesures des déformations endogènes pour les formulations à base de ciments type 10, Whitehall1 et Type 50 sont respectivement 12h, 12h et 16h.

L'influence du rapport eau/ciment sur les mesures des déformations endogènes et de fluage en particulier durant les premières vingt-quatre heures pourrait être expliquée par le fait que la réaction d'hydratation a été accélérée sous des conditions thermiques de 38 °C. La matrice cimentaire développe à la fois une importante rigidité et un réseau capillaire moins dense par comparaison à la matrice développée à 20 °C. Le mécanisme de la dépression capillaire permet de prédire que plus la matrice cimentaire est poreuse (donc moins dense), plus les tensions capillaires sont moindres, et par conséquent des déformations endogènes moins importantes. Ceci devrait être validé lors de l'analyse de l'effet de la température sur le comportement des bétons au jeune âge.

Du point de vue influence de la composition minéralogique sur les mesures des déformations endogènes et de fluage, il a été constaté que sous des conditions isothermes à 38 °C, plus le béton est faible en teneur de C_3A , plus les déformations le sont aussi. Ceci est encore une fois plus évident durant les premières vingt-quatre heures d'hydratation. Toutefois, et contrairement aux résultats obtenus sous des conditions isothermes à 20 °C, les bétons ayant de fortes teneurs en C_3A ne présentent pas une deuxième phase de gonflement sous des conditions isothermes à 38 °C. Cette constatation sera discutée dans la section « 5.5 Synthèse comparative ».

Sur le plan du comportement mécanique, sous des conditions isothermes à 38 °C, l'influence du rapport eau/ciment est encore une fois plus marquée durant les premières vingt-quatre heures. Durant cette période, le béton B30T10 démontre une cinétique plus importante en contrainte par rapport au B40T10. Dans le cas des bétons formulés à partir du ciment type 50, plus le rapport eau/ciment est faible, plus les contraintes enregistrées sont nettement plus importantes. Dans les mêmes conditions thermiques, il a été constaté aussi que plus la teneur en C_3A est importante, plus les mesures des contraintes développées sont élevées. Cette constatation est d'autant plus évidente dans le cas des formulations à fort rapport eau/ciment. Ceci donne un indice sur l'accroissement de la rigidité de la matrice cimentaire ainsi que du module élastique.

Les mesures des modules issus des essais R^2D^2 ne semble pas donner une piste claire quant à l'influence du rapport eau/ciment, de plus ces mesures sont généralement plus importantes que les modules élastiques issus des essais mécaniques normalisés qui démontrent

que plus le rapport eau/ciment est faible, plus les modules élastiques sont importants. Ces dernières observations concordent avec les travaux de Pertué (2008) qui a expérimenté des pâtes de ciment type CEM I (équivalent au ciment type 10) avec des rapports eau/ciment 0,30 et 0,40 sous des conditions thermiques isothermes à 40 °C. Il faut mentionner ici que les modules élastiques issus des essais R^2D^2 sont obtenus avec une éprouvette ayant subi un historique de chargement, alors que les essais mécaniques normalisés déterminent le module élastique sur des éprouvettes qui n'ont subi aucun historique de chargement. Ceci remet même en question la validité de la comparaison que nous venons de faire puisque la procédure des essais de module ainsi que la forme des éprouvettes et l'historique de chargement ne sont pas pareils.

Les essais mécaniques montrent, entre autres, que pour des rapports eau/ciment de 0,40, les modules élastiques des formulations ayant de faibles teneurs en C_3A sont plus faibles que ceux mesurés pour les formulations ayant de plus importants teneurs en C_3A . Toutefois, l'influence de la composition minéralogique n'est pas évidente si l'on examine les formulations pour de faible rapport eau/ciment.

Les résultats issus des essais R^2D^2 montrent que plus le rapport eau/ciment est important, plus l'influence de la composition minéralogique du ciment sur le comportement des bétons au jeune âge est évidente. Et plus la teneur en C_3A importante dans les bétons, plus l'influence du rapport eau/ciment est marquante, en particulier durant les premières vingt-quatre heures d'hydratation.

Dans la suite l'influence de la température sur le comportement des bétons depuis le très jeune âge sera examinée.

5.5 Synthèse comparative

Afin d'évaluer l'influence de la température sur le comportement des bétons au jeune âge, les résultats des deux dernières phases expérimentales réalisées respectivement à 20 °C et à 38 °C sont comparés (figures 5-49 à 5-59). Ce sont essentiellement les déformations endogènes décalées, les déformations de fluage, les contraintes développées, les courbes de résistances mécaniques ainsi que les modules élastiques qui ont été examinés. Il est à noter que les déformations endogènes totales obtenues dans les essais à 38 °C ne sont pas analysées puisque les conditions thermiques n'étaient pas isothermes durant les premières heures.

Les résultats montrent que la température de cure a une forte incidence sur le comportement des bétons au jeune âge. En particulier, plus le rapport eau/ciment ainsi que la teneur en C_3A sont faibles, plus l'influence de la température est importante. Ceci est d'autant plus évident durant les premières vingt-quatre heures d'hydratation.

En examinant les résultats des essais R^2D^2 sur les bétons formulés avec du ciment à faibles teneurs en C_3A (ciment type 50), il a été constaté qu'à faible rapport eau/ciment (B30T50), une augmentation de la température réduit significativement les cinétiques et les amplitudes des déformations endogènes décalées ainsi que celles du fluage, plus particulièrement durant les premières vingt-quatre heures. Après cette courte période, la tendance demeure la même mais avec une cinétique moins prononcée. Toutefois, pour un rapport eau/ciment plus important (B40T50), une variation de température de 20 °C à 38 °C semble ne pas avoir une influence significative ni sur la cinétique ni sur l'amplitude des déformations endogènes ainsi que celles du fluage, du moins durant les six premiers jours d'hydratation.

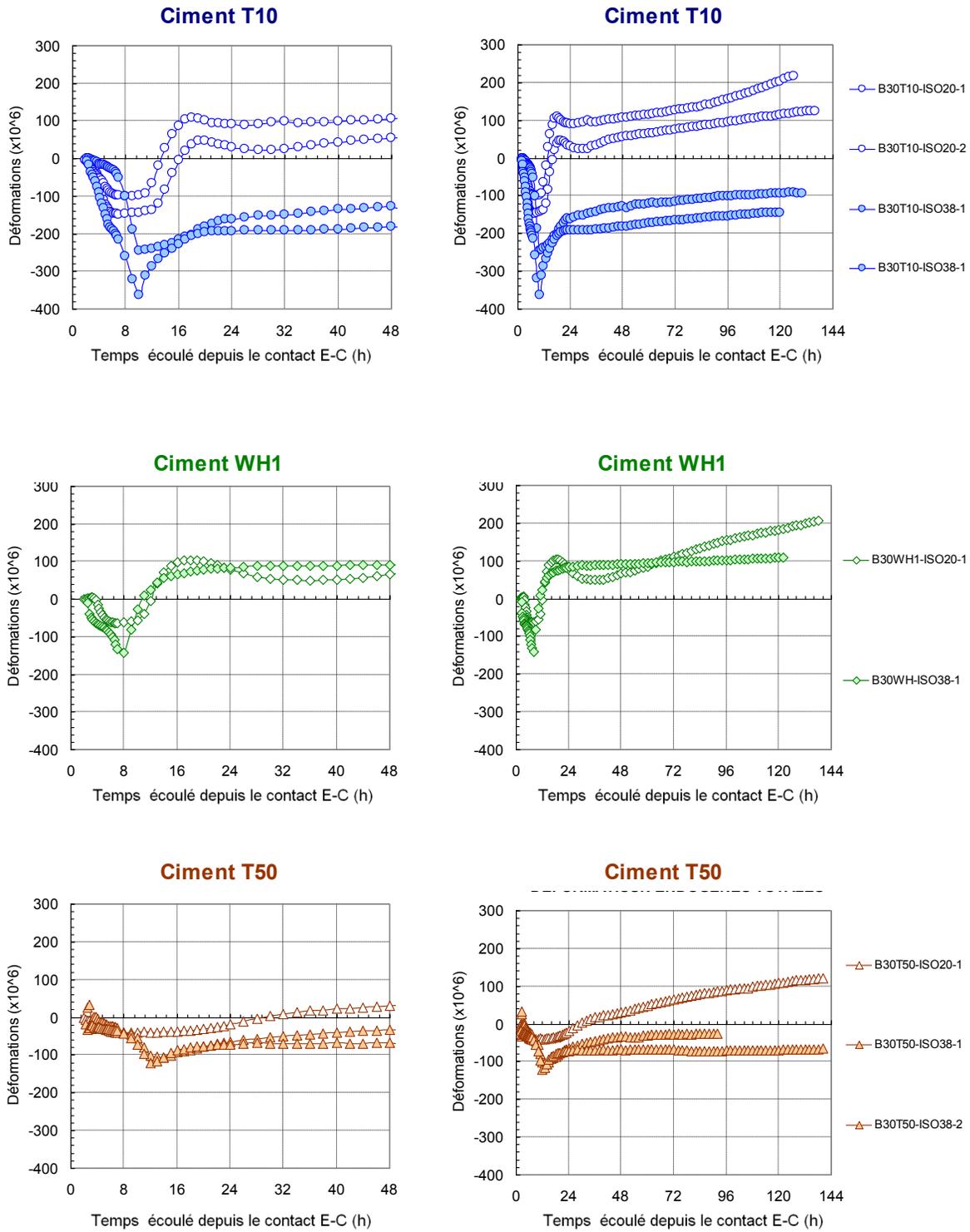


Figure 5-49 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes libres (E/C = 0,30)

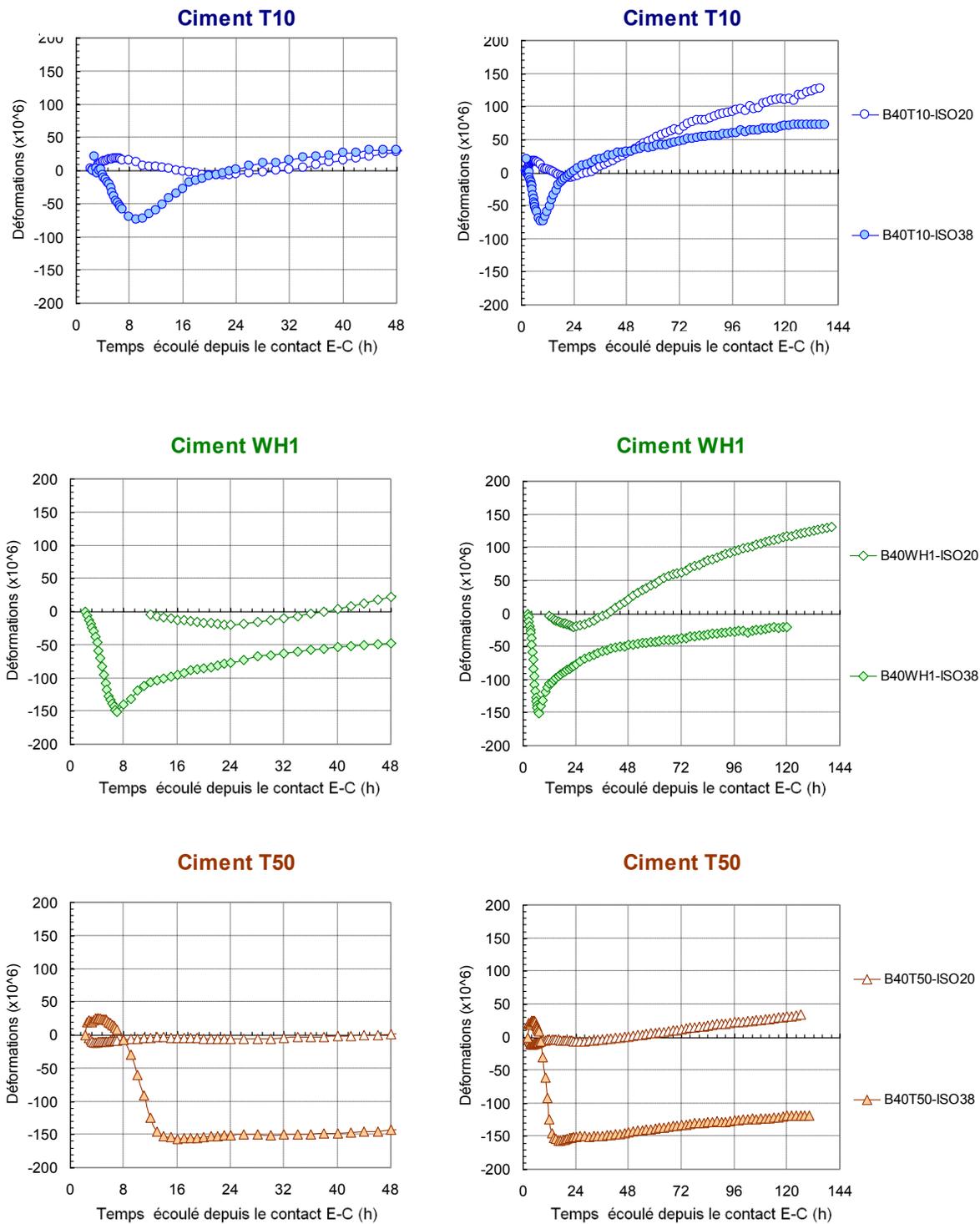


Figure 5-50 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes libres (E/C = 0,40)

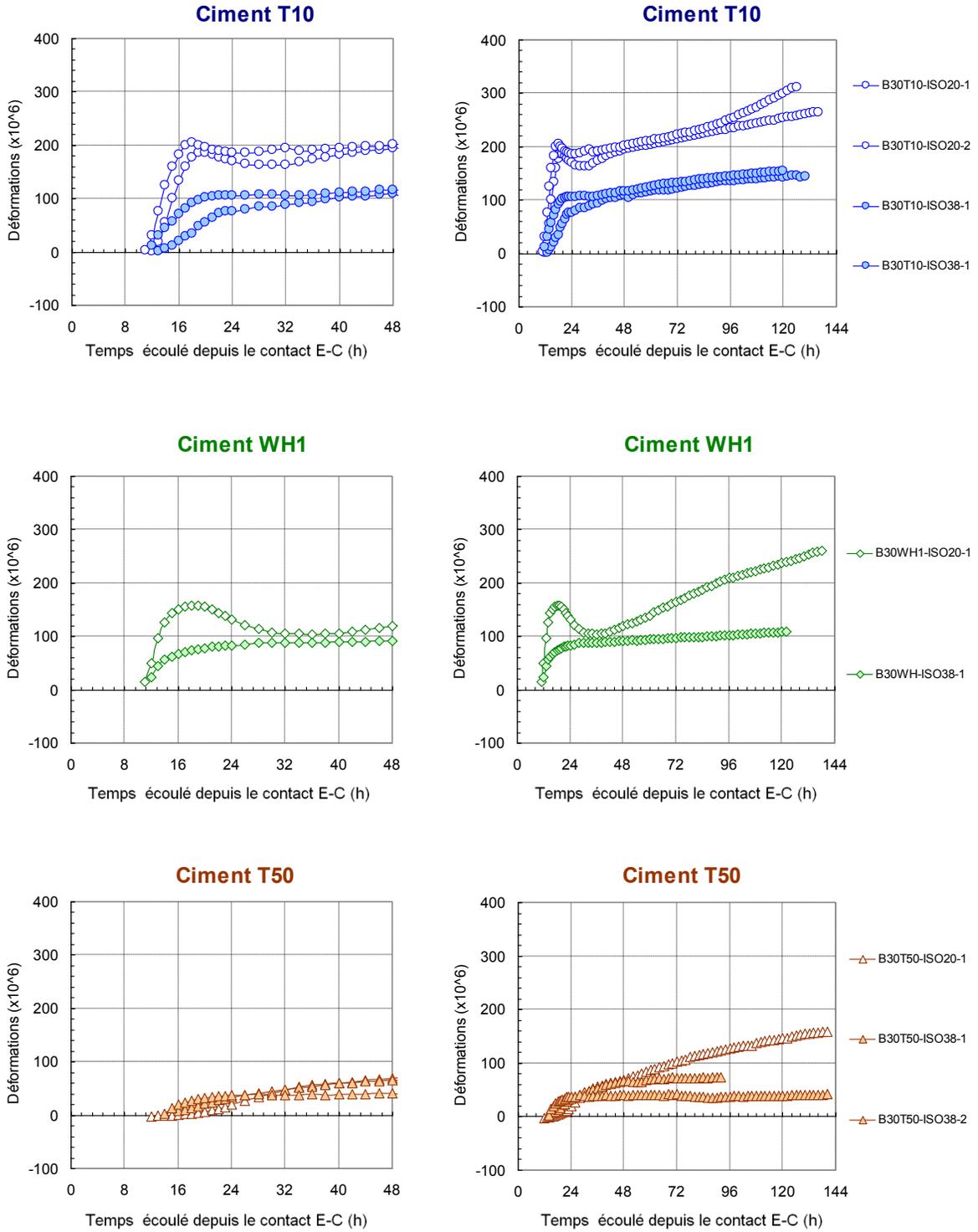


Figure 5-51 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes décalées (E/C = 0,30)

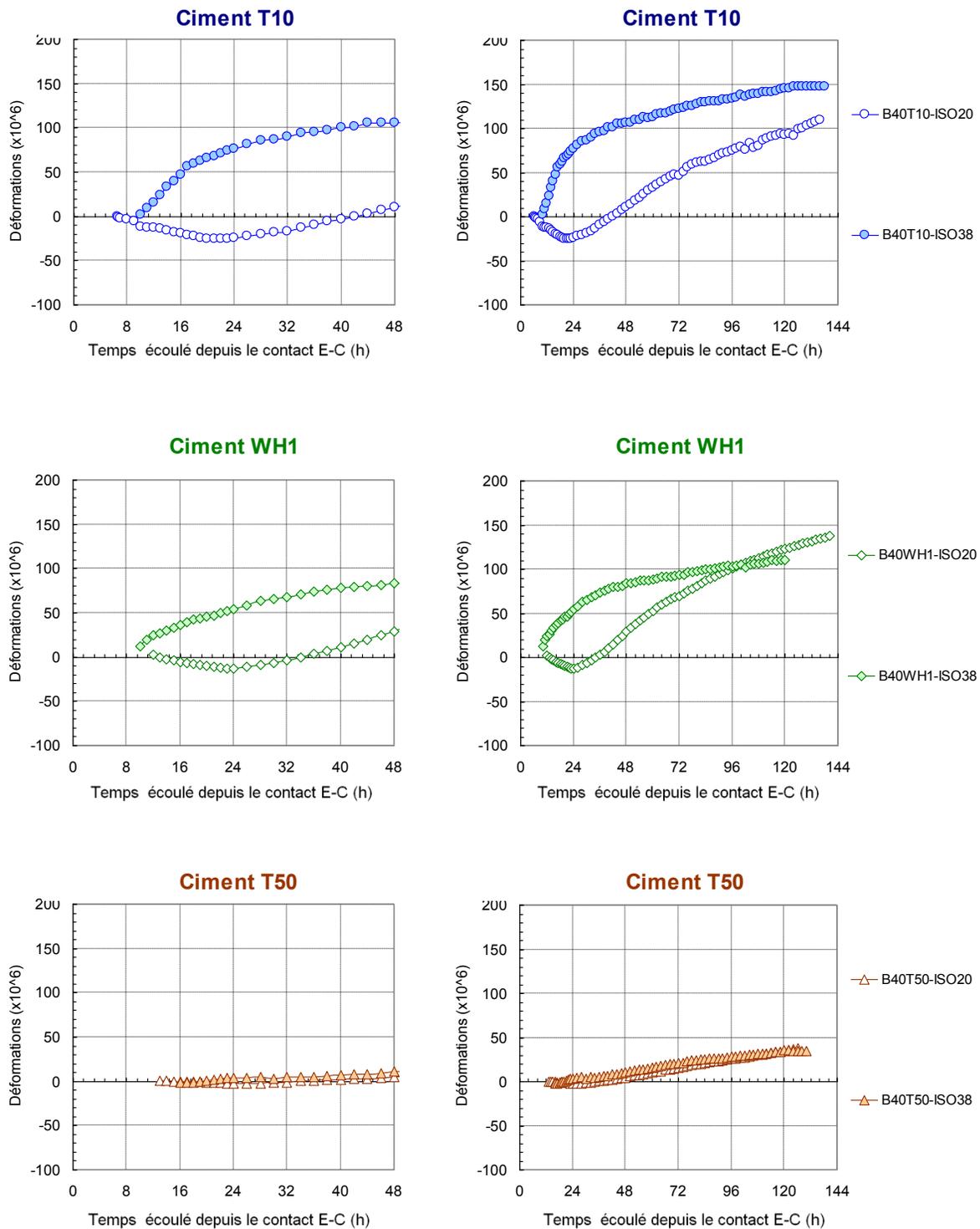


Figure 5-52 : Influence de la température sur les mesures des déformations endogènes décalées (E/C = 0,40)

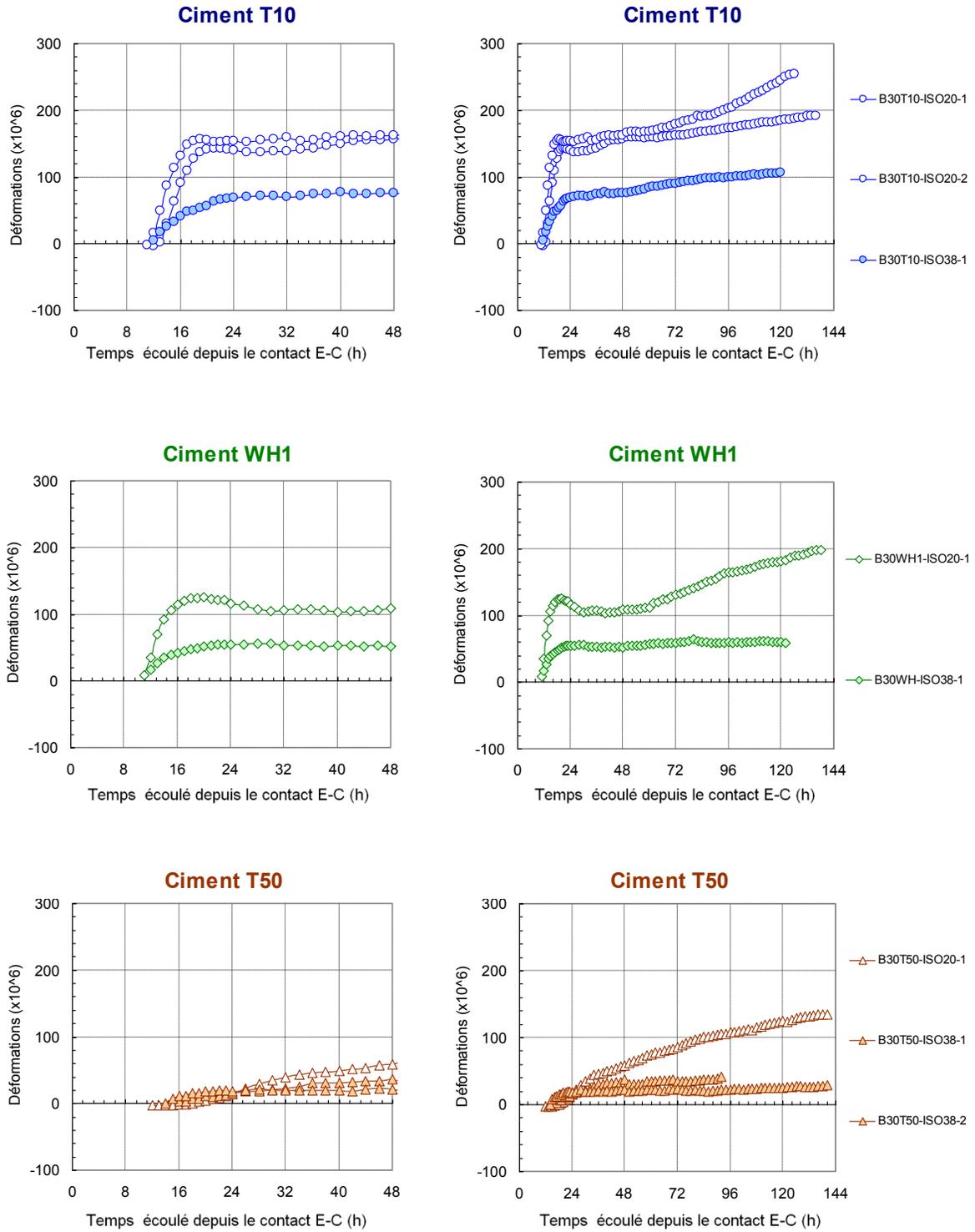
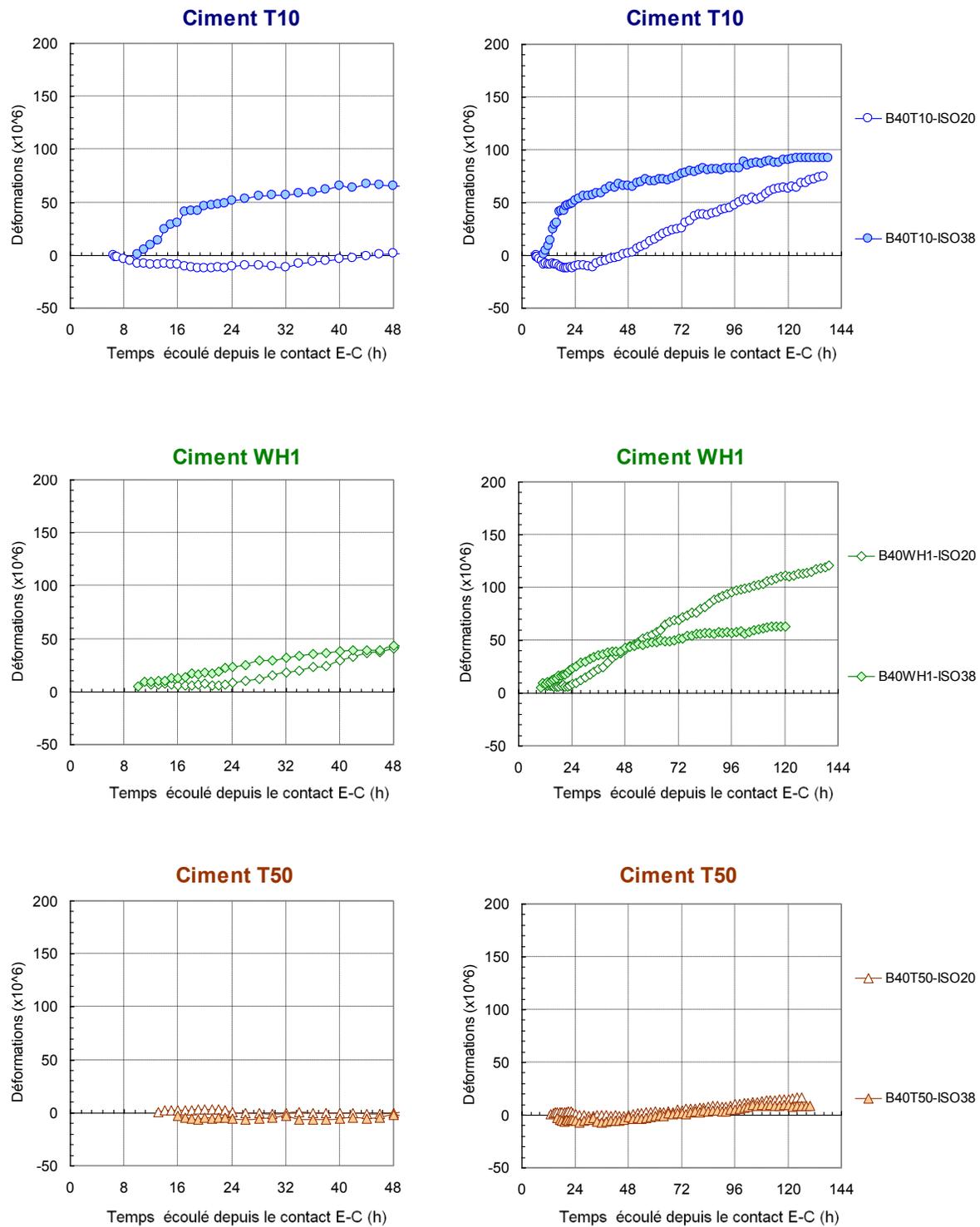


Figure 5-53 : Influence de la température sur les mesures des déformations de fluage (E/C = 0,30)

Figure 5-54 : Influence de la température sur les mesures des déformations de fluage ($E/C = 0,40$)

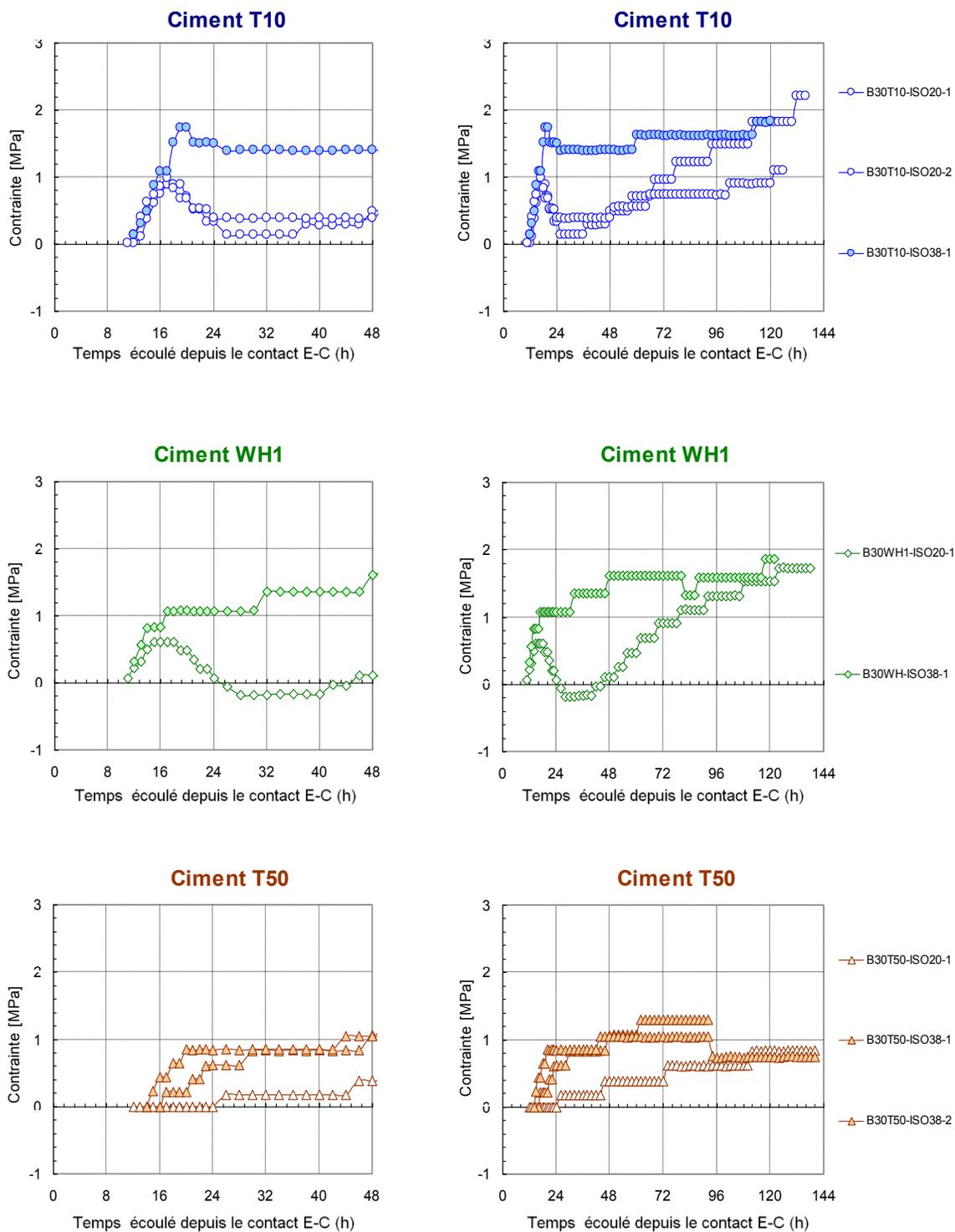


Figure 5-55 : Influence de la température sur les mesures des contraintes (E/C = 0,30)

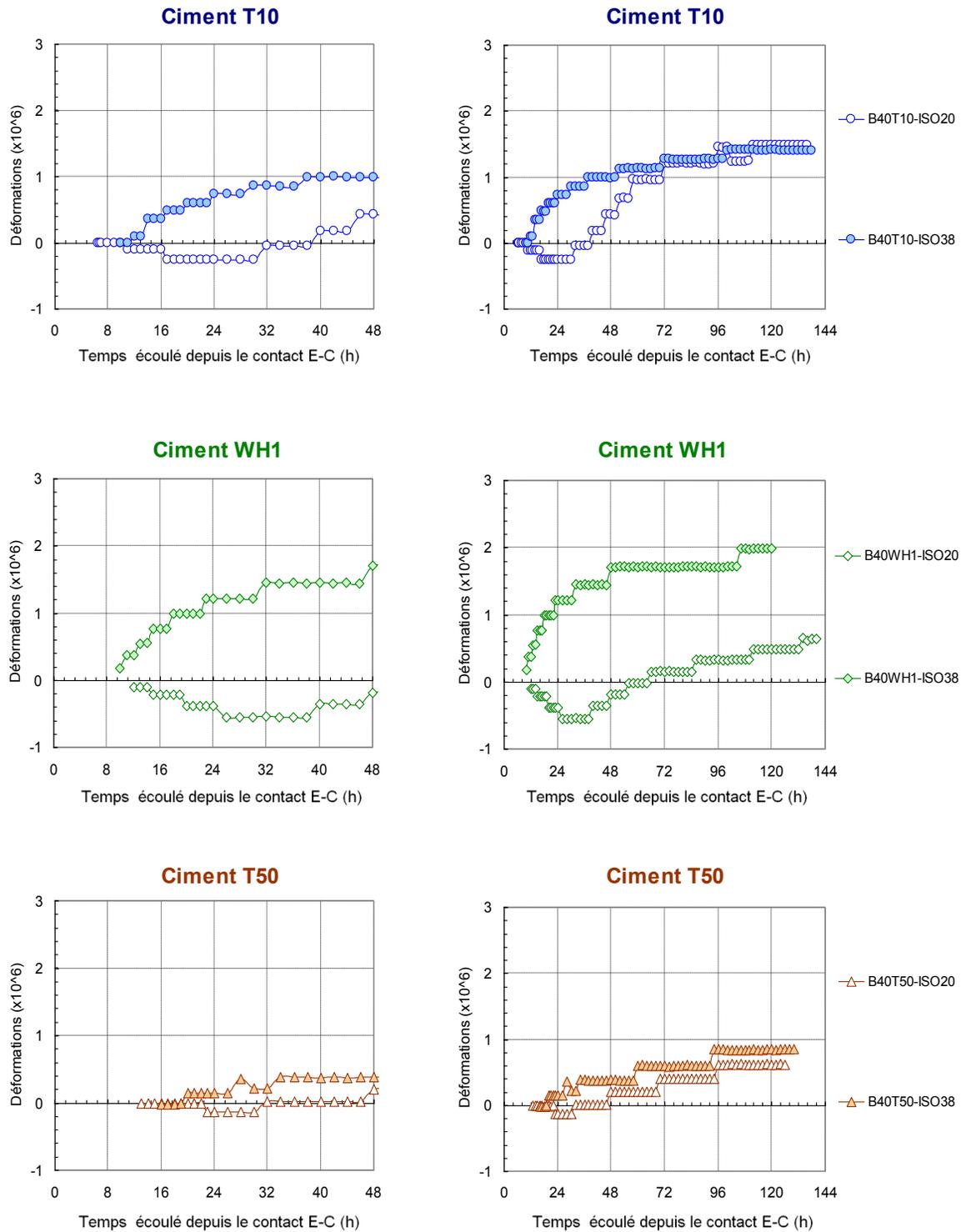


Figure 5-56 : Influence de la température sur les mesures des contraintes ($E/C = 0,40$)

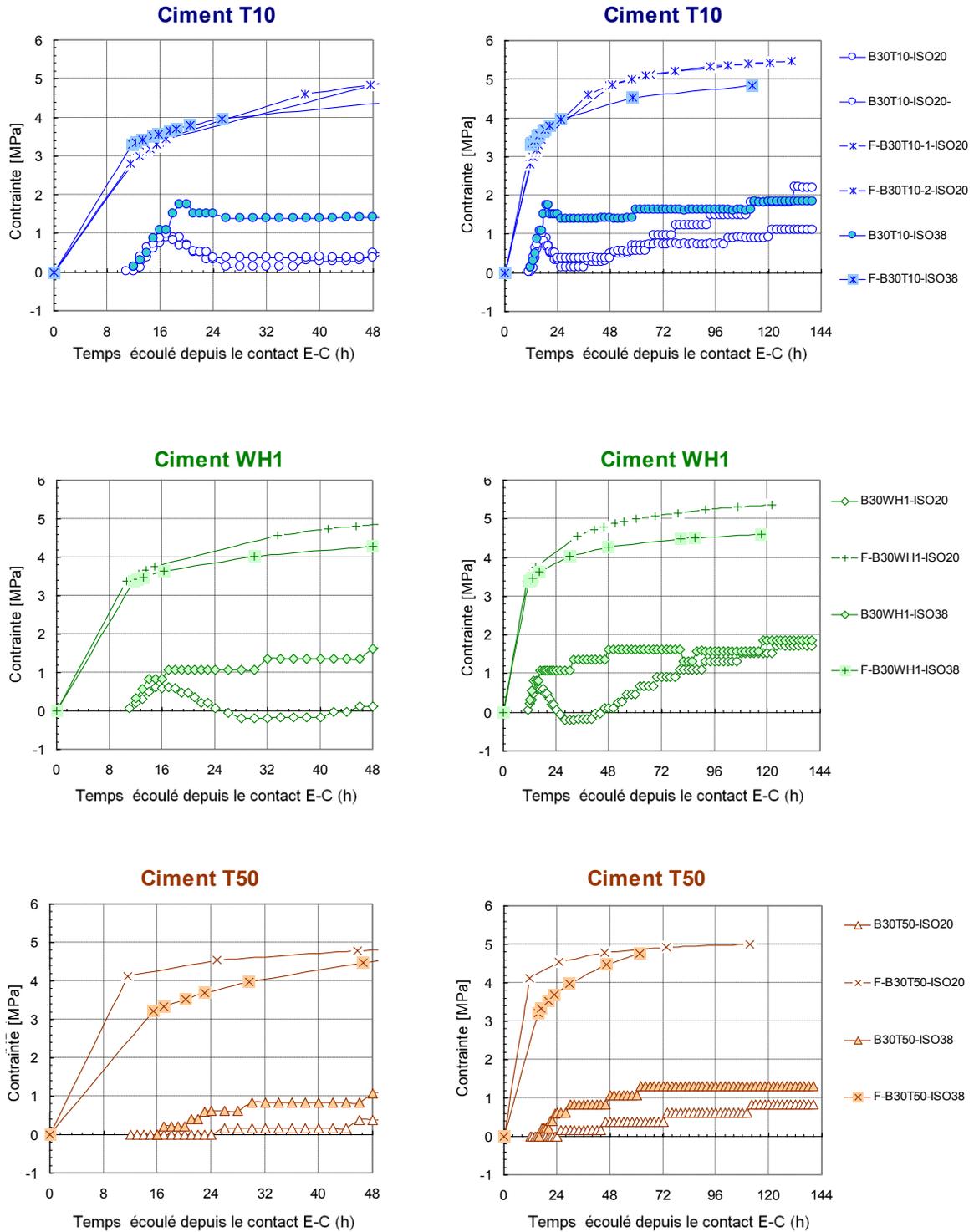


Figure 5-57 : Influence de la température sur les mesures des résistances en traction (E/C = 0,30)

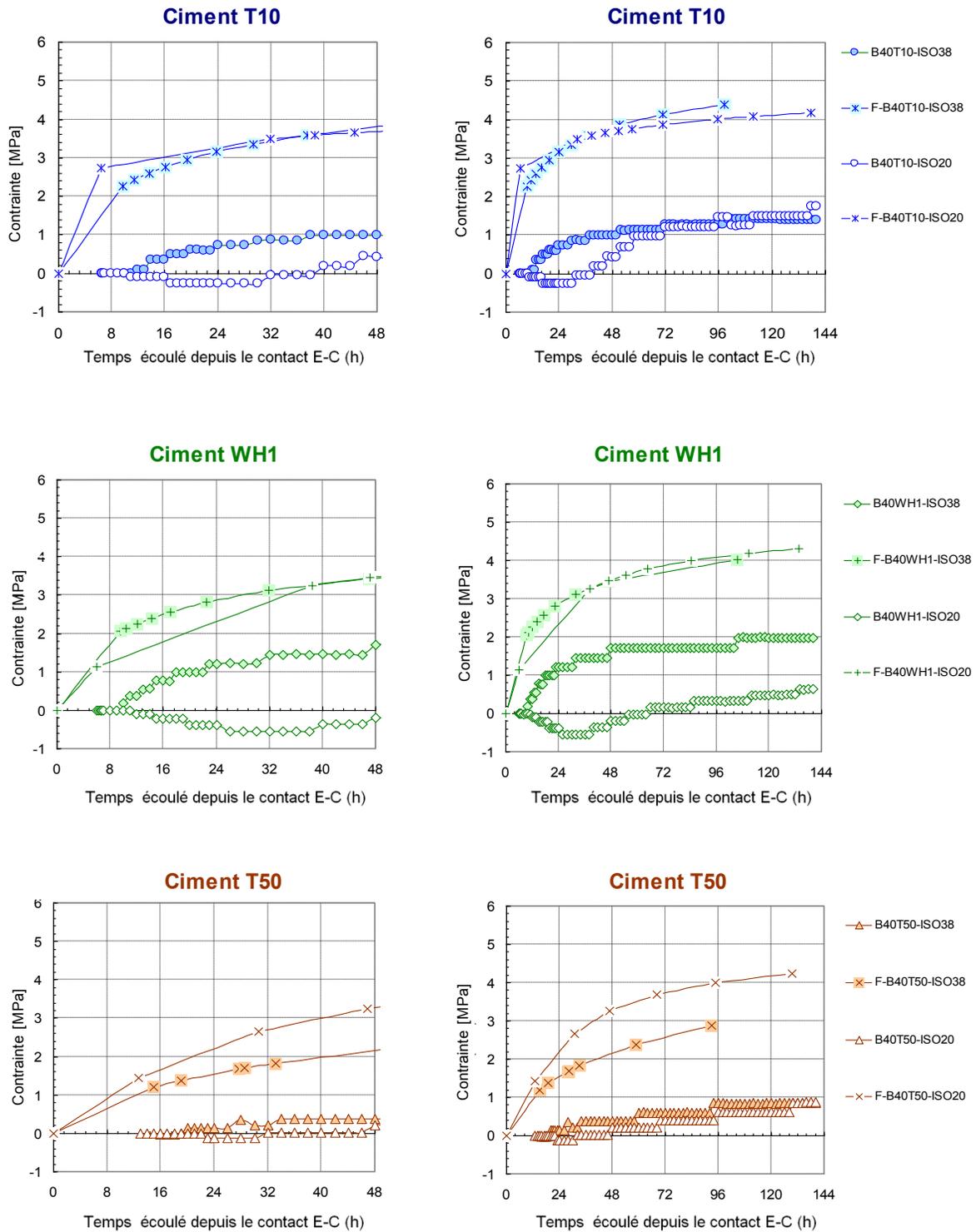


Figure 5-58 : Influence de la température sur les mesures des résistances en traction ($E/C = 0,40$)

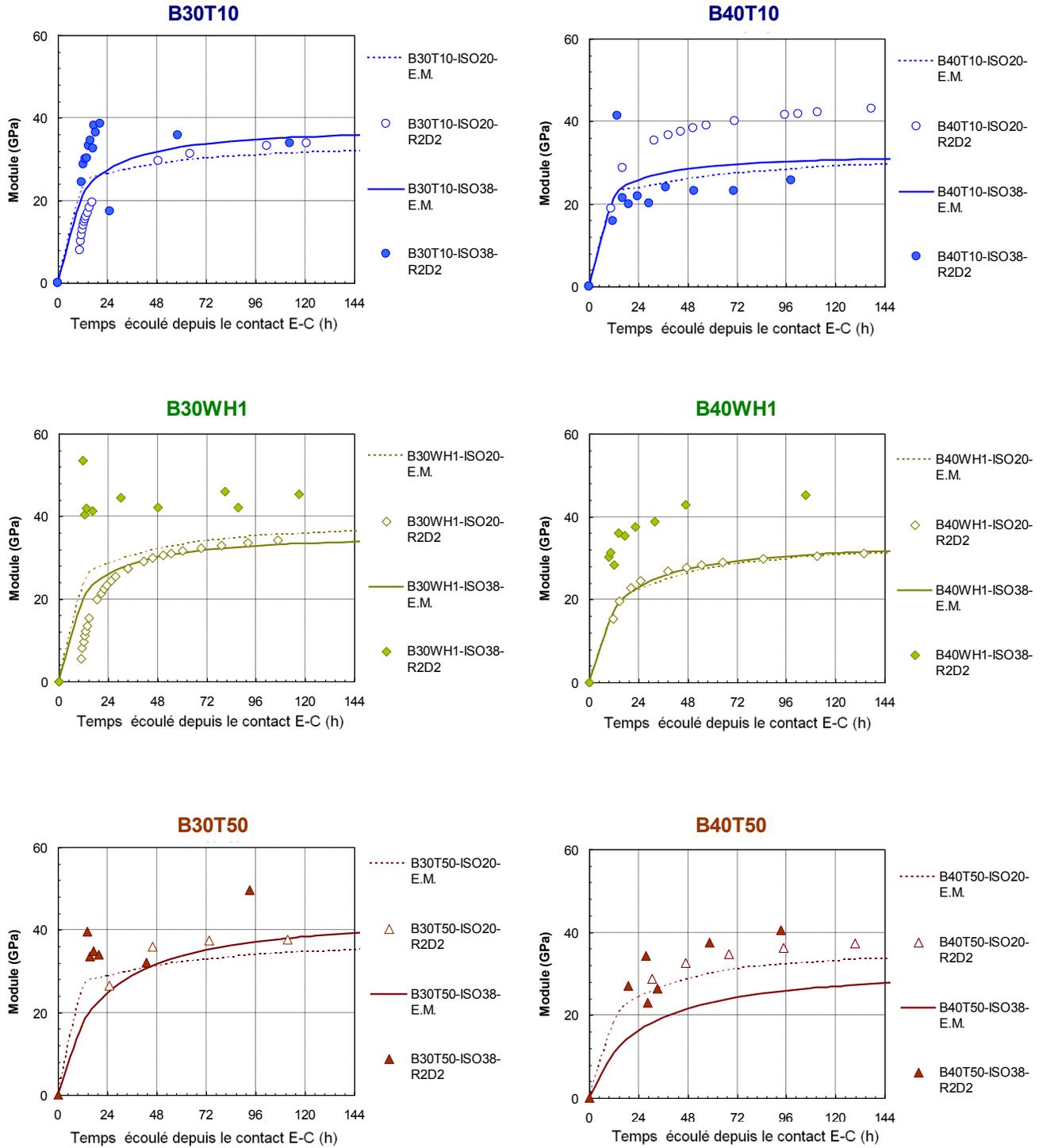


Figure 5-59 : Influence de la température sur les mesures des modules élastiques

Selon Ramachandran (1973), durant les premières quarante-huit heures, plus la température est importante, plus la porosité totale dans la matrice cimentaire est faible et plus la distribution poreuse présente des diamètres plus importants. La distribution poreuse est affectée aussi par le rapport eau/ciment. D'après les travaux de Michaud (2008), plus le rapport eau/ciment est faible et plus la distribution poreuse tend rapidement vers des pores de petites tailles. Par conséquent, la température, le type de ciment ainsi que le rapport eau/ciment affectent directement à la fois le volume et la distribution du réseau capillaire.

Dans le cas des bétons utilisant les ciments type 10 et type Whitehall1, bien que les variations thermiques affectent clairement l'évolution des déformations endogènes et les déformations de fluage, cette influence varie d'une formulation à une autre. Durant les premières vingt-quatre heures d'hydratation, plus la température est importante, plus la cinétique des déformations l'est aussi, probablement à cause de la formation d'une matrice poreuse rigide plus rapidement à haute température. Au-delà de vingt-quatre heures, les distributions poreuses n'évoluent pratiquement plus (Michaud, 2008). Les cinétiques des déformations endogènes et de fluage à 38 °C s'atténuent rapidement par comparaison aux mesures à 20 °C dont le réseau capillaire est plus dense et présente plus de pores de faibles diamètres. Du moment de la structuration de la matrice cimentaire, la théorie de la dépression capillaire permet d'expliquer l'effet croissant de la cinétique des déformations à 20 °C par comparaison aux mesures à 38 °C. En effet, la loi de Laplace permet de prédire que plus les dimensions des pores capillaires est faible, plus les tensions sont importante. La théorie de Kelvin permet de prédire que plus la température est importante, plus la pression dans l'eau capillaire est importante.

Il a été constaté aussi que la phase de gonflement enregistrée à 20 °C après avoir atteint le critère de démarrage entre 16h et 30h pour les formulations B30T10, B40T10, B30WH1 et B40WH1 n'est plus existante dans des conditions isotherme à 38 °C. Ces observations sont en concordance avec les travaux de Pertué (2008) qui ont montré que plus la température est importante, plus la phase de gonflement est atténuée. Dans la littérature, l'influence de la température sur les mesures de gonflement peut être attribuée à un ou plusieurs des mécanismes suivants:

- Une augmentation de la température affecte la structuration du réseau capillaire et favorise la formation au jeune âge de pores de faible rayon (Mounanga et al., 2006). Ceci a comme effet d'amplifier les déformations de retrait et, par conséquent, favorise un bilan déformationnel sans ou avec peu de gonflement.
- Le ressuage est un autre mécanisme qui peut induire du gonflement et qui est affecté par la température. Des études ont montré qu'une augmentation de la température réduit l'incidence du ressuage et par conséquent atténue les risques de gonflement causé par ce phénomène (Josserand & de Larrard, 2002; Bjøntegaard, 1999).
- Au niveau de la formation des hydrates, une augmentation de la température favorise la formation des C-S-H plus denses et par conséquent une matrice plus dense (Gallucci et al., 2006). Selon Ramachandran (1973), une importante température de cure favorise la formation de la phase cubique de C_3AH_6 issue de la réaction d'hydratation des C_3A , tandis qu'à 20 °C, c'est la phase hexagonale, moins dense que la phase cubique, qui se forme en premier. Le produit final est plus compact et par conséquent présente moins de gonflement.

Ces mécanismes montrent qu'une augmentation de la température favorise un bilan déformationnel global net de retrait et permettent de donner une explication à la disparition à haute température de la deuxième phase de gonflement observée à 20 °C.

L'absence du deuxième gonflement à 38 °C dans le cas des formulations B30T10 et B30WH1 a permis d'obtenir des mesures de contraintes de traction tout au long des essais R^2D^2 . Ceci n'était pas le cas des mesures obtenus à 20 °C, où des contraintes de compression ont été enregistrées à chaque fois que les déformations endogènes développent du gonflement. Une autre constatation importante est que durant les premières soixante douze heures, les amplitudes des contraintes mesurées à 38 °C sont plus importantes que celles mesurées à 20 °C. Ceci permet de confirmer que la température a comme effet d'accélérer la prise et le processus d'hydratation à très court terme. Toutefois, ce gain de rigidité des bétons est rattrapé au bout de six jours, où les

amplitudes des contraintes atteints à 20 °C semblent être du même ordre de grandeur que celles mesurées à 38 °C.

Les essais mécaniques de fendage (figures 5-57 et 5-58) ne montrent pas une influence évidente de la température sur les résultats des résistances en traction. D'ailleurs, il semble que les résistances en traction sont peu influencées par la température, du moins entre 20 °C et 38 °C.

Les résultats des modules élastiques issus des essais mécaniques ainsi que ceux obtenus des essais R^2D^2 ont été présentés sur la même figure, et ce pour les deux régimes thermiques isothermes 20 et 38 °C dans le but de les comparer (figure 5-59). Les résultats des essais mécaniques montrent qu'à l'exception de la formulation B40T50, une variation de la température de 20 °C à 38 °C n'a pas une grande incidence sur les mesures des modules élastiques. Dans le cas de la formulation B40T50, une augmentation de la température semble réduire le module d'Young. En analysant les résultats issus des essais R^2D^2 , une pareille conclusion ne peut pas être retenue. Au contraire, ces résultats tentent à montrer qu'une augmentation de la température a comme effet d'amplifier les modules élastiques. Ceci est en désaccord avec les observations en littérature. En effet, les travaux de Pertué (2008) démontrent clairement qu'une élévation de la température se traduit en quelques jours d'hydratation par un croisement des courbes de résistance mécaniques et de module d'Young. Il est clair que les résultats expérimentaux issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de donner une indication évidente à propos de l'influence de la température sur les modules élastiques. De plus, les essais mécaniques standards sont effectués sur les éprouvettes qui n'ont subi aucun historique de chargement alors que les éprouvettes testées avec le montage R^2D^2 ont subi dès la prise un historique de chargement. D'autres essais expérimentaux devront être réalisés dans ce sens pour valider et mieux analyser l'influence de la température sur l'évolution du module d'Young.

Chapitre 6

Conclusions générales et recommandations

Le comportement des bétons au jeune âge est le résultat d'un ensemble de phénomènes très complexes faisant intervenir différents mécanismes à différentes échelles de la matrice cimentaire. Une meilleure compréhension de ce comportement au jeune âge permettra notamment de clarifier l'origine de la fissuration précoce des bétons en service qui met en péril le bon fonctionnement et plus particulièrement la durée de vie des structures en béton. C'est dans cette optique que ce travail de recherche a été initié. Le but ultime est d'aider à mieux comprendre le comportement des bétons, en particulier au jeune âge. Le terme « jeune âge » désigne les premiers jours, voire même les premières heures suivant le déclenchement de la réaction d'hydratation. L'étude du comportement des bétons durant cette période très critique tout en simulant des conditions réelles de service nécessite un dispositif expérimental très poussé et très particulier. Le Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB) à l'Université Laval a été parmi les premiers à s'intéresser à l'étude du comportement des bétons depuis les premières heures de l'hydratation. On y a développé un montage expérimental permettant de simuler le comportement des bétons dans des conditions de restriction des déformations. Ce montage initialement conçu par Toma (1999) permet d'enregistrer dès les premières phases d'hydratation la déformation endogène et la contrainte interne et d'en déduire les déformations instantanées et différées. L'essai de retrait restreint à déformations différées communément nommé « R^2D^2 » a été amélioré une première fois par Charron (2002) qui a introduit une autre composante d'étude fondamentale, à savoir la composante thermique. Cette nouvelle version permet d'imposer différents régimes thermiques aux bétons testés.

La présente étude constituait la suite de ces travaux réalisés antérieurement. La conception du montage a été revue et a été améliorée en vue d'élargir l'étude de l'influence de la température sur le comportement des bétons au jeune âge. Les formulations étudiées par Charron (2002) ont été en premier temps reprises. Par la suite, le programme expérimental a été bonifié en étudiant trois types de ciments ainsi que deux rapports eau/ciment. Le tableau 6.1 résume l'essentiel du travail expérimental réalisé sous différents régimes thermiques isothermes. La notation ISO-XX indique un régime thermique isotherme à XX °C (exemple : ISO-30 indique un régime thermique isotherme à 30 °C). Il est à noter que des essais additionnels ont été réalisés selon des besoins particuliers, tel que des essais de collaboration avec d'autres universités ou centres de recherche.

Tableau 6.1 – Tableau récapitulatif du programme expérimental réalisé

C^(*)	E/C^(**)	PHASE-I	PHASE-II	PHASE-III
T10	0,30		ISO-20	ISO-38
	0,35	ISO-10		
		ISO-20		
		ISO-30		
	0,40		ISO-20	ISO-38
0,45	ISO-10			
	ISO-20			
	ISO-30			
WH1	0,30		ISO-20	ISO-38
	0,40		ISO-20	ISO-38
T50	0,30		ISO-20	ISO-38
	0,40		ISO-20	ISO-38

(*) Type de ciment

(**) Rapport eau/ciment

Au cours de cette recherche expérimentale, trois grandes phases peuvent être distinguées : La première phase consiste en une reprise de quelques essais réalisés par des recherches antérieures afin de valider la répétabilité des essais de retrait restreint (essais R²D²). Durant cette phase, l'étude a été focalisée sur l'influence de la température sur le comportement au jeune âge de deux bétons formulés avec le même ciment (ciment type 10) et deux rapports eau/ciment (E/C = 0,35 et 0,45). Trois régimes de température isothermes ont été appliquées durant les essais de retrait restreint R²D² : 10 °C, 20 °C et 30 °C.

Au cours de la deuxième et de la troisième phase, deux autres ciments ont été ajoutés au programme expérimental. Au total, trois ciments ont été testés, à savoir, un ciment type 10, un ciment type 50 et un ciment type I (Whitehall). Le ciment type 10 ainsi que le ciment Whitehall présentent des compositions minéralogiques très similaires. Toutefois, le ciment type 50 présente une minéralogie plus riche en C₂S et plus faible en C₃A. Ce dernier est caractérisé par une bonne résistance au sulfate. Comme indiqué dans le tableau 6.1, les essais de retrait restreint dans ces deux dernières phases ont été réalisés sous deux régimes thermiques isothermes : 20 °C et 38 °C.

Les principaux aspects examinés à travers cette campagne expérimentale se résument ainsi :

- la répétabilité des essais R²D² ;
- l'influence du rapport eau/ciment pour différents ciments et sous différentes conditions thermiques isothermes sur le comportement des bétons au jeune âge ;
- l'influence de la composition minéralogique du ciment pour différents rapports eau/ciment et sous différentes conditions thermiques isothermes sur le comportement des bétons au jeune âge ;
- l'influence de la température pour différents types de ciments et pour différents rapports eau/ciment sur le comportement au jeune âge des bétons ;

Le terme « comportement au jeune âge des bétons » englobe dans le cadre des essais de retrait restreint considérés les déformations hygrométriques et thermiques et les réponses mécaniques instantanées (élastique) et différées (fluage).

6.1 Répétabilité des essais R²D²

La répétabilité des essais R²D² réalisés par deux utilisateurs du montage a été examinée. Les résultats obtenus au cours de la première phase de cette étude ont été comparés à ceux obtenus par Charron (2002) qui a utilisé le même montage expérimental R²D² et a réalisé plusieurs essais pour un même mélange à des températures isothermes 10 °C, 20 °C et 30 °C. D'après Charron, ses résultats ont montré une répétabilité intra gâchées satisfaisante [Charron, 2002]. Ainsi, pour chaque mélange testé par Charron, un seul mélange a été retenu dans le but de le comparer avec ceux de la présente étude.

Les résultats examinés sont principalement les déformations endogènes libres, les déformations décalées, les déformations de fluage, les contraintes induites ainsi que les modules d'Young. Les résultats inter-opérateurs ont montré des tendances très similaires en termes de profils et de cinétiques des mesures, toutefois les amplitudes présentent certains écarts, parfois non négligeable entre les essais, en particulier pour les essais réalisés à 30 °C. Ces différences ont été mesurées durant la phase d'échauffement et avant d'atteindre la température de l'essai, et par conséquent avant d'atteindre le critère de démarrage. Ces écarts avant démarrage de l'essai R²D² affectent uniquement les mesures des déformations endogènes libres. Ces différences de mesures peuvent s'expliquer par des biais expérimentaux encore non parfaitement contrôlés tel que la procédure de pré-conditionnement thermiques des granulats et la procédure d'atteinte de la température cible des essais isothermes avant d'atteindre le critère de démarrage, de même que par des différences sur le plan matériau tel que des lots d'approvisionnement des divers matériaux constitutifs non nécessairement identiques ou des différences au niveau des quantités d'adjuvants (superplastifiant) utilisées. Par conséquent, il est conclu la répétabilité des essais inter-opérateurs est satisfaisante.

6.2 Influence du rapport eau/ciment

Au cours de cette étude expérimentale il a été démontré que, sous des régimes isothermes variés (10 °C, 20 °C, 30 °C et 38 °C) et pour différents types de ciments, le rapport eau/ciment a une grande influence sur le comportement des bétons depuis le jeune âge. Les résultats ont montré que, peu importe la température de l'essai, plus le rapport E/C est faible, plus les

déformations endogènes sont importantes en termes d'amplitude et de cinétique. Ceci est cohérent avec les résultats des travaux antérieurs traitant ce sujet en particulier pour des températures ambiantes [Justnes et coll. 96 ; Toma et coll. 00 ; Tazawa et coll. 95]. La théorie de Laplace, qui semble être encore valide pour une plage de température variant de 10 °C à 40 °C, permet de dévoiler en grande partie la dépendance des déformations endogènes avec le rapport eau/ciment. En effet, plus ce rapport est faible, plus la matrice cimentaire est dense d'où un réseau capillaire plus fin. Selon cette théorie plus les rayons des pores capillaires sont faibles, plus les tensions capillaires sont importantes. Ceci se traduit à l'échelle macroscopique sous forme de déformations endogènes apparentes, dont l'importance croît avec la diminution du rapport E/C. D'une façon très similaire, le rapport eau/ciment influence aussi les déformations viscoélastiques.

Le rapport eau/ciment n'influence pas uniquement les déformations. En effet, plus ce rapport est faible, plus les contraintes développées sont importantes. Ceci peut être attribué à une structuration plus dense et à la formation d'un réseau capillaire plus fin au sein de la matrice cimentaire. Les résistances mécaniques, en traction et en compression, sont par conséquent améliorées. Les niveaux de chargement mesurés au cours des essais R^2D^2 n'excèdent pas 45% de la limite de résistance en traction de chaque formulation. Ceci laisse croire que les bétons étudiés dans le cadre de cette étude se comportent élastiquement tout le long des essais de retrait restreint.

Les mesures issues des essais R^2D^2 ne permettent pas de formuler des conclusions précises concernant l'influence du rapport E/C sur le module élastique sous des différentes conditions thermiques. Par contre, les résultats des essais mécaniques montrent que le module d'Young est d'autant plus important si le rapport E/C est faible. Cette constatation a été validée avec toutes les formulations. Ces résultats concordent avec les travaux de Pertué (2008) qui a expérimenté des pâtes de ciment type CEM I (équivalent au ciment type 10) ayant des rapports eau/ciment 0,30 et 0,40 sous plusieurs conditions thermiques isothermes, entre autre à 20 et 40 °C. Il faut mentionner ici que les modules élastiques issus des essais R^2D^2 sont obtenus avec une éprouvette ayant subi un historique de chargement, alors que les essais mécaniques normalisés déterminent le module élastique sur des éprouvette qui n'ont subi aucun historique de chargement.

Ceci remet en question la validité de la comparaison que nous venons de faire puisque la procédure des essais de module ainsi que la forme des éprouvettes et l'historique de chargement ne sont pas pareils.

Les essais calorimétriques, permettant de caractériser l'évolution de la réaction d'hydratation, ont montré que les profils des dégagements de chaleur mesurés avec des ciments types 10 et Whitehall ne semblent pas être trop influencés par le rapport eau/ciment. C'est uniquement au cours des premières vingt-quatre heures d'hydratation que les mesures montrent un dégagement de chaleur plus tardif lorsque le rapport eau/ciment est faible et ce pour les deux types de ciment T10 et Whitehall. Ce retard a été évalué approximativement à quatre heures. Le pic de température atteint est quasi identique pour les courbes calorimétriques pour les formulations préparées avec les ciments T10 et WH1, à plus ou moins 2 °C.

Les retards observés dans le cas des formulations à rapport E/C plus faibles sont vraisemblablement attribuables aux dosages accrus en fluidifiant. Dans le cas des formulations B30T10 et B30WH1, la quantité de superplastifiant est en effet de l'ordre de 15 litres au mètre cube de béton, alors que pour les formulations B40T10 et B40WH1 la quantité de superplastifiant est de l'ordre de 4 litres au mètre cube de béton.

Dans le cas des bétons à base de ciment type 50, la tendance est un peu différente. Bien que l'effet retardateur au très jeune âge n'a pas été observé dans ce cas, il a été constaté que plus le rapport eau/ciment est faible, plus le pic des courbes semi-adiabatiques est important.

6.3 Influence de la composition minéralogiques du ciment

Trois types de ciments ont été utilisés dans la formulation des bétons à savoir, un ciment type 10, le ciment Whitehall et un ciment type 50. Les compositions minéralogiques du ciment type 10 et du ciment Whitehall sont très similaires (tableaux 5-12 et 5-13 du chapitre 5). Le ciment type 50 présente quant à lui une plus faible teneur en C_3A et une plus importante teneur en C_2S . Ce type de ciment est usuellement utilisé dans des milieux agressifs en vertu d'une meilleure résistance face aux attaques des ions sulfates.

Les résultats obtenus pour les deux rapports eau/ciment (0,30 et 0,40) et pour les deux régimes isothermes des essais (20 °C et 38 °C) sont riches d'information. Durant les premières vingt-quatre heures, pour les deux rapports eau/ciment ainsi que les deux régimes thermiques isothermes (20 °C et 38 °C), plus le béton est riche en C_3A , plus les déformations endogènes développées sont importantes en terme de cinétiques et d'amplitudes. Au bout de vingt-quatre heures, les déformations enregistrées pour les bétons à base du ciment type 50 sont presque nulles alors que pour les autres formulations elles varient entre 50 et 100 $\mu\text{m}/\text{m}$. De plus le critère de démarrage de 0,01 MPa a été atteint pour les bétons à base de ciment type 50 plus tardivement que dans le cas des autres bétons. Ceci donne un indice sur l'évolution de la rigidité de la matrice cimentaire, et indirectement sur l'évolution de la réaction d'hydratation. Pour les deux températures étudiées, les résultats montrent que les ciments type 10 et WH1 présentent des déformations endogènes et viscoélastiques plus importantes en termes de cinétique et d'amplitude que celles observées avec le ciment type 50. Ce dernier présente ainsi moins de risques de fissurations par comparaison aux ciments type 10 et type WH1.

Un comportement particulier a été observé pour les bétons fabriqués à base des ciments type 10 et WH1 à 20 °C et ce pour un faible rapport eau/ciment (0,30). En effet, les profils des déformations endogènes ont présentés une deuxième phase de gonflement entre dix-huit heures et vingt-quatre heures suivant le déclenchement de la réaction d'hydratation. Ce deuxième gonflement n'a pas été enregistré à température élevée (38 °C).

La loi de la dépression capillaire confirme que l'humidité relative interne de la matrice cimentaire influence les mesures des déformations endogènes. D'après les travaux de Michaud (2008), la minéralogie d'un ciment peut affecter de manière importante l'intensité de la baisse de l'humidité relative provoquée par l'autodessiccation. Michaud (2008) a montré d'après des simulations que les bétons B30T10 et B40T10 (nommés respectivement C1 0,30 et C1 0,40) engendrent des pressions capillaires plus importantes que les bétons B30T50 et B40T50 (nommés respectivement C2 0,30 et C2 0,40).

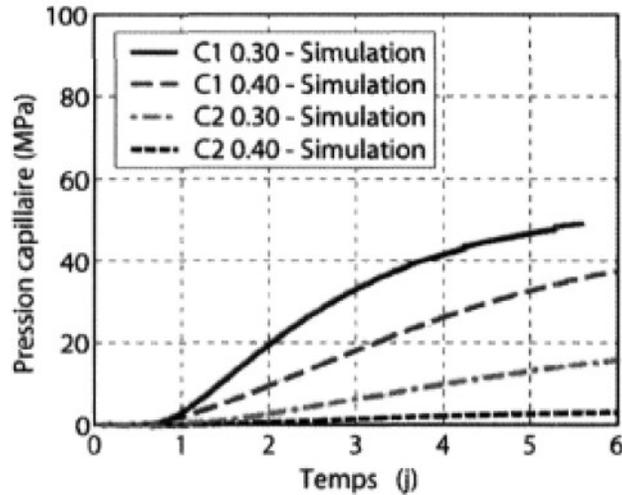


Figure 6-1 : Influence du ciment et du rapport E/C sur le développement des dépressions capillaires dans les réseaux poreux du béton en fonction du temps (Michaud, 2008)

Les déformations de fluage dépendent de l'état de l'humidité relative dans le matériau. Par conséquent, en se basant sur les travaux de Michaud (2008), les déformations de fluage dépendent aussi de la composition minéralogique des ciments. Globalement, l'influence de la composition minéralogique sur les mesures viscoélastiques demeure très similaire à celle observée sur les mesures de la déformation endogène et ce pour toutes les températures expérimentées ainsi que pour tous les rapports eau/ciment étudiés. Les mécanismes qui pilotent les deux types de déformations semblent être couplés et dépendent les uns des autres.

Dans des conditions isothermes à 20 °C et 38 °C, les résultats issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de donner une idée claire quant à l'influence du type de ciment sur les mesures des modules élastiques. De plus, les essais mécaniques sur le module élastique semblent montrer que ce dernier est peu influencé par le type de ciment utilisé (figure 5-35 et figure 5-48).

6.4 Influence de la température

L'influence de la température a été examinée durant la première phase expérimentale pour un seul type de ciment (ciment type 10) et ce pour trois régimes thermiques isothermes différents (10 °C, 20 °C et 30 °C), puis elle a été réexaminée par la suite pour six formulations de bétons

différentes (B30T10, B40T10, B30T50, B40T50 B30WH1 et B40WH1) et ce pour les deux régimes thermiques isothermes 20 °C et 38 °C.

Tel que décrit dans le chapitre 5, tous les mélanges ont été préparés à la température ambiante ($T \approx 22$ °C). Le profil thermique des essais R^2D^2 à 38 °C a été appliqué en suivant le profil semi-adiabatique propre à chaque formulation. Dans le cas des essais sous 38 °C, cette procédure conduit à une phase d'échauffement. Il en résulte ainsi un gonflement apparent dans les premières heures d'hydratation avant d'atteindre le critère de démarrage de l'essai R^2D^2 . A ce moment, le matériau a déjà subi une expansion non négligeable. Les déformations endogènes libres ne pourraient pas donner une information exploitable avant d'atteindre le critère de démarrage. Par conséquent, ce sont les déformations endogènes décalées qui peuvent nous donner une information plus juste quant à l'influence de la température sur ces déformations.

Il a été constaté expérimentalement que les bétons ayant un faible rapport eau/ciment sont les plus sensibles aux variations thermiques. Pour un même type de ciment, une variation du rapport eau/ciment affectera essentiellement les propriétés physiques de la matrice cimentaire. La taille et la dispersion du réseau capillaire ainsi que l'humidité interne de la matrice cimentaire dépendent directement du rapport eau/ciment. Plus la température est importante, plus la cinétique de la réaction d'hydratation est amplifiée. Le nombre de pores de faible rayon étant plus important pour les températures élevées (Ramachandran et al., 1973). La tension capillaire est par conséquent plus importante et donc un retrait endogène plus élevé.

Les résultats ont montré que la phase de gonflement enregistrée à 20 °C après avoir atteint le critère de démarrage entre 16h et 30h pour les formulations B30T10, B40T10, B30WH1 et B40WH1 n'est plus existante dans des conditions isotherme à 38 °C. Ces observations sont en concordance avec les travaux de Pertué (2008) qui ont montré que plus la température est importante, plus la phase de gonflement est atténuée. Dans la littérature, l'influence de la température sur les mesures de gonflement peut être attribuée à un ou plusieurs des mécanismes suivants:

- Une augmentation de la température affecte la structuration du réseau capillaire et favorise au jeune âge la formation de pores de faible rayon (Mounanga et al., 2006). Ceci

a comme effet d'amplifier les déformations de retrait et, par conséquent, favorise un bilan déformationnel sans ou avec peu de gonflement.

- Le ressuage est un autre mécanisme qui peut induire du gonflement et qui est affecté par la température. Des études ont montré qu'une augmentation de la température réduit l'incidence du ressuage et par conséquent atténue les risques de gonflement causé par ce phénomène (Josserand & de Larrard, 2002; Bjøntegaard, 1999).

- Au niveau de la formation des hydrates, une augmentation de la température favorise la formation des C-S-H plus denses et par conséquent une matrice plus dense (Gallucci et al., 2006). Selon Ramachandran (1973), une importante température de cure favorise la formation de la phase cubique de C_3AH_6 issue de la réaction d'hydratation des C_3A , tandis qu'à 20 °C, c'est la phase hexagonale, moins dense que la phase cubique, qui se forme en premier. Le produit final est plus compact et par conséquent présente moins de gonflement.

Ces mécanismes favorisent un bilan déformationnel net global de retrait et permettent de donner une explication à la disparition à haute température de la deuxième phase de gonflement observée à 20 °C.

L'effet de la température sur le fluage est très similaire à celui observé sur les déformations endogènes (décalées). Les évolutions des déformations du fluage à 30 °C et 10 °C présentent les mêmes caractéristiques que celles des déformations endogènes. En comparant les mesures des déformations endogènes décalées à celles de fluage, il semble qu'à 30 °C, les déformations de fluage sont plus sensibles à la température que les déformations endogènes. Toutefois, pour des faibles températures (10 °C), les déformations de fluage sont très similaires aux déformations endogènes. Pour expliquer l'effet de la température sur le fluage, Bazant et al. (2004) suggère que l'élévation de la température a un effet double sur le fluage. Ces deux effets seraient générés par deux mécanismes différents. D'une part, l'élévation de la température accélère la rupture des liaisons provoquant le glissement des C-S-H et par conséquent accroît l'amplitude de fluage. D'autre part, le processus chimique de l'hydratation du ciment est plus

rapide et donc augmente la rigidité, ce qui diminuerait le fluage. Habituellement le premier effet l'emporte et l'effet global d'une élévation de la température se traduit par une augmentation de l'amplitude de fluage du béton (Bazant et al 2004). Hauggaard et al. (1999) expliquent quant à eux l'accroissement de l'amplitude du fluage avec la hausse de température par la réduction de la viscosité de l'eau. Powers (1968) affirme que l'effet de la température sur la vitesse de fluage traduit l'effet de la température sur la diffusion de l'humidité et ajoute qu'il n'y a pas de fluage en absence d'eau évaporable.

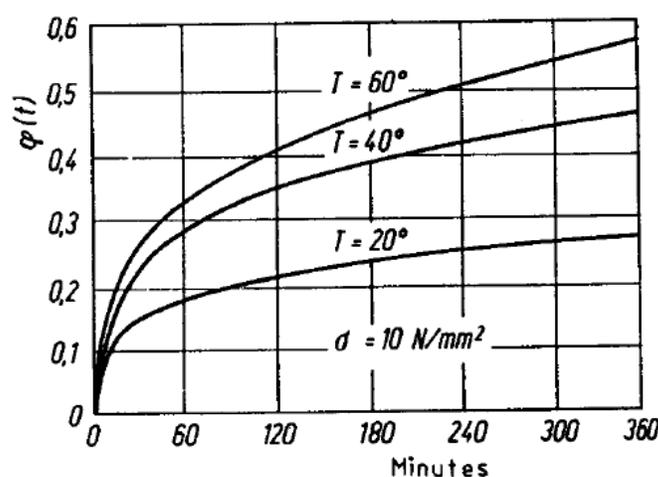


Figure 6-2 : Mesures de fluage sous différentes conditions thermiques sur un béton mûri de deux mois (d'après Atrushi, 2003).

L'influence de la température sur le développement des contraintes induites est plus importante pour les formulations ayant de faible rapport eau/ciment ($E/C = 0,35$ et $0,30$). Il a été constaté que plus la température est élevée, plus les niveaux de contraintes induites enregistrées au cours des essais R^2D^2 sont importants. Pour un rapport eau/ciment égal à $0,45$, les contraintes développées à 30°C après 6 jours d'essais sont légèrement plus importantes que celles développées à 20°C . Pour un même rapport eau/ciment et en conditions isothermes 10°C , les amplitudes des contraintes atteintes au bout de six jours représentent 32% de celles enregistrées en isotherme 20°C . Les bétons à faible teneur en C_3A sont encore une fois les moins influencés en termes de contraintes atteintes suite à une augmentation de température.

Bien que les résultats expérimentaux issus des essais R^2D^2 ne permettent pas de déterminer avec précision l'évolution des modules élastiques, les propriétés élastiques des bétons testés semblent être les propriétés les moins influencées par la température. À 30 °C, au bout de six jours, les modules d'Young mesurés sont de l'ordre de 120% par rapport aux modules élastiques mesurés à la température ambiante (20 °C). Cela est vrai pour les deux rapports eau/ciment étudiés (figure 5-20). À 10 °C, les bétons ayant un fort rapport eau/ciment ($E/C=0,45$) ont développé des modules similaires à ceux mesurés à 20 °C. Toutefois, une légère réduction des amplitudes des modules a été observée 10 °C pour les bétons ayant un faible rapport eau/ciment, soit 87% des amplitudes mesurées à 20 °C.

6.5 Recommandations

Le jeune âge demeure encore un domaine de recherche très vaste à couvrir. Au-delà des résultats prometteurs qui ont été obtenus dans le cadre de cette étude avec les essais R^2D^2 , des perspectives sur le plan expérimental semblent être bénéfiques et complémentaires afin de contribuer à la compréhension du comportement des matériaux cimentaires au jeune âge.

Sur le plan procédure expérimentale, les propriétés mécaniques sont obtenues en contrôlant l'essai R^2D^2 avec un seuil de déplacement. La qualité des résultats peut dépendre du nombre ainsi que de la répartition des paliers de chargement. Lorsque l'amplitude des déformations endogène est faible, l'asservissement des essais R^2D^2 en déplacement n'engendre que de faibles contraintes et très fréquemment très peu de paliers de chargement. Dans l'éventualité où les essais R^2D^2 seront contrôlés selon un historique de chargement prédéfini, ceci permettra de prédéfinir le nombre de paliers ainsi que la durée de chaque palier dès le départ. Une telle procédure permettra d'avoir en plus des évolutions des déformations endogènes et de fluage, une meilleure vue de l'évolution du module d'Young qui semble être le paramètre le moins précis des résultats issus des essais R^2D^2 asservis en déplacement. L'approche de contrôler les essais R^2D^2 avec un historique de chargement prédéfinie nécessite une connaissance préalable de la courbe de résistance contrainte-temps. Ceci implique que chaque essai sur un nouveau matériau cimentaire doit être précédé par des essais de caractérisation mécaniques.

Sur le plan du montage expérimental, certaines modifications pourraient être bénéfiques, tel que la disposition des LVDT et la nature du liquide du bain thermostaté. En effet, les LVDT sont référencés par rapport au bâti du montage R²D² et non pas par rapport à l'éprouvette. En utilisant une telle conception, Altoubat [Altoubat 01] a mesuré de faibles modules élastiques en comparaison avec ce qui existait dans la littérature. Il a corrigé sa conception tout en fixant cette fois-ci les LVDT directement sur l'éprouvette et non pas sur le bâti du montage. Dans le cas des essais R²D² à des températures contrôlées, le bâti peut subir des déformations d'origine thermique en particulier durant des phases d'échauffement ou de refroidissement. Dans de telles situations, les mesures obtenues par les LVDT ne peuvent pas être interprétés directement sans prendre en considération les corrections nécessaires pour éliminer les déformations du bâti. La conception du montage R²D² ne permet pas de référencer les LVDT directement par rapport à l'éprouvette de béton. Les référencer par rapport à un seul point du bâti localisé vis-à-vis le centre de l'éprouvette permettra d'éliminer cette source d'erreur. Cette recommandation a été réalisée par Bédard (2009) tel que présenté à la figure 4-28. Noter que pour les essais réalisés en conditions isothermes, l'influence des déformations du bâti peut être considérée négligeable puisque les essais devraient démarrer après avoir atteint un équilibre thermique à la température de l'essai. Pour cette raison, dans le cadre de cette étude, cette modification n'a pas été effectuée.

Le bain thermostaté utilise actuellement l'eau comme fluide. Selon les fiches techniques du bain, sa plage normale de variation de température est de [10 °C à 90 °C]. Ceci implique que si nous souhaitons réaliser des essais à faibles températures (10 °C ou moins) le bain fonctionnera en dehors de sa plage normale. Par conséquent, le bon fonctionnement du bain ne sera pas garanti. Dans ces conditions, l'eau n'est plus un bon choix comme fluide utilisé dans le bain. Par contre, un mélange d'Éthylène Glycol (50%) et d'eau (50%) permet d'assurer une marge de manœuvre entre -20 °C et 100 °C. De plus il est plus stable en termes de viscosité à haute température que l'eau seule.

Les rôles du rapport eau/ciment, de la composition minéralogique et de la température ont été abordés. L'influence de l'humidité relative ainsi que de la porosité sur le comportement des bétons a été ressenti sous différents régimes thermiques. Ainsi, dans le but de recueillir le maximum des informations nécessaires pour une éventuelle modélisation du comportement des

bétons au jeune âge, des mesures de l'humidité relative au sein du béton durant toute la durée des essais R²D² seraient très utiles. Une telle mesure peut être introduite au montage R²D² en introduisant un capteur d'humidité.

L'évolution du coefficient de dilatation thermique est une information très intéressante qui permettra de mieux simuler le comportement thermique des matériaux cimentaires. Il pourrait être évaluée en appliquant des profils thermiques en dents de scie ou même sinusoïdaux. Après les améliorations réalisées par Bédard (2009) le montage R²D² permet de réaliser de tels essais.

Finalement, les conclusions de cette étude expérimentale reposent sur l'utilisation de trois types de ciments (Type 10, WH1 et Type 50), de deux rapports eau/ciment (0,30 et 0,40) et de trois régimes thermiques isothermes (10 °C, 20 °C et 38 °C). Étendre l'étude à d'autres types de ciments, d'autres rapports eau/ciment et d'autres régimes thermiques (adiabatiques et semi-adiabatiques avec la possibilité d'appliquer des paliers de variation afin de déterminer l'évolution du coefficient de dilatation thermique) contribuerait à la compréhension du comportement des matériaux cimentaires au jeune âge.

Chapitre 7

Références bibliographiques

Acker, P. et Eymard, R., (1992) « *FLUAGE DU BÉTON : un MODÈLE plus PERFORMANT et plus SIMPLE à INTRODUIRE dans les CALCULS de STRUCTURES* », Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, N507, série : Béton 295.

Acker P., Torrenti J.M. et Ulm F.J., (2004) « *Comportement du béton au jeune âge* », Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux, pp. 189.

Alexa B. (2006) « *Influence de la minéralogie sur le comportement des mortier de ciment au jeune âge* ». Maîtrise soutenue à l'Université Laval, Québec, Canada. 197pp.

Altoubat Salah A. et David A. Lange. (2001), "*Early Age Stresses and Creep-Shrinkage interaction of Restrained Concrete*", Technical Report of Research, Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, March, 2001.

Aitcin, P.-C (1998) « *Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete* », Japan Concrete institute. E. Tazawa, editor, Hiroshima, Japan, (1998) 245-256.

Atrushi D. S., (2003) « *Tensile and compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and modelling.* », Ph.D. The Norwegian university of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Baroghel-Bouny V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations*, Edition LCPC, 568 p.

Baroghel-Bouny V., Mounanga P., Khelidj A., Loukili A., Rafai N. (2006), "*Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values*" Cement and Concrete Research, Vol. 36, n°1, 123-136.

Baron J., Olivier J.P. (1999), « *LES BÉTONS, Bases et données pour leur formulation* », Edition Eyrols, 522 p.

Bazant, Z.P., Fellow et Prasannan S. (1989a), « *Solidification Theory for Concrete Creep. I : Formulation* », Journal of Engineering Mechanics, Vol 115, No 8, August, 1989.

Bazant, Z.P., Fellow et Prasannan S. (1989b), « *Solidification Theory for Concrete Creep. II : Verification and Application* », Journal of Engineering Mechanics, Vol 115, No 8, August, 1989.

Bazant, Z.P., Gianluca C., Luigi C. (2004), « *Temperature effect on concrete creep modeled by microprestress –solidification Theory* », Journal of Engineering Mechanics, © ASCE, June, pp. 691-699.

Bentur A., (2002), *Early Age Cracking in Cementitious Systems*, RILEM, Vol. 25, pp. 57-62.

Bédard É., (2009), « *Influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton* », mémoire de maîtrise soutenue à l'université Laval, Québec, Canada.

Bentz, D.P., Quénard, D.A., Baroghel-Bouny, V., Garboczi, E.J., Jennings, H.M. (1995), *Modelling drying shrinkage of cement paste and mortar – part 1 ; Structural models from nanometers to millimetres*, Materials and Structures, Vol. 28, pp. 450-458.

Bissonnette B., Marchand J., Delagrave A., Barcelo L. (2002) « *Early-age behavior of cement-based materials* », Materials Science of Concrete – VI, A. Ceramic. Soc., p. 243-326.

Bissonnette B., (1996), *Le fluage en traction : un aspect important de la problématique des réparations minces en béton*, PHD soutenue à l'Université Laval, Québec, Canada, pp. 290.

Bissonnette B., Pigeon M., (2000) *Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations*, Materials and Structures, 2000, V 33, pp 108-118.

Bissonnette B., Marchand J., Martel C. & Pigeon M., (2002 a) *Influence of superplasticizer on the volume stability of hydrating cement pastes at early age*, Concrete: Material Science to Applications - A Tribute to Surendra P. Shah, ACI Spring Convention, Detroit (MI), 21-26 avril, pp. 167-188.

Bjøntegaard Ø. (1999) « *Thermal Dilation and Autogenous Deformation as Driving Forces to Self-Induced Stresses in High Performance Concrete* », PHD report, Division of Structural Engineering. The Norwegian University of Science and Technology, December 1999.

Bjøntegaard Ø. et E. J. Sellevold (2000) « *Autogenous and thermal deformations* », Early age cracking in cementitious systems, Chapter 4.

Bjøntegaard Ø. et E. J. Sellevold (2001) « *Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in HPC* », Materials and structures, 34, June 2001 – pp. 266-272.

Bjøntegaard Ø. et Sellevold E. J. (2002), « *Effects of Silica Fume and Temperature on Autogenous Deformation of High Performance Concrete* », Presented at the Fall 2002 Convention, American Concrete Institute, Phoenix, AZ, USA, October 27- November 1, 2002.

Bjøntegaard Ø., Hammer A. et Sellevold E. J. (?) « *On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete* », Cement and Concrete Composites

Bogue R. H. (1955), *Chemistry of Portland Cement*, (New York, Reinhold)

Bloom, R., et Benture, A. (1995), *Free and restrained shrinkage of normal and high strength concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 92, N°2, pp. 211-217.

Bresson A. (2006), « *Influence de la mineralogy sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge* », Maitrise soutenue à l'Université Laval, Québec, Canada.

Brooks, J.J. (2001), « *A theory for drying creep of concrete* », Magazine of Concrete Research, 29 (100), pp. 145-153 (tiré de Bissonnette 96)

Brooks, J.J. et Neville, A.M., (1977), « *A comparaison of creep, elasticity and strength of concrete in tension and in compression* », Magazine of Concrete Research, 29 (100), pp. 145-153 (tiré de Bissonnette 96)

Le Chatelier, H. (1900) « *Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments* » Bulletin de la Société pour l'Encouragement de l'Industrie Nationale, 5^{ème} Série, Tome 5, pp.54-57.

Charron J. P., Marchand J., Bissonnette B. et Gérard B. (2001) « *Etude comparative de modèles phénoménologiques décrivant le comportement au jeune âge du béton. Partie 2* » Can. J. Civ. 28 : 323-331, 2001

Charron J. P., (2002) « *Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte* » PHD soutenue à l'Université Laval – Québec, CANADA.

Davis, R.E., Davis, H.E. et Brown, E.H., (1937), « *plastic Flow and volume Changes of Concrete* », ASTM Proceedings, 37 (Part 2), pp. 317-330.

Diamond G. (1976) « *Cement Paste Microstructure – An Overview at several levels* » Hydraulic Cement Pastes : their Structure and Properties, Cement and Concrete Association.

Feldman, R.F. et Sereda, P.J., (1968), « *A Model for Hydrated Portland Cement Paste as Deduced from Sorption-Length Change and Mechanical Properties* », Matériaux et Constructions, 1 (6), pp.509-520; (tiré de Bissonnette 96).

Fu, Y. (1996), « *Delayed ettringite formation in portland cement products* », Thèse de doctorat soutenue à l'université d'Ottawa, 199 p.

Gagné R., GCI-714, notes de cours « *Durabilité et réparation du béton* », Université de Sherbrooke.

Gartner, E.M., Gaidis, W.R., (1988), *Hydration mechanisms I*, Materials Science of Concrete, Edited by skalny, pp. 99-125.

Garcia-Boivin, S. (1999), « *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène* », Thèse, École Nationale des Ponts et Chaussées.

Haugaard A. B., Damkilde L., Hansen, P.F. (1999), « *Transitional thermal creep of early age concrete* », Journal of Engineering Mechanics, Vol 125 (4), pp. 458-465.

Hansen, T.C., (1960), *Physical structure of hardened cement paste – A classical approach*, Matériaux et Constructions, vol. 19, N° 114, pp. 423-436.

Hansen, T.C., (1970), *Physical composition of hardened Portland cement paste*, ACI journal, mai 1970, pp. 404-407.

- Helmuth R. A. (1961) "*Dimensional Changes of Hardened Portland Cement Pastes Caused by Temperature Changes*". Highway Research Board Proceedings, Vol. 40, 1961.
- Hua Chongyue, EHRLACHER Alain, ACKER. Paul (1995) "*Retrait d'autodessiccation du ciment, Analyse et Modélisations. II Modélisation à l'échelle des grains en cours d'hydratation*" Bull. liaison Labo P. et Ch.- 199- sept.-oct. 1995
- Jensen, O. M., Hansen, p. F. (1996), *Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste*, ACI Materials Journal, Vol. 93, N°6, pp. 539-543.
- Josserand, Laurent (2002) «*Ressuage des bétons hydrauliques*», Doctorat Structures et Matériaux, École des ponts Paris Tech > ENPC p.211.
- Justnes, H., Van Gemert, A., Verboven, F., Sellevold, E. (1996), *Total and external chemical shrinkage of low w/c ratio cement pastes*, Advances in Cement Research, Vol 8, N°31, pp. 121-126. (tiré de Bissonnette et coll. 2002)
- Kovler K. (1994) *Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage*, Materials and Structures, **V27**, 324-330
- Lange D. A. (2000) "*Overview of Driving Forces*", Early age cracking in cementitious systems, Chapter 3.
- Laplante Pierre. (1993) "*Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des béton classiques et à très hautes performances*" Thèse soutenue en décembre 1993, réalisée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées & à l'Université de Sherbrooke.
- Laplante P. et Boulay C. (1994) «*Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tous premiers âges*», Mater. Struc. 27 (1994) 596-605.
- L'Hermite, R.G. et Mamillan, M., (1968) «*Further Results of Shrinkage and Creep Tests*», International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, Londres (1965), pp. 423-433.
- Michaud P. M.,(2008) «*Vers une approche chimio-poro-visco-élastique du comportement au jeune âge des béton*». Ph.D. soutenue à l'Université Laval, Québec, Canada.
- Molez L. (2003) «*comportement des réparations structurales en béton: couplage des effets hydriques et mécaniques*». Ph.D. soutenue à l'Université Laval, Québec, Canada, pp. 248.
- Mullen, W.G. et Dolch, W.L. (1964) «*Creep of Portland Cement Paste*», ASTM Proceedings., Vol 64, pp. 1146-1170. (tiré de Bissonnette 96)
- Nagy A., (1997) «*Simulation of thermal stress in reinforced concrete at early ages with a simplified model*», Mat. And Struc., 30, pp. 167-173 (Apr. 1997)
- Nasser, K.W. et Neville, A.M., (1965) «*Creep of concrete at elevated temperatures*», J. Amer. Concrete. Inst.,, 60, pp. 1567-1579 (Dec. 1965) (tiré de Neville 00).
- Nechnech W. (2000) «*Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplée : une*
-

approche thermo-élasto-plastique endommageable », Thèse, Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Neville, A. M., (1959) « *Creep recovery of mortars made with different cement* », J. Amer. Concr. Inst., 56, pp. 167-74 (Aug. 1959)

Neville, A. M., (1970) « *Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed* », North Holland Publishing Company, Amsterdam, 622 p.

Neville, A. M. et Brooks, J.J., (1988) « *Concrete Technology* », REVISED, 209-235 p.

Neville, A. M., (2000), « *Propriétés des bétons* », Edition Eyrolles, pp. 824.

Paillère M., Buil M. et Serrano J. J. (1989) *Effect of Fiber addition on the Autogenous Shrinkage of silica Fume concrete*, ACI Materials Journal, **V86**, N° 2, 139-144.

Paulini P. (1990), *Reaction mechanisms of concrete admixtures*, Cement and Concrete Research, Vol. 20, N°6, pp. 910-918.

Pertué A., (2008), « *Étude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeunes et très jeune âges* », thèse de doctorat soutenue à l'Université de Nantes, France.

Pigeon M., Toma G., Delagrave A., Bissonnette B., Marchand J. and Prince J.C., (2000), *Equipment for the analysis of the behaviour of concrete under restrained shrinkage at early ages*, Magazine of Cement Research, Vol. 52, N° 4, pp. 297-302.

Powers T. C., et Brownyard, T. L. (1947) *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste – part 4 : The thermodynamics of adsorption of water on hardened Portland paste*, Journal of Am. Concr. Inst., Vol. 18, N° 5, jan., pp. 549-595. (tiré de Altoubat 01)

Powers T. C. (1968), « *The thermodynamics of volume change and creep* » Material and Structures, Research and testing (Paris), Vol 1, No, 6, Nov.-Dec, pp. 487-507.

Ramachandran V. S., Feldman R. F. (1973), « *Significance of Low Water-solid Ration and Temperature on the Physio-mechanical Characteristics of Hydrates of Tricalcium Aluminate* », J. appl. Chem. Biotechnol. 1973, **23**, pp. 625-633.

Seed, H.B., (1948), *Creep and shrinkage in reinforced concrete structures*, Reinforced Concrete Review, Vol. 1, N° 8, pp. 253-267 (tiré de Neville 70)

Shkoukani H., and Walraven, J.C. (1993): « *Creep and relaxation of concrete subjected to imposed thermal deformations* », in 'Creep and Shrinkage of Concrete', Proc. Of the 5th International RILEM Symposium, Barcelona, E.& FN Spon, London.

Tazawa E.; Miyazawa S. et Kasai T. (1995) *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 2, p. 288-292] – 1995.

Toma G. (2000) « *Comportement des bétons au jeune âge* », Thèse de doctorat présentée à l'Université Laval, Québec, Canada, 262 p.

Toma, G., Pigeon, M., Marchand, J., Bissonnette, B., Delagrave, A. (2000), *early age autogenous restrained shrinkage : stress build up and relaxation*, Concrete Science and Engineering. (tiré de Bissonnette et coll. 2002)

Troxell, G.E., Raphael, J.M. et Davis, R.E., (1958), “*Long-time creep and shrinkage testes of plain and reinforced concrete*”, ASTM Proceedings, Vol 58, pp. 1101-1120 (tiré de Neville 88).

Ulm, F. J. et P. Acker (1997). Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Spécial XX, 73–82.

Ulm Franz-Josef, Fabrice Le Maou, Claude Boulay (1998) « *Creep and shrinkage coupling : New Review of some Evidence* », Revue. Volume 1 n° 1/1998

Verbeck G. J. et Helmuth R. A. (1968) “*Structures and physical properties of cement paste*” Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of cement, Tokyo, vol. 3, pp. 1-32 (1968).

Vernet C., Cadoret G. (1991) *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours*, Comptes-rendus du colloque « Voies Nouvelles du béton », Cachan, France, 17p., (tiré de la thèse de Charron 02)

Wagner O. (1958) *Das Kriechen unbewehrten Betons*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, No. 131, pp. 74 Berlin.

Witasse R. (2000) *Contribution à la compréhension du comportement d'une coque d'aéroréfrigérant vieilli : définition d'un état initial, influence des effets différés sous sollicitations hydro-mécaniques*, Thèse, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon.

Wittmann, F.H., (1982), *Creep and shrinkage mechanisms*, Creep and shrinkage in concrete structures, Edited by Z.P. Bazant and F.H. Wittmann, pp. 129-161. (tiré de Charron 02)

Wittmann F.H. & Lukas j. (1974) *Experimental study of thermal expansion of hardened cement paste*, Materials and Structures, N° 40, pp. 247-252.

Yammine J.(2007) *Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques*, Thèse de doctorat soutenue à l'École Normale Supérieure de Cachan, 243p.

Annexe 1 : programme R2D2TEMP

```

DECLARE FUNCTION RAPIDERETOUR (X AS SINGLE)
DECLARE FUNCTION FIN (X AS SINGLE)
DECLARE FUNCTION DEBUT (X AS SINGLE)
DECLARE FUNCTION MILIEU (X AS SINGLE)
DECLARE FUNCTION DEMISINUSOIDE (temps!, initialtime!, amplitude!, periode!)
DECLARE FUNCTION TOTALSINUSOIDES (temps!, initialtemperature!, amplitude!, periode!)
DECLARE SUB Effacetitre ()
DECLARE SUB ecranmenu ()
DECLARE FUNCTION ISO (celcus AS SINGLE)
DECLARE FUNCTION SINUSOIDE (temps!, initialtime!, amplitude!, periode!)
DECLARE FUNCTION setisods (temps, dtemps, dtemperature, temperature0 AS SINGLE)
DECLARE SUB graduation (DureeEssai&)
DECLARE FUNCTION timeconvert (T AS STRING)
DECLARE SUB ecranvide ()
DECLARE FUNCTION setpnt(A, B, C, D, E, F)
DECLARE SUB DisplayValues ()
DECLARE SUB Openport()
DECLARE SUB sendget(com$, answer$, status$)
DIM CHOIX AS INTEGER
DIM A, B, C, D, E, F AS SINGLE
DIM strkey, strtemps, strkey1 AS STRING

SCREEN 12
LINE (15, 20)-(639, 55), 14, B
LINE (15, 55)-(400, 404), 14, B
LINE (400, 55)-(639, 404), 10, B
LINE (15, 404)-(639, 442), 12, B
ecranvide
' *****
'           OUVERTURE DU PORT COM1
' *****
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
Openport           'First Open the Com1 Port

' *****
'           MENU
' *****
startover:         'Start Over Again Label
ecranmenu
KEY(1) ON
KEY(2) ON
KEY(10) ON

ON KEY(1) GOSUB F1
ON KEY(2) GOSUB F2
ON KEY(10) GOSUB F10
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> MENU PRINCIPAL           "
LOCATE 9, 20: PRINT " F1 >>>  VERIFIER LA CONFIGURATION DU BAIN "
LOCATE 10, 20: PRINT " F2 >>>  DEMARRER UN ESSAI           "
LOCATE 11, 20: PRINT " F10 >>>  QUITTER           "
LOCATE 27, 5: PRINT "SAISSER VOTRE CHOIX : F1 ou F2 ou F10   "

DO

```

```

strkey1$ = INKEY$
LOOP UNTIL strkey1$ = CHR$(27)

' *****
'           F1 : CONFIGURATION DES PARAMETRES DU BAIN
' *****

F1:
ecranmenu
Effacetitre
ecranvide
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> CONFIGURATION DES PARAMETRES DU BAIN ..."
    DisplayValues    'DisplayAll of the Values
    LOCATE 27, 5: PRINT " "
    LOCATE 27, 5: INPUT "Enter Command Here: ", com$

    IF com$ = "" THEN
        ekranvide
        GOTO startover
    END IF
    sendget com$, answer$, status$    'Execute the Command
    IF status$ <> "0" THEN
        COLOR 12: PRINT "DTC STATUS ERROR CODE="; status$
        PRINT "Press Any Key to Continue....."
    WaitKey: IF INKEY$ = "" THEN GOTO WaitKey    'Pause
    END IF
    ekranvide
    GOTO startover    'Start Over Again
FinConfiguration:
GOTO startover

' *****
'           F2 : CHOIX DU TYPE D ESSAI
' *****

F2:
ecranmenu

KEY(3) ON
KEY(4) ON
KEY(5) ON
KEY(6) ON
KEY(7) ON
KEY(8) ON
KEY(9) ON

ON KEY(3) GOSUB F3
ON KEY(4) GOSUB F4
ON KEY(5) GOSUB F5
ON KEY(6) GOSUB F6
ON KEY(7) GOSUB F7
ON KEY(8) GOSUB F8
ON KEY(9) GOSUB F9
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> CHOIX DU TYPE D ESSAI..."
LOCATE 9, 20: PRINT " F3 >>>  Essai isotherme "
LOCATE 10, 20: PRINT " F4 >>>  Essai isotherme en dents de scie uniforme "
LOCATE 11, 20: PRINT " F5 >>>  Essai isotherme en dents de scie optimise "
LOCATE 12, 20: PRINT " F6 >>>  Essai r,aliste "
LOCATE 13, 20: PRINT " F7 >>>  Essai r,aliste en dents de scie uniforme "
LOCATE 14, 20: PRINT " F8 >>>  Essai r,aliste en dents de scie optimise "
LOCATE 15, 20: PRINT " F9 >>>  Essai particulier "
LOCATE 27, 5: PRINT "SAISSER VOTRE CHOIX : "

```

```

DO
strkey2$ = INKEY$
LOOP UNTIL strkey2$ = CHR$(27)

' *****
'           F3 : DONNEES ISOTHERME
' *****

F3:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI ISOTHERME           "
TYPE$ = "ISOTHERME"

ATTENTEISO:
LOCATE 6, 5: INPUT " Specifier la temperature d essai (Celcus) :", T!
IF T! <> 0 THEN
    GOTO PROGRAMME
ELSE
    GOTO ATTENTEISO
END IF
' *****
'           F4 : DONNEES ISOTHERME EN DS UNIFORME
' *****

F4:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI ISOTHERME EN DS           "
TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE UNIFORME"

ATTENTEISODS:
LOCATE 6, 5: INPUT " Specifier la temperature d essai (Celcus)           :", T!
IF T! <> 0 THEN
ATTENTECYCLE:
    LOCATE 7, 5: INPUT " Specifier la dur,e d un cycle (minutes)           :", CYCLE!
    IF CYCLE! <> 0 THEN
ATTENTECELCUS:
        LOCATE 8, 5: INPUT " Specifier l'amplitude de la temp,rature (celcus) :", amplitude!
        IF amplitude! <> 0 THEN
            GOTO PROGRAMME
        ELSE
            GOTO ATTENTECELCUS
        END IF
    ELSE
        GOTO ATTENTECYCLE
    END IF
ELSE
    GOTO ATTENTEISODS
END IF

' *****
'           F5 : DONNEES ISOTHERME EN DS OPTIMISE
' *****

F5:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI ISOTHERME EN DS           "
TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE OPTIMISE"

ATTENTEISODSOP:
LOCATE 6, 5: INPUT " Specifier la temperature d essai (Celcus)           :", T!
IF T! <> 0 THEN
ATTENTECYCLEOP:

```

```

LOCATE 7, 5: INPUT " Spécifier la dur,e d un cycle (minutes)      : ", CYCLE!
IF CYCLE! <> 0 THEN
ATTENTECELCUSOP:
LOCATE 8, 5: INPUT " Spécifier l'amplitude de la temp,rature (celcus) : ", amplitude!
IF amplitude! <> 0 THEN
    GOTO PROGRAMME
ELSE
    GOTO ATTENTECELCUSOP
END IF
ELSE
    GOTO ATTENTECYCLEOP
END IF
ELSE
    GOTO ATTENTEISODSOP
END IF

! *****
'          F6 : DONNEES REALISTE
! *****

F6:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI REALISTE      "
TYPE$ = "REALISTE"

PRINT
LOCATE 27, 5: PRINT "
LOCATE 27, 5: INPUT "MODIFIER : Tmax, T0, X_pique, duree_T0, T_finale [35,20,0.40,0.15,40] O/<N>",
REPLY$
IF UCASE$(REPLY$) = "O" THEN
    LOCATE 27, 5: PRINT "
    LOCATE 27, 5: INPUT "ENTRER : [Tmax, T0, X_pique, duree_T0, T_finale]", A, C, B, E, F
ELSE
' A d,signe la temp,rature maximale
' B d,signe le temps correpondant ... Tmax (A)
' C d,signe la temp,rature initiale T0
' D d,signe la variable temps
' E p,ride ou la temp,rature demeure = T0 (isotherme)
' F temperature finale en isotherme

A = 47
C = 20
B = .45
E = 0 / 24 ' p,ride isotherme initiale dure
F = 38
END IF
LOCATE 27, 5: PRINT "
LOCATE 27, 5: INPUT "POUR CORRIGER TAPER O/<N> ... ", REPLY$
IF UCASE$(REPLY$) = "O" THEN GOTO F2
ecranvide

GOTO PROGRAMME

! *****
'          F7 : DONNEES REALISTE EN DS UNIFORME
! *****

F7:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI REALISTE EN DS      "

SLEEP 2

```

```

TYPES$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE UNIFORME"
GOTO PROGRAMME

' *****
'           F8 : DONNEES REALISTE EN DS OPTIMISE
' *****
F8:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI REALISTE EN DS      "

SLEEP 2
TYPES$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE OPTIMISE"
GOTO PROGRAMME

' *****
'           F9 : DONNEES ESSAI PARTICULIER
' *****
F9:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> PARAMETRES ESSAI PARTICULIER      "

SLEEP 2
TYPES$ = "PARTICULIER"
GOTO PROGRAMME

' @@@@
DEBUT PROGRAMME
' @@@@
PROGRAMME:
ecranmenu
Effacetitre
LOCATE 3, 5: PRINT "R2D2TEMP ==> EXECUTION ==> ESSAI " + TYPES$

' *****
'           DONNEES GENERALES DE L ESSAI
' *****
LOCATE 8, 5: PRINT "heure ...", TIME$
REENTER1:
LOCATE 9, 20: INPUT "Heure du contact E/C HH:MM:SS.....= ", contact$
IF contact$ = "" THEN GOTO REENTER1
REENTER2:
LOCATE 10, 20: INPUT "Duree de l essai en jour .....= ", DureeEssai&
IF DureeEssai& = 0 THEN GOTO REENTER2
REENTER3:
LOCATE 11, 20: INPUT "Inter enregistrement en minute .....= ", InterEnrgminute&
IF InterEnrgminute& = 0 THEN GOTO REENTER3
REENTER4:
LOCATE 12, 20: INPUT "Nbre de signaux envoyes par enregistrement=", NbrSignal%
IF NbrSignal% = 0 THEN GOTO REENTER4
ENREGISTRER:
LOCATE 13, 20: INPUT "Enregistrer le fichier sous :", FICHER$
IF FICHER$ = "" THEN GOTO ENREGISTRER

OPEN FICHER$ + ".TXT" FOR OUTPUT AS #2
PRINT #2, "temps_(j)", "Consigne", "Reponse", DATE$, TIME$

' *****
k% = 7
date0& = VAL(MID$(DATE$, 4, 2)) ' identification du premier jour de d,but de l'essai
date1& = date0& ' pour identifier la date du premier jour d'essai

```

```

jour% = 1 / 24
initialtime% = timeconvert(TIME$)          ' heure initiale du d,but de l'asservissement)
NbreEnrg% = 1
NbrFichierEnrg% = 0
NbrLigneEnrg% = 10000  ' Nbre d'enregistrement MAX par fichier
InterEnrg% = InterEnrgminute% * 60  ' fr,quence d'enregistrement [ secondes ]

```

```

' *****
'      VISUALISATION DE LA COURBE ENTIERE
' *****

```

```
ecranvide
```

```
graduation (DureeEssai&)
```

```

t0! = (timeconvert(TIME$) - timeconvert(contact$)) / 86400
WHILE t0! < DureeEssai&
  XTEMPS% = INT(t0! * 350 / DureeEssai&) + 33
  IF TYPE$ = "ISOTHERME" THEN
    YTEMPS% = 390 - INT(ISO(T!)) * 4
  ELSEIF TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE UNIFORME" THEN
    YTEMPS% = 390 - INT(setisods(t0!, CYCLE!, amplitude!, T!)) * 4
  ELSEIF TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE OPTIMISE" THEN
    YTEMPS% = 390 - INT(TOTALSINUSOIDES(t0!, T!, amplitude!, CYCLE!)) * 4
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE" THEN
    YTEMPS% = 390 - INT(setpnt(A, B, C, t0!, E, F) * 4)
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE UNIFORME" THEN
    PRINT " REALISTE DS UNIFORME NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE OPTIMISE" THEN
    PRINT " REALISTE DS OPTIMISE NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  ELSE
    PRINT " PARTICULAR NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  END IF

```

```

PSET (XTEMPS%, YTEMPS%), 3
t0! = t0! + .00005
WEND

```

```

LOCATE 27, 5: PRINT "
LOCATE 27, 5: PRINT "Programme en cours d execution ... "

```

```

' *****
'      COMMUNICATION AVEC LE BAIN
' *****

```

```

DO
  *****
  ' R,initialisation de la communication avec le bain
  Openport
  *****
  SignalDone% = 0
  LINE (400, 55)-(639, 90), 10, B
  LOCATE 5, 52: PRINT "NbrEnrg T_CIBLE REPONSE"
  LOCATE 27, 5: PRINT "
  LOCATE 27, 5: PRINT "Programme en cours d'ex,cution ...      >>> " + FICHER$ + " <<<"
  REM sendgetcom$, answer$, status$
  *****
  ' Spécification du D □ CALAGE d'enregistrement (seconde)
  *****

```

```
Reboucler:
```

```
IF VAL(MID$(DATE$, 4, 2)) <> date0& THEN
```

```

    jour% = jour% + 1
  END IF
  date0& = VAL(MID$(DATE$, 4, 2))
  debutAttente$ = TIME$
  D = CSNG(jour%) + (CSNG(timeconvert(TIME$)) - CSNG(timeconvert(contact$))) / 86400 +
  CSNG(InterEnrg& / NbrSignal%) / 86400

  IF TYPE$ = "ISOTHERME" THEN
    com$ = "S" + MID$(STR$(ISO(CSNG(T!))), 1, 6)
  ELSEIF TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE UNIFORME" THEN
    com$ = "S" + MID$(STR$(setisods(D, CYCLE!, amplitude!, T!)), 1, 6)
  ELSEIF TYPE$ = "ISOTHERME EN DENTS DE SCIE OPTIMISE" THEN
    com$ = "S" + MID$(STR$(TOTALSINUSOIDES(D, T!, amplitude!, CYCLE!)), 1, 6)
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE" THEN
    com$ = "S" + MID$(STR$(setpnt(A, B, C, D, E, F)), 1, 6)
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE UNIFORME" THEN
    PRINT "REALISTE DS UNIFORME NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  ELSEIF TYPE$ = "REALISTE EN DENTS DE SCIE OPTIMISE" THEN
    PRINT "REALISTE DS OPTIMISE NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  ELSE
    PRINT "PARTICULAR NOT YET DEFINED ... "
    SLEEP 2
  END IF

  sendget com$, answer$, status$
  SLEEP 2
  com1$ = com$
  IF k% = 25 THEN
    LOCATE 7, 52: PRINT "          "
    LOCATE 7, 63: PRINT MID$(com1$, 3, 7)
  ELSE
    LOCATE k%, 63: PRINT MID$(com1$, 3, 7)
  END IF
  SLEEP InterEnrg& / NbrSignal%
  SignalDone% = SignalDone% + 1
  IF SignalDone% < NbrSignal% THEN GOTO Reboucler
  *****
  ' Affichage et enregistrement des valeurs
  *****
  sendget com1$, answer$, status$
  SLEEP 2
  response$ = "F?"
  sendget response$, answer$, status$
  LOCATE k%, 73: PRINT MID$(answer$, 1, 5)
  LOCATE k%, 53: PRINT NbreEnrg%
  *****
  ' ENREGISTREMENT SUR FICHER
  *****
  PRINT #2, STR$(D), MID$(com1$, 3, 7), MID$(answer$, 1, 5)
  *****
  k% = k% + 1
  NbreEnrg% = NbreEnrg% + 1
  ' Vider l'ecran d'enregistrment des temperatures
  IF k% > 25 THEN
    FOR J = 8 TO 25
      LOCATE J, 52: PRINT "          "
    NEXT
    k% = 7
  END IF
  *****

```

```

'          ZONE GRAPHIQUE
*****
XTEMPS% = INT(D * 350 / DureeEssai) + 33
YTEMPS% = 390 - INT(VAL(MID$(answer$, 1, 5)) * 4)
PSET (XTEMPS%, YTEMPS%), 14
LOOP UNTIL D >= CSNG(DureeEssai&)
CLOSE #1
' *****

ecranvide
LOCATE 27, 5: PRINT "
LOCATE 27, 5: PRINT "FIN          >>> " + FICHER$ + " <<<"
CLOSE #2
RETURN
RETURN

' *****
'          FIN DU PROGRAMME
' *****

F10:
KEY(1) OFF
KEY(2) OFF
KEY(5) OFF
KEY(6) OFF
KEY(7) OFF
KEY(8) OFF
KEY(9) OFF
KEY(10) OFF
END

' *****
'          ACKNOWLEDGE SUBROUTINE
' *****

acknowledge:
INPUT #1, ACK
IF ACK <> 0 THEN
PRINT "Error "; ACK; ". ";
SELECT CASE ACK
CASE 1
PRINT "Syntax Error"
CASE 2
PRINT "Execution Error"
CASE 3
PRINT "Synchronisation Error"
CASE 4
PRINT "Communication Error"
CASE IS > 4
PRINT "Unknown Acknowledge"
CASE IS < 1
PRINT "Unknown Acknowledge"
END SELECT
PRINT "Program aborted."
END
END IF
RETURN

' *****
'          DONNEE : PARAMETRES DU BAIN
' *****

'DATA statements are the source of the Queries
'used in subroutine DisplayValues
DATA Setpoint Temperature          ,S?

```

```

DATA Fluid Temperature ,F?
DATA Temp Units in Degrees C F or U ,U?
DATA Upper Temperature Limit ,&LH?
DATA Lower Temperature Limit ,&LL?
DATA Readout Decimal Places ,&P?
DATA AutoRefrig Setpoint ,&R?
DATA Internal Probe = 0 External = 1 ,&X?
DATA External Probe Maximum Setpoint Differential ,&D?
DATA PID Tuning Based on Flow Rate in LPM ,&F?
DATA PID Tuning Based on Total Volume in Liters ,&V?
DATA PID Tuning Based on Specific Heat of Fluid ,&S?
DATA Degrees (U) User Units Constant K1 ,&K1?
DATA Degrees (U) User Units Constant K2 ,&K2?
DATA Degrees (U) User Units Constant K3 ,&K3?
DATA ,

```

```

' @@@@
LES SOUS ROUTINES
' @@@@

```

FUNCTION DEBUT (X AS SINGLE)

```

REM DEBUT = 127457 * X ^ 6 - 181432 * X ^ 5 + 95080 * X ^ 4 - 23294 * X ^ 3 + 3105.6 * X ^ 2 - 191.1 * X + 29.707 - 5.57
REM DEBUT = 256124 * X ^ 6 - 222006 * X ^ 5 + 70718 * X ^ 4 - 9496.8 * X ^ 3 + 744.34 * X ^ 2 - 20.251 * X + 20.139

```

REM B30TWH1 du 16 decembre 03

```

'DEBUT = 22595 * X ^ 6 - 637.21 * X ^ 5 - 7705.6 * X ^ 4 + 3234.7 * X ^ 3 - 529.1 * X ^ 2 + 46.558 * X + 22.499
'B40T10 du 20 avril 2004

```

```

DEBUT = -118157 * X ^ 6 + 129989 * X ^ 5 - 57394 * X ^ 4 + 13279 * X ^ 3 - 1347.6 * X ^ 2 + 68.706 * X + 19.192
END FUNCTION

```

FUNCTION DEMISINUSOIDE (temps!, initialtime!, amplitude!, periode!)

```

' amplitude >>> variation de la temp,rature (celcus)
' temps >>> temps r,el (jour)
' periode >>> intervalle d'application du cycle (minute)
' initialtime >>> temps d'application de la sinusoide (heure)

```

```

IF temps! < (initialtime! / 24) THEN
    DEMISINUSOIDE = 0
ELSEIF temps! < initialtime! / 24 + periode! / (2 * 1440) THEN
    DEMISINUSOIDE = amplitude! * SIN(temps! * 24 * 60 * 2 * 3.14 / periode!)
ELSE
    DEMISINUSOIDE = 0
END IF
END FUNCTION

```

SUB DisplayValues

```

'DisplayRoutine.....
'Example automatic extraction of values
'Automatically Polls a List of Queries in the DATA statements
'CLS : COLOR 14 'Print Heading
RESTORE
LOCATE 6, 5: PRINT "Description:";
LOCATE CSRLIN, 58: PRINT "Inquiry";
LOCATE CSRLIN, 68: PRINT "Value"
PRINT
ReadMore: READ Descr$, com$ 'Read DATA containing queries
IF Descr$ = "" THEN EXIT SUB 'Quit Upon Last Query
sendget com$, answer$, status$ 'Ask and Receive Answer
LOCATE CSRLIN, 5: PRINT LEFT$(Descr$ + STRING$(50, 46), 44); 'Print Description

```

```

LOCATE CSRLIN, 58: PRINT com$;          'Print Query
LOCATE CSRLIN, 68: PRINT answer$      'Print Answer
GOTO ReadMore                          'Keep Reading DATA
END SUB

```

SUB ecranmenu

```

FOR J% = 5 TO 27
LOCATE J%, 2: PRINT "                  "
NEXT
LINE (15, 20)-(639, 55), 14, B
LINE (15, 55)-(639, 404), 14, B
LINE (15, 404)-(639, 442), 12, B
END SUB

```

SUB ecranvide

```

FOR J% = 6 TO 27
LOCATE J%, 2: PRINT "                  "
NEXT
LINE (15, 20)-(639, 55), 14, B
LINE (15, 55)-(400, 404), 14, B
LINE (400, 55)-(639, 404), 10, B
LINE (15, 404)-(639, 442), 12, B
END SUB

```

SUB Effacetitre

```

LOCATE 3, 5: PRINT "                  "
LOCATE 27, 5: PRINT "                 "
END SUB

```

FUNCTION FIN (X AS SINGLE)

```

REM FIN = -.0058 * X ^ 6 + .1308 * X ^ 5 - 1.1793 * X ^ 4 + 5.2271 * X ^ 3 - 10.07 * X ^ 2 - 4.5439 * X + 68.332 - 5.57
FIN = -.0102 * X ^ 6 + .23121 * X ^ 5 - 2.1132 * X ^ 4 + 10.041 * X ^ 3 - 26.5 * X ^ 2 + 38.321 * X + 53.469
END FUNCTION

```

SUB graduation (DureeEssai&)

```

LINE (33, 70)-(382, 389), 7, B
' traçage de l'echelle des "Y"
FOR J% = 1 TO 7
    LINE (33, 70 + J% * 40)-(38, 70 + J% * 40), 7
NEXT
' traçage de l'echelle des "X"
FOR k% = 1 TO 6
    LINE (33 + k% * 350 / DureeEssai&, 384)-(33 + k% * 350 / DureeEssai&, 389), 7
NEXT
LOCATE 24, 35: PRINT "temps (jour)"
LOCATE 6, 7: PRINT " T (C) "
END SUB

```

SUB graphique

```

LINE (33, 70)-(386, 382), 1, B
END SUB

```

FUNCTION ISO (celcus AS SINGLE)

```

ISO = celcus
END FUNCTION

```

FUNCTION MILIEU (X AS SINGLE)

```

REM MILIEU = -7455.1 * X ^ 6 + 29468 * X ^ 5 - 48128 * X ^ 4 + 41626 * X ^ 3 - 20177 * X ^ 2 + 5226 * X - 507.88 - 5.57
REM MILIEU = 134977 * X ^ 6 - 386119 * X ^ 5 + 451321 * X ^ 4 - 274732 * X ^ 3 + 91196 * X ^ 2 - 15411 * X + 1062.1

```

```

REM B30TWH1 du 16 decembre 03

```

```
MILIEU = -142173 * X ^ 6 + 428194 * X ^ 5 - 518175 * X ^ 4 + 320778 * X ^ 3 - 106670 * X ^ 2 + 18152 * X - 1217.2
END FUNCTION
```

SUB Openport 'OPENS, Clears and Prepares COM Port AS Filenumber 1

Note : cette subroutine a été développée par le fournisseur du bain thermostaté.

```
CLOSE #1
OPEN "COM1:9600,N,8,1,CD0,CS0,DS0,OP0,RS,TB0,RB0" FOR RANDOM AS 1
REM OPEN "COM1:9600,N,8,1" FOR RANDOM AS #1
PRINT #1, "CM" ' Clear memory
WHILE LOC(1) > 0
    LINE INPUT #1, In$
WEND
REM PRINT #1, "DS" ' Reset the ScopeMeter to the default setting
wait7! = TIMER + 10 'Wait 10 Seconds for a Response
Retry:
PRINT #1, "A0" 'Place in Non-Echo Mode A0
PRINT #1, "ON" 'Turn ON if OFF and/or Remove from Logger LO mode
IF TIMER > wait7! THEN PRINT : PRINT "Failed to Communicate": END
FOR i = 1 TO 5000 'Look multiple times for Good Status Byte = "0"
IF INSTR(INPUT$(LOC(1), 1), "0") THEN GOTO ClearOutBuffer
NEXT
GOTO Retry
ClearOutBuffer: FOR i = 1 TO 5000: In$ = INPUT$(LOC(1), 1): NEXT
END SUB
```

FUNCTION RAPIDERETOUR (X AS SINGLE)

```
RAPIDERETOUR = .0168 * (X ^ 4) - .5373 * (X ^ 3) + 6.3355 * (X ^ 2) - 36.52 * X + 96.82
END FUNCTION
```

SUB sendget (com\$, answer\$, status\$)

' Note : cette subroutine a été développée par le fournisseur du bain thermostaté.

'Sends Commands and Receives Data

```
TrySendingAgn: PRINT #1, com$ 'Send Out the Command Line
Wait2! = TIMER + 10: In$ = "" 'Set 10 Second TIMER, Clear Input Buffer
WaitForChars: 'Wait for More Characters
IF TIMER > Wait2! THEN Openport: GOTO TrySendingAgn 'Try Command Over Again
In$ = In$ + INPUT$(LOC(1), 1) 'Quickly Take in Data in Chunks
IF RIGHT$(In$, 1) <> CHR$(13) THEN GOTO WaitForChars 'Done Yet?
IF INSTR(In$, CHR$(10)) < 1 THEN GOTO WaitForChars 'Done Yet?
answer$ = "": InLength = LEN(In$) - 2 'Answer$ = In$ - CR and Status Byte
FOR OneAtATime = 1 TO InLength 'Weed Out Non-Printing Chars
OneCharacter$ = MID$(In$, OneAtATime, 1) 'Check Each Character
IF OneCharacter$ > " " THEN answer$ = answer$ + OneCharacter$
NEXT
status$ = MID$(In$, InLength + 1, 1) 'Extracts the Status Character
END SUB
```

FUNCTION setisods (temps, dtemps, dtemperature, temperature0 AS SINGLE)

```
' dtemperature >>> variation de la temp,rature (celcus)
' temps >>> temps r,el (jour)
' dtemps >>> intervalle d'application du cycle (minute)
' temperature0 >>> la temp,rature de r,f,rence initiale
setisods = dtemperature * SIN(temps * 24 * 60 * 2 * 3.14 / dtemps) + temperature0
END FUNCTION
```

FUNCTION SINUSOIDE (temps!, initialtime!, amplitude!, periode!)

```
' amplitude >>> variation de la temp,rature (celcus)
' temps >>> temps r,el (jour)
' periode >>> intervalle d'application du cycle (minute)
' initialtime >>> temps d'application de la sinusoire (heure)
```

```
IF temps! < (initialtime! / 24) THEN
```

```

    SINUSOIDE = 0
ELSEIF temps! < initialtime! / 24 + periode! / 1440 THEN
    SINUSOIDE = amplitude! * SIN(temps * 24 * 60 * 2 * 3.14 / periode!)
ELSE
    SINUSOIDE = 0
END IF
END FUNCTION

```

FUNCTION setpnt (A, B, C, D, E, F AS SINGLE)

```

' A d, signe la temp, rature maximale
' B d, signe le temps correpondant ... Tmax (A)
' C d, signe la temp, rature initiale T0
' D d, signe la variable temps
' E p, ride ou la temp, rature demeure = T0 (isotherme)
' F Temperature finale
essai% = 1
REM 1 : essai isotherme en suivant une courbe r/aliste
REM 2 : essai isotherme = passage de C a F brusquement
REM 3 : essai realiste
IF essai% = 1 THEN
    result! = DEBUT(D - E + 1 / 24)
    IF D <= E THEN
        result! = C
    ELSE
        IF D <= .37 + E THEN result! = DEBUT(D - E + 1 / 24)
        IF D > .37 + E THEN result! = F
        REM IF D > .667 + E THEN result! = F
    END IF

    IF result! < F THEN
        setpnt = result!
    ELSE
        setpnt = F
    END IF

ELSEIF essai% = 2 THEN
    IF D <= E THEN
        setpnt = C
    ELSE
        setpnt = F
    END IF
ELSE
    IF D <= .25 THEN result! = DEBUT(D)
    IF D > .25 AND D <= .667 THEN result! = MILIEU(D)
    IF D > .667 THEN result! = FIN(D)

    REM IF D > .6285 THEN result! = RAPIDERETOUR(D)
    setpnt = result!
END IF
END FUNCTION

```

FUNCTION timeconvert (T AS STRING)

```

' cette procedure permet de convertir l'heure en secondes
timeconvert = (VAL(LEFT$(T, 2)) * 3600 + VAL(MID$(T, 4, 2)) * 60 + VAL(RIGHT$(T, 2)))
END FUNCTION

```