

ARNAUD MULLER

**Conversion & résistance en compression des ciments
d'aluminates de calcium**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil
pour l'obtention du grade de Maître ès science (M.Sc.)

DEPARTEMENT GENIE CIVIL
FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIE
UNIVERSITE LAVAL
QUEBEC

2010

Résumé

Les ciments d'aluminates de calcium (CACs) constituent un type de liant bien particulier. Présentant un durcissement rapide, ils sont aussi très résistants face aux sulfates et aux hautes températures. Ces intéressantes propriétés leur confèrent un avantage dans des domaines d'application bien précis comme les réparations rapides, les dallages industriels et l'industrie réfractaire.

Ces excellentes caractéristiques mécaniques et chimiques sont associées à un mécanisme d'hydratation très particulier. En effet, les produits formés suite au contact entre l'eau et un ciment CAC sont fonction de la température atteinte pendant le durcissement et peuvent être de plusieurs formes : CAH_{10} , C_2AH_8 , et C_3AH_6 . Certains de ces hydrates sont dits métastables, c'est à dire qu'ils sont destinés à changer de forme selon l'évolution des conditions thermiques et hydriques du matériau. Ce phénomène, appelé la « conversion », est responsable d'une diminution des résistances mécaniques du béton durci. Quelques effondrements de structure survenus en Angleterre dans les années 1970 ont été attribués à cette conversion, laissant des a priori négatifs sur les ciments alumineux. Maintenant que ce phénomène est mieux compris, il est plus facile de planifier et concevoir des ouvrages tout en tenant compte de cette conversion, et ainsi mieux prédire les caractéristiques d'un béton de CACs. La procédure actuelle visant à déterminer leur résistance en compression minimale nécessite l'immersion immédiate du béton frais, dans des éprouvettes scellées, à 38 °C pour une durée de 5 jours. Contraignante sur un chantier, cette procédure apparaît comme une limite à l'utilisation plus régulière des ciments alumineux en génie civil.

L'objectif principal de ce projet est donc d'élaborer une nouvelle procédure d'évaluation de la résistance en compression d'un CACs, plus facile à réaliser en chantier. L'approche souhaitée est d'envoyer les éprouvettes au laboratoire, après les premières 24 heures de durcissement, qui se déroulent dans les conditions environnementales inconnues du chantier ; afin de leur faire subir une cure qui permettrait de connaître la *résistance minimum garantie* du béton de CACs mis en place. Un objectif secondaire de cette étude est ainsi d'établir l'influence des conditions initiales de cure (0-24 heures) sur la conversion en phase. Dans un second temps, le but à atteindre est de caractériser le comportement en

compression dans le temps d'un nouveau liant, le ciment « LBC ». L'impact du changement de certains paramètres de base (ratio E/C, type de granulats, températures des matériaux et adjuvantation) est aussi étudié.

L'étude de différentes températures de cure démontre que plus elles sont élevées, plus la conversion survient rapidement. Pour le Ciment Fondu, elle se produit en 120 jours à 23 °C, en 14 jours à 38 °C et enfin en 1 à 2 jours de cure dans un environnement à 50 °C. Peu importe le traitement thermique et l'état d'hydratation initial (premières 24 heures), la résistance à long terme après conversion est similaire. Pour le liant LBC, les chutes de résistances associées à la conversion sont moins importantes que pour le Ciment Fondu, et les gains de résistances à long terme sont observés dans le cas des cures où les éprouvettes sont immergées dans l'eau.

Abstract

Calcium Aluminate Cements constitute a special type of binder. Their hardening is quick and they are very resistant against sulfate attacks and high temperatures. These interesting properties give them an advantage for specific applications such as rapid repairs, industrial flooring and in the refractory applications.

These excellent mechanical and chemical characteristics are unfortunately related to a unique hydration mechanism. The products generated after the contact between water and CAC cement depend on the temperature reached during the hardening process, and may take several shapes : CAH_{10} , C_2AH_8 and C_3AH_6 . Some of these hydrates are said metastable, which means that they can change over time. This phenomenon, called « conversion », is responsible for a strength reduction in hardened CAC concrete. Some structural failures that occurred in England in the 1970s and have been associated with conversion, creating a negative image for the aluminate cements. Now that this phenomenon is better understood, it is easier to design structures, taking into account the conversion and effects, predict the characteristics of CAC concretes. The current procedure to determine the minimum compressive strength is an immediate immersion of the fresh samples at 38 °C for 5 days. Restrictive on a job site, this procedure is a limiting factor to the regular use of calcium aluminate cements in civil engineering.

The main objective of this project is to develop a new procedure to evaluate the compressive strength of CACs, easier to perform in job site. For the elaboration of new testing procedure, the idea is to send samples to the laboratory, after the first 24 hours, spend under unknown environmental conditions in the job site, to subject them to a predetermined curing regime, which would give the minimum guaranteed compressive strength of in-place CAC concrete. One of the specific objectives of this study is to establish the influence of initial temperatures of curing (0-24 hours) on the hydrate's phases. The second objective is to characterize the compressive strength behavior of a new binder, the « LBC cement ». The impact of changing some basic parameters (W/C ratio, type of aggregates, material temperatures and presence of admixtures) has also been studied.

The study shows that the higher the curing temperatures, the faster is the conversion. For the Ciment Fondu, the conversion occurs in 120 days at 23 °C, 14 days at 38 °C and finally in 1 to 2 days in an environment at 50 °C. Regardless of these initial temperatures and the state of initial hydration (first 24 hours), the long-term strength after conversion remains approximately the same.

For the cement LBC, the strength reductions associated with conversion are not as important as those of the Ciment Fondu. Also, an increase of long-term strength is observed when water curing is maintained.

Avant-Propos

Avec le recul du temps universitaire passé sur les bancs d'école, et en particulier celui à étudier le génie civil, cette maîtrise a été de loin l'expérience la plus enrichissante dans ma compréhension du matériau complexe qu'est le béton. Elle m'apparaît aujourd'hui comme un aboutissement personnel de par le plaisir que j'ai éprouvé à la mener à terme.

En premier, je remercie tout particulièrement mon directeur de recherche, M. Marc Jolin, pour la confiance qu'il m'a accordée, son écoute, son assistance et sa collaboration tout au long de cette étude. C'est un vrai plaisir de travailler avec Marc, il est passionné par ce qu'il fait, par ce qu'il partage avec ses étudiants, et il détient l'incroyable talent de savoir le transmettre. Avec Marc, une difficulté devient un challenge, un résultat abstrait devient une énigme scientifique attrayante. Je lui exprime donc ma reconnaissance pour ce qu'il m'a apporté et pour la façon dont il continue de le faire aujourd'hui.

Merci à M. Louis-Samuel Bolduc pour sa collaboration directe à l'avancement de ce projet de par ses analyses techniques et scientifiques. Il a par ailleurs toujours été disponible et compréhensif à mon égard.

Je cite également M. Bastien Wipliez, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée au laboratoire. Bastien m'a en effet assisté avec enthousiasme lors des quelques mois très chargés de ma campagne expérimentale, sans compter ses heures et l'énergie qu'il y déployait (VSD). Je souhaite à quiconque de travailler un jour avec lui.

De plus, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce projet. Je pense aux techniciens du laboratoire, et en particulier à M. René Malo, pour leur aide et leur disponibilité au quotidien. Je pense aussi à Mme Julie Conseiller, chef laboratoires; à M. Étienne Crépault, menant un projet parallèle sur la rhéologie des CACs; à Mme Séverine Lamberet, pour les essais effectués dans son laboratoire et ses analyses scientifiques; et enfin M. Frédéric Gagnon, pour son aide au début du projet.

Pour finir, je pense à tous mes collègues étudiants avec qui j'ai eu plaisir à travailler et à évoluer session après session.

À ma famille

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	iii
Avant-Propos.....	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures.....	x
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Introduction générale.....	1
1.2 Mise en contexte.....	2
1.3 Objectifs du projet.....	3
1.4 Structure du document.....	3
Chapitre 2 – Revue de documentation.....	4
2.1 Ciments d’Aluminates de Calcium (CACs)	4
2.1.1 Historique des CACs	4
2.1.2 Domaine d’utilisation	5
2.1.3 Fabrication et composition des CACs	8
2.2 Comportement des CACs.....	10
2.2.1 Mécanisme d’hydratation des CACs	10
2.2.2 Propriétés mécaniques des CACs.....	16
2.2.3 Influence des laitiers sur les ciments alumineux	20
2.2.4 Influence du type de granulats.....	24
2.3 État de l’art	28
Chapitre 3 – Matériel et Méthodes	31
3.1 Introduction	31
3.2 Programme expérimental.....	31
3.2.1 Mise au point de l’essai	32
3.2.2 Autres paramètres étudiés.....	37
3.3 Matériaux.....	38
3.3.1 Constituants	38
3.3.2 Proportions des mélanges	40
3.4 Procédé de fabrication	41
3.5 Fabrication des bétons à 5 °C et 35 °C.....	43
3.6 Fabrication des éprouvettes	44
3.6.1 Éprouvettes de béton	44
3.6.2 Éprouvettes de mortier	44
3.7 Équipements et accessoires	45
3.8 Essai.....	45
Chapitre 4 – Élaboration d’une procédure expérimentale pour la détermination de la résistance en compression	46
4.1 Introduction	46

4.2 Analyses Diffraction Rayon-X à 24 heures (A1, A2 et A3).....	47
4.2.1 Ciment Fondu.....	48
4.2.2 Ciment LBC.....	51
4.3 Cure à 23 °C	54
4.3.1 Cure en air	54
4.3.2 Cure en eau.....	58
4.4 Cure à 38 °C	61
4.4.1 Cure en air	61
4.4.2 Cure en eau.....	67
4.5 Cure à 50 °C	71
4.5.1 Ciment Fondu.....	71
4.5.2 Ciment LBC.....	75
4.6 Conclusions et observations	79
4.7 Proposition d'essai.....	80
Chapitre 5 - Robustesse de l'essai	82
5.1 Introduction	82
5.2 Rapport eau/ciment.....	82
5.2.1 Ciment Fondu.....	83
5.2.2 Ciment LBC.....	86
5.3 Température de fabrication (5 °C et 35 °C)	89
5.3.1 Ciment Fondu.....	89
5.3.2 Ciment LBC.....	93
5.4 Influence des granulats	96
5.4.1 Ciment Fondu.....	96
5.4.2 Ciment LBC.....	100
5.5 Influence d'un adjuvant fluidifiant.....	103
5.5.1 Ciment Fondu.....	103
5.5.2 Ciment LBC.....	105
5.6 Discussion.....	106
Chapitre 6 - Conclusion.....	107
6.1 Introduction	107
6.2 Conclusions générales	107
Bibliographie	109
Annexe A : Fiches matériaux	111
Annexe B : Températures.....	164
Annexe C : Résistances en compression	171

Liste des tableaux

Tableau 3.1 – Protocole expérimental : Températures de cure	36
Tableau 3.2 – Protocole expérimental : Autres paramètres étudiés	37
Tableau 3.3 – Composition et caractéristiques du mélange de référence.....	40
Tableau 3.4 – Composition et caractéristiques du mortier	41

Liste des figures

Figure 2.1 – Jules Bied	4
Figure 2.2 – Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil (couverture du livre de 1924).....	4
Figure 2.3 – Secar 71, Secar 51 et Ciment Fondu	8
Figure 2.4 – Diagramme de composition en $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ [Scrivener (2003)].....	9
Figure 2.5 – Les différentes phases du processus d’hydratation Zone I : Dissolution – Zone II : Induction – Zone III : Précipitation [Oliveira et al. (2008)].....	11
Figure 2.6 – Agrandissement MEB des hydrates C_2AH_8 [Sir Frederick Lea].....	12
Figure 2.7 – Influence de la température sur le temps de conversion [tiré de la norme française EN 14647 (2006)]	13
Figure 2.8 – Apparition des différents hydrates en fonction de la température atteinte lors de la prise.....	14
Figure 2.9 – Historique d’hydratation d’un CACs [Fryda, Charpentier et al. (2008)].....	15
Figure 2.10 – Analyses des hydrates à différents stades de la prise [Alt et al. (2001)].....	16
Figure 2.11 – Évolution des résistances en compression en fonction de 4 températures de cure ($E/C = 0,40$ cubes de 100 mm) [Fryda, Charpentier et al. (2008)].....	17
Figure 2.12 – Résistances avant et après conversion pour différents ratios E/C [tiré de la norme française EN 14647 (2006)]	18
Figure 2.13 – R_c de mélanges immergés à 40 °C (après un durcissement de 24 h à 20 °C/100 % H.R.) en fonction de la teneur en laitier [tiré de Heikal et al. (2004)].....	20
Figure 2.14 – Résistances en compression de mélange HTA/laitier (cubes de 100×100 mm et $E/C = 0,45$) en fonction du temps [Majumdar et al. (1992)].....	22
Figure 2.15 – Résistances en compression pour un mélange Ciment Fondu/laitier muri à différentes températures [Sir Frederick Lea (Lea’s 2004)]	23
Figure 2.16 – Phases présentes dans la pâte de Ciment « carbo-alumineux » à 24 h pour différentes températures de murissement [Fentiman et al (1985)].....	25
Figure 2.17 – Phases présentes dans la pâte de Ciment Fondu à 24 h pour différentes températures de murissement [Fentiman et al. (1985)]	25
Figure 2.18 – Effet de l’augmentation du carbonate de calcium sur les résistances en compression [Fentiman et al. (1985)].....	26
Figure 2.19 – Résistances en compression de bétons muris à 38 °C après avoir été conservés à 20 °C pendant les premières 24 heures.....	27
Figure 2.20 – Températures atteintes par différents types de moules [Fryda, Charpentier et al. (2008)]	29
Figure 3.1 – Bacs Auto 1	32
Figure 3.2 – Intérieur d’un bac	32
Figure 3.3 – Historique de température en condition A1 (Ciment Fondu et ciment LBC).32	
Figure 3.4 – Boite A2	33
Figure 3.5 – Boite A2 avec couvercle	33
Figure 3.6 – Historique de température en condition A2 (Ciment Fondu et ciment LBC).33	
Figure 3.7 – Boite A3 avec couvercle	34
Figure 3.8 – Boite A3	34
Figure 3.9 – Historique de température en condition A3 (Ciment Fondu et ciment LBC).34	
Figure 3.10 – Conditions A1, A2 et A3.....	35

Figure 3.11 – Conditions A1, A2 et A3 avec couvercle.....	35
Figure 3.12 – Sable siliceux 0-5 mm.....	38
Figure 3.13 – Pierre calcaire 5-14 mm.....	38
Figure 3.14 – Malaxeur à tambour.....	39
Figure 3.15 – Sable homogénéisé.....	39
Figure 3.16 – Pierre granitique 5-14 mm.....	39
Figure 3.17 – Sable calcaire 0-5 mm.....	39
Figure 3.18 – Malaxeur 80 litres.....	41
Figure 3.19 – Malaxage à sec.....	42
Figure 3.20 – Malaxage humide.....	42
Figure 3.21 – Mise à température du matériel et des matériaux.....	43
Figure 3.22 – Table vibrante.....	43
Figure 3.23 – Produits secs.....	43
Figure 3.24 – Malaxage du béton.....	43
Figure 3.25 – Cylindres 100×200 mm.....	44
Figure 3.26 – Table vibrante.....	44
Figure 3.27 – Bain thermostaté.....	45
Figure 3.28 – Intérieur du bain.....	45
Figure 3.29 – Presse hydraulique de compression (capacité : 1 000 000 Lbs).....	45
Figure 4.1 – Analyse DRX - A1 - Ciment Fondu – 24 heures.....	48
Figure 4.2 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 24 heures.....	49
Figure 4.3 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 24 heures.....	50
Figure 4.4 – Analyse DRX – A1 - ciment LBC – 24 heures.....	51
Figure 4.5 – Analyse DRX – A2 - ciment LBC – 24 heures.....	52
Figure 4.6 – Analyse DRX – A3 - ciment LBC – 24 heures.....	53
Figure 4.7 – Cure à 23 °C en Air – Ciment Fondu.....	54
Figure 4.8 – Cure à 23 °C en Air – Mortier – Ciment Fondu.....	55
Figure 4.9 – Cure à 23 °C en Air – LBC.....	57
Figure 4.10 – Cure à 23 °C en Eau – Ciment Fondu.....	58
Figure 4.11 – Cure à 23 °C en Eau – LBC.....	59
Figure 4.12 – Cylindres scellés et non scellés.....	61
Figure 4.13 – Vue d'ensemble.....	61
Figure 4.14 – Cure à 38 °C en Air – Ciment Fondu – Scellés et non Scellés.....	62
Figure 4.15 – Cure à 38 °C en Air – Ciment Fondu – Pertes de masses.....	63
Figure 4.16 – Cure à 38 °C en Air – LBC – Scellé et non Scellé.....	65
Figure 4.17 – Cure à 38 °C en Air – LBC – Pertes de masses.....	66
Figure 4.18 – Cure à 38 °C en Eau – Ciment Fondu.....	67
Figure 4.19 – Analyse DRX – A1 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C.....	68
Figure 4.20 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C.....	69
Figure 4.21 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C.....	69
Figure 4.22 – Cure à 38 °C en Eau – LBC.....	70
Figure 4.23 – Cure à 50 °C en Eau – Ciment Fondu.....	71
Figure 4.24 – Analyse DRX – A1 - Ciment Fondu – 2 jours - cure à 50 °C.....	72
Figure 4.25 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 2 jours - cure à 50 °C.....	73
Figure 4.26 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 50 °C.....	74
Figure 4.27 – Cure à 50 °C en Eau – LBC.....	75

Figure 4.28 – Analyse DRX – A1 - Ciment LBC – 7 jours - cure à 50 °C	77
Figure 4.29 – Analyse DRX – A2 - Ciment LBC – 3 jours - cure à 50 °C	77
Figure 4.30 – Analyse DRX – A3 - Ciment LBC – 3 jours - cure à 50 °C	78
Figure 5.1 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45).....	83
Figure 5.2 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45).....	84
Figure 5.3 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45).....	85
Figure 5.4 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)	86
Figure 5.5 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)	87
Figure 5.6 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)	88
Figure 5.7 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1 (Gâché à 5, 23 et 35 °C).....	90
Figure 5.8 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2 (Gâché à 5, 23 et 35 °C).....	91
Figure 5.9 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3 (Gâché à 5, 23 et 35 °C).....	92
Figure 5.10 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)	93
Figure 5.11 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)	94
Figure 5.12 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)	95
Figure 5.13 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1	96
Figure 5.14 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2.....	98
Figure 5.15 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3.....	99
Figure 5.16 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1	100
Figure 5.17 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2	101
Figure 5.18 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3	102
Figure 5.19 – Cure à 50 °C en Eau – Ciment Fondu – Superplastifiant.....	104
Figure 5.20 – Cure à 50 °C en Eau –LBC – Superplastifiant.....	105

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Introduction générale

L'inventeur du premier « ciment hydraulique », qu'on connaît actuellement sous le nom de ciment Portland est monsieur Louis Vicat (1786-1862). Il fit état pour la première fois de sa composition ainsi que du procédé de fabrication dans son mémoire, remis à l'Académie des Sciences de Paris en 1817. Pour ces ciments dits « ordinaires », les principaux produits d'hydratation formés sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Quelques-uns des principaux mécanismes de dégradation des bétons ordinaires sont liés à la présence de C_3A dans la phase anhydre du ciment Portland. Associé à une attaque du béton par les sulfates, le C_3A est à l'origine de l'augmentation du volume des phases solides, pouvant mener à la détérioration de l'ouvrage. Au fil du temps, des solutions à ce problème ont été trouvées, en particulier avec le développement de ciments à faible teneur en C_3A . Cependant, ce ciment engendre de faibles résistances à court terme et des exigences de fabrication peu économiques.

C'est avec ces connaissances que Jules Bied, directeur du laboratoire de la société Lafarge, inventa au début de XX^{ème} siècle les ciments d'aluminates de calcium (CACs), conçus pour résister aux sulfates. On leur associe aussi un bon comportement lorsqu'ils sont soumis à de hautes températures ainsi qu'un durcissement très rapide. La grande proportion d'alumine qu'ils contiennent en fait un type de liant différent des ciments traditionnels, et présentant de nouveaux produits d'hydratation. Les phases formées sont principalement les aluminates de calcium hydratés. Le processus d'hydratation des CACs est également très particulier, car l'évolution des résistances en compression s'avère très sensible à la température. Pour plusieurs, les CACs sont à considérer comme un autre produit, touchant des marchés très précis (industrie réfractaire, environnements sulfatés, réparations rapides, etc.) et nécessitant de nouveaux règlements d'utilisation.

1.2 Mise en contexte

Lorsqu'une entreprise met en place un béton en chantier, elle doit s'assurer de ses bonnes propriétés afin de livrer un ouvrage viable et durable. Pour cela, il existe de nombreux essais à réaliser, dont le plus courant est l'essai de résistance à la compression. De nombreuses normes existent sur tous les continents afin d'indiquer aux laboratoires la procédure à suivre pour obtenir des valeurs comparables et représentatives. Elles définissent la géométrie du moule à utiliser, le mode de mise en place du béton, les conditions de cure, le transport vers le laboratoire, etc. Dans le cas du ciment Portland, le béton doit être mis en place dans des éprouvettes normalisées, puis envoyé en laboratoire après 24 heures sur le chantier ; le béton est ensuite démoulé puis conservé en cure humide. La résistance est ensuite évaluée à 28 jours, avec parfois des essais intermédiaires à 3 et 7 jours. Pour le cas particulier des CACs, il existe une autre procédure détaillée dans la norme française EN 14647 (2006), spécifique aux ciments alumineux, qui nécessite une immersion immédiate du béton frais dans une eau à 38 °C pour une durée de 5 jours, suivie de la mesure de résistance. Cependant, la validité et le caractère pratique de cette procédure (bain d'eau à 38 °C en chantier) sont remis en question pour de nombreuses raisons, qui seront toutes détaillées dans le chapitre 2. Il y a donc une demande dans l'industrie pour un essai moins contraignant et plus robuste, afin de mieux évaluer les propriétés des CACs, et ainsi de permettre une plus grande utilisation de ces bétons très durables.

1.3 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est de développer un nouvel essai d'évaluation de la résistance en compression des CACs, mieux adapté aux conditions de chantier que le test décrit dans la norme EN 14647 (2006) ; dans le but d'élaborer un essai à court terme qui permette d'obtenir *la résistance minimum garantie* du béton à long terme.

L'idée est d'avoir un essai indépendant des conditions environnementales du site des travaux pour les 24 premières heures (type de moule, température ambiante, humidité relative, etc). Les éprouvettes seraient donc envoyées en laboratoire après 24 heures, pour ensuite subir une cure jusqu'à la caractérisation, dont la nature et la durée restent à déterminer.

Le second objectif de cette étude est de générer des données comparables sur le liant LBC, actuellement en développement chez Kerneos, afin de documenter et de comprendre le comportement de ce nouveau ciment alumineux.

1.4 Structure du document

Ce document est séparé en six chapitres. Après cette première partie qui explique le contexte, la motivation et les objectifs de l'étude, une revue de documentation qui fait état des connaissances actuelles sur les CACs dans le contexte du projet est présentée. Ensuite, le troisième chapitre explique la façon dont sont réalisées les manipulations expérimentales. Le quatrième chapitre présente les résultats qui ont mené au choix de la procédure d'évaluation des résistances mécaniques des bétons de ciments alumineux, et le chapitre suivant est consacré à une discussion sur la robustesse de l'essai préconisé, dans lequel différents paramètres du mélange sont modifiés. Enfin, le document se termine par une conclusion discutant de l'atteinte des objectifs et de la suite à donner à cette étude.

Chapitre 2 – Revue de documentation

2.1 Ciments d'Aluminates de Calcium (CACs)

2.1.1 Historique des CACs

Les ciments alumineux (CACs) ont été inventés au début du XX^{ème} siècle (1908) par Jules Bied (figure 2.1), alors directeur du laboratoire de la société Pavin de Lafarge. Après le dépôt du brevet, la première production du « Ciment Fondu » a eu lieu en 1916 à l'usine de Le Teil en France (figure 2.2), et mena à une industrialisation à partir de 1918.



Figure 2.1 – Jules Bied



Figure 2.2 – Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil (couverture du livre de 1924)

Les liants alumineux sont aujourd'hui commercialisés par plusieurs sociétés, basées un peu partout dans le monde, dont les plus importantes sont Kerneos (France), Caltra Nederland BV (Hollande), Calucem GmbH (Allemagne) et Associated Cement Companies ACC Ltf. (Inde). Tous ces groupes fabriquent un grand nombre de ciments alumineux différents, destinés à des applications spécifiques.

Les 100 ans d'histoire de ce liant ont somme toute été mouvementés. Un premier cas de détérioration est constaté sur des bétons CACs en 1926. En Bavière, les toits de plusieurs logements et d'une écurie se sont écroulés en 1961. Or, les ciments alumineux fabriqués en Allemagne, très différents du Ciment Fondu breveté en France, contenaient des sulfates et leur utilisation y a ensuite été interdite en 1962 [Argandona (1966)]. Dans les années 1970, 3 accidents sont survenus en Angleterre sur une courte période de temps. Le 17 juin 1973, une partie du toit d'une salle de classe de l'Université de Leicester s'écroule. Le jour suivant, la salle d'assemblée de l'école des filles de Camden s'écroula à Londres. Enfin, le 8 février 1974, le toit de la piscine de l'école secondaire de Sir John à Stepney tombe à son tour. Bien que les CACs aient été pointés du doigt, seulement le dernier évènement a été directement attribué au comportement du liant.

Aujourd'hui, les causes de ces événements sont connues et des changements dans les réglementations ont été apportés dans de nombreux pays pour interdire les bétons de CACs dans la fabrication des éléments structuraux.

Malgré cela, des constructions datant du début du siècle, dont un pont en Angleterre datant de 1926, ou le chantier naval de Halifax construit en 1930 (ayant nécessité 18 000 tonnes de ciments alumineux), sont encore aujourd'hui en excellent état.

2.1.2 Domaine d'utilisation

L'origine du développement des CACs visait à trouver un nouveau matériau durci résistant à l'attaque des sulfates. L'idée était d'avoir une absence totale de C_3A et de $Ca(OH)_2$, produit formé de l'hydratation des silicates de calcium. Les sulfates réagissent en effet avec les C_3A et attaquent la portlandite pour former du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et de la thaumasite, qui sont des phases expansives. Il s'avère que les CACs résistent mieux que les ciments Portland à une grande variété d'agressions chimiques, particulièrement face aux sulfates. Cette bonne durabilité explique l'attrait pour les CACs dans les applications comme les réseaux d'égouts et usines d'assainissement, dans la pétrochimie, dans l'industrie agro-alimentaire et les industries chimiques (bassin de décantation, planchers, canaux d'effluents, fosses à soufre). Historiquement, les CACs ont été utilisés comme

bétons de structure exposés aux eaux marines et aux eaux souterraines sulfatées à la suite de la première guerre mondiale. Ils ont commencé à être utilisés dans les réseaux d'égout avant les années 1950.

La deuxième caractéristique attrayante des CACs est leur durcissement rapide. Il faut bien distinguer durcissement rapide et prise rapide, car les CACs ont une prise plutôt lente et comparable aux ciments ordinaires (généralement entre 2 et 4 heures). En fait, c'est la fin de la prise qui survient rapidement. Environ 80 % des résistances mécaniques sont atteintes à 24 heures. Ceci permet des remises en service très rapides et une utilisation adaptée pour les interventions d'urgence, en particulier pour les zones circulées. Il y a comme exemple les réparations sur autoroute, où l'on peut rouvrir un ouvrage au trafic routier seulement 6 heures après la mise en place (avec des résistances atteintes souvent supérieures à 25 MPa). On pense également aux pistes d'atterrissage des aéroports pour lesquelles le temps d'inactivité est une perte logistique et monétaire considérable. Pour obtenir un durcissement aussi rapide en béton conventionnel, il faut utiliser du matériel de chauffage, généralement destiné à la préfabrication d'éléments. Lors de la seconde guerre mondiale, les ciments alumineux ont été utilisés en France pour la construction rapide de fortifications militaires.

L'augmentation rapide des résistances liée à l'hydratation massive résulte d'une réaction fortement thermoactivée. La chaleur d'hydratation du Ciment Fondu est pourtant semblable à celle du ciment Portland (450 à 500 J/g ; Bilodeau, 1996). Cependant, entre 70 % et 90 % de cette chaleur est libérée dans les premières 24 heures à 20 °C. Le ciment Portland dans les mêmes conditions libère 25 % à 50 % de sa chaleur d'hydratation dans ce laps de temps. La chaleur ainsi dégagée lors du durcissement permet aux CACs d'être utilisés pour des bétonnages par temps froids, à des températures pouvant aller jusqu'à -10 °C. Ceci convient parfaitement à des travaux hivernaux, en montagne mais aussi pour les sols des entrepôts frigorifiques.

La troisième caractéristique importante des CACs est une bonne résistance aux hautes températures en raison de leur forte teneur en aluminés. Le point de fusion de l'aluminium pur est situé au-delà de 2000 °C. Ainsi, la température pour laquelle le composé $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ passe sous sa forme liquide est de 1400 °C. En termes de comparaison, la composition des ciments Portland empêche une utilisation à des températures plus hautes que 500 °C [Gault (2003)]. Combiné à l'absence de chaux, les CACs résistent ainsi très bien aux chocs thermiques sévères. La plage de température indiquée par le fabricant (-180 °C à +1100 °C) permet une utilisation pour des incinérateurs et des chaudières, dans les bassins de rétention de produits inflammables, dans les cimenteries, les cokeries et dans l'industrie métallurgique en général (stockage de pièce chaudes, zones de fusion, d'oxycoupage).

Enfin, le dernier point concerne leur bonne résistance à l'abrasion et au poinçonnement. Cet aspect leur vaut une présence particulière dans les structures hydrauliques comme les barrages (principalement en Espagne : San Lorenzo 1928-1929, La Plana 1930, Flix 1941-1946, Balaguer 1954-1959 et Menuza 1958), les évacuateurs de crues, les déversoirs, les collecteurs et les écluses. Ils sont aussi utilisés en béton projeté dans certaines mines à des températures entre 35 °C et 45 °C [Scrivener (2003)]. En applications courantes, on retrouve également les planchers industriels pour les aires de déchargement et de transfert.

Aujourd'hui, le volume des ciments d'aluminates de calcium utilisé dans le monde représente environ 1/1000 de celui du ciment Portland. Leurs utilisations principales sont les ouvrages horizontaux et les réparations rapides, mais on retrouve tout de même quelques applications intéressantes telles que le métro souterrain parisien, certaines plates-formes pétrolières et plus récemment, le pas de tir de la fusée Ariane à Kourou. Dans tous ces cas, les CACs peuvent être utilisés comme liant principal ou encore en addition à d'autres mélanges cimentaires, ces derniers étant généralement pré-ensachés par des fournisseurs spécialisés.

2.1.3 Fabrication et composition des CACs

Comme leur nom l'indique, ces ciments contiennent une proportion importante d'alumines. Pour leur fabrication, on utilise principalement du calcaire, composé de carbonate de calcium (CaCO_3), et de la bauxite, qui contient beaucoup d'alumines. Il existe 2 procédés de fabrication : par fusion dans des fours réverbères pour les basses et moyennes teneurs en Al_2O_3 , et par frittage dans des fours rotatifs similaires à ceux utilisés pour la fabrication des ciments ordinaires (hautes teneurs en Al_2O_3).

La composition dépend de l'utilisation prévue, et le type de bauxite utilisée détermine les éléments mineurs présents. Deux catégories distinctes de CACs sont disponibles, ceux riches en fer (dits « noirs ») ou ceux à faible teneur en fer (dits « blancs »). Le ciment noir le plus célèbre est le Ciment Fondu. Sa fabrication se fait par fusion, et la bauxite rouge utilisée contient 20 % d'oxydes de fer, ce qui lui confère sa couleur gris-noir. Le Secar 51 est gris clair, tandis que le Secar 71 est blanc (figure 2.3).



Figure 2.3 – Secar 71, Secar 51 et Ciment Fondu

Le Ciment Fondu contient 36 à 42 % d' Al_2O_3 , à la différence des ciments Portland qui en contiennent 5 à 6 %. Pour le reste, c'est environ 40 % de chaux (CaO), 15 % d'oxydes ferreux/ferriques (Fe_2O_3) et entre 3 et 8 % de silice (SiO_2 , préférablement inférieur à 6 %). On tolère un faible pourcentage de TiO_2 (< 2 %). Aucun composé n'est ajouté au clinker comparativement aux ciments Portland où l'on ajoute du gypse lors du broyage. Pour obtenir certaines caractéristiques, la proportion d'alumine peut atteindre 80 %.

Le diagramme de composition en $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ (figure 2.4) permet de comparer les différents liants hydrauliques et pouzzolaniques.

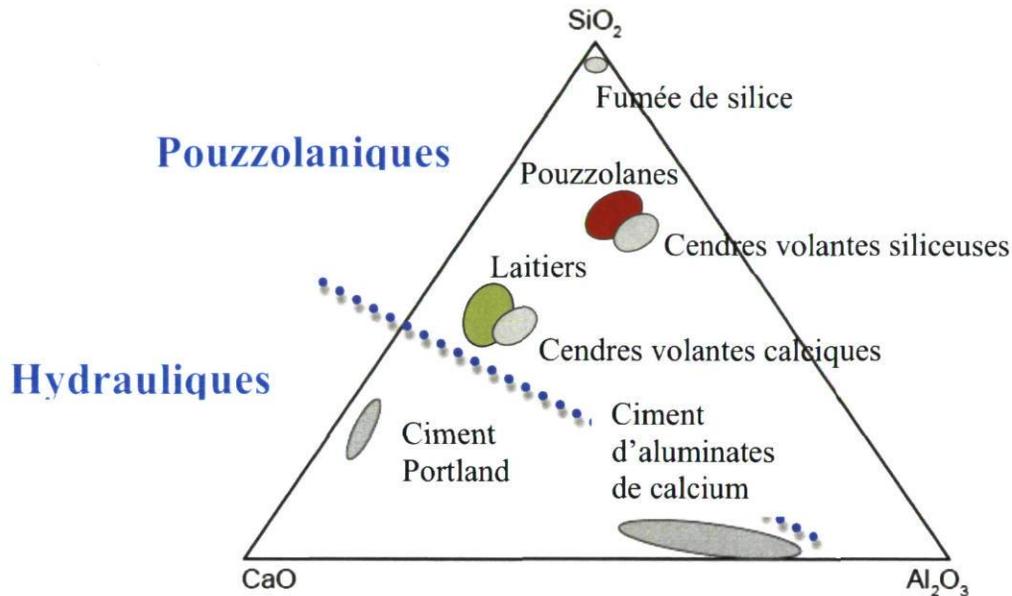


Figure 2.4 – Diagramme de composition en $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ [Scrivener (2003)]

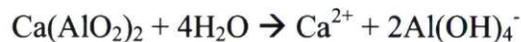
Les phases anhydres issues de ces matières premières et présentant les propriétés liantes sont les aluminates de calcium, principalement du **CA** ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, aluminat monocalcique ; 40 à 70 %), du **C₂AS** ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, gehlenite ; 20 à 25 %) et du **C₁₂A₇** ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, mayenite ; < 3 %). On trouve aussi une proportion négligeable de **C₂S**, et quelques composés mineurs comme les **C₄AF** ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, ferrite). Le Ciment Fondu est une combinaison de ces différentes phases. Les CACs ont une faible teneur en alcalins.

2.2 Comportement des CACs

2.2.1 Mécanisme d'hydratation des CACs

Le processus général d'hydratation est le même pour les CACs que pour tous les ciments hydrauliques, à savoir que le ciment et l'eau sont remplacés par des phases d'hydrates suivant un processus de dissolution/précipitation. Cependant, les produits des CACs et leur évolution sont chimiquement différents de ceux des phases de silicate de calcium trouvées dans les ciments Portland, car la phase anhydre des grains de ciment alumineux disparaît complètement pour entrer en solution. Ces ions formés peuvent alors être recombinaés en différentes proportions avec les ions présents dans la phase aqueuse. Dans le cas des ciments Portland, l'hydratation a lieu à la surface des particules et ces dernières sont progressivement consommées.

À partir du contact entre l'eau et un ciment alumineux, une dissolution rapide des aluminates de calcium survient. Cette étape est représentée sur la figure 2.5 (zone I). Elle a pour équation :



Cette dissolution augmente la concentration en ions Ca^{2+} et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ dans la solution, jusqu'au maximum correspondant à la solubilité limite, et menant donc à la saturation de la solution. La période d'induction (figure 2.5, zone II), durant laquelle les concentrations en ions restent élevées, survient ensuite. Comme l'expliquent Alt et al. (2001), la durée de cette période d'induction dépend de la constitution du ciment et en particulier de la teneur en C_{12}A_7 . Plus cette phase est présente, plus la période d'induction sera longue. Quelques phases amorphes peuvent s'y développer, mais le degré d'hydratation reste bas [Scrivener (2003)]. Cette étape consiste en un lent processus de nucléation (formation de germes).

La fin de la période d'induction conduit à une précipitation rapide, massive et homogène d'hydrates à partir des germes formés. Le début des réactions favorise la

dissolution de nouvelles phases anhydres. Une fois la prise débutée, c'est un processus cyclique de dissolution/précipitation qui se répète jusqu'à ce qu'une grande partie ou la totalité des grains anhydres exposés à la solution ait été consommés (zone III).

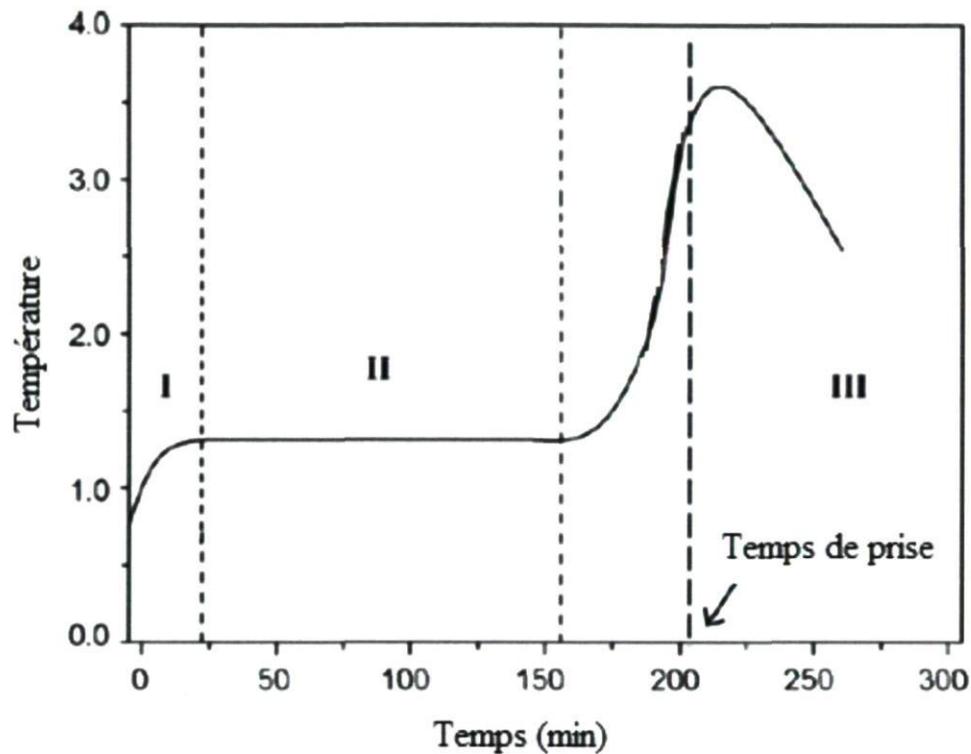


Figure 2.5 – Les différentes phases du processus d'hydratation
Zone I : Dissolution – Zone II : Induction – Zone III : Précipitation
 [Oliveira et al. (2008)]

Le processus d'hydratation des CACs est fortement influencé par la température atteinte par le béton lors de la prise. Les produits qui peuvent être formés sont les CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6 et du gel d'alumine AH_3 . Par ailleurs, la faible proportion de C_2S présente va former naturellement des C-S-H.

Si la température de la pâte reste en-dessous d'environ 30 °C, le principal hydrate formé est le CAH_{10} de forme hexagonale (éq. 1). Une légère quantité de C_2AH_8 peut tout de même exister [Edmonds et al. (1987)].



À de plus hautes températures (au dessus de 30 °C), le processus d'hydratation devient progressivement dominé par la formation de C_2AH_8 (éq. 2 et éq. 3), de forme hexagonale (figure 2.6). En effet, la nucléation des CAH_{10} devient difficile à partir de 27 °C et la précipitation des C_2AH_8 est ainsi favorisée [Gosselin (2009)]. Ces 2 hydrates (CAH_{10} et C_2AH_8) sont dits « métastables » ou instables. On constate également l'apparition d' AH_3 .

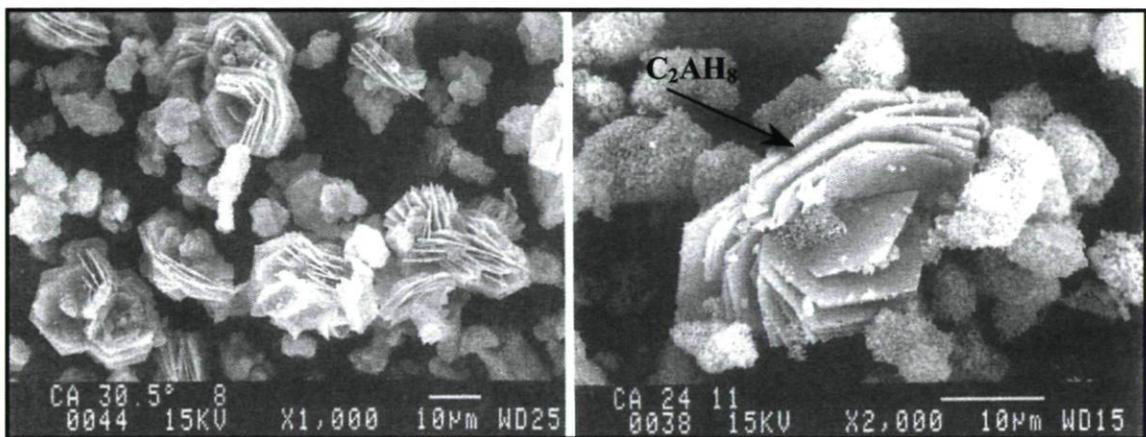
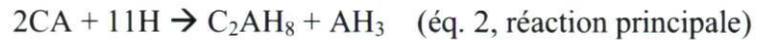
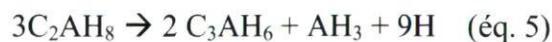
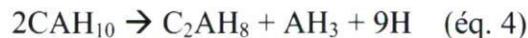


Figure 2.6 – Agrandissement MEB des hydrates C_2AH_8 [Sir Frederick Lea]

Finalement, si la pâte de ciment atteint des températures supérieures à 60 °C lors du durcissement, il se forme rapidement des C_3AH_6 (cubiques), dits hydrates « stables ». Ces derniers sont principalement issus de la transformation des phases métastables, qui se dissolvent pour re-précipiter en C_3AH_6 . Ce phénomène est appelé la **conversion**. Voici les réactions de conversion successives, pour lesquelles on remarque que chacune relâche de l'eau (éq. 4 et éq. 5).



Il est difficile de former directement les hydrates stables en raison de l'arrangement des ions qui nécessite beaucoup d'énergie (grande symétrie et structure cristalline complexe). C'est la raison pour laquelle les hydrates métastables sont essentiellement ceux

qui précipitent au début de l'hydratation (orientation plate ou en aiguilles). Il a été démontré que même à des températures très élevées lors de la prise (au-dessus de 90 °C), la phase stable C_3AH_6 est toujours précédée par la formation transitoire de C_2AH_8 et la conversion se produit alors en même temps que l'hydratation primaire. Mais, on peut tout de même observer à plus long terme la formation directe de C_3AH_6 depuis les CA, une fois que beaucoup de C_3AH_6 sont formés (éq. 6).



La microstructure des bétons CACs tend toujours vers une constitution finale stable, et la conversion est inévitable. Les phases métastables sont donc temporaires et destinées à se transformer. Les paramètres influençant et initiant la formation des C_3AH_6 sont la température, mais aussi la présence d'eau libre. En effet, la conversion ne surviendra jamais dans un environnement sec. Toutefois, in situ, il y a pratiquement toujours de l'humidité. Dans le cas d'un béton « métastable » après durcissement, plus les températures d'exposition sont élevées, plus la conversion est rapide. Immersé dans de l'eau à 50 °C, elle surviendra en quelques jours, tandis qu'il lui faudra des dizaines d'années dans certaines conditions à 15 °C. La figure 2.7 montre le temps nécessaire pour achever la conversion en fonction de la température d'exposition du béton.

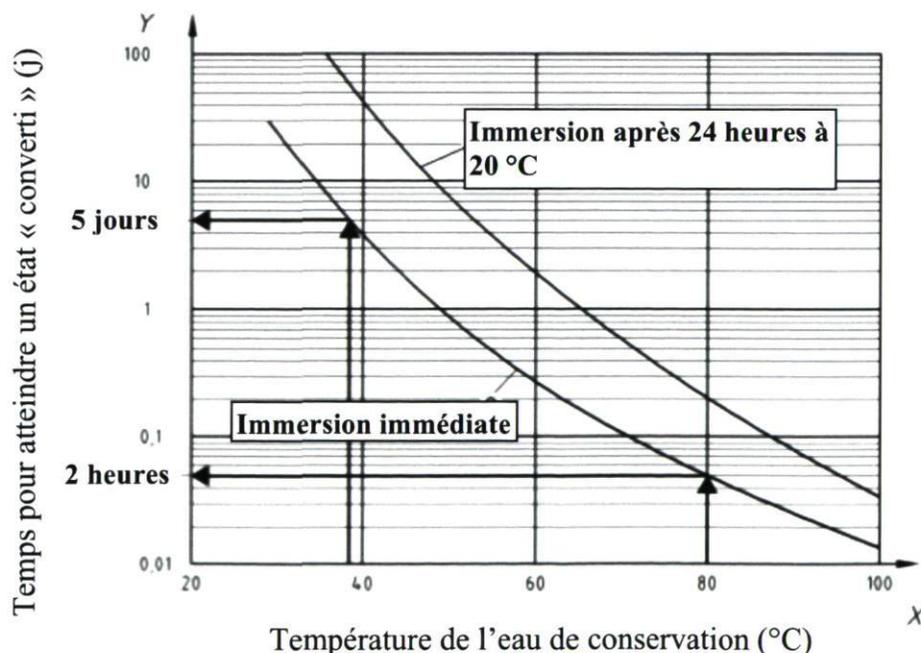


Figure 2.7 – Influence de la température sur le temps de conversion [tiré de la norme française EN 14647 (2006)]

Enfin, malgré le changement de phases dans le béton durci, il n'y a aucun retrait associé à la conversion puisqu'il s'agit d'un processus de dissolution/précipitation ponctuel. Les différents états d'hydratation évoqués précédemment sont récapitulés et schématisés sur la figure 2.8. Ces derniers sont associés à la température approximative nécessaire à leur apparition.

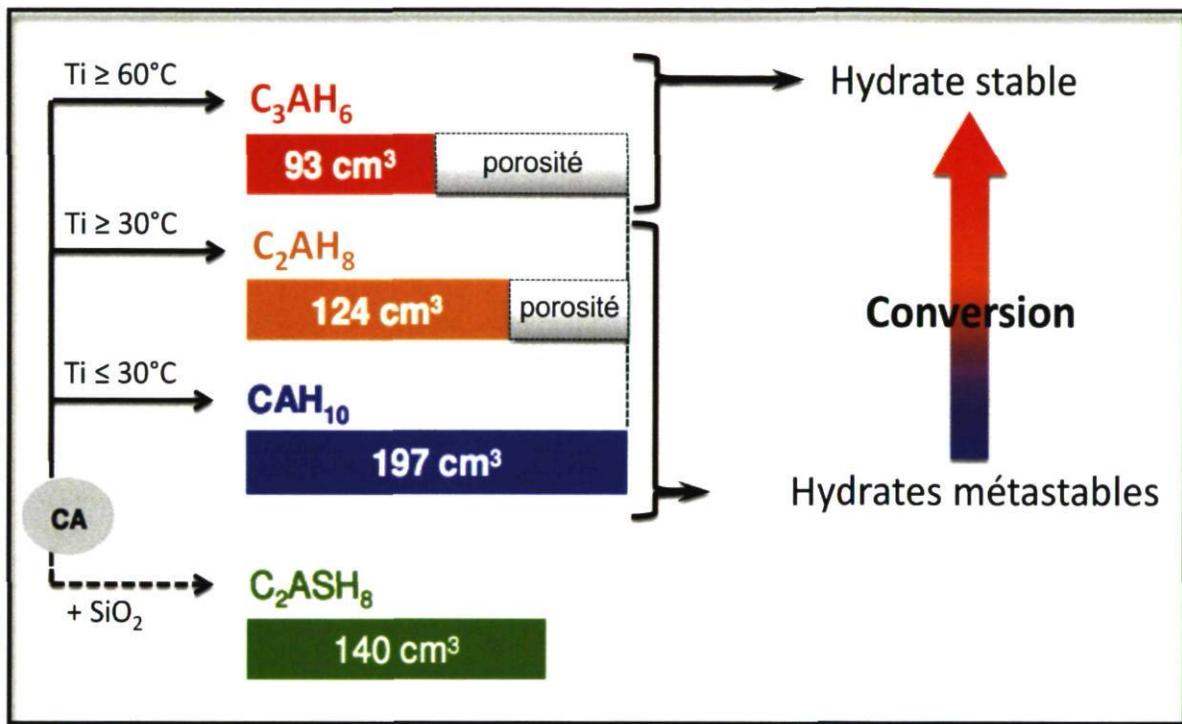


Figure 2.8 – Apparition des différents hydrates en fonction de la température atteinte lors de la prise

L'information importante sur ce schéma est le volume occupé par les différents hydrates. Lorsqu'un béton constitué au départ en majorité de CAH_{10} subit la conversion, le volume occupé par la phase solide par mole de CA passe de 197 cm^3 à 93 cm^3 (hydrates stables plus denses), laissant des vides et créant ainsi de la porosité.

Pour illustrer la formation des hydrates lors du durcissement initial, le graphique suivant (figure 2.9) montre un historique de température typique d'un CACs atteignant 80°C lors de l'hydratation initiale.

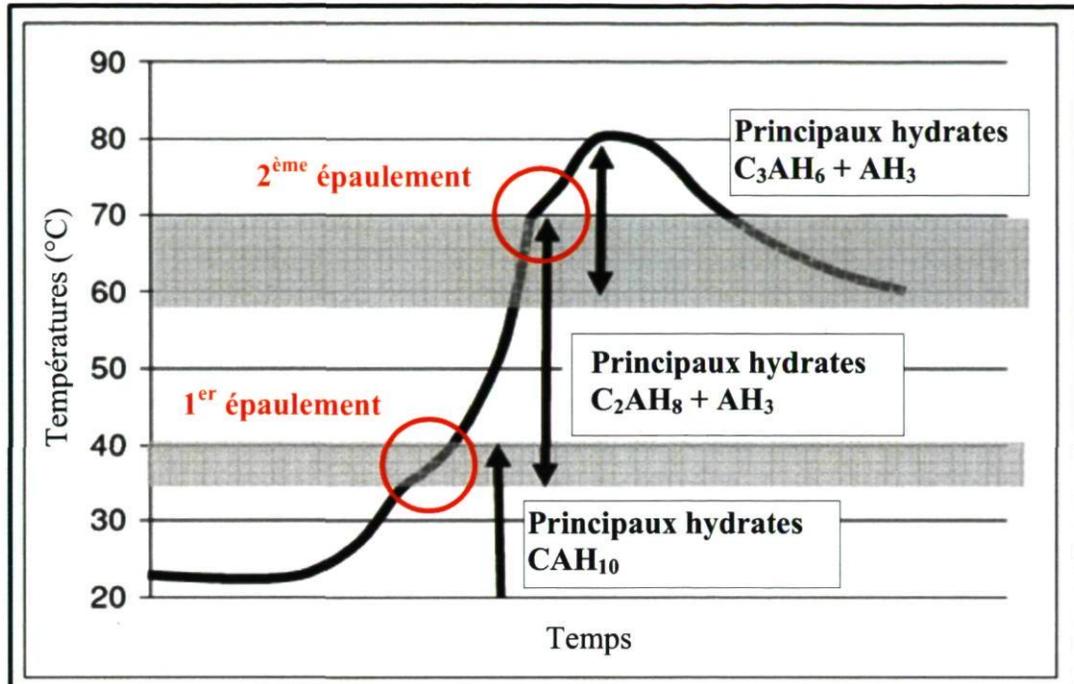


Figure 2.9 – Historique d'hydratation d'un CACs [Fryda, Charpentier et al. (2008)]

En premier lieu, il se forme des CAH₁₀. Lorsque le système atteint 35-40 °C, la conversion de ces derniers en C₂AH₈ libère de l'eau et permet une accélération de l'hydratation traduite par un premier épaulement de température. Parallèlement, dans cette plage de température, l'hydratation continue avec la formation directe de C₂AH₈ depuis les aluminates de calcium. Au-delà de 60 °C apparaît un deuxième épaulement lié au passage des hydrates « métastables » en C₃AH₆. Ensuite, l'hydratation se trouve ralentie par le manque d'eau et/ou de phases anhydres.

Des analyses DRX (Diffraction Rayon-X) et ATD (Analyse Thermique Différentielle) ont été effectuées sur des mortiers par Alt et al. (2001) afin de mettre en évidence la présence des différentes phases d'hydrates pendant les stades de durcissement (figure 2.10). On y voit la température atteinte par le béton en fonction du temps, ainsi que la phase d'hydrates prédominante. Le ciment utilisé contenait 70 % d'Al₂O₃ et était principalement composé de CA et de CA₂. Les résultats confirment la théorie. Entre 40 °C et 60 °C, la phase prédominante est le C₂AH₈. Les C₃AH₆ apparaissent lorsque le système dépasse 70 °C.

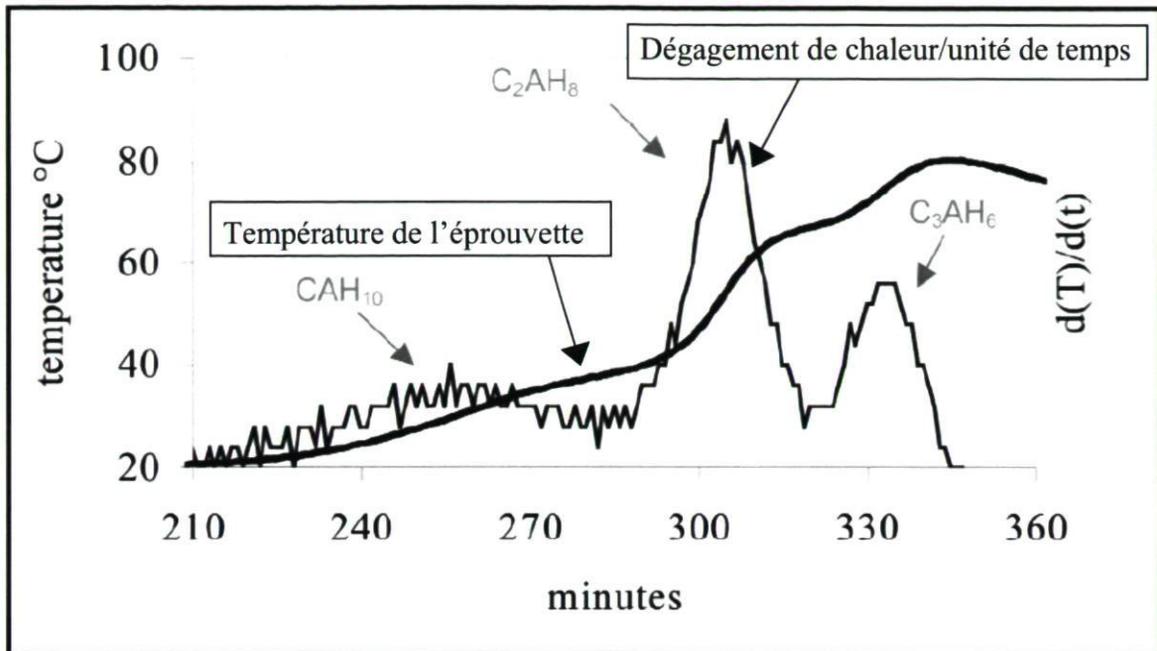


Figure 2.10 – Analyses des hydrates à différents stades de la prise [Alt et al. (2001)]

2.2.2 Propriétés mécaniques des CACs

Dans les CACs, le remplacement rapide des espaces occupés par l'eau lors de l'hydratation conduit à de hautes résistances en compression au jeune âge. La plus importante partie des résistances est amenée par l'hydratation des aluminates de calcium CA et C₁₂A₇ qui vont être recombinaés, tel qu'expliqué précédemment, sous différentes formes. Certaines de ces phases sont temporaires et leur conversion en produits stables surviendra à une échéance qui est fonction des températures.

La densité des CAH₁₀ est de 1,72 comparativement à 2,53 pour le C₃AH₆. À cause de cette différence entre les hydrates métastables et stables, la conversion est accompagnée d'une réduction du volume des phases solides et crée ainsi de la porosité (voir figure 2.8). Ce phénomène conduit à une diminution des résistances mécaniques du béton. La conversion des CAH₁₀ en C₃AH₆ peut aller jusqu'à réduire le volume des hydrates de moitié. Cette diminution est plus faible lorsque les hydrates métastables sont les C₂AH₈.

Les travaux de French et al. (1971) repris par Fryda, Charpentier et al. (2008), illustrent parfaitement ces phénomènes par des courbes très claires (figure 2.11).

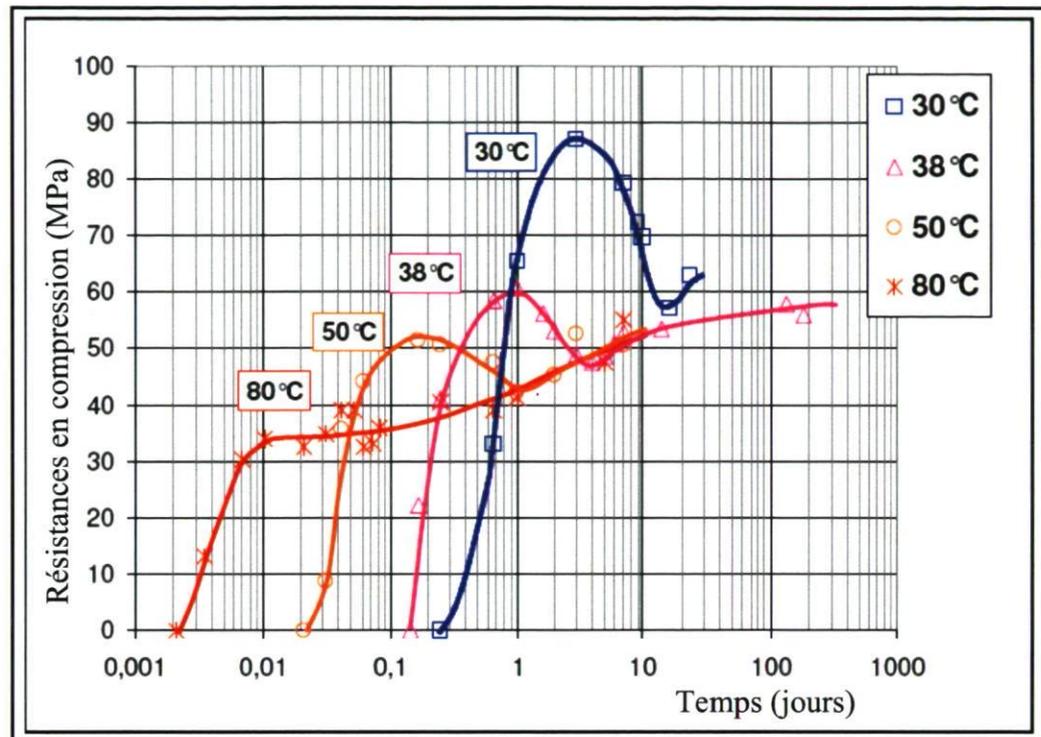


Figure 2.11 – Évolution des résistances en compression en fonction de 4 températures de cure (E/C = 0,40 cubes de 100 mm) [Fryda, Charpentier et al. (2008)]

La température indiquée représente la cure subie par le béton. Comme pour tout type de ciment, plus la température est élevée, plus les résistances apparaissent rapidement. On constate toutefois différentes résistances initiales selon le régime de température. À 30 °C, on atteint 88 MPa à 3 jours en raison du volume important occupé par les hydrates initialement formés à cette température (CAH_{10}). À 38 °C, la valeur maximale est de l'ordre de 60 MPa (1 jour), car l'hydratation est majoritairement C_2AH_8 entre 30 °C et 60 °C (voir figure 2.8). Au même stade (24 heures), on atteint 42 MPa à 80 °C, résultat de la conversion et d'un béton constitué principalement de C_3AH_6 (plus dense), et donc d'une microstructure plus poreuse.

La conversion est mise en évidence par les chutes de résistances observées pour les cures à 50, 38 et 30 °C. Plus la température est élevée, plus la conversion survient

rapidement. Lorsque de hautes températures sont atteintes initialement (cure à 80 °C), l'énergie apportée au système est suffisante pour que des hydrates stables se forment rapidement, et la conversion se produit alors pendant le durcissement. On ne constate ainsi aucune diminution de résistance. Il est intéressant de voir qu'après la conversion, toutes les courbes d'évolution des résistances se rejoignent à long terme.

Fryda, Lamberet et al. (2008) présentent les résistances en compression de béton « convertis » et « non-convertis » pour différents rapports E/C (figure 2.12). Les bétons « convertis » sont moins résistants.

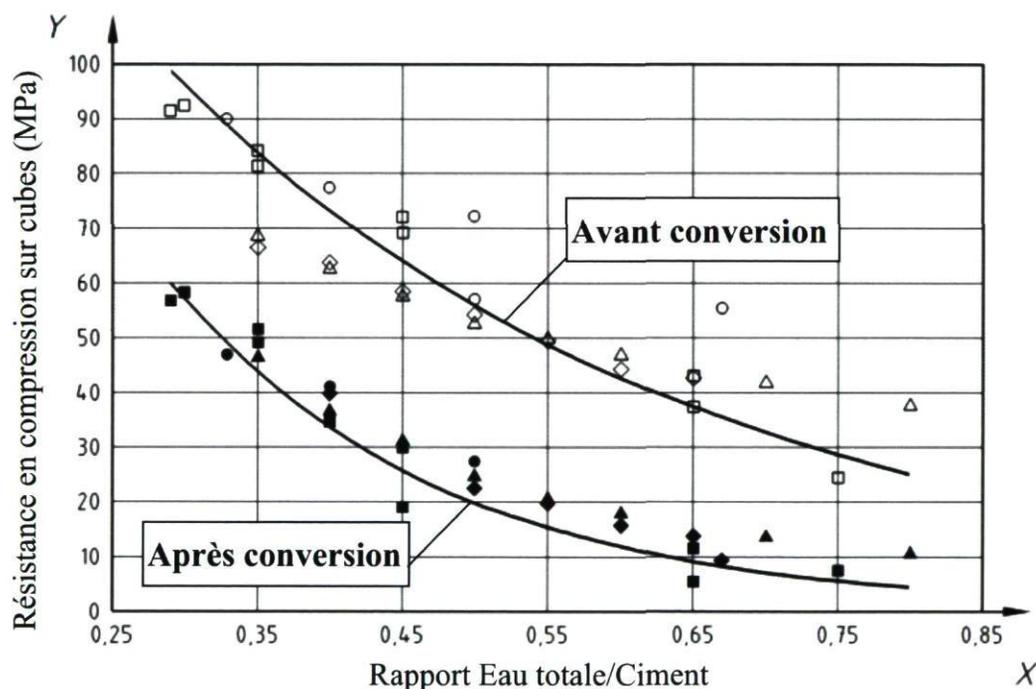


Figure 2.12 – Résistances avant et après conversion pour différents ratios E/C [tiré de la norme française EN 14647 (2006)]

La quantité d'eau nécessaire pour hydrater à 100 % un ciment alumineux est relativement importante par rapport au ciment Portland. Elle s'approche d'un ratio E/C de 0,50. Il est courant que la première étape de l'hydratation laisse des aluminates de calcium anhydres dans la matrice. Plus tard, l'eau libérée par la conversion va réagir avec ces CA

pour former des hydrates stables additionnels, atténuant la diminution des résistances mécaniques et l'augmentation de la porosité.

Dans la première partie, la bonne durabilité des CACs face aux sulfates a été soulignée, dont les principales raisons sont l'absence quasi totale de portlandite et de C_3A , limitant ainsi la formation de gypse et d'étringite. Le bon comportement des CACs face aux agressions chimiques de toute sorte est également attribué à une couche plus dense à la surface du béton, qui limiterait la pénétration des agents agressifs. Certains chercheurs rapportent une porosité mesurée en surface de 2 à 4 % tandis qu'au cœur, les porosités atteignent plus de 17 %, typiques d'un béton « converti » à un haut ratio E/C. Dunster et al. (1997) ont mesuré la perméabilité à l'oxygène de plusieurs CACs prélevés sur des structures en service. Pour des bétons âgés de 60 ans ($E/C = 0,60$), la perméabilité mesurée à l'intérieur était jusqu'à 200 fois plus élevée que celle mesurée sur les 50 premiers millimètres.

La présence de cette couche dense en surface n'est pas très bien expliquée. Plusieurs analyses ont montré la présence des hydrates métastables CAH_{10} et de la phase amorphe AH_3 (gel) en surface. Cela peut être dû à la déshydratation du béton en surface pendant la première phase de l'hydratation, ce qui est défavorable à l'éventuelle conversion des phases métastables. De plus, lors d'un hypothétique apport d'eau par la suite, on aurait une réaction tardive du ciment anhydre qui formerait des hydrates additionnels, et réduirait ainsi la porosité du béton. Cette couche moins poreuse en surface limiterait l'infiltration des éléments chimiques. Les CAH_{10} présents, en plus de ne pas réagir avec les sulfates, semblent aussi empêcher le phénomène de pénétration grâce à leur forme hexagonale.

Il est cependant possible que face à certaines agressions chimiques, la conversion soit défavorable à la durabilité du matériau, seulement ce comportement est très peu documenté. Bates (1984) a montré que les CACs présentent une bonne durabilité dans un environnement sulfaté seulement si le béton n'a pas été exposé à de grandes températures, ce qui confirme les bienfaits de la présence d'hydrates métastables en surface pour la durabilité de l'ouvrage.

2.2.3 Influence des laitiers sur les ciments alumineux

Il a été prouvé à de nombreuses reprises que l'ajout de fumée de silice ou de laitier à un ciment d'aluminates de calcium provoque la formation d'un nouvel hydrate nommé la stratlingite (C_2ASH_8). Ce composé se présente comme des cristaux lamellaires hexagonaux et se forme par décomposition des phases métastables des CACs (éq. 7, 8 et 9).



Formée par conversion au détriment des C_3AH_6 , la stratlingite diminue la création de porosité associée aux changements de phases en raison de sa plus faible densité (1,90 comparativement à 2,53 pour les C_3AH_6). Ceci conduit les bétons CACs à de plus hautes résistances mécaniques après conversion.

Heikal et al. (2004) ont mis en évidence l'effet bénéfique du laitier mélangé à un ciment alumineux (figure 2.13).

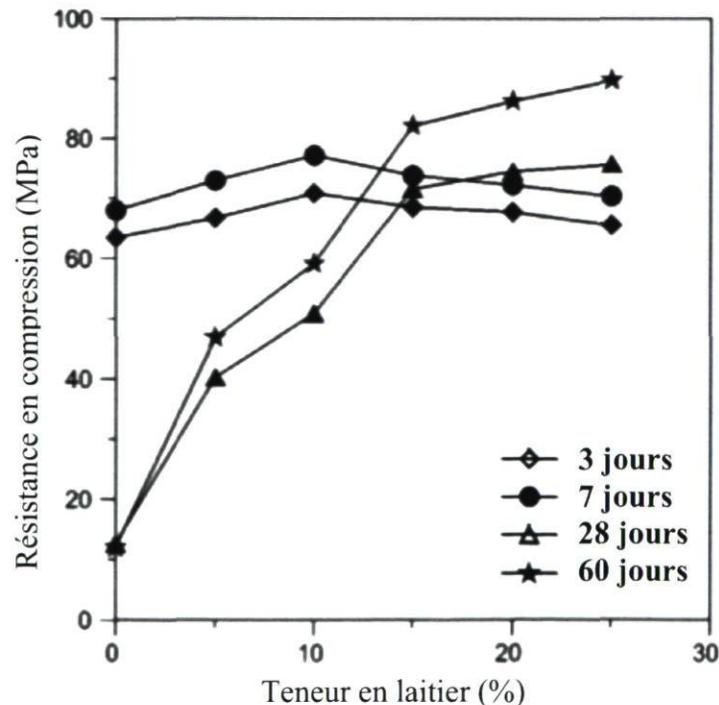


Figure 2.13 – Rc de mélanges immergés à 40 °C (après un durcissement de 24 h à 20 °C/100 % H.R.) en fonction de la teneur en laitier [tiré de Heikal et al. (2004)].

Les résultats obtenus ont montré, pour les matériaux considérés, que 15 % de laitier suffisait pour supprimer les diminutions de résistances normalement constatées lors de la conversion. On remarque en effet que les résistances à un jour ne sont pratiquement pas modifiées avec l'augmentation de la teneur en laitier et que les effets positifs de ce dernier ne se font sentir de façon significative qu'après immersion pendant 28 jours à 40 °C. Ceci confirme que la formation de C_2ASH_8 se produit principalement lors de la conversion, et vient atténuer les diminutions de résistances qui y sont associées. À 60 jours, le béton contenant 15 % de laitier présentait une résistance de 83 MPa contre 11 MPa pour le béton de Ciment Fondu sans laitier.

Afin de confirmer ces effets macroscopiques, des mesures parallèles de porosité et d'attaque par les sulfates ont montré que plus la teneur en laitier était élevée, plus le béton était dense (moins poreux).

Certaines autres études ont montré que les mélanges CAC/laitier pouvaient présenter des augmentations de résistance à très long terme. On sait que le laitier est une phase réactive très lente et que son hydratation peut se poursuivre sur de longues périodes lorsque de l'eau est disponible. Majumdar et al. (1992) ont en effet montré que pour un ciment à haute teneur en alumine (HTA) mélangé à une quantité équivalente de laitier (50/50), des augmentations de résistances sont observées jusqu'à 5 ans en condition immergée (figure 2.14). À cette échéance, des analyses parallèles ont identifié une grande quantité de stratlingite (C_2ASH_8), apparaissant même comme le produit d'hydratation prédominant. En comparaison, l'hydratation des ciments alumineux semble stoppée à 180 jours en l'absence de laitier.

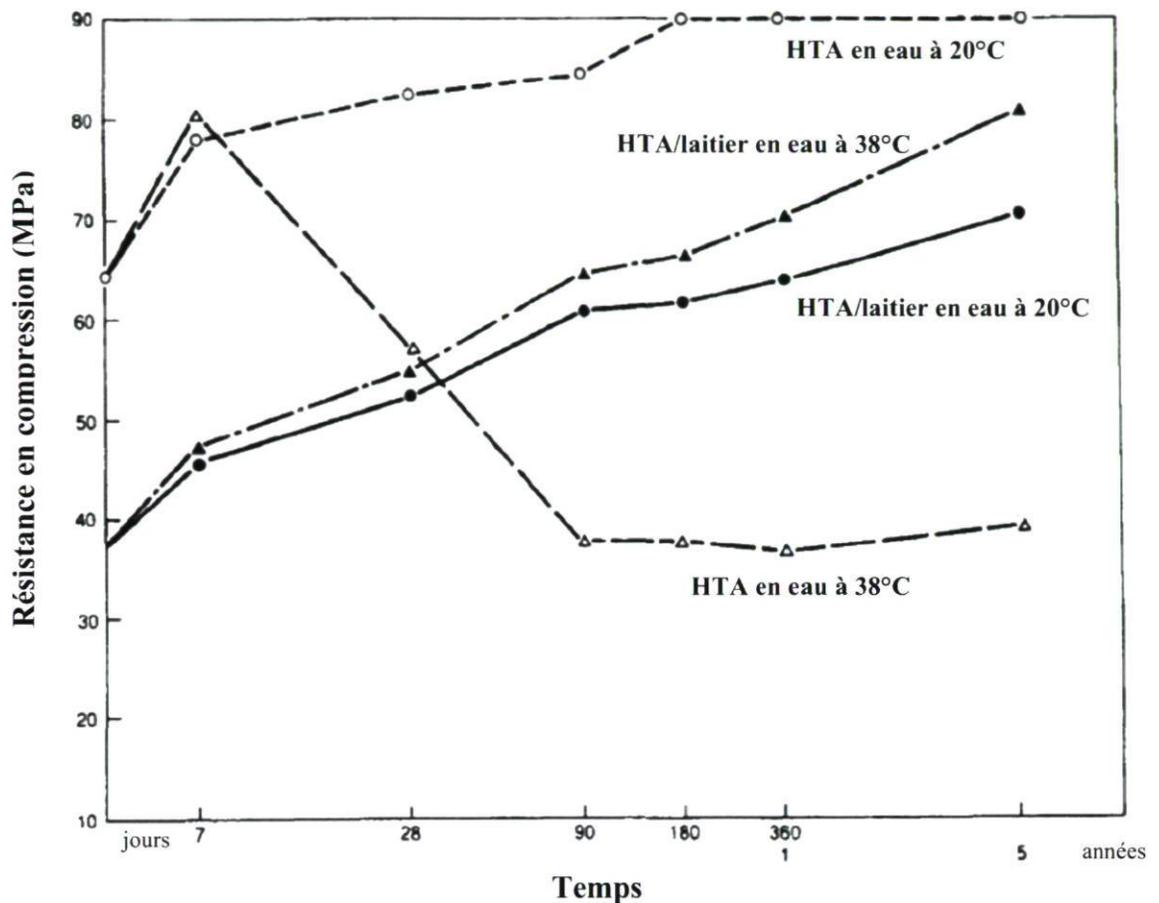


Figure 2.14 – Résistances en compression de mélange HTA/laitier (cubes de 100×100 mm et E/C = 0,45) en fonction du temps [Majumdar et al. (1992)]

Ainsi, en plus de l'aspect bénéfique de la formation de stratlingite sur la porosité (par rapport à un béton « stable » constitué uniquement de C_3AH_6), la poursuite de sa nucléation à long terme aurait également un effet positif sur les résistances mécaniques.

Quoi qu'il en soit, Heikal et al. (2004) ont constaté que pour des températures de cure de 60 °C, les résistances de ciments alumineux mélangés à des laitiers sont considérablement réduites. Sir Frederick Lea (Lea's 2004) a également observé ce phénomène pour des températures de cure supérieures à 40 °C (figure 2.15). Il semblerait que de hautes températures prolongées aient un effet néfaste sur la stratlingite, et la rendent instable.

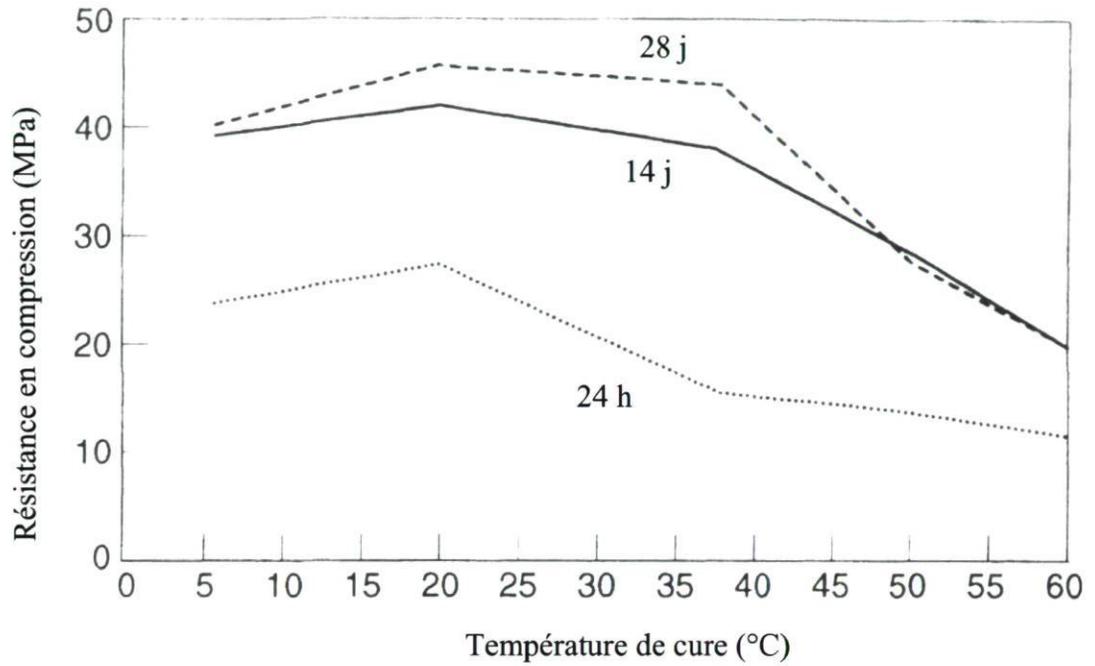
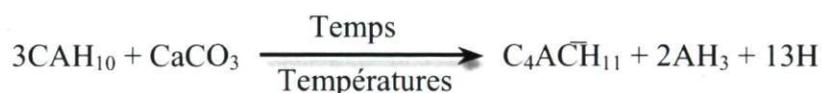


Figure 2.15 – Résistances en compression pour un mélange Ciment Fondu/laitier muri à différentes températures [Sir Frederick Lea (Lea's 2004)]

2.2.4 Influence du type de granulats

Il est mis en évidence dans la littérature un développement particulier des résistances en compression des ciments alumineux en présence de granulats calcaires, lié à la formation d'un nouveau composé en présence de calcite (CaCO_3), nommé mono-carbo-aluminates ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CO}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$).

Ce produit apparaît dans une zone de quelques dizaines de microns d'épaisseur autour des granulats suite à la réaction entre les hydrates CAH_{10} , C_2AH_8 et les ions carbonates.



Beaucoup plus stable, les mono-carbo-aluminates se présentent comme une nouvelle phase intermédiaire à la formation des C_3AH_6 , ralentissant ainsi leur formation et implicitement la création de porosité et les chutes de résistances qui y sont associées.

Plusieurs études concluent que la présence de granulats d'origine calcaire limite ou prévient les chutes de résistance normalement observées au moment où le béton est supposé se convertir. Ollivier et al. (1984) mentionnent que la formation de mono-carbo-aluminates retarde vraisemblablement la formation des C_3AH_6 , et diminue la quantité de C_2AH_8 présente. Cet hydrate réagit en effet rapidement avec les ions carbonates (provenant de la dissolution de la calcite) pour former des $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$.

Kuzel et al. (1996) ont étudié des mélanges cimentaires comportant 80 % de ciment alumineux (Secar 71 et Ciment Fondu) combinés à 20 % de CaCO_3 . Même lorsque le béton durcit et munit à 25 °C, on constate dans les 2 cas la présence majoritaire de $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$ et une faible quantité de CAH_{10} . Fentiman et al. (1985) ont également montré que la présence de filler calcaire dans du Ciment Fondu entraîne la formation de mono-carbo-aluminates. Des analyses d'hydrates ont été faites sur des pâtes d'un ciment contenant 70 % de Ciment Fondu et 30 % de filler calcaire (carbonate de calcium) et nommé par les auteurs « ciment carbo-alumineux » (figure 2.16). Il y a apparition de $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$ à des températures de cure

entre 25 et 60 °C. Entre 30 et 50 °C, les $C_4\overline{A}CH_{11}$ constituent même la principale phase formée, au détriment des C_2AH_8 . Les hydrates stables C_3AH_6 commencent à apparaître à des températures plus élevées que dans le Ciment Fondu seul (figure 2.17), ce qui semble confirmer que la formation de $C_4\overline{A}CH_{11}$ retarde la conversion en C_3AH_6 , mais ne l'empêche pas.

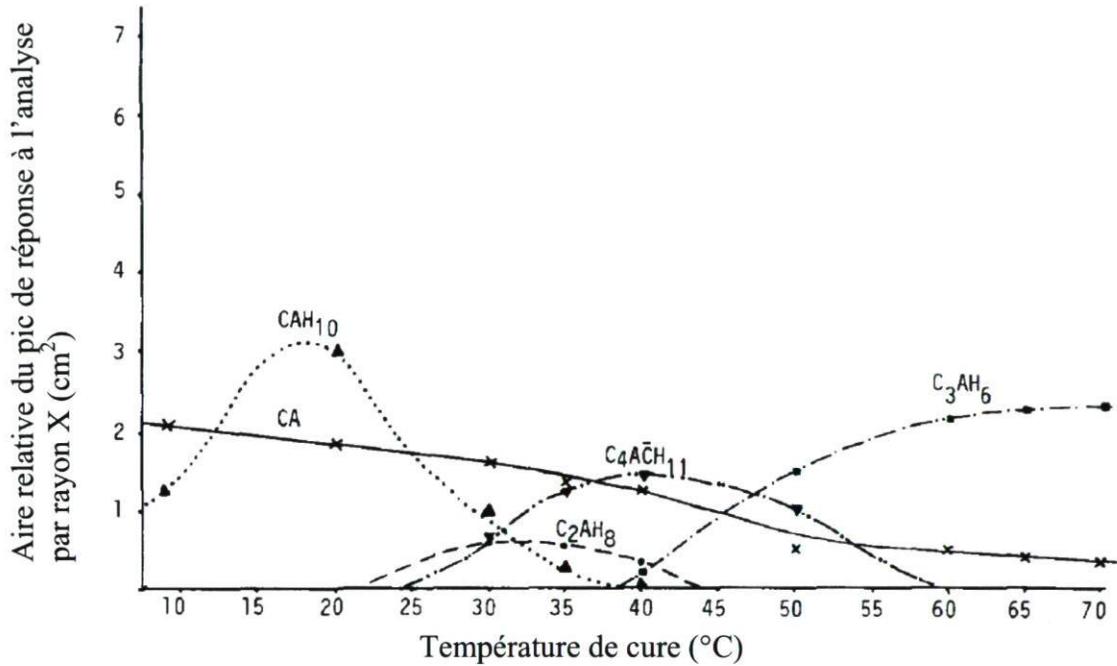


Figure 2.16 – Phases présentes dans la pâte de Ciment « carbo-alumineux » à 24 h pour différentes températures de murissement [Fentiman et al (1985)]

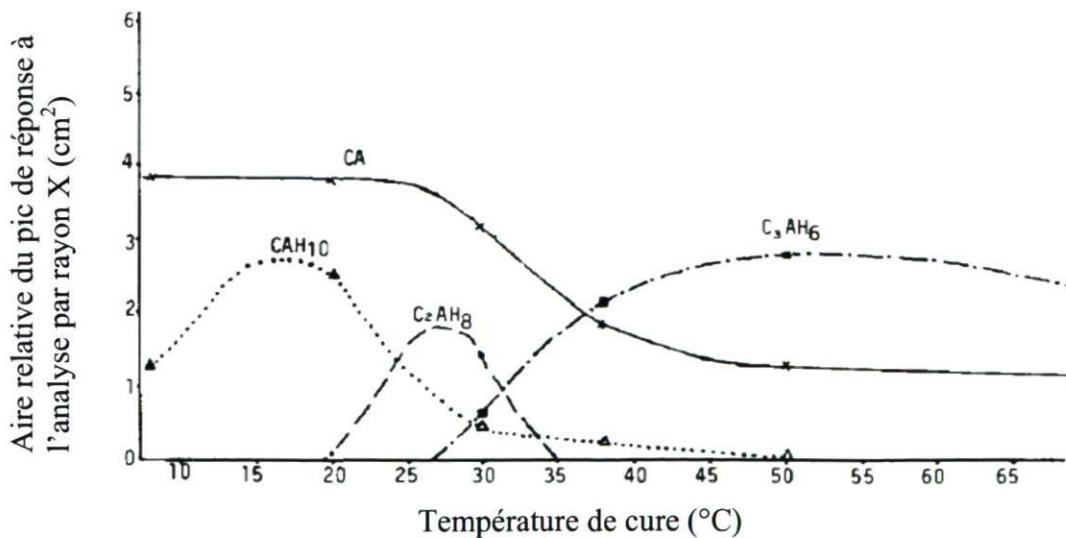


Figure 2.17 – Phases présentes dans la pâte de Ciment Fondu à 24 h pour différentes températures de murissement [Fentiman et al. (1985)]

Les effets de ce nouveau composé sur les résistances en compression du béton sont également étudiés dans l'article de Fentiman (1985) par l'intermédiaire de la quantité de carbonate de calcium dans le mélange (figure 2.18).

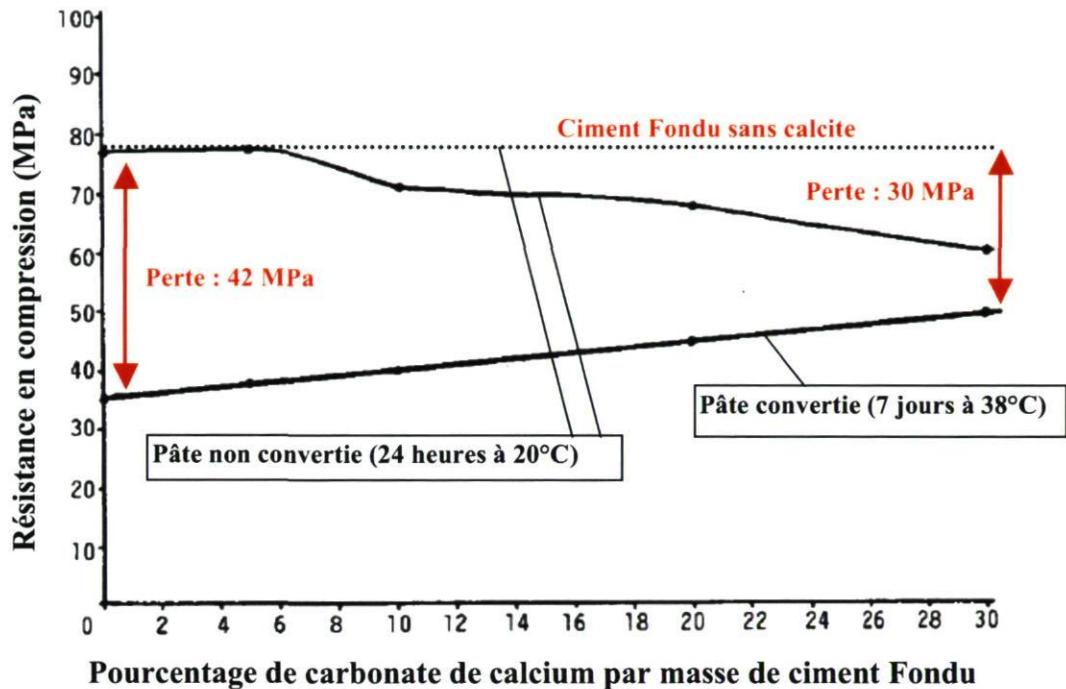


Figure 2.18 – Effet de l'augmentation du carbonate de calcium sur les résistances en compression [Fentiman et al. (1985)]

Plus le pourcentage de carbonate de calcium est élevé, plus la différence de résistance entre la pâte non convertie et celle convertie est faible (voir les effets de la conversion sur la figure 2.18). Avec l'augmentation de la quantité de filler, les éprouvettes non converties sont de moins en moins résistantes, simplement par réduction du nombre de CA dans le mélange. Quant aux éprouvettes converties, ils forment préférentiellement des C_4ACH_{11} (densité : 2,17) à la place des C_3AH_6 (densité : 2,52), entraînant alors une plus faible porosité et donc, des résistances mécaniques supérieures.

D'autres éprouvettes « carbo-alumineuses » non converties ont subi jusqu'à 6 mois une cure en immersion à 38 °C (figure 2.19). Comme présumé et contrairement aux ciments alumineux seuls, le ciment « carbo-alumineux » ne présentent pas de chute de

résistance à court terme. Des analyses d'hydrates ont montré que dans ce dernier cas, la conversion des CAH_{10} est également beaucoup plus lente.

En revanche, les résistances en compression de ces 2 liants se rejoignent après 6 mois de cure. La raison des chutes de résistances observées à long terme pour le ciment carbo-alumineux est attribuée à la décomposition des mono-carbo-aluminates ($C_4A\bar{C}H_{11}$). En effet, ces derniers deviennent instables dans certaines conditions et de nombreuses études mettent en évidence leur décomposition à des températures au-dessus de 60 °C. Fentiman (1985) ont montré qu'à de hautes températures, la conversion en C_3AH_6 survenait quand même. Kuzel et al. (1996) ont également mis en évidence la décomposition des $C_4A\bar{C}H_{11}$ accompagnée de l'augmentation de la phase C_3AH_6 pour des températures au-dessus de 90 °C.

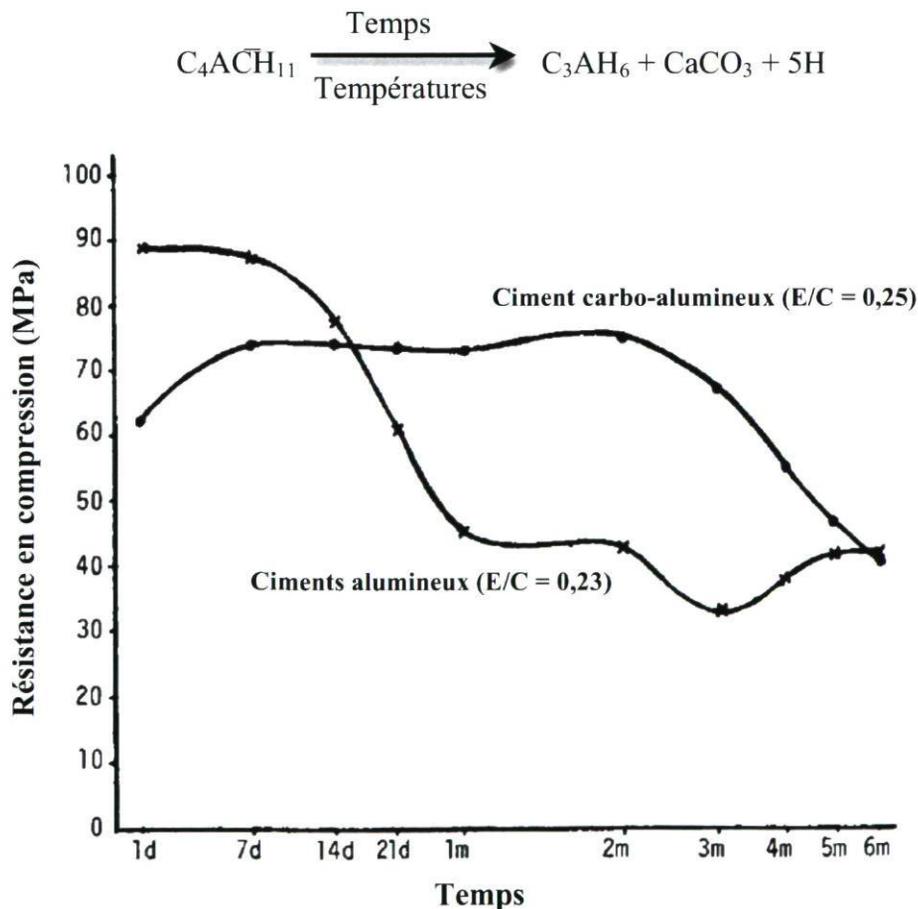


Figure 2.19 – Résistances en compression de bétons mûris à 38 °C après avoir été conservés à 20 °C pendant les premières 24 heures

2.3 État de l'art

Lors de la mise en place d'un béton, le contrôle de la qualité impose un suivi du matériau afin de s'assurer de la bonne tenue de l'ouvrage futur. Dans la plupart des cas, c'est l'essai de compression qui est ciblé et la procédure courante sur un chantier est de mettre le béton dans les moules disponibles, et de le laisser durcir. Les éprouvettes sont ensuite transportés après 24 heures vers un laboratoire afin d'être muris et testés. C'est le cas pour les ciments Portland. Pour les CACs, un test d'évaluation de la résistance en compression est précisé dans la norme française EN 14647 (2006, Annexe A1). Il y est stipulé de réaliser une immersion immédiate du béton frais dans l'eau à 38 °C. La mesure de la résistance en compression est faite après 5 jours de ce traitement. Les éprouvettes sont démoulées à 24 heures et le béton doit être remplacé en cure le plus vite possible pour éviter d'être refroidi.

D'un point de vue phénoménologique, un tel apport initial en énergie mène à de faibles résistances mécaniques, contrairement à ce qui est observé dans certains ouvrages exposés à basses températures durant leur durcissement (voir section 2.2.2). De plus, des températures en service au-dessus de 38 °C pendant de longues périodes sont rares. Il est ainsi probable que le béton en utilisation ne subisse jamais ou très lentement leur conversion et reste donc toute sa vie plus résistant que la valeur obtenue par ce test.

Cette procédure d'évaluation présente toutefois quelques inconvénients. Tout d'abord, elle est peu pratique, car elle nécessite de s'équiper sur site du matériel de chauffage particulier pour maintenir l'eau à 38 °C, et d'éventuels moules étanches en vue d'une immersion complète.

Par ailleurs, si l'accélération du passage à un état stable par augmentation de la température permet de donner une réponse rapide, on doit garder à l'esprit que les résistances mécaniques dépendent non seulement de la température, mais aussi de la composition du béton. Par exemple, il est connu que les granulats calcaires réagissent avec les CACs pour former des mono-carbo-aluminates. Cette réaction peut modifier la

cinétique de conversion, et conduire des bétons convertis à de plus hautes résistances à court terme, même dans le cas d'une immersion immédiate à 38 °C.

Il y a aussi la question de robustesse méthodologique. Il a été démontré que l'hydratation des CACs est très sensible à la température. Une différence de 1 °C ou 2 °C peut avoir une influence sensible sur les résistances mécaniques mesurées. Plusieurs types de moules existent en chantier, de différentes dimensions et matériaux (acier, plastique). Il est mentionné dans la norme française EN 14647 (2006) d'utiliser de préférence des moules en métal de dimension adaptée, mais rien n'est formellement obligatoire. On sait que pour des conditions environnementales identiques, des moules différents peuvent conduire à d'importants écarts thermiques d'auto échauffements (figure 2.20) et, par conséquent, à des évolutions de résistance très différentes. Même sous immersion immédiate à 38 °C, les différentes conditions de moulage du béton (conductivité thermique) peuvent modifier l'hydratation initiale et, dans certains cas, avoir une influence significative sur la résistance en compression évaluée à 5 jours.

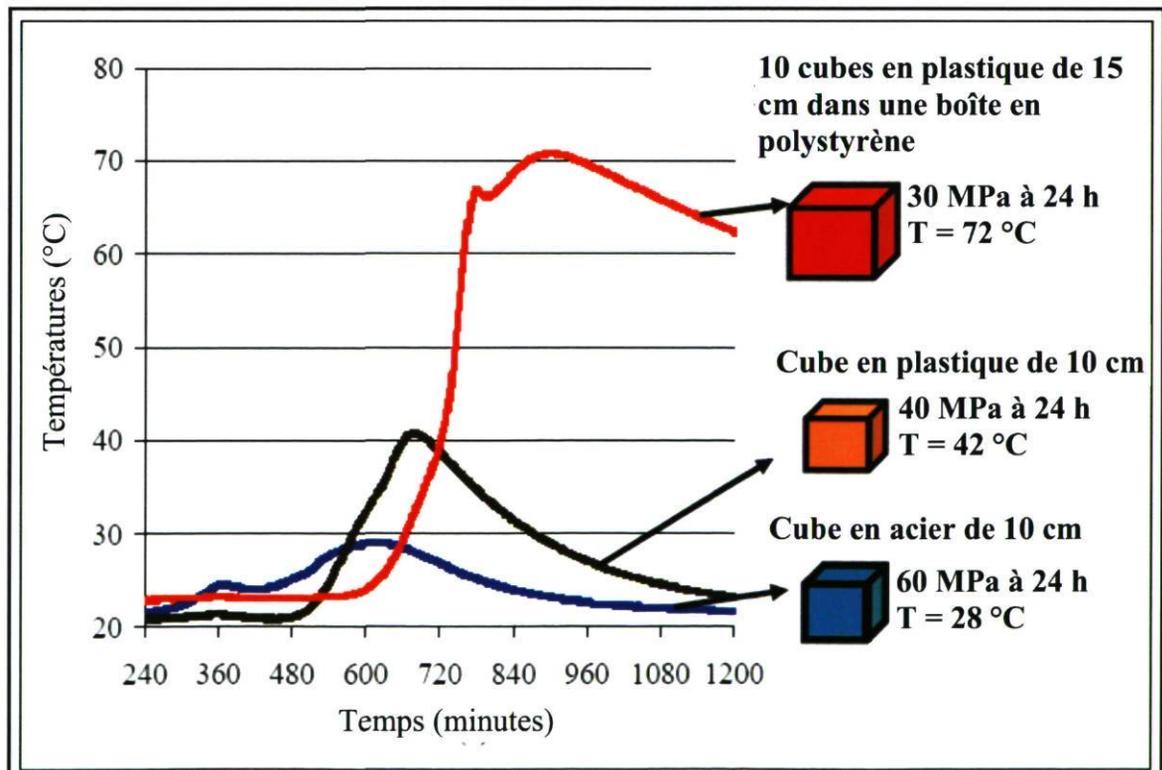


Figure 2.20 – Températures atteintes par différents types de moules
[Fryda, Charpentier et al. (2008)]

Le type de murissement joue aussi un rôle important sur la résistance obtenue. Il a été démontré qu'au lieu d'une immersion immédiate à 38 °C, si le béton est mûri à 20 °C pendant 24 heures et ensuite immergé à 38 °C, la résistance minimum peut être atteinte non pas à 5 jours, mais seulement à 3 mois [Fryda, Charpentier et al. (2008)].

Tous les points précédents démontrent que la procédure d'évaluation actuelle des CACs est très délicate et nécessite une précision méthodologique qui n'est pas forcément présente sur un chantier. Une conversion accélérée est nécessaire pour évaluer rapidement les propriétés mécaniques minimum. Mais il est aussi nécessaire de trouver un essai moins contraignant en chantier, et surtout plus robuste afin d'optimiser l'utilisation des ciments alumineux.

Chapitre 3 – Matériel et Méthodes

3.1 Introduction

Il a été vu dans le chapitre précédent que l'hydratation des CACs est fortement dépendante de la température atteinte par le béton lors de son durcissement. Selon le cas, la composition du béton durci à la suite de l'hydratation initiale peut être très différente. Dans le cas d'un auto échauffement faible ou modéré, le béton se retrouve constitué principalement d'hydrates métastables CAH_{10} ou C_2AH_8 . Au contraire, pour des ouvrages massifs qui vont atteindre des températures très élevées, les C_3AH_6 stables sont présents en majorité. Ces états opposés engendrent différentes résistances en compression de l'élément durci, avec des valeurs pouvant varier du simple au double pour un béton issu de la même gâchée. Dans le but de trouver une procédure d'essai permettant de prédire et de quantifier la résistance en compression du béton, il faut donc impérativement considérer ce phénomène.

Ce chapitre présente le programme expérimental mis en place pour atteindre les objectifs du projet, les mélanges utilisés avec leurs constituants, la procédure de fabrication des éprouvettes ainsi que les essais réalisés.

3.2 Programme expérimental

L'objectif de cette étude est d'élaborer un essai à court terme permettant d'évaluer la *résistance minimum garantie* du béton à long terme. La procédure recherchée est un traitement thermique en laboratoire faisant suite aux 24 premières heures de durcissement dans les conditions environnementales inconnues du site des travaux. Ainsi, afin de tenir compte de l'évolution particulière de la microstructure des pâtes CACs, 3 conditions environnementales dans lesquelles le béton va évoluer pendant les 24 premières heures ont été sélectionnées. Elles correspondent approximativement aux températures d'apparition des 3 types d'hydrates majoritaires des CACs (CAH_{10} , C_2AH_8 et C_3AH_6 , voir figure 2.8).

3.2.1 Mise au point de l'essai

3.2.1.1 Premières 24 heures

Les 3 conditions environnementales mises en œuvre ont été calibrées avec le Ciment Fondu. Le ciment LBC a ensuite été placé dans les mêmes configurations. Pour la première condition, nommée **Auto 1** (ou A1 pour Auto échauffement 1), le béton est placé dans des cylindres en PVC souple, eux-mêmes immergés à 80 % dans des bacs d'eau à température ambiante. Comme le montre les figures 3.1 et 3.2, dix cylindres sont placés dans chaque bac. Cette configuration permet de maintenir la température au cœur du béton inférieure à 30 °C, et de former principalement des CAH₁₀ (voir figure 2.8). Pour le mélange de référence (tableau 3.3), la température atteinte de cette manière avec le Ciment Fondu est de 27 °C. Le béton à base de ciment LBC reste entre 25 °C et 26 °C au maximum (figure 3.3).



Figure 3.1 – Bacs Auto 1

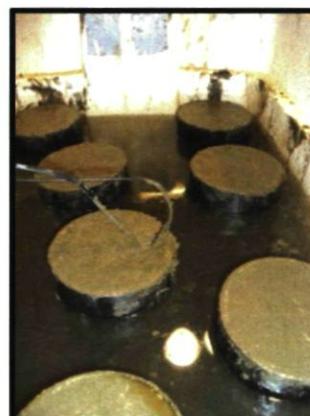


Figure 3.2 – Intérieur d'un bac

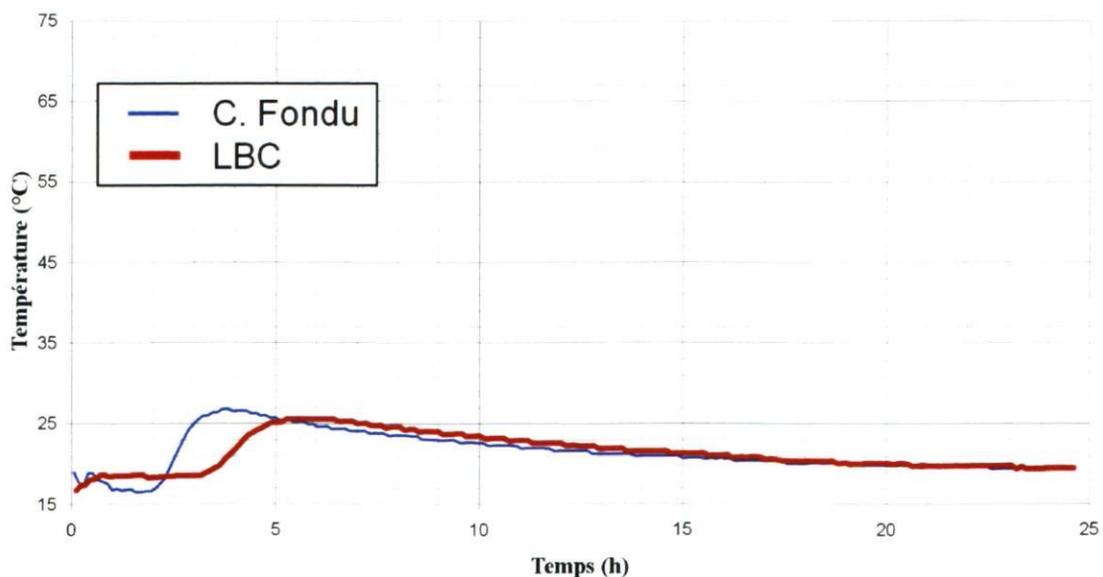


Figure 3.3 – Historique de température en condition A1 (Ciment Fondu et ciment LBC)

La deuxième condition est nommée **Auto 2** (ou A2). Des cylindres en plastique ABS épais sont placés au nombre de 20 dans une boîte isolée au fond et sur les côtés avec 2 couches de polystyrène (Dow Styrofoam) d'une épaisseur de 50 mm chacune (figure 3.4). Sur le dessus, la boîte est simplement recouverte d'un film de polyéthylène double épaisseur, tendu entre le contour supérieur en bois (figure 3.5).



Figure 3.4 – Boite A2



Figure 3.5 – Boite A2 avec couvercle

Le mélange de référence donne une température maximale de 49 °C avec le Ciment Fondu, et de 42 °C avec le ciment LBC (figure 3.6), favorisant ainsi l'apparition de C_2AH_8 .

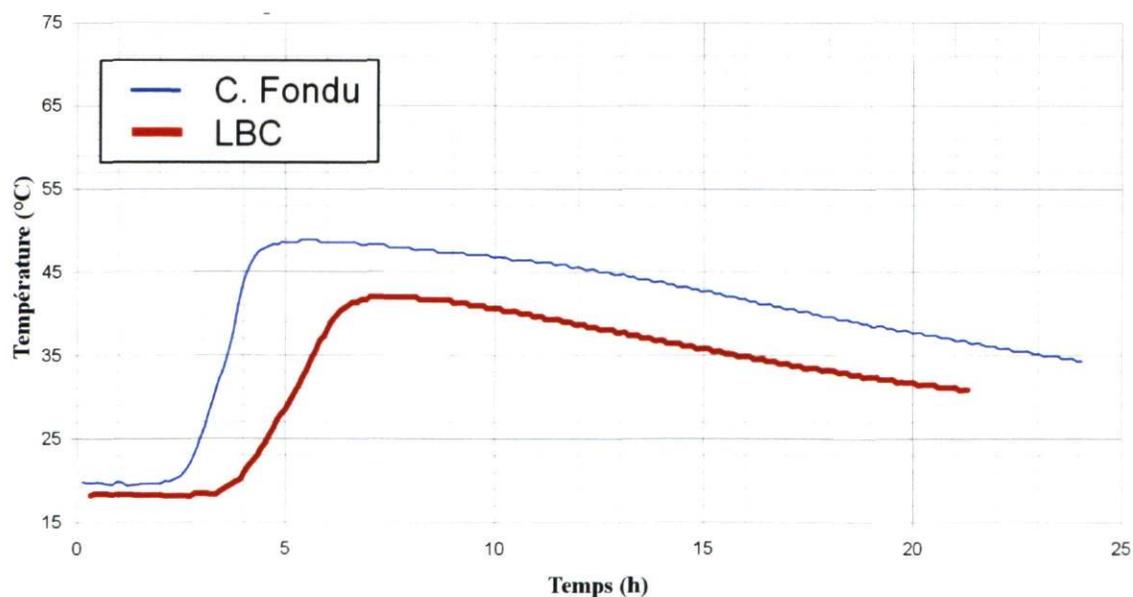


Figure 3.6 – Historique de température en condition A2 (Ciment Fondu et ciment LBC)

La dernière condition est appelée **Auto 3** (ou A3). Elle nécessite également 20 cylindres en plastique ABS épais, mais placés cette fois ci dans une boîte isolée par 3 couches de polystyrène, y compris sur le dessus (figure 3.7). Les pertes de chaleur au droit des ponts thermiques sont atténuées à l'aide de laine minérale (figure 3.8).



Figure 3.7 – Boîte A3 avec couvercle



Figure 3.8 – Boîte A3

Pour le mélange de référence, la température atteinte de cette manière avec le Ciment Fondu est de 61 °C. L'objectif est d'atteindre une chaleur suffisante pour initier la conversion. L'épaulement de température repéré sur la figure 3.9 traduit le passage en C_3AH_6 . Cette condition A3 conduit ainsi un béton fait avec du Ciment Fondu, à un état en grande partie stable à 24 heures. Le LBC atteint un maximum de 49 °C.

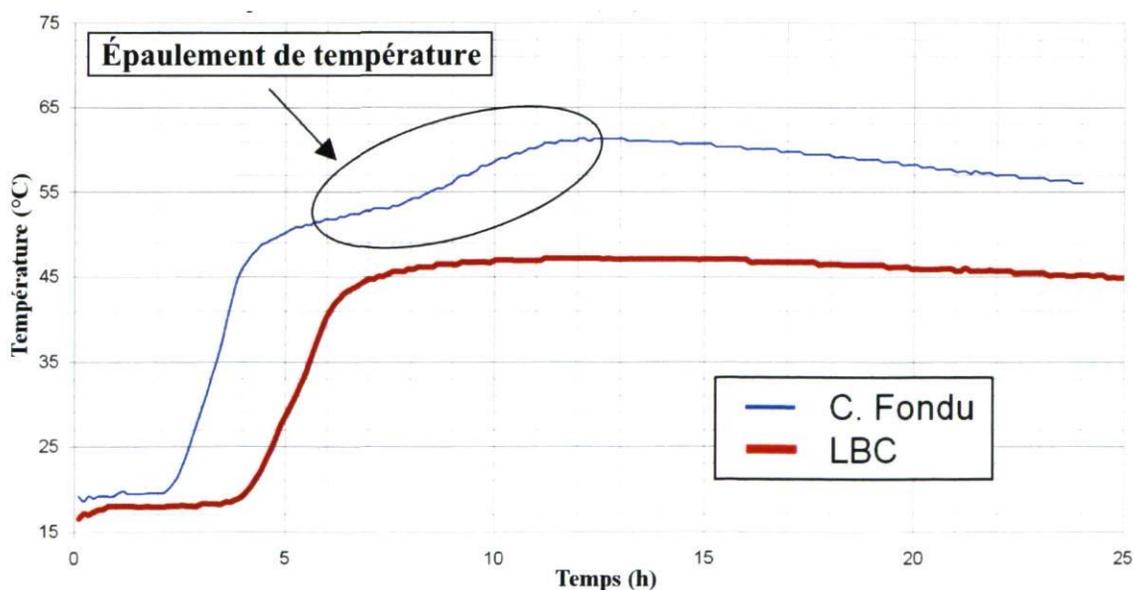


Figure 3.9 – Historique de température en condition A3 (Ciment Fondu et ciment LBC)

Les 3 conditions (Auto 1, Auto 2 et Auto 3) sont à nouveau illustrées sur les figures 3.10 et 3.11 afin de bien visualiser les particularités du dispositif expérimental.

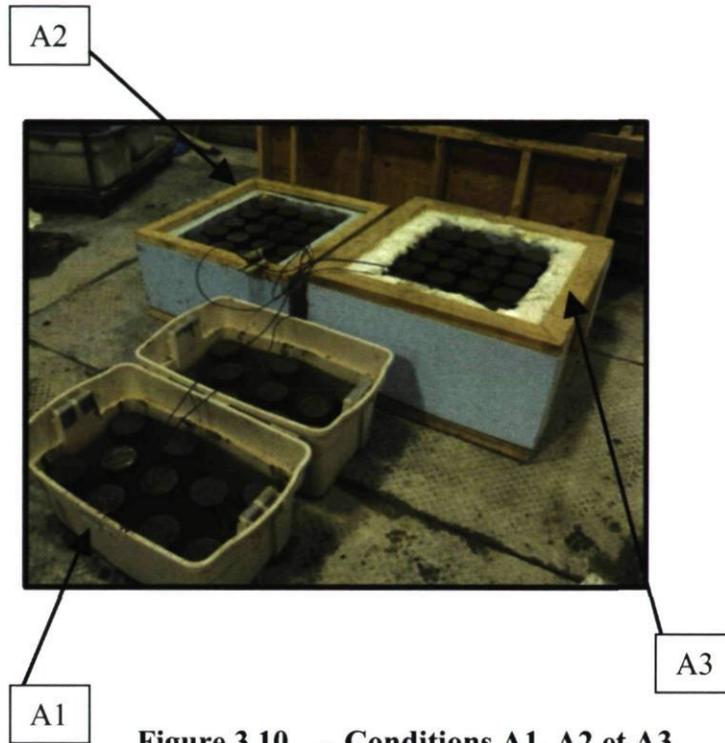


Figure 3.10 – Conditions A1, A2 et A3



Figure 3.11 – Conditions A1, A2 et A3 avec couvercle

3.2.1.2 Températures de cure

Les 3 conditions d'auto échauffement détaillées précédemment permettent de simuler tous les états d'hydratation pouvant survenir lors du durcissement initial en chantier (moules en plastiques, en acier, températures hivernales, estivales, ouvrages minces ou massifs, etc.). Les éprouvettes sont ensuite envoyées au laboratoire après 24 heures sur site, et la procédure recherchée pour déterminer les propriétés mécaniques minimum du matériau est un traitement thermique des cylindres pour évaluation.

Dans le contexte de cette étude, les cylindres sortant des conditions initiales A1, A2 et A3 vont ainsi être soumis à différentes cures afin de déterminer laquelle est la mieux adaptée pour déterminer *la résistance minimum garantie* du béton. Ces cures sont résumées ci-dessous (tableau 3.1) :

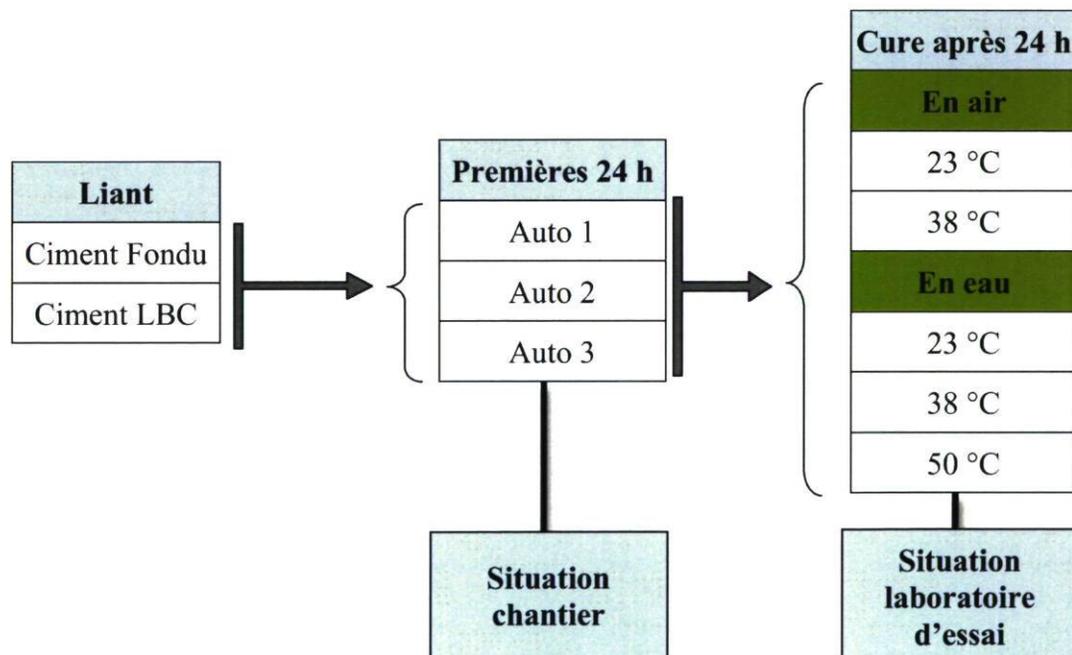


Tableau 3.1 – Protocole expérimental : Températures de cure

3.2.2 Autres paramètres étudiés

Lorsque le traitement thermique en laboratoire, permettant de connaître la *résistance minimum garantie* du mélange de référence, sera déterminé (en termes de temps et de type/température de cure), sa robustesse sera étudiée en faisant varier quelques paramètres supplémentaires (tableau 3.2).

Le rapport E/C est à l'étude, car c'est un paramètre important dans le comportement de tous les bétons. En pratique, les CACs sont rarement utilisés sans superplastifiant, en particulier lorsqu'il s'agit du Ciment Fondu. L'influence des produits rhéologiques sur le béton durci doit donc être étudiée. On souligne souvent l'importance des conditions thermiques dans le comportement mécanique des CACs. La température des matériaux de la gâchée constitue donc également un point important sur lequel s'attarder. Enfin, la partie 2.2.4 de la revue de documentation traite de l'influence du type de granulats sur l'évolution des résistances mécaniques des CACs. Il apparaît nécessaire de générer des résultats additionnels pour confirmer les informations rapportées dans la documentation scientifique.

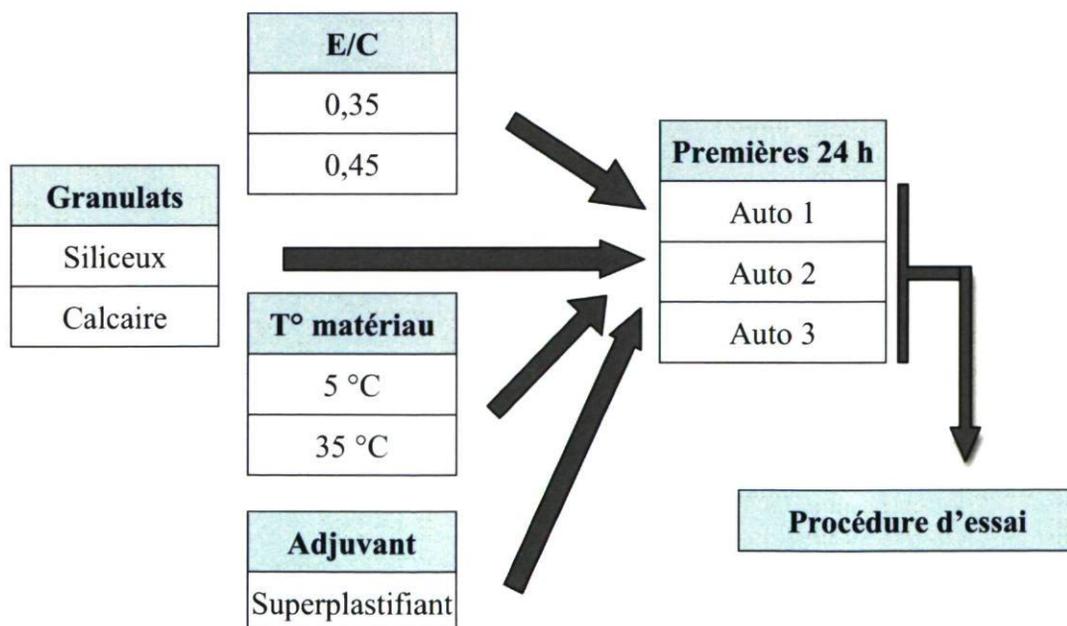


Tableau 3.2 – Protocole expérimental : Autres paramètres étudiés

3.3 Matériaux

3.3.1 Constituants

3.3.1.1 Liants

Deux liants sont à l'étude dans ce projet, le « Ciment Fondu » et le « LBC ». Ce dernier, en développement chez Kerneos, est un mélange entre un nouveau ciment et une fraction de laitier (environ 20 %). Les fiches techniques sont disponibles à l'annexe A.2.

Le Ciment Fondu a une densité de 3,2 comparativement à 3,1 pour le LBC, dont la valeur est affectée par les ajouts cimentaires (densité du laitier : 2,9). Les laitiers sont moins foncés que les ciments à base d'aluminates de calcium, ce qui confère au LBC une teinte plus claire que celle du Ciment Fondu.

3.3.1.2 Granulats

A l'exception de la dernière partie des essais concernant l'influence du type de granulats, les constituants utilisés furent ceux utilisés couramment au laboratoire du CRIB de l'Université Laval. Le sable est fourni par la sablière Ladufo Inc. de Saint-Joachim au Québec (figure 3.12). De nature siliceuse, sa fiche technique est en Annexe A.3 avec une granulométrie de 0 à 5 mm (densité : 2,688 ; absorption : 0,54 %). Le gros granulat est une pierre calcaire 5-14 mm (Annexe A.4), fournie par la société Graymont, de densité 2,659 et d'absorption 0,64 % (figure 3.13).

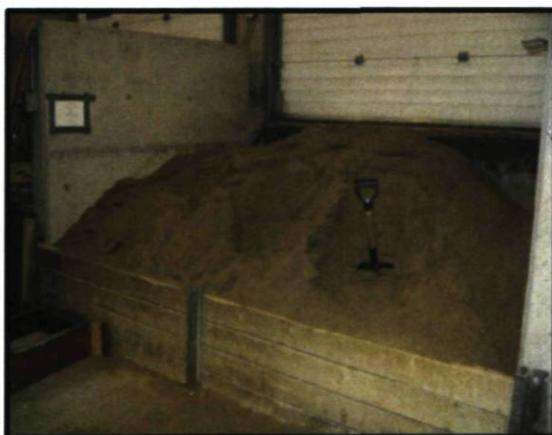


Figure 3.12 – Sable siliceux 0-5 mm



Figure 3.13 – Pierre calcaire 5-14 mm

La teneur en eau des granulats est préalablement homogénéisée et mesurée avant chaque gâchée afin de corriger la quantité d'eau effective des mélanges. Cette opération est réalisée dans un malaxeur à tambour (figure et 3.14 et 3.15).



Figure 3.14 – Malaxeur à tambour



Figure 3.15 – Sable homogénéisé

Pour la portion de l'étude portant sur la nature des granulats, une pierre concassée granitique 5-14 mm de la carrière Bédard à Québec (figure 3.16) et du sable calcaire 0-5 mm de St-Eugène (figure 3.17) ont été utilisés. Les fiches techniques de ces 2 matériaux sont également en annexe A.5 et A.6.



**Figure 3.16 – Pierre granitique
5-14 mm**



**Figure 3.17 – Sable calcaire
0-5 mm**

3.3.1.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour les mélanges est de l'eau de l'aqueduc de la ville de Québec qui est propre à la consommation et ne contient aucun contaminant connu.

3.3.1.4 Adjuvants

Un seul adjuvant a été utilisé dans ce projet, soit le superplastifiant de type polycarboxylate commercialisé par la société Chryso Inc. sous le nom « Optima 203 » (fiche technique en annexe A.7).

3.3.2 Proportions des mélanges

La plupart des essais ont été effectués sur des mélanges ayant un rapport eau/liant de 0,40, une teneur en ciment de 400 kg/m^3 , et sont fabriqués avec les granulats usuels du CRIB (sable siliceux et pierre calcaire). Afin d'avoir un mélange optimisé, des essais de compacité ont été effectués avec différentes proportions granulat fin/gros granulat pour réduire au minimum le volume des vides du mélange sec. Après plusieurs essais, la répartition granulaire choisie fut la suivante :

- Sable siliceux 0-5 mm : **45 %**
 - Pierre calcaire 5-14 mm : **55 %**
- 
- Volume des vides : 19,8 %

Pour un mètre cube de béton, le masse approximatif des constituants (granulats saturés surface sèche) est détaillé dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 – Composition et caractéristiques du mélange de référence

Constituant	Masse (kg/m^3 de béton)	
	Ciment Fondu	Ciment LBC
Ciment	400	400
Eau effective	149	149
Sable siliceux 0-5 mm (SSS)	852	847
Pierre Calcaire 5-14 mm (SSS)	1016	1011
Volume de pâte (%)	30,5	30,9
Teneur en air (%)	2,0 – 2,5	

Les mortiers étudiés dans ce projet ont été fabriqués de manière à obtenir la même surface spécifique des granulats que celle du mélange de béton de référence. Leur composition est détaillée dans le tableau 3.4 ci-dessous.

Tableau 3.4 – Composition et caractéristiques du mortier

Constituants	Masse (kg/m ³ de mortier)
Ciment Fondu	635
Eau effective	254
Sable siliceux 0-5 mm (SSS)	1418
Volume de pâte (%)	47,2

3.4 Procédé de fabrication

Les mélanges ont été préparés à l'aide d'un malaxeur à mouvement planétaire de capacité 80 litres (figure 3.18).



Figure 3.18 – Malaxeur 80 litres

Les matériaux secs sont introduits dans la cuve en quantités équivalentes de la manière suivante : une chaudière de pierre, une chaudière de sable et une de ciment, jusqu'à épuisement des constituants.

La procédure de malaxage est la suivante :

- **1 minute** de malaxage des matériaux secs (figure 3.19) ;
- Ajout de l'eau et des éventuels adjuvants (dilués dans cette dernière) ;
- **3 minutes** de malaxage ;
- **1 minute** de repos sous un film plastique ;
- **3 minutes** de malaxage (figure 3.20).



Figure 3.19 – Malaxage à sec



Figure 3.20 – Malaxage humide

3.5 Fabrication des bétons à 5 °C et 35 °C

Dans le cadre de la deuxième partie du projet, la fabrication devait être réalisée à 5 °C et à 35 °C. Dans chaque cas, matériaux, moules et malaxeur ont été placés 24 heures avant la gâchée à la température visée dans une chambre environnementale de grande dimension, afin d'atteindre la stabilité thermique désirée. Le malaxage et la mise en œuvre ont également été faits à la température correspondante (voir figures 3.21 à 3.24).



Figure 3.21 – Mise à température du matériel et des matériaux

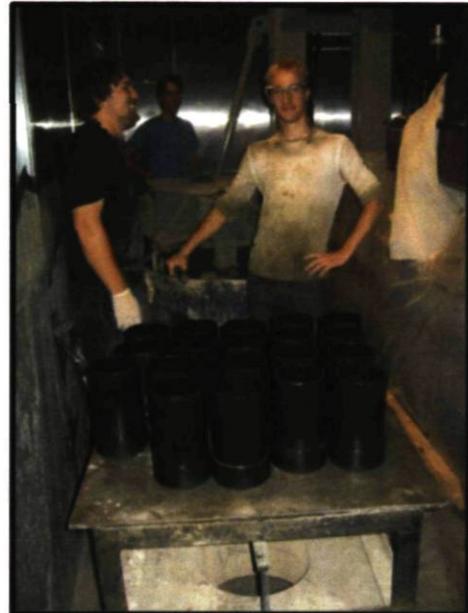


Figure 3.22 – Table vibrante



Figure 3.23 – Produits secs



Figure 3.24 – Malaxage du béton

3.6 Fabrication des éprouvettes

3.6.1 Éprouvettes de béton

L'objectif est de suivre l'évolution des résistances en compression des bétons fabriqués. Selon la norme CSA A23.2-9C, la fabrication des éprouvettes se fait avec des moules cylindriques de 100×200 mm (figure 3.25). Ces derniers sont remplis en 2 couches égales et vibrés 20 secondes à chaque étape (figure 3.26). Ils sont ensuite finis à l'aide de taloches en bois pour être immédiatement placés dans la condition souhaitée (A1, A2 ou A3).



Figure 3.25 – Cylindres 100×200 mm



Figure 3.26 – Table vibrante

3.6.2 Éprouvettes de mortier

Les éprouvettes de mortier sont fabriquées dans des moules cubiques en laiton de dimension 50×50×50 mm. Le mélange des constituants est fait dans un malaxeur de capacité 10 litres. Les moules sont remplis au complet puis vibrés 20 secondes de la même manière que les cylindres de béton.

3.7 Équipements et accessoires

Afin de réaliser les différents régimes de cure suite aux première 24 heures, plusieurs chambres environnementales ainsi qu'un bain thermostaté (figure 3.27 et 3.28) étaient disponibles.



Figure 3.27 – Bain thermostaté

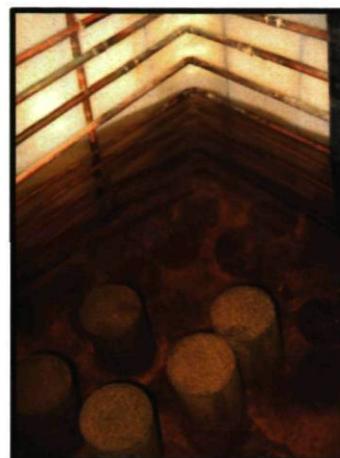


Figure 3.28 – Intérieur du bain

3.8 Essai

Pour chaque mélange, un suivi de température pour les premières 24 heures est effectué à l'aide d'un thermocouple. Un seul type d'essai est effectué au laboratoire, soit l'essai de résistance à la compression. Les échéances des essais varient selon la cure subie par le béton et les éprouvettes sont testées selon les indications de la norme ASTM C39 (Annexe A.8). Les cylindres sont préalablement surfacés par sablage pour assurer la planéité et le parallélisme des surfaces de contact. Selon le nombre d'échéances voulues, 2 ou 3 éprouvettes sont testés en raison du nombre réduit de cylindres disponibles (20 pour chaque condition A1, A2 et A3). La presse est illustrée sur la figure 3.29.



Figure 3.29 – Presse hydraulique de compression
(capacité : 1 000 000 Lbs)

Chapitre 4 – Élaboration d'une procédure expérimentale pour la détermination de la résistance en compression

4.1 Introduction

L'objectif du projet est de développer un nouvel essai d'évaluation de la résistance en compression des ciments alumineux, dans le but de connaître rapidement la *résistance minimum garantie* à long terme du béton. La procédure la plus intéressante permettrait d'avoir un essai dont le résultat est indépendant des 24 premières heures de durcissement en chantier. Pour cela, 3 séries d'éprouvettes sont muries de manière à simuler, par 3 températures d'auto échauffement différentes, un spectre représentatif des états d'hydratation possibles au cours des 24 premières heures (voir section 3.2.1.1). On retrouve la série A1, avec un matériau constitué principalement de CAH_{10} (température $T \leq 30$ °C pendant le durcissement); la série A2, avec un matériau constitué essentiellement de C_2AH_8 (30 °C < T < 60 °C) puis la série A3, avec un matériau composé majoritairement d'hydrates C_3AH_6 ($T \geq 60$ °C, maintenues assez longtemps pour créer une hydratation stable).

Les éprouvettes des 3 séries sont ensuite soumises, après 24 heures, à différentes cures. Ce protocole expérimental, élaboré à partir des données de la figure 2.8, a permis de générer de nombreux résultats permettant de choisir le traitement thermique le mieux adapté pour atteindre les objectifs.

Afin de vérifier les hypothèses sur l'état d'hydratation de certaines éprouvettes, des analyses DRX (Diffraction Rayon-X) ont été effectuées au laboratoire de la société Kerneos à Saint Quentin Fallavier (France).

4.2 Analyses Diffraction Rayon-X à 24 heures (A1, A2 et A3)

Des analyses par diffraction de rayon-X (DRX) ont été faites pour évaluer et confirmer l'état d'hydratation à la sortie des conditions A1, A2 et A3.

Vingt-quatre heures après le contact eau/ciment, les cylindres ont été immédiatement surfacés puis chargés sur une presse jusqu'à éclatement. Des échantillons de béton ont ensuite été prélevés, en privilégiant les morceaux « riches » en pâte et en évitant les gros granulats, puis plongés pour plusieurs semaines dans de l'isopropanol pur afin d'en stopper l'hydratation. Les spécimens ont ensuite été émiettés puis placés au dessiccateur pour une durée de 7 jours pour extraire l'alcool. Cette procédure vise à arrêter l'hydratation du ciment.

Les échantillons sont finalement broyés à 100 microns puis compactés pour obtenir une surface lisse. C'est l'analyse de cette surface par irradiation aux rayons-X qui donne les résultats présentés ci-après sous forme de graphiques affichant l'intensité de la réponse en fonction de l'angle de diffraction observé. À chaque hydrate correspond un, ou plusieurs angles de diffraction « 2 θ » (6,5 et 12,5 pour les hydrates CAH_{10} , 17,5 pour les C_3AH_6 , etc.), et l'intensité mesurée est directement liée à la quantité détectée, pour la phase considérée. Cependant, la comparaison directe de l'intensité des pics entre les différents échantillons est à prendre avec précaution, car les échantillons analysés ont été soigneusement choisis pour être riche en pâte de ciment.

4.2.1 Ciment Fondu

4.2.1.1 Condition Auto 1 (A1)

De nouvelles éprouvettes ont été fabriquées en vue des analyses DRX pour vérifier les hydrates présents à la sortie de la condition A1 (figure 4.1). Comme attendu, la phase métastable CAH_{10} est présente et aucune quantité significative de C_2AH_8 et de C_3AH_6 n'est détectée. Il reste également une fraction de ciment anhydre. L'intensité des pics d'hydrates n'est pas très élevée car le signal est dilué par la présence des granulats.

Les températures et la résistance associées à l'échantillon analysé sont présentées sur le graphique.

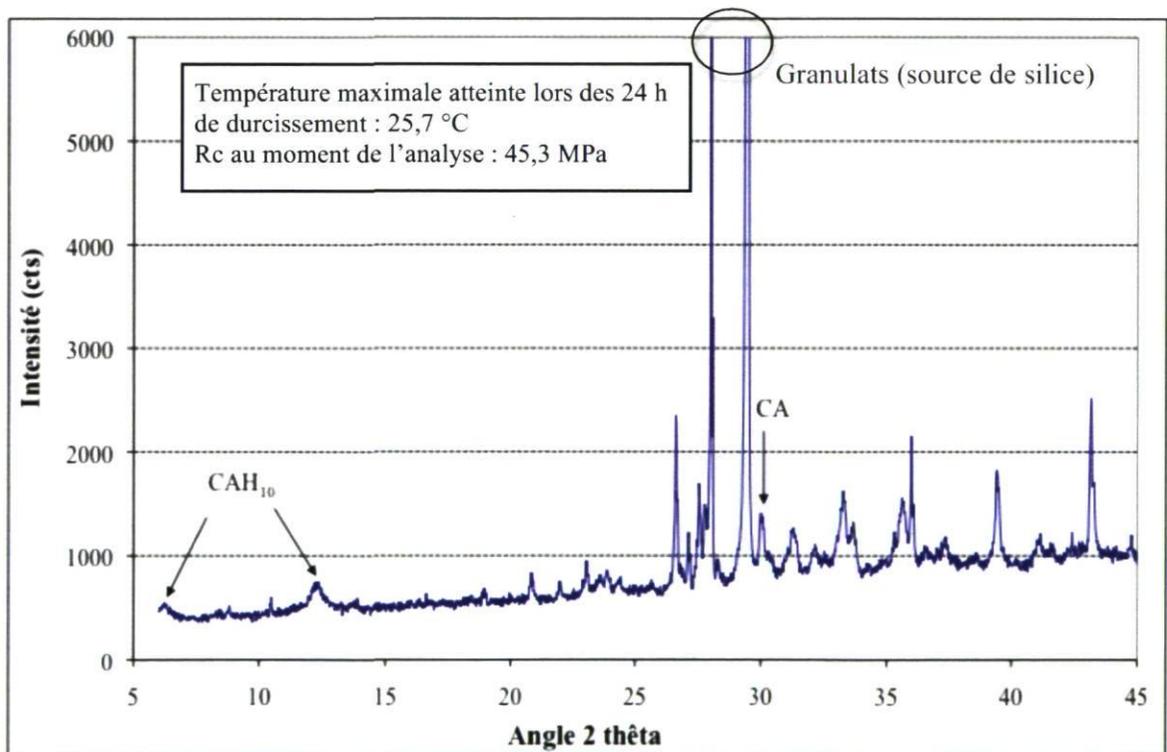


Figure 4.1 – Analyse DRX - A1 - Ciment Fondu – 24 heures

4.2.1.2 Condition Auto 2 (A2)

Les résultats pour la condition A2 sont présentés sur la figure 4.2. Comme dans le cas des cylindres A1, il reste une quantité importante de ciment anhydre à 24 heures. On constate non seulement la présence des hydrates métastables CAH_{10} et C_2AH_8 (formés à des températures de durcissement entre 30 °C et 60 °C), mais également de la phase stable C_3AH_6 . Les données thermiques semblent pourtant conformes, car la température maximale atteinte n'est que de 51,2 °C et aucun épaulement de température n'est observé (Annexe B.1). Une hypothèse serait que les hautes chaleurs soient maintenues trop longtemps, ce qui permettrait à la conversion de s'amorcer. On constate tout de même un assez grande différence dans l'état d'hydratation par rapport aux cylindres A3 (figure 4.3), pour considérer la condition A2 valable.

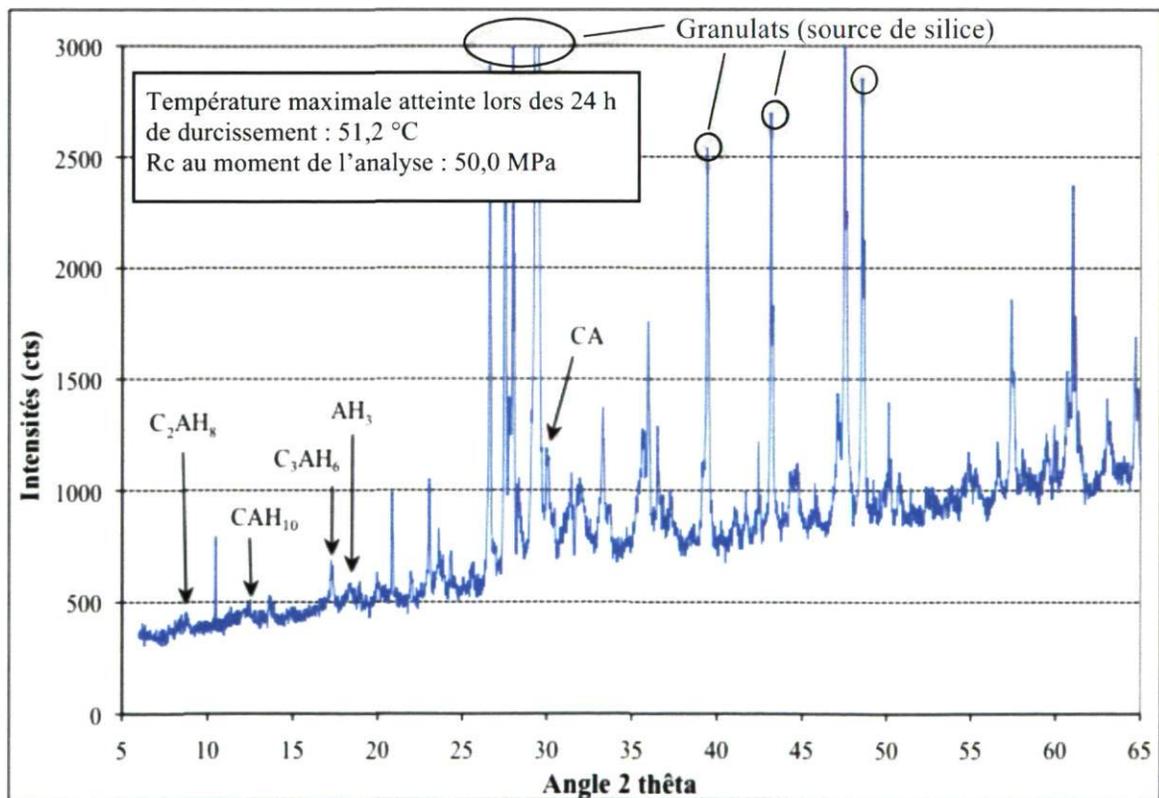


Figure 4.2 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 24 heures

4.2.1.3 Condition Auto 3 (A3)

Dans la même optique que pour les conditions A1 et A2, cette analyse (figure 4.3) sert à confirmer l'état d'hydratation à la suite du conditionnement thermique A3. Comme escompté, on observe que la seule phase d'aluminates de calcium présente est le C_3AH_6 . L'analyse d'un échantillon identique, placé à 38 °C en eau pendant 13 jours (figure 4.21), montre que la quantité d'hydrates stables n'a pas beaucoup changé, signe que la conversion était pratiquement complète à 24 heures. De plus, l'historique de température (voir Annexe B.1) montre que les cylindres sont exposés pendant 12 h à des températures au dessus de 57 °C. La figure 2.7 tirée de la norme française EN 14647 (2006) indique qu'à cette température, il faut environ 7 h d'exposition pour achever la conversion. Ceci supporte ce que les analyses DRX révèlent.

Dans cette configuration de durcissement, il ne reste pratiquement plus de ciment anhydre à 24 heures comparé aux autres conditions A1 et A2.

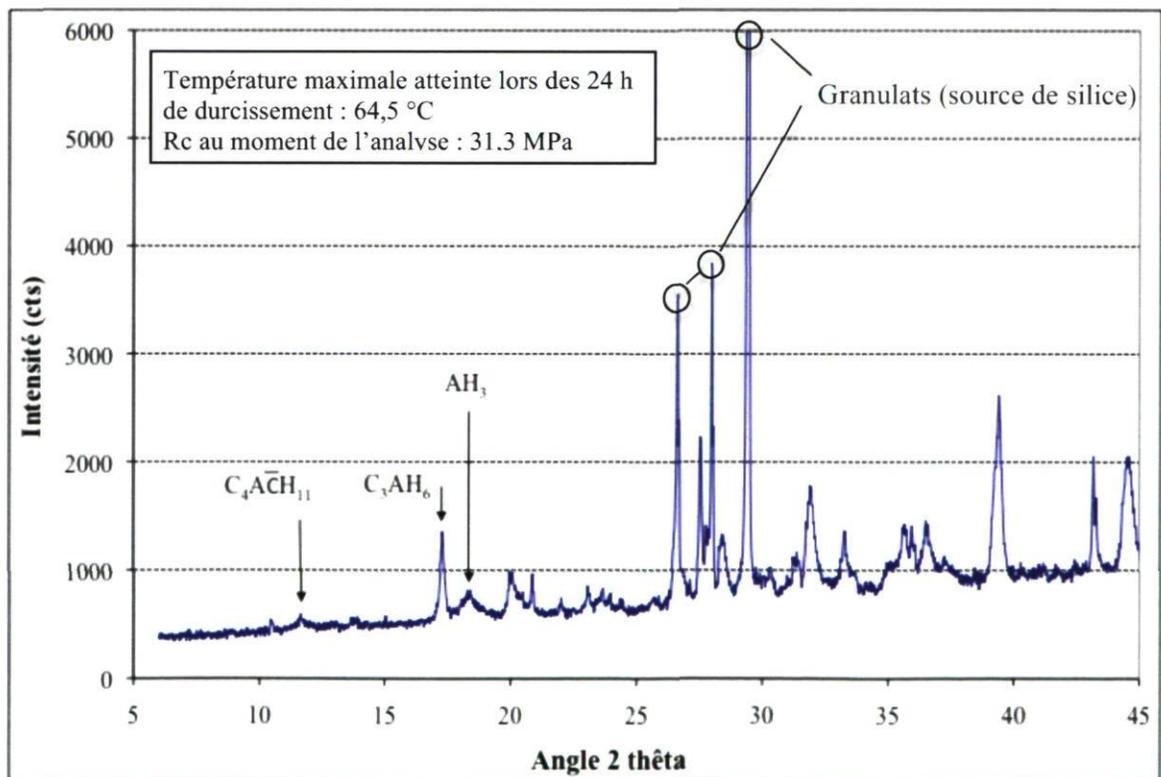


Figure 4.3 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 24 heures

4.2.2 Ciment LBC

4.2.2.1 Condition Auto 1 (A1)

Pour le ciment LBC, la condition A1 conduit à un état d'hydratation semblable à celui observé avec le Ciment Fondu, et seule la phase métastable CAH_{10} est détectée (figure 4.4). À ce stade (24 heures après le contact E/C), il reste également du ciment anhydre.

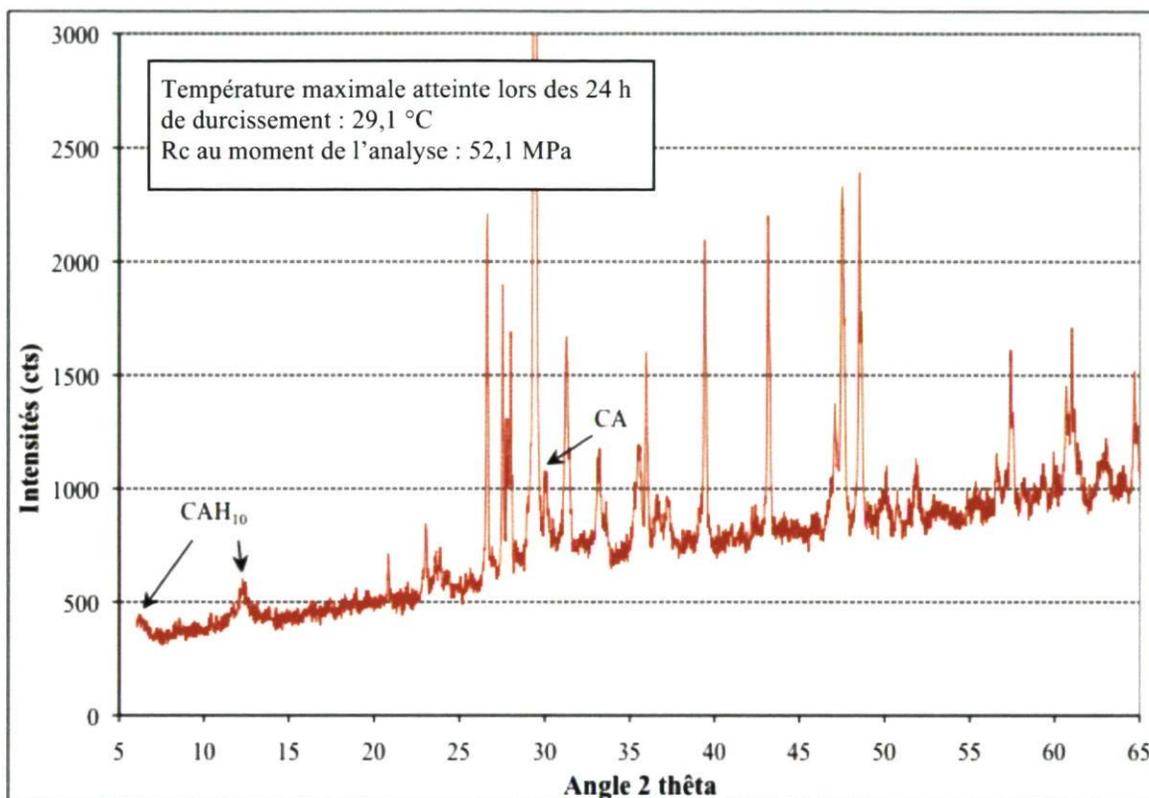


Figure 4.4 – Analyse DRX – A1 - ciment LBC – 24 heures

4.2.2.2 Condition Auto 2 (A2)

Dans le cas du ciment LBC, les cylindres exposés en conditionnement A2 sont constitués de C_2AH_8 , de mono-carbo-aluminates ($C_4A\bar{C}H_{11}$) et d' AH_3 (figure 4.5). Cet état d'hydratation est idéal pour le conditionnement A2, car comme souhaité, aucun CAH_{10} ni C_3AH_6 n'est détecté. Il reste également du ciment anhydre. À cette échéance (24 heures), aucune stratlingite (C_2ASH_8) n'est formée.

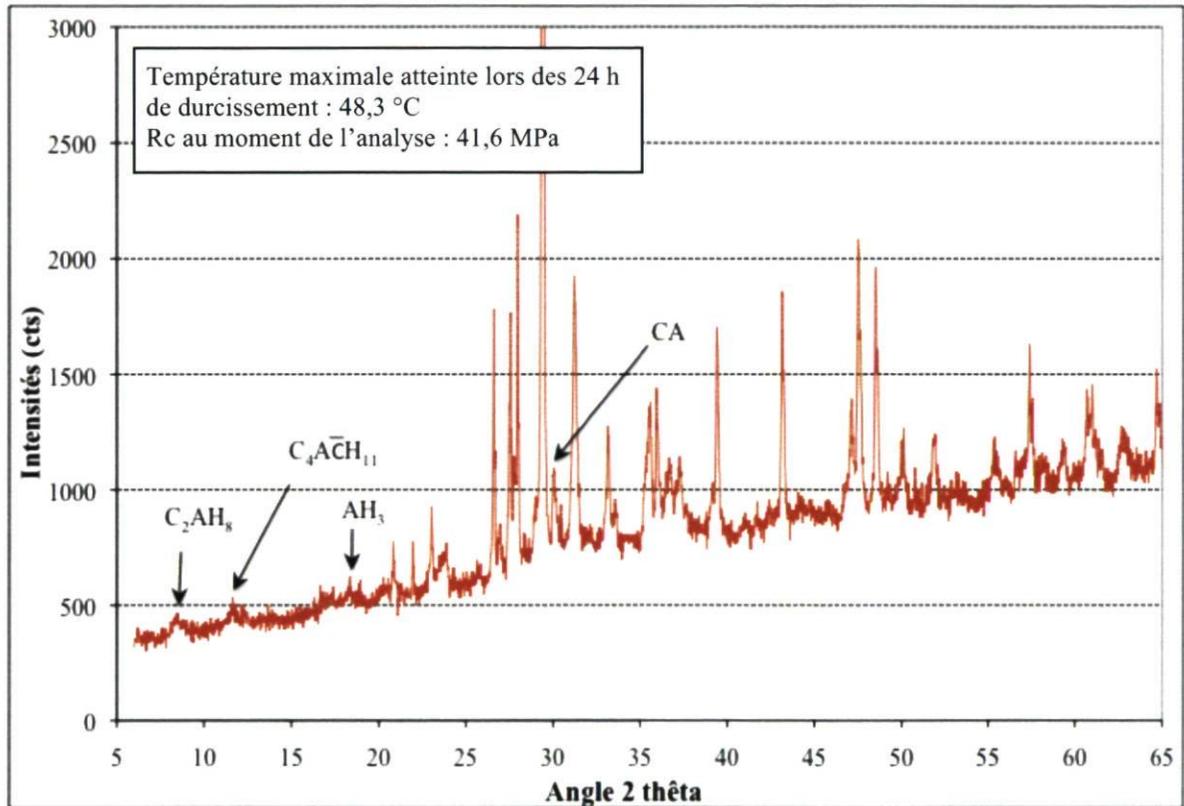


Figure 4.5 – Analyse DRX – A2 - ciment LBC – 24 heures

4.2.2.3 Condition Auto 3 (A3)

Dans le cas de la condition A3 (figure 4.6), les hautes températures sont maintenues beaucoup plus longtemps que dans la condition A2 (Annexe B.2), permettant ainsi d'amorcer la conversion. On observe la présence d'hydrates stables C_3AH_6 , inexistants à 24 heures pour les cylindres A2.

Cet état d'hydratation obtenu dans la condition A3 est cependant comparable à celui obtenu en condition A2 avec du Ciment Fondu, car des hydrates métastables C_2AH_8 sont encore présents. Ceci est dû aux températures plus faibles atteintes par le ciment LBC dans la configuration A3. Il reste également plus de ciment anhydre que les cylindres A3 faits de Ciment Fondu.

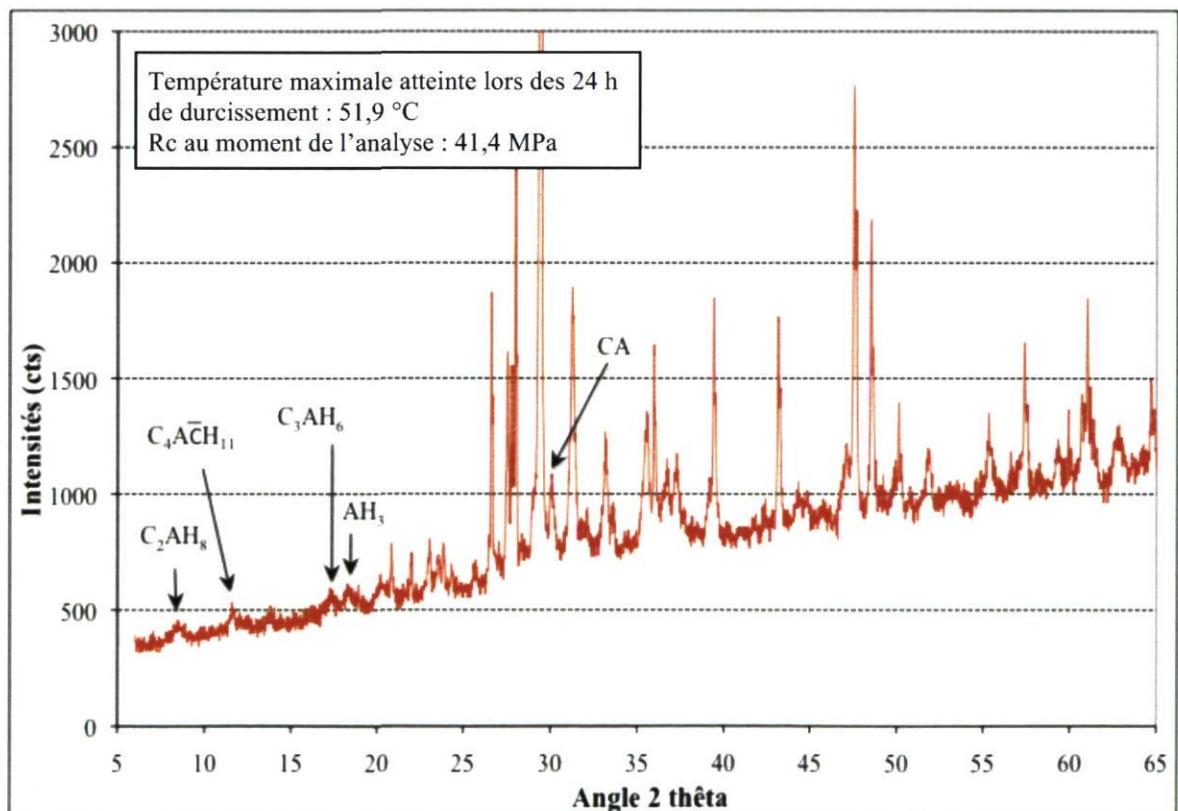


Figure 4.6 – Analyse DRX – A3 - ciment LBC – 24 heures

4.3 Cure à 23 °C

4.3.1 Cure en air

Les résultats de la cure à 23 °C en air pour le Ciment Fondu sont présentés sur la figure 4.7. Les éprouvettes en air sont stockées dans un environnement à 23 °C et 50 % d'humidité relative.

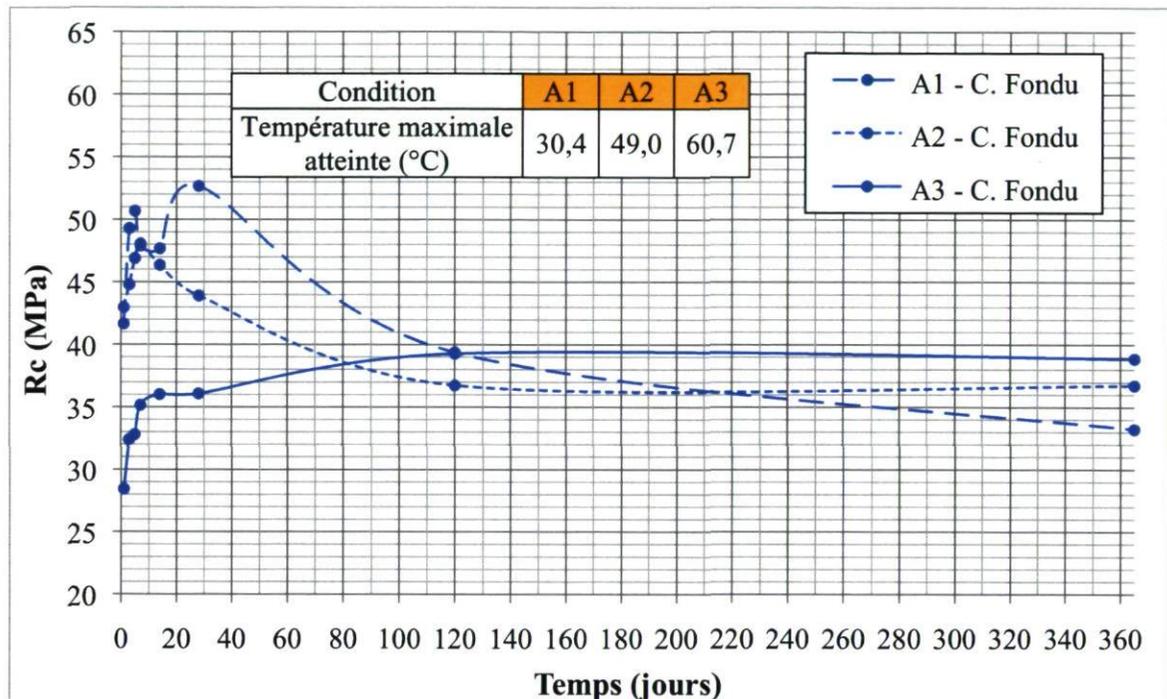


Figure 4.7 – Cure à 23 °C en Air – Ciment Fondu

La première échéance (1 jour) représente la résistance au terme des 3 conditions d'auto échauffement A1, A2 et A3. On enregistre 28 MPa pour la cure A3, soit une résistance typique d'un béton « converti » de rapport eau/liant de 0,40. Malgré leur historique de température différent lors du premier jour (30,4 °C et 49 °C atteint), les valeurs A1 et A2 sont pratiquement les mêmes à 24 heures. Cependant, l'évolution des résistances dans le temps confirme leur différence dans l'état initial d'hydratation, avec une différence de près de 10 MPa à 28 jours entre ces 2 configurations.

La condition A3 conduit normalement à un matériau constitué principalement de C_3AH_6 à 24 heures. La conversion s'est en effet déjà produite pendant le durcissement, conduisant à des résistances plus faibles à 1 jour (28 MPa). De plus, son évolution ne

présente aucune diminution des résistances subséquente, ce qui confirme l'hydratation « stable » déjà atteinte à la suite des premières 24 heures. Cette courbe sert donc d'indicateur de la résistance du mélange « après conversion ».

Pour les conditions A1 et A2, les chutes de résistances observées mettent en évidence le passage des hydrates métastables en phases stables. Cette conversion semble achevée à 120 jours, car ces éprouvettes présentent des résistances similaires aux cylindres A3.

Des essais ont aussi été effectués sur des mortiers pour la cure à 23 °C en air afin de vérifier s'ils ont un comportement analogue aux bétons (figure 4.8). Pour reproduire les conditions thermiques A1, A2 et A3 sur des cubes de 50×50×50 mm de mortier, des profils de température, calibrés sur ceux obtenus avec les bétons ont été imposés aux éprouvettes dans une chambre environnementale spéciale. Le but était de reproduire une évolution thermique pendant les 24 premières heures similaire à celle des bétons.

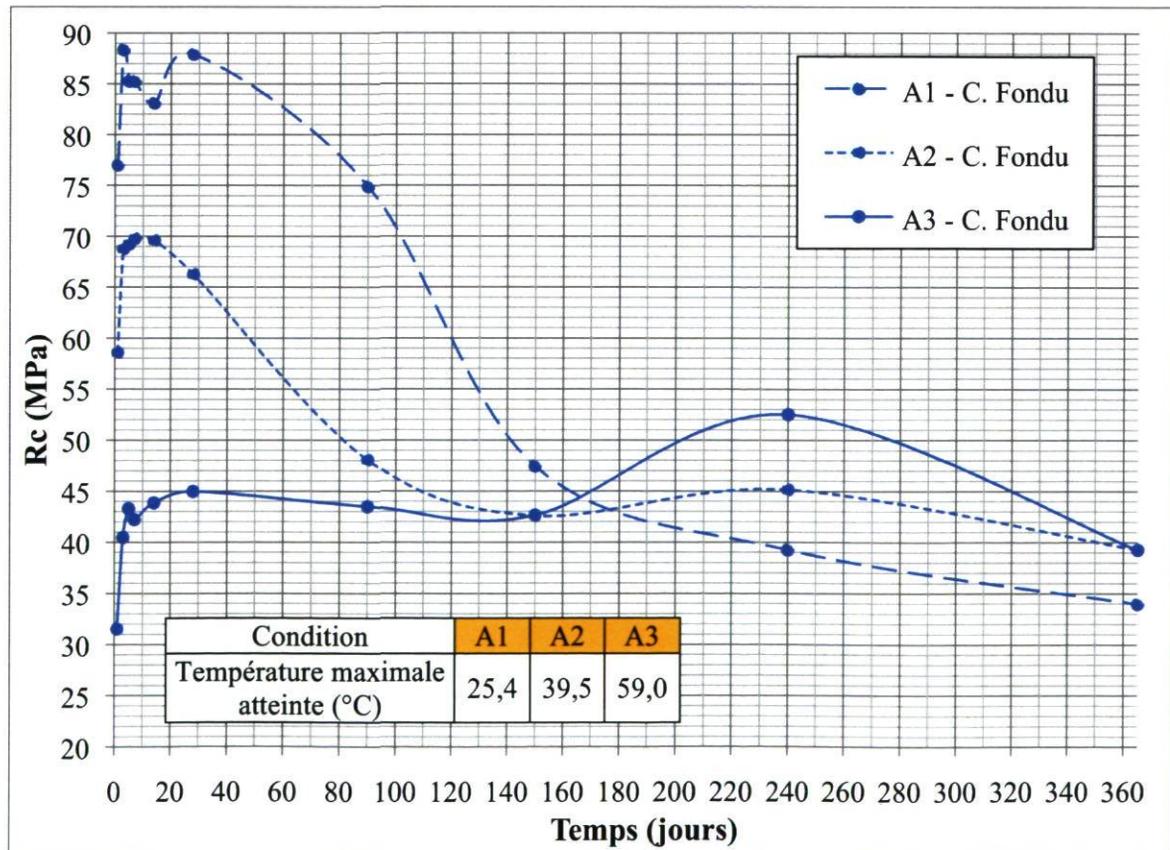


Figure 4.8 – Cure à 23 °C en Air – Mortier – Ciment Fondu

Dans un premier temps, les différences entre les résistances enregistrées à 24 heures sont beaucoup plus marquées que pour les bétons. Il est à noter que les éprouvettes A2 ont atteint des températures inférieures à celles des bétons A2. On observe ainsi, pour un même mortier, des résistances à 1 jour de 77 MPa (A1), 58 MPa (A2) et 31 MPa (A3).

D'un ordre général, les valeurs des résistances sont plus élevées pour les mortiers que pour les bétons, car ces essais sont réalisés sur des cubes de 50×50×50 mm. En réalité, et comme l'explique Evans et al. (1943), les mortiers sont moins résistants à géométrie identique. Dans l'optique de comparer ces résultats à ceux des bétons, il faut donc se concentrer seulement sur les phénomènes observés.

Ici encore, les cubes A3 sont en grande partie constitués d'hydrates stables à 24 heures, et seuls les éprouvettes A1 et A2 subissent la conversion durant la cure. Les cubes A1 passent par un point haut à 28 jours avant d'en subir les effets. Les éprouvettes A2, plus près d'un état stable, ont besoin de moins d'énergie pour convertir et les résistances commencent à chuter à partir de 14 jours, pour se rapprocher de celle d'A3 à 90 jours. Au même stade, les éprouvettes A1 montrent encore une résistance supérieure (25 MPa de plus), et il faut attendre 150 jours pour obtenir une valeur proche de celle d'A3, représentative d'une résistance d'un béton ayant achevé la conversion.

À noter qu'à la différence des bétons, les mortiers ne contiennent aucun granulat calcaire pouvant avoir un effet sur les résistances en compression par la formation de mono-carbo-aluminates (voir section 2.2.4).

L'évolution de la résistance pour les mélanges fabriqués avec le ciment LBC en cure à 23 °C en air est présentée sur la figure 4.9.

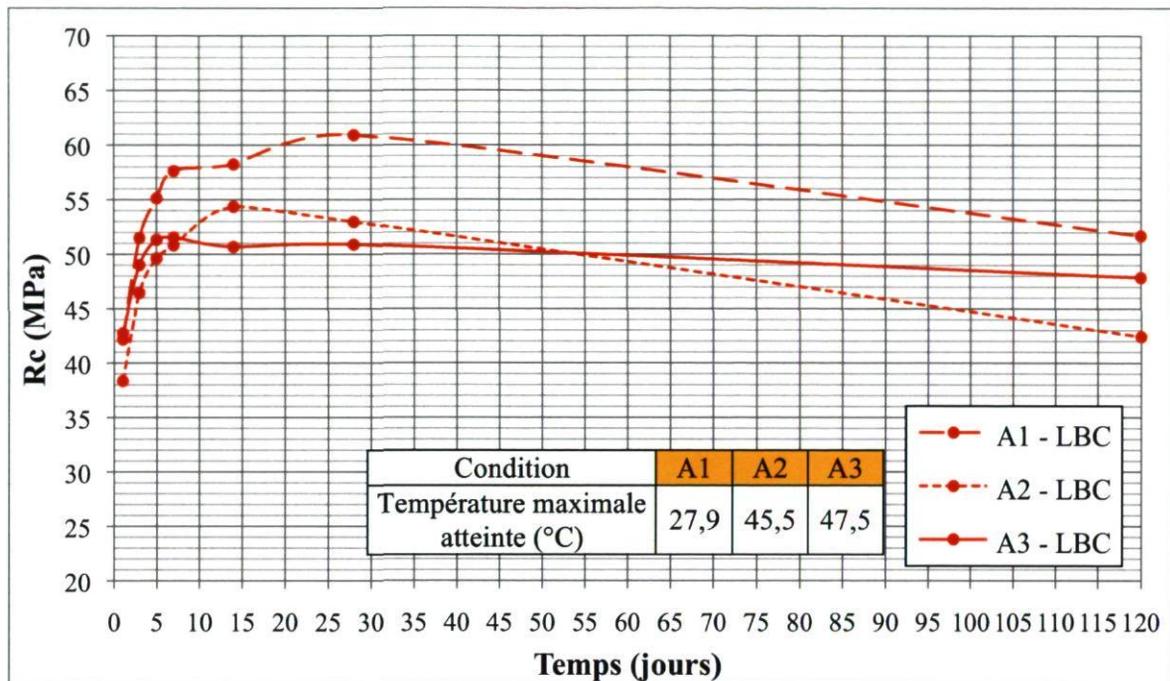


Figure 4.9 – Cure à 23 °C en Air – LBC

Les bétons fabriqués avec le ciment LBC atteignent des températures moins élevées dans les conditions A1, A2 et A3 que ceux fabriqués avec le Ciment Fondu, car dans le LBC, une fraction du ciment est remplacée par du laitier, qui réagit plus tardivement [Majumdar et al. (1992)]. La température maximale atteinte pendant le durcissement est de 47,5 °C en condition A3 au lieu de 60 °C pour le Ciment Fondu. Seuls 2 °C séparent la température maximale atteinte lors du durcissement en condition A2 et A3, et la différence d'état d'hydratation est alors moins marquée que pour le Ciment Fondu. Il est même probable que la condition A3 ne crée cette fois que peu d'hydrates stables en condition A3. Ceci n'est toutefois aucunement préjudiciable. Au contraire, le but de l'étude est de comparer les 2 ciments dans les mêmes conditions thermique, car il n'y aura pas d'attention particulière in situ sur le type de liant utilisé. En chantier, le LBC va ainsi uniquement moins chauffer dans des conditions identiques.

Les 3 conditions d'auto échauffement A1, A2 et A3 mènent à de très proches résistances en compression à 1 jours, comprises entre 38 à 43 MPa. Dans l'ensemble, on

observe une évolution similaire des résistances dans le temps. Comme pour le Ciment Fondu, la conversion est observée entre 28 et 120 jours à 23 °C, mais les chutes de résistance sont moins importantes dans le cas du ciment LBC. Après 119 jours de cure, les éprouvettes A1 chutent de 13 MPa pour le Ciment Fondu et seulement de 9 MPa pour le ciment LBC dans ce même laps de temps. Ce phénomène peut être expliqué par la présence de laitier dans le liant LBC, qui est une source de silice favorisant la formation de stratlingite (C_3ASH_8) au détriment des C_3AH_6 . Moins dense et relativement stable à cette température, il conduit ainsi à de plus faibles porosités en limitant la conversion en C_3AH_6 (voir section 2.2.3).

Pour un même rapport eau/liant, les bétons faits de ciment LBC sont donc plus résistants à maturité que ceux faits de Ciment Fondu. À long terme, si les conditions y sont favorables, la stratlingite se transformera peut être en C_3AH_6 .

4.3.2 Cure en eau

Les résultats de la cure à 23 °C en eau pour le Ciment Fondu sont présentés sur la figure 4.10 et sur la figure 4.11 pour le ciment LBC. L'eau utilisée pour les cures immergées est celle de l'aqueduc.

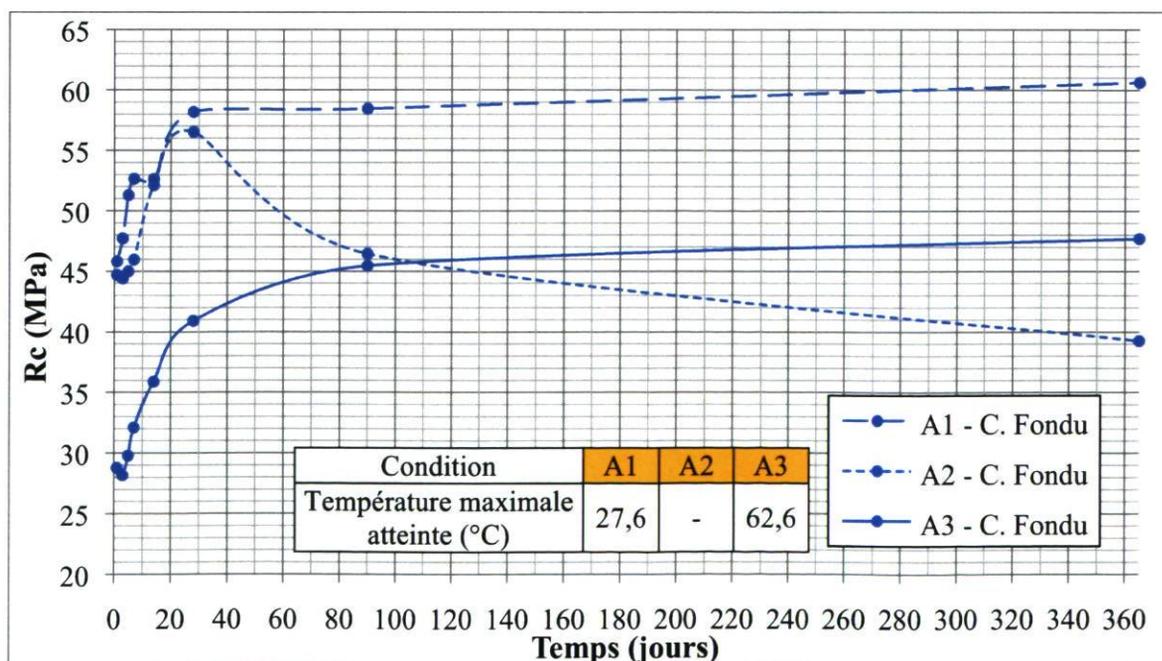


Figure 4.10 – Cure à 23 °C en Eau – Ciment Fondu

Il est dans un premier temps intéressant de noter la bonne reproductibilité des essais, avec des résistances au terme des conditions A1, A2 et A3 pratiquement identiques aux résultats présentés pour la cure en air (figure 4.7). Pour cette cure à 23 °C en eau, les éprouvettes A2 ont rejoint un état de résistance identique aux cylindres A3 à 90 jours ; en revanche, les cylindres A1 ne semble toujours pas avoir commencé à convertir après un an.

Le point de comparaison important avec la cure à 23 °C en air (Ciment Fondu) est la résistance atteinte à long terme. Pour un état d'hydratation initial « converti », la condition A3 murie en air présentait 40 MPa à 120 jours alors que les cylindres immergés ont déjà atteint 45 MPa à 90 jours. La quantité d'eau pour hydrater à 100 % un ciment alumineux dépend de la nature des hydrates présents, s'approchant généralement d'un rapport eau effective/ciment de 0,50. Les bétons fabriqués ici ont un rapport de 0,40 et vont donc conserver une fraction de ciment anhydre dans la matrice. L'apport d'eau lié à l'immersion développerait ainsi de la résistance supplémentaire, possiblement en prolongeant l'hydratation des phases anhydres, stoppée par manque d'eau dans le cas de la cure en air.

Pour le ciment LBC (figure 4.11), la conversion n'est pas observable et il y a une croissance monotonique des résistances de 7 à 365 jours. À 90 jours, on enregistre pour les 3 conditions des résistances supérieures de 10 MPa à celles des bétons LBC muris en air.

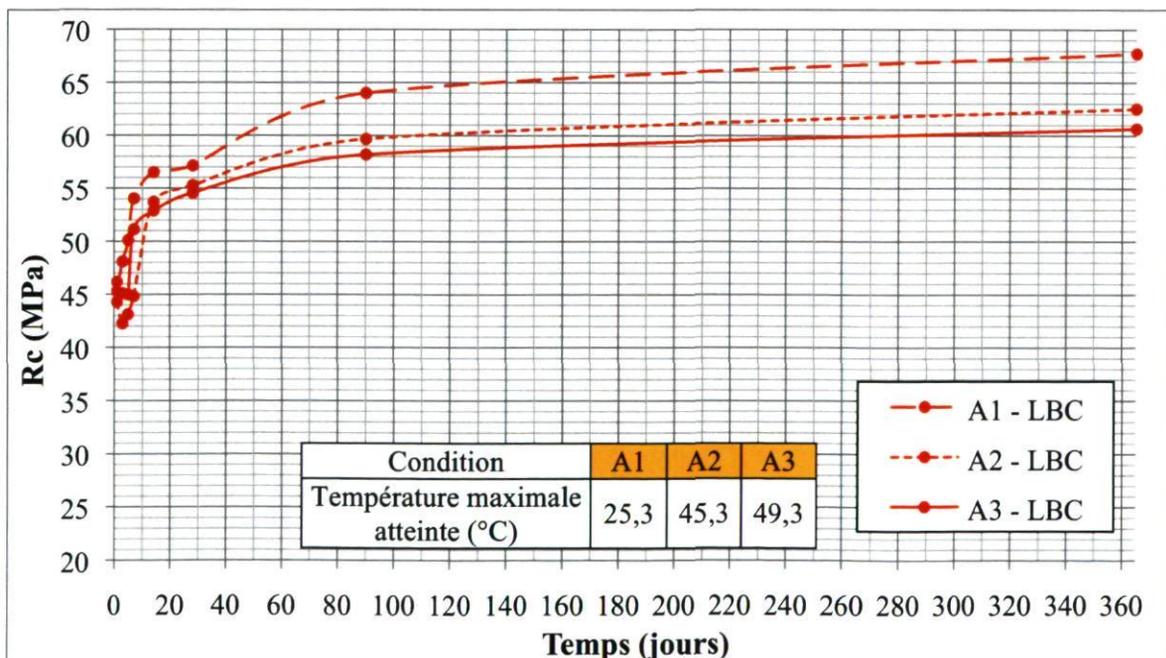


Figure 4.11 – Cure à 23 °C en Eau – LBC

La réaction progressive du laitier contenu dans le LBC mène à une hydratation continue de ce dernier sur une longue période. Roy (1992) démontre que, pour des liants composés à base de ciment Portland, seulement 8 à 16 % des particules du laitier sont hydratées à 32 jours. Majumdar et al. (1992) ont montré que pour un ciment alumineux mélangé à une quantité égale de laitier, les augmentations de résistances se poursuivent jusqu'à 5 ans (section 2.2.3).

Il a été dit précédemment pour le mélange de référence, qu'une fois l'eau entièrement consommée, il reste une fraction de phases liantes anhydre dans la microstructure solide. Ainsi, en raison de la faible vitesse de réaction du laitier par rapport aux autres phases des CACs, une grande partie de l'eau effective va réagir avec les CA pour former des aluminates de calcium hydratés et par la suite, l'hydratation du laitier ne peut plus progresser par manque d'eau. En plus de compléter l'hydratation des CA, on peut imaginer que l'apport d'eau liée à l'immersion permet aussi au laitier de continuer de réagir à long terme. Associés aux bienfaits de la formation de stratlingite sur la porosité des CACs, ces phénomènes pourraient expliquer l'augmentation progressive des résistances observées jusqu'à 365 jours et même probablement au-delà. À l'inverse, pour les cures en air, les bétons manquent d'eau à long terme pour engendrer ces réactions.

Les chutes de résistance observées pour la cure à 23 °C en air (figure 4.9) permettent d'affirmer que cet apport thermique suffit à initier la conversion en quelques semaines. Ainsi, pour la cure à 23 °C en eau, la conversion a certainement eu lieu, mais tellement lentement (au minimum une centaine de jours, voir figure 4.9) que ses effets n'ont pas paru, masqués par les augmentations de résistance liées à la réaction du laitier. L'évolution des résistances est dans ce cas un compromis entre degré de conversion et degré d'hydratation. Les résultats des cures en eau à de plus hautes températures permettront de confirmer cette hypothèse.

4.4 Cure à 38 °C

4.4.1 Cure en air

Les cures à 38 °C ont été réalisées dans la grande chambre environnementale présentée dans le chapitre précédent. L'humidité relative mesurée lors des essais était de 15,9 %. Avec de telles conditions environnementales, la question d'éventuelles pertes d'eau par séchage se pose puisqu'elles peuvent avoir une influence négative sur les résistances mécaniques du béton, et ainsi fausser l'interprétation des résultats. Afin de mettre en évidence et de quantifier ce phénomène, une seconde série d'éprouvettes a été produite, où les cylindres étaient emballés dans du papier aluminium autocollant afin de les isoler et d'empêcher les échanges d'eau avec l'air ambiant (figure 4.12 et 4.13). En supplément aux essais de compressions, des mesures de perte de masse de toutes les éprouvettes ont été effectuées sur une période de 14 jours.



Figure 4.12 – Cylindres scellés et non scellés

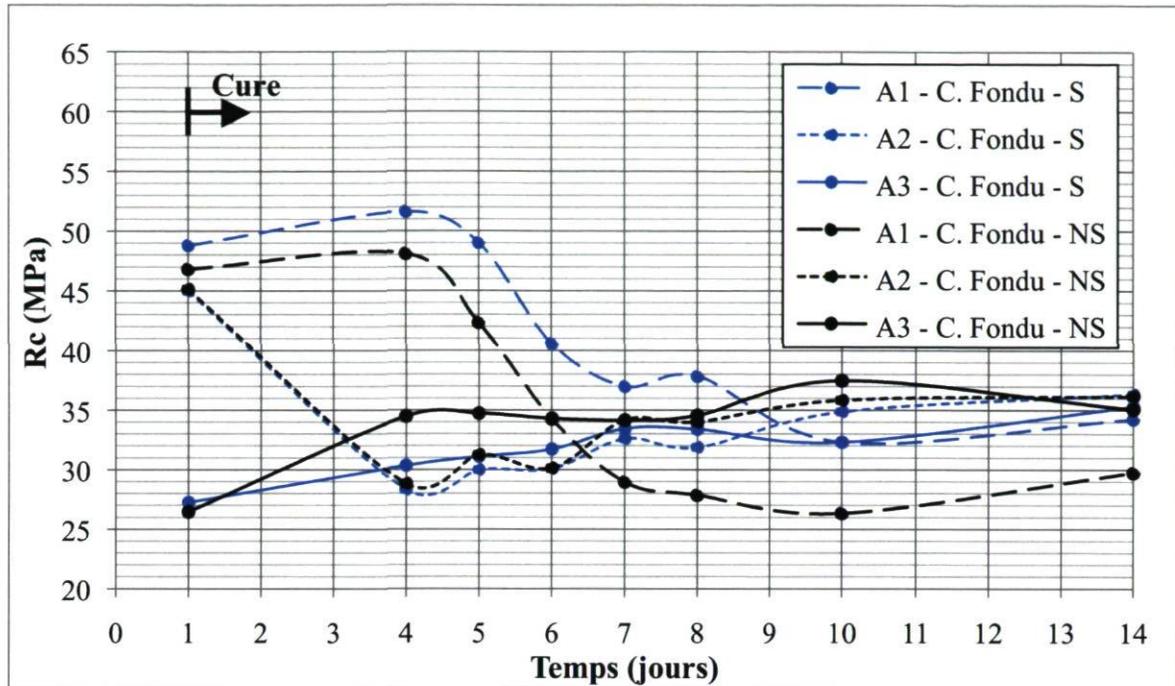


Figure 4.13 – Vue d'ensemble

La figure 4.14 présente l'évolution des résistances en compression pour le mélange avec Ciment Fondu, en condition scellée et non scellée. Les courbes de perte de masse correspondante sont présentées sur la figure 4.15.

Il est à préciser pour cette cure que de l'eau à 15 °C a été utilisée pour immerger les cylindres en condition A1, et non pas l'eau à température ambiante. C'est pour cela que les températures atteintes sont de l'ordre de 22 °C comparativement à 27-28 °C obtenu

précédemment. Cette configuration est exclusive à l'étude des pertes d'eau, et a été réalisée pour accentuer la différence entre un béton A1 et A3.



Condition	A1	A2	A3
Température atteinte – Scellés (°C)	22,3	49,0	60,3
Température atteinte - Non Scellés (°C)	21,3	51,6	61,1

Figure 4.14 – Cure à 38 °C en Air – Ciment Fondu – Scellés et non Scellés

Dans un premier temps, il est encore intéressant de noter la reproductibilité des résultats au terme des murissements dans les conditions A1, A2 et A3 (0-24 heures). Les éprouvettes scellées et non scellées ne proviennent pas de la même gâchée et leurs résistances initiales sont pratiquement identiques dans chaque cas.

Pour les courbes A1, la conversion débute après le 4^e jour (3 jours de cure) et semble achevée au 10^e jour. Les cylindres A2, plus proche d'un état final stable, achèvent leur conversion dans les premiers quatre jours. Comme observé précédemment pour les cures à 23 °C, les cylindres A3 sont déjà majoritairement convertis à 24 heures et gagnent progressivement de la résistance avec le temps, par réaction entre les phases anhydres restantes et l'eau effective encore disponible.

La résistance finale atteinte à 38 °C par la majorité des éprouvettes à 14 jours (environ 35 MPa) est la même que celle à 1 an pour la cure à 23 °C en air. Ainsi, par rapport à ce qu'on observe à 23 °C, la conversion à 38 °C se produit au minimum dix fois plus rapidement. La cure à 38 °C en eau (figure 4.18), menée jusqu'à 112 jours, confirmera l'état converti atteint dans ce laps de temps par cet apport énergétique.

Le phénomène particulier à remarquer est la résistance inférieure à 14 jours pour la condition A1 non scellée. Pour comprendre cet état plus faible, il faut regarder l'évolution des pertes d'eau de ces éprouvettes.

Toutes les éprouvettes ont une masse d'environ 4 kg \pm 100 g. Les pertes d'eau à 14 jours représentent ainsi approximativement 2 % de la masse du béton. Dans cette plage de mesure, la précision de la balance est de 1 gramme.

Pour les 50 éprouvettes scellées, aucune perte d'eau n'a été enregistrée. Les résultats des cylindres laissés à l'air libre sont présentés sur la figure 4.15. On y voit les pertes de masse des éprouvettes issues des 3 différentes conditions d'auto échauffement (A1, A2 et A3).

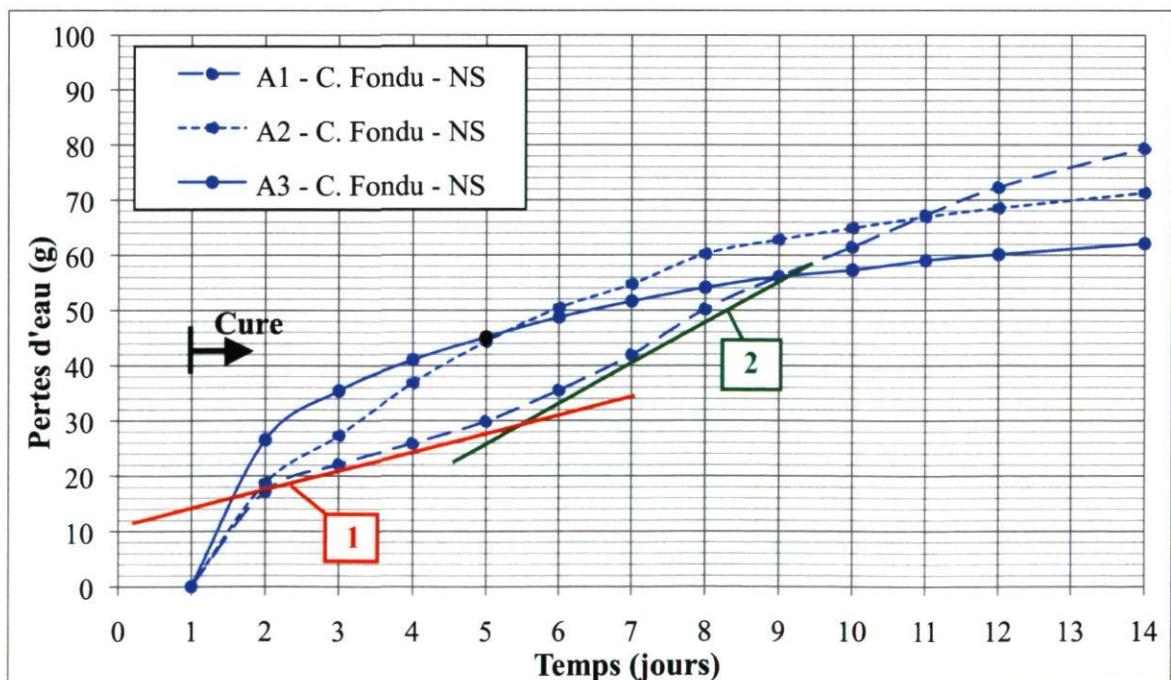


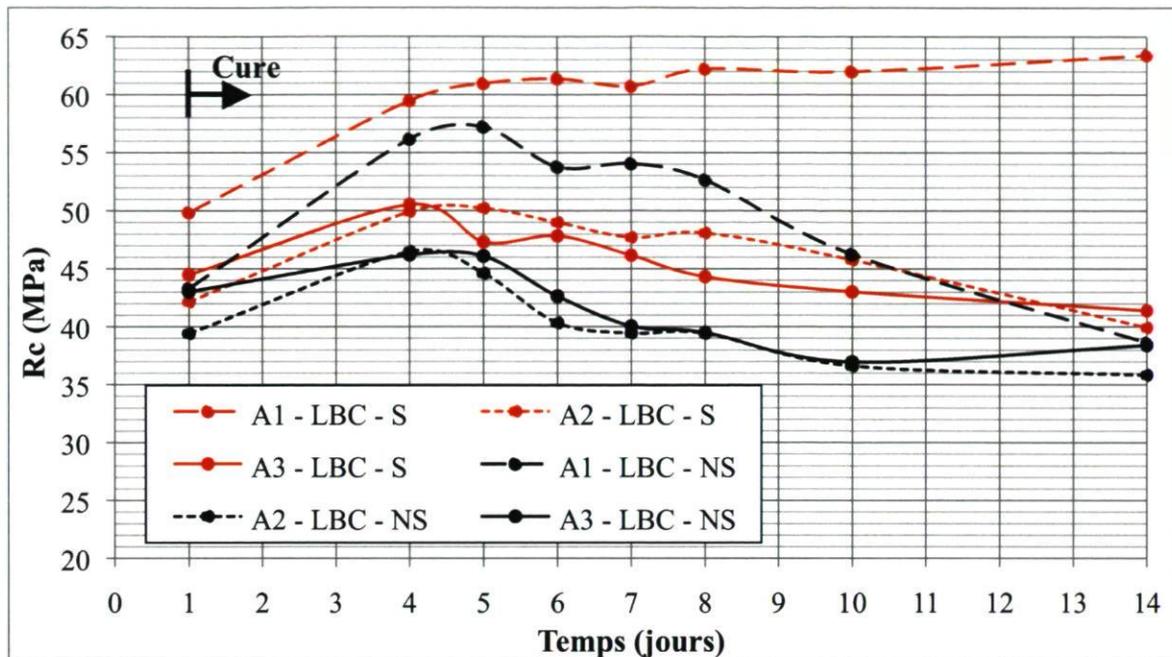
Figure 4.15 – Cure à 38 °C en Air – Ciment Fondu – Pertes de masses

Dans un environnement à 38 °C associé à de faibles humidités relatives (15.9 %), on remarque des pertes d'eau dès le premier jour d'exposition. D'ailleurs, 25 % à 45 % de l'eau perdue sur 14 jours est évaporée dans les premières 24 heures de cure. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'hydratation n'est pas encore complète, et qu'une grande quantité d'eau libre est alors disponible et exposée au séchage. Pour ce premier jour de cure, on observe une perte d'eau plus importante pour les cylindres A3 par rapport à ceux issus des 2 autres conditions (environ 10 grammes supplémentaires). Il y a une quantité d'eau chimiquement liée beaucoup moins importante avec les hydrates C_3AH_6 qu'avec les CAH_{10} . Il est donc probable que beaucoup plus d'eau libre soit disponible et sujette à l'évaporation dans le cas des cylindres A3, en grande partie convertis à 24 heures. Ceci pourrait expliquer cette plus forte évaporation au début de la cure.

Pour les éprouvettes A2 et A3, les pertes d'eau journalières ralentissent progressivement et atteignent respectivement 70 et 60 grammes à 14 jours.

Pour les cylindres A1, une accélération des pertes au 5^e jour est mise en évidence par les courbes de tendance « 1 » et « 2 » sur la figure 4.15, dont l'intersection coïncide avec le moment précis où les premiers effets de la conversion sur les résistances en compression sont observés. L'hypothèse posée est la suivante : les conséquences du traitement à 38 °C sur les résistances en compression sont importantes pour les cylindres A1, car leur constitution est majoritairement CAH_{10} à 24 heures. Lorsque ces éprouvettes convertissent, les CAH_{10} vont d'abord passer par la phase transitoire C_2AH_8 pour atteindre ensuite un état stable C_3AH_6 , et ces 2 étapes de transformation libèrent de l'eau (voir bilan stœchiométrique, figure 2.8). Dans cet environnement à 38 °C, une partie de cette eau produite lors de la conversion s'évapore des éprouvettes non scellées, et n'est alors plus disponible pour l'hydratation des phases stables. Ceci pourrait expliquer la résistance plus faible de 4,5 MPa observée à 14 jours pour les cylindres A1 non scellés par rapport aux cylindres scellés, qui conservent l'intégralité des molécules d'eau relâchées par la conversion.

Les résultats obtenus avec le ciment LBC sont présentés sur la figure 4.16.



Condition	A1	A2	A3
Température atteinte – Scellés (°C)	20,0	44,6	48,4
Température atteinte - Non Scellés (°C)	22,0	45,3	49,6

Figure 4.16 – Cure à 38 °C en Air – LBC – Scellé et non Scellé

Pour le ciment LBC, la conversion débute à environ 5 jours pour la majorité des éprouvettes et les résistances chutent à environ 40 MPa à 14 jours. Cet état de résistance semble indiquer que les valeurs observées à 120 jours pour la cure à 23 °C en air (42 MPa en A2, 49 MPa en A3 et 52 MPa en A1), ne sont pas des résistances d'un béton ayant complété la conversion. Même dans le cas de cette cure à 38 °C, il faudrait poursuivre le traitement pour pouvoir affirmer, grâce à l'évolution des résistances en compression, si la conversion est achevée.

Les hautes résistances observées pour la condition « A1 scellé » par rapport aux autres n'ont pas encore d'explication à ce jour.

Des mesures de masse ont aussi été faites sur le ciment LBC (figure 4.17) et les pertes d'eau à 14 jours sont du même ordre de grandeur que celles observées avec le Ciment Fondu, avec environ 80 grammes. La tendance est approximativement la même pour les cylindres issus des 3 conditions A1, A2 et A3, car l'hydratation du laitier servirait à limiter la conversion, qui a été jugée préjudiciable vis-à-vis du séchage pour la condition « A1 Ciment Fondu non scellé ».

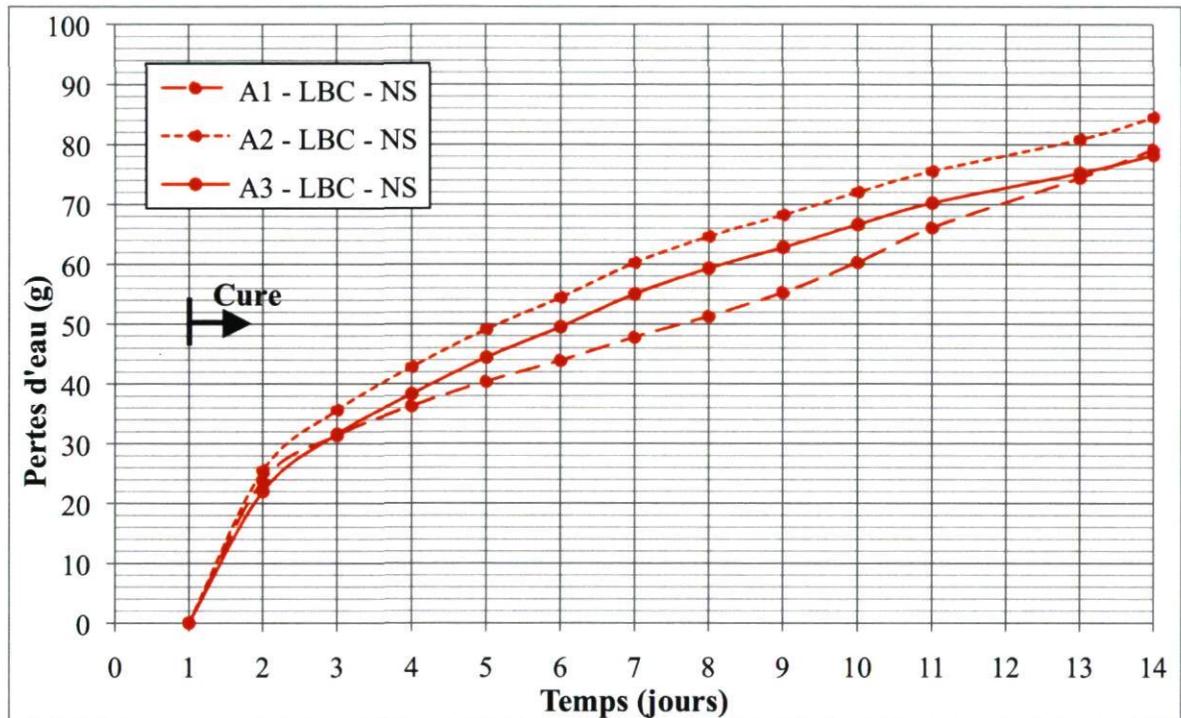


Figure 4.17 – Cure à 38 °C en Air – LBC – Pertés de masses

Il est clair qu'au regard des résultats obtenus par le traitement à 38 °C en air, il est judicieux de se diriger vers une cure en eau afin d'éviter d'avoir à emballer les éprouvettes pour empêcher leur séchage.

4.4.2 Cure en eau

Les résultats de la cure à 38 °C en eau présentés sur la figure 4.18.

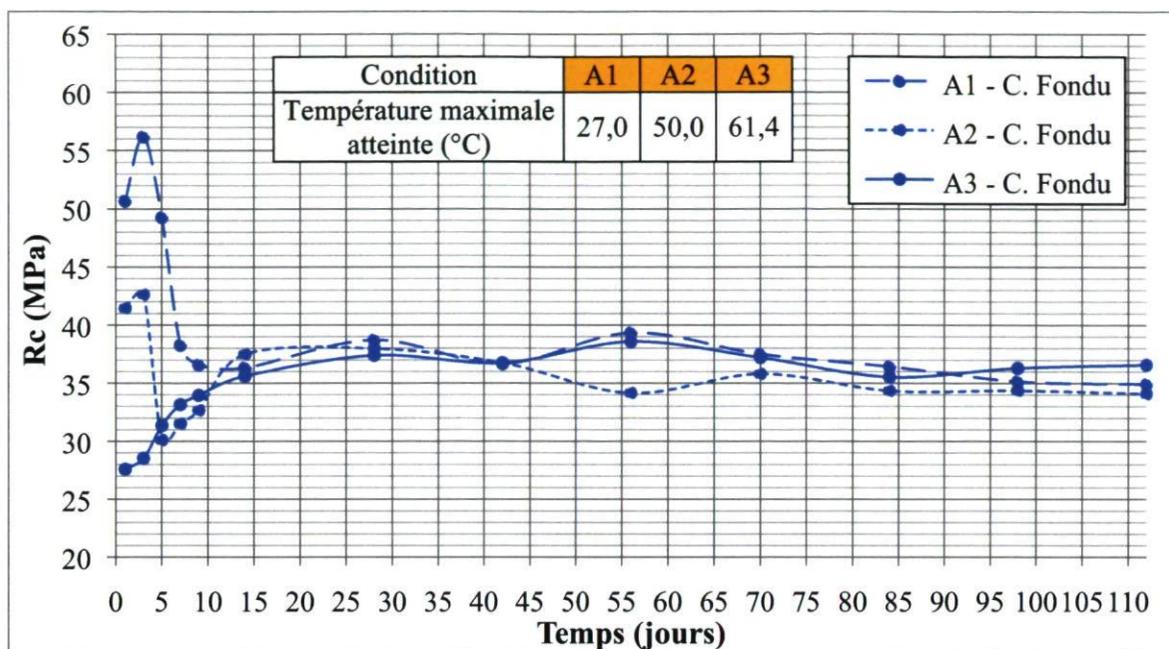


Figure 4.18 – Cure à 38 °C en Eau – Ciment Fondu

Par rapport aux résultats précédents obtenus avec le Ciment Fondu, la résistance des éprouvettes A1 est légèrement supérieure à 24 heures. Comme pour la cure à 38 °C en air, les résistances des cylindres A2 et A3 se rejoignent après 4 jours de cure. Les cylindres A1 mettent 13 jours à compléter la conversion. Par la suite, les résistances restent stables jusqu'à 112 jours. Il est possible d'affirmer que ces 3 types d'éprouvettes ont achevé leur conversion à environ 14 jours lorsqu'elles sont soumises à un environnement de 38 °C.

Des analyses DRX ont été faites à 14 jours afin de vérifier cette hypothèse et les résultats confirment l'état converti suggéré par les résistances en compression. Les phases métastables ont en effet disparues au profit des C_3AH_6 et du AH_3 (figure 4.19, 4.20 et 4.21). À ce stade, il n'y a pratiquement plus de ciment anhydre. Ainsi, lorsque la température de murissement augmente, la principale conséquence est une cinétique de conversion plus rapide.

Il avait été observé précédemment pour la cure à 23 °C que les éprouvettes immergées étaient plus résistantes à long terme que celles muris en air, en raisons de l'eau disponible pour l'hydratation des phases anhydres et du séchage des éprouvettes muris en air. Dans le cas de la cure à 38 °C en eau, les résistances à 14 jours sont pratiquement les mêmes que la cure en air, soit environ 35 MPa (excepté la condition A1 pour les raisons détaillées à la section 4.4.1). L'immersion des cylindres n'a donc pas encore un grande influence au 14^e jour de murissement.

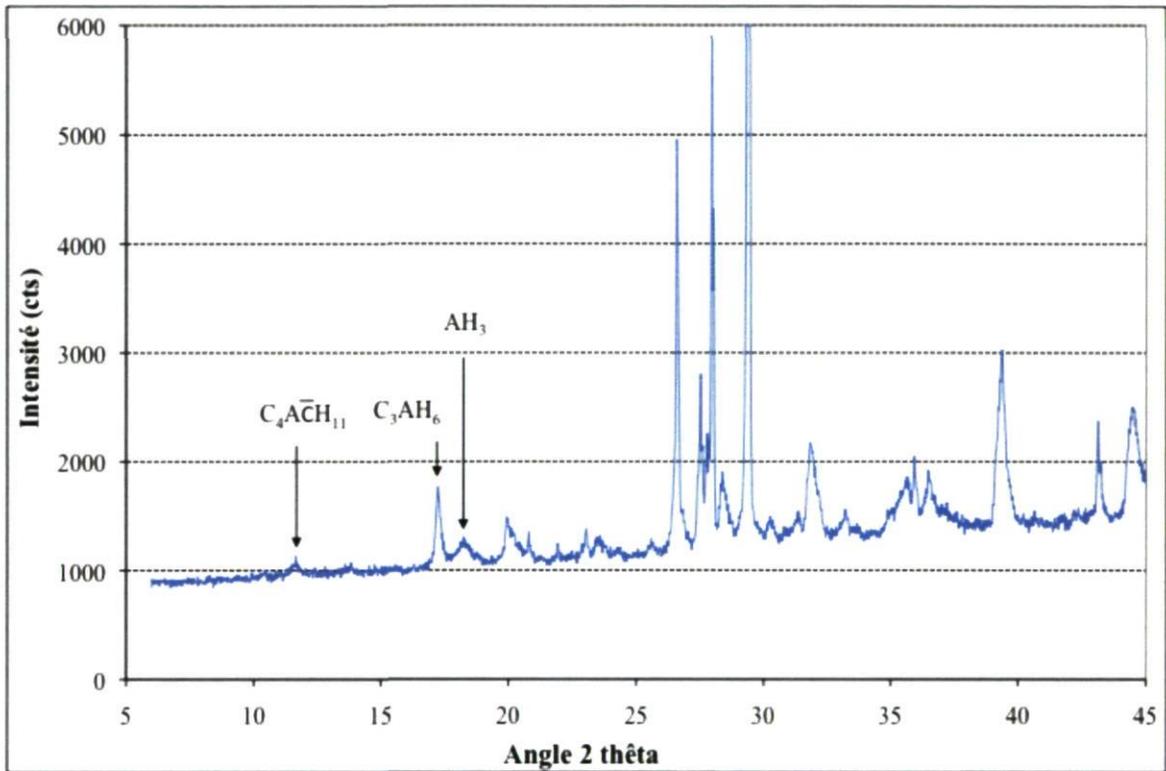


Figure 4.19 – Analyse DRX – A1 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C

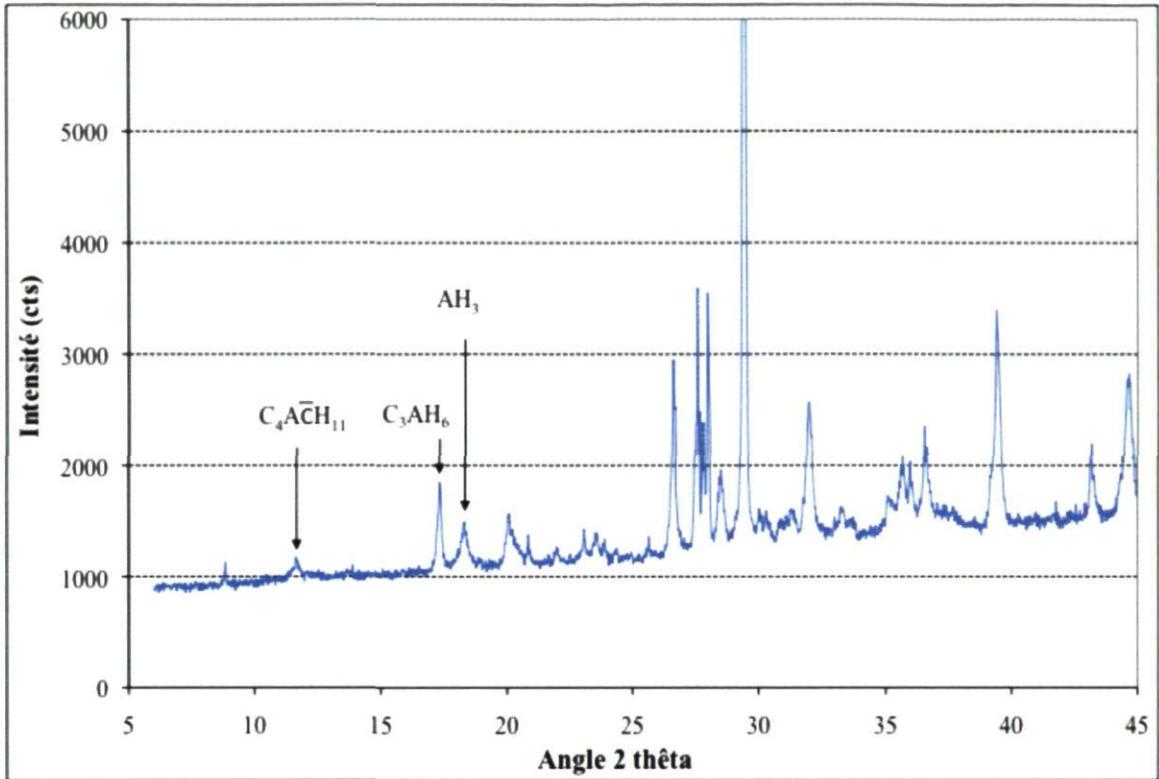


Figure 4.20 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C

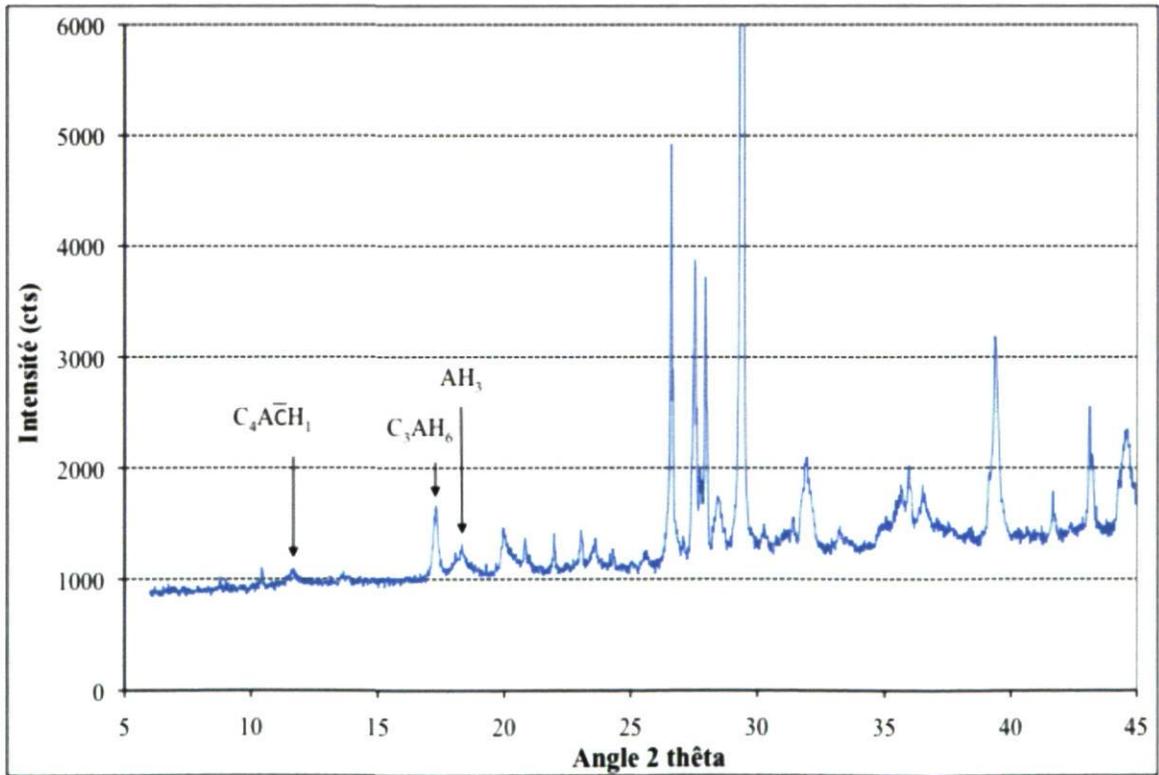


Figure 4.21 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 38 °C

Voici les résultats pour le ciment LBC mûri à 38 °C en eau (figure 4.22).

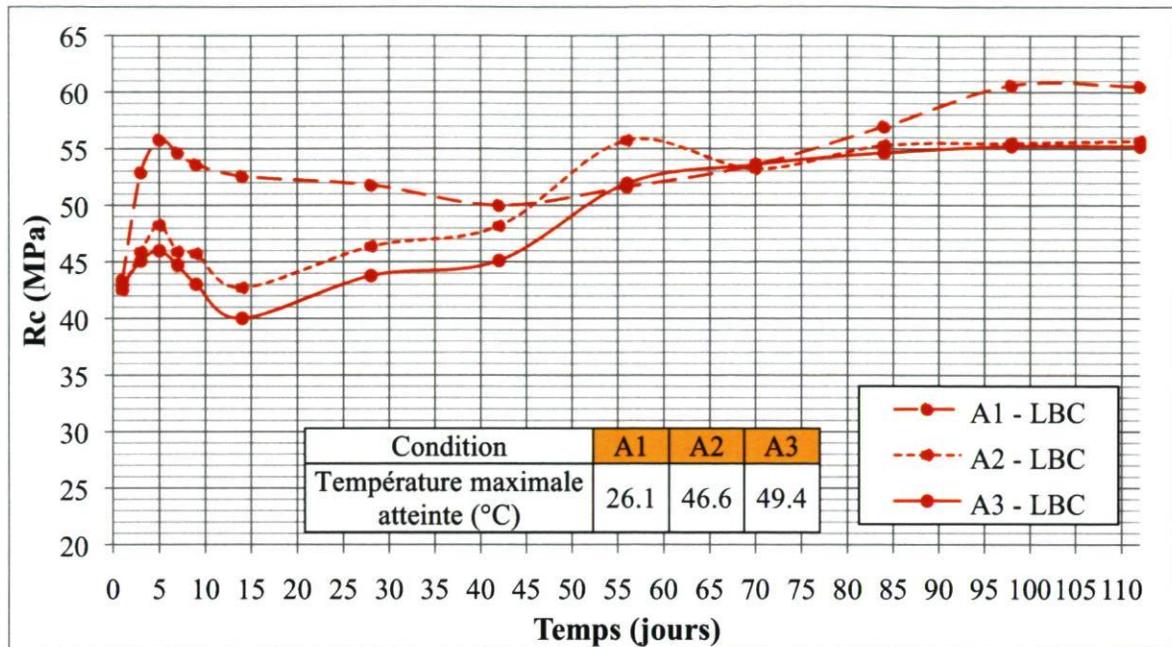


Figure 4.22 – Cure à 38 °C en Eau – LBC

De la même manière que pour la cure à 23 °C en eau, la cure immergée pour le LBC conduit à des résistances élevées à long terme. Deux phénomènes se superposent : la conversion, et l'augmentation des résistances due à l'hydratation des phases anhydres (CA et laitier), qui avait déjà été observées pour la précédente cure en eau (figure 4.11). La conversion survient entre les jours 5 et 14 pour les éprouvettes A2 et A3. Elle est plus longue dans le cas des cylindres A1 avec une décroissance observée jusqu'à 42 jours.

Aucune chute de résistance n'avait été constatée sur le LBC pour la cure à 23 °C en eau (figure 4.11), car les effets de la conversion sont probablement lents à cette température, et se trouvent masqués par l'augmentation des résistances due à l'hydratation du laitier. Dans le cas de la cure à 38 °C en eau, la conversion se produit beaucoup plus rapidement (1 à 2 semaines pour les éprouvettes A2 et A3), ce qui permet de l'observer.

À long terme, les résistances semblent se stabiliser, soit par épuisement des phases réactives ou par manque d'espace pour les produits d'hydratation [Yudenfreund (1972)]. La première explication semble la plus plausible dans le cas des CACs. On obtient des

résistances à 112 jours de 55 MPa pour les conditions A2 et A3 et de 60 MPa pour la condition A1.

4.5 Cure à 50 °C

À la suite de la mise en évidence des effets indésirables des cures en air, à des températures et des humidités relatives favorisant un séchage important, il devient évident qu'on doit s'orienter préférentiellement vers une cure immergée, en particulier lorsqu'il s'agit de caractériser la résistance en compression du matériau. Ainsi, pour cette température de cure (50 °C), seules les cures en eau sont étudiées.

4.5.1 Ciment Fondu

Les résultats de la cure à 50 °C en eau sont présentés sur la figure 4.23.

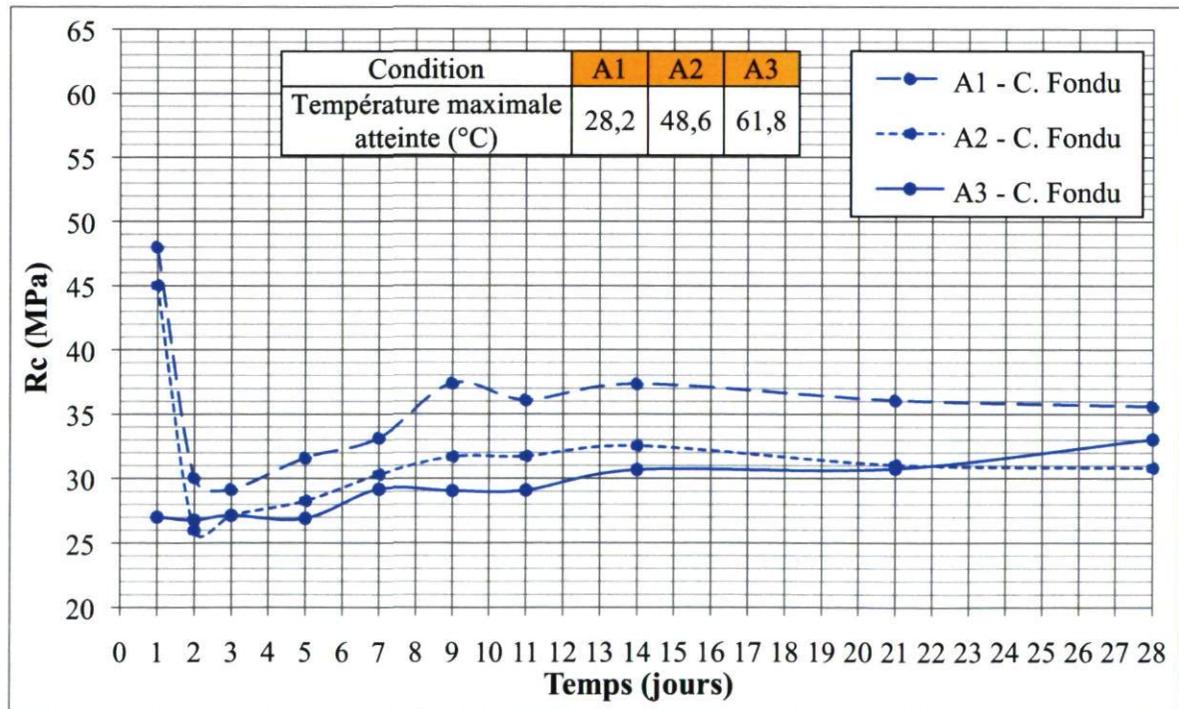


Figure 4.23 – Cure à 50 °C en Eau – Ciment Fondu

À 50 °C en eau, la conversion des éprouvettes A2 et A1 a lieu en 1 et 2 jours de cure seulement, ce qui est 5 à 7 fois plus rapide que lors de la cure à 38 °C. Ils passent respectivement de 45 MPa et 48 MPa à 26 MPa et 29 MPa. Ce changement de phases a lieu tellement rapidement que l'on constate par la suite une augmentation des résistances jusqu'au 9^e jour. C'est possiblement l'hydratation initiale des phases anhydre qui se complète, grâce à la disponibilité des molécules d'eau issues de la réaction de conversion et de la situation d'immersion. De la même manière que pour les cures à 38 °C, les résistances à 28 jours pour les bétons de Ciment Fondu muri à 50 °C dans l'eau sont d'environ 35 MPa.

Des essais DRX ont également été réalisés pour cette cure à 50 °C en eau afin d'en savoir plus sur l'évolution de la microstructure. Des échantillons issus des cylindres A1 et A2 ont été analysés à 2 jours (figure 4.24 et figure 4.25), ainsi qu'une éprouvette A3 à 14 jours (figure 4.26).

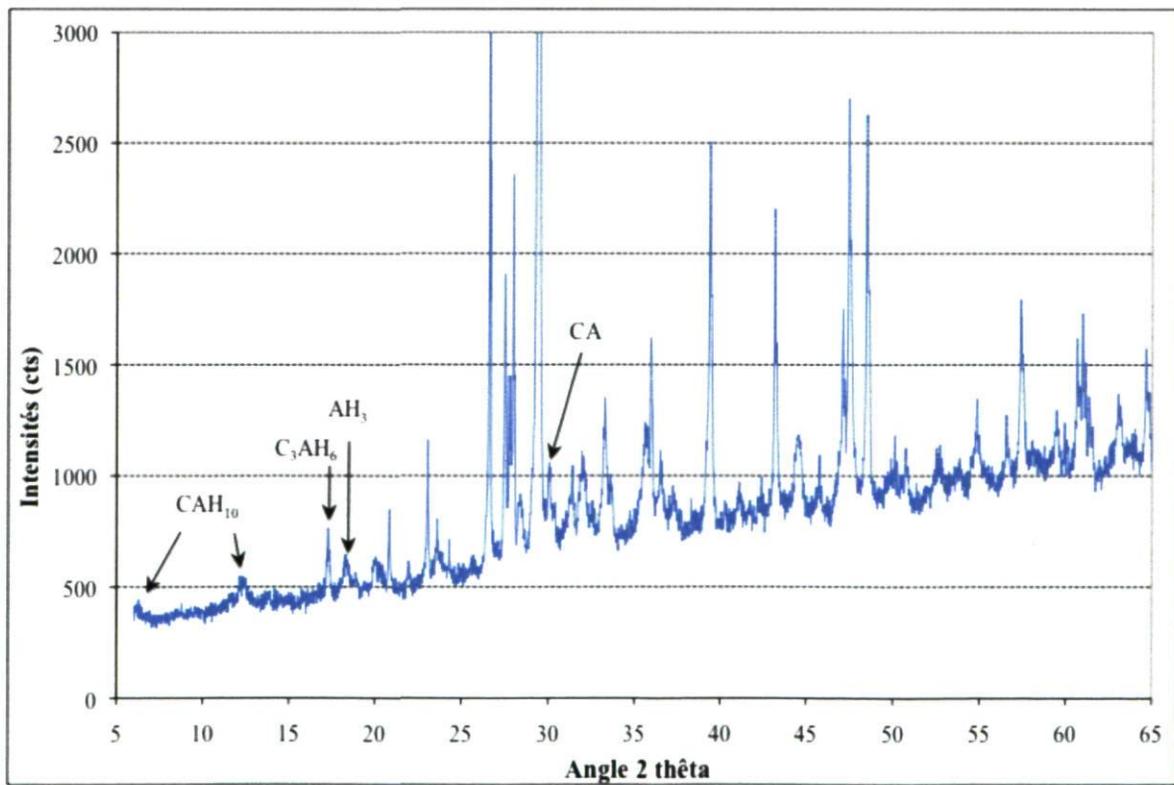


Figure 4.24 – Analyse DRX – A1 - Ciment Fondu – 2 jours - cure à 50 °C

L'analyse d'un cylindre A1 après 1 jour de cure à 50 °C en eau met en évidence la présence des phases CAH_{10} et C_3AH_6 . À ce stade, les résistances en compression n'ont pas encore atteint la valeur minimale observée un jour plus tard, et la quantité restante de CAH_{10} confirme que la conversion n'est pas encore achevée. Le point intéressant est l'absence de la phase C_2AH_8 , pourtant énoncée comme état intermédiaire lors de la conversion des CAH_{10} . Il semblerait qu'à une température de traitement de 50 °C, ces hydrates soient très instables et se transforment rapidement en C_3AH_6 .

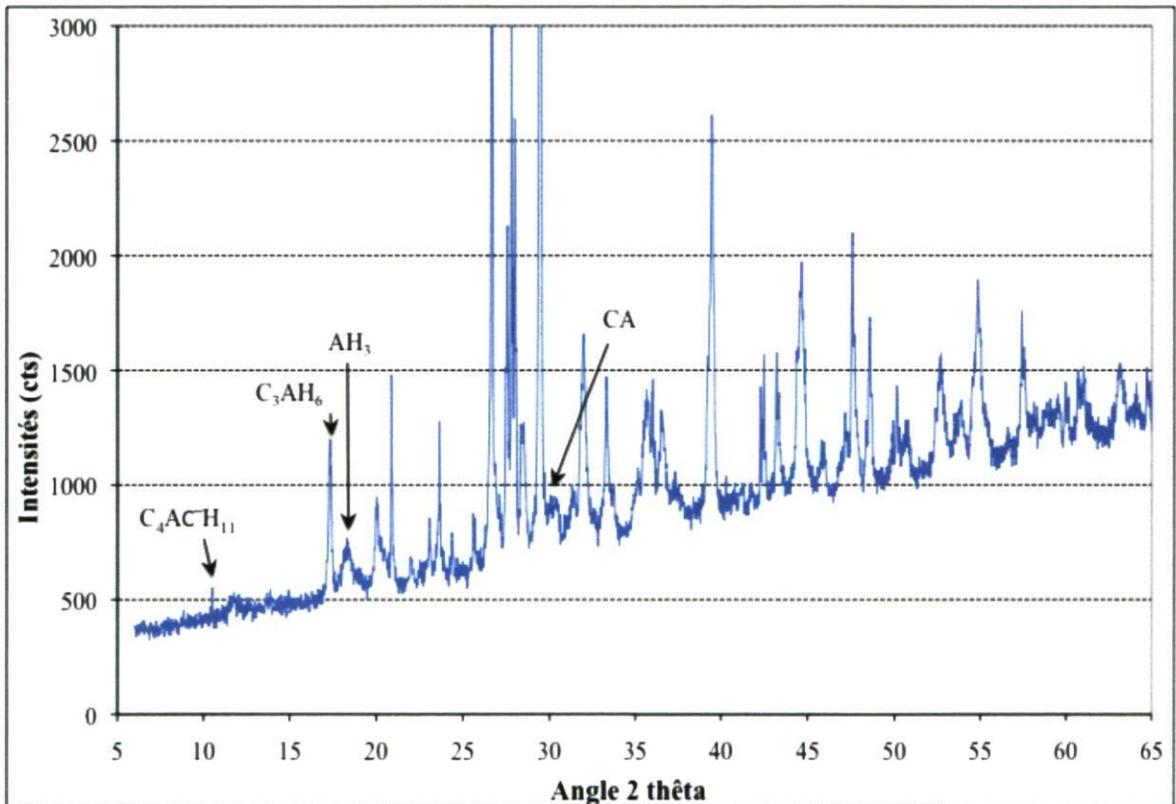


Figure 4.25 – Analyse DRX – A2 - Ciment Fondu – 2 jours - cure à 50 °C

En accord avec les résistances en compression, les cylindres A2 ne présentent plus d'hydrates métastables à 2 jours, et peuvent donc être considérés comme convertis à ce stade.

La prédominance des hydrates C_3AH_6 et AH_3 est évidente pour un cylindre A3 ayant passé 13 jours dans une eau à 50 °C (figure 4.26). Cette analyse DRX est cependant intéressante, car elle met en évidence l'absence de ciment anhydre à 14 jours comparativement aux analyses faites à 2 jours pour les cylindres A1 et A2. Cette information confirme l'hypothèse émise précédemment. L'augmentation des résistances constatée après conversion avant le 14^e jour est donc due à l'hydratation des phases anhydres.

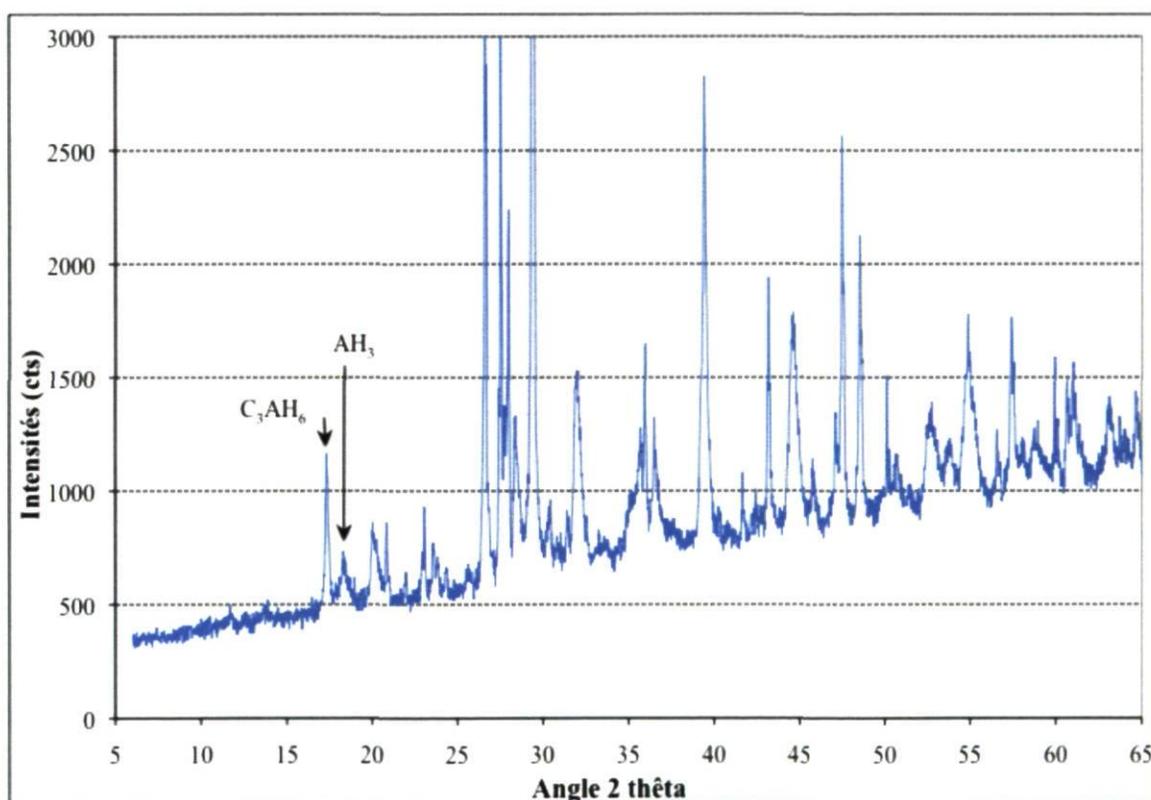


Figure 4.26 – Analyse DRX – A3 - Ciment Fondu – 14 jours - cure à 50 °C

4.5.2 Ciment LBC

Les résultats de la cure à 50 °C en eau sont présentés sur la figure 4.27.

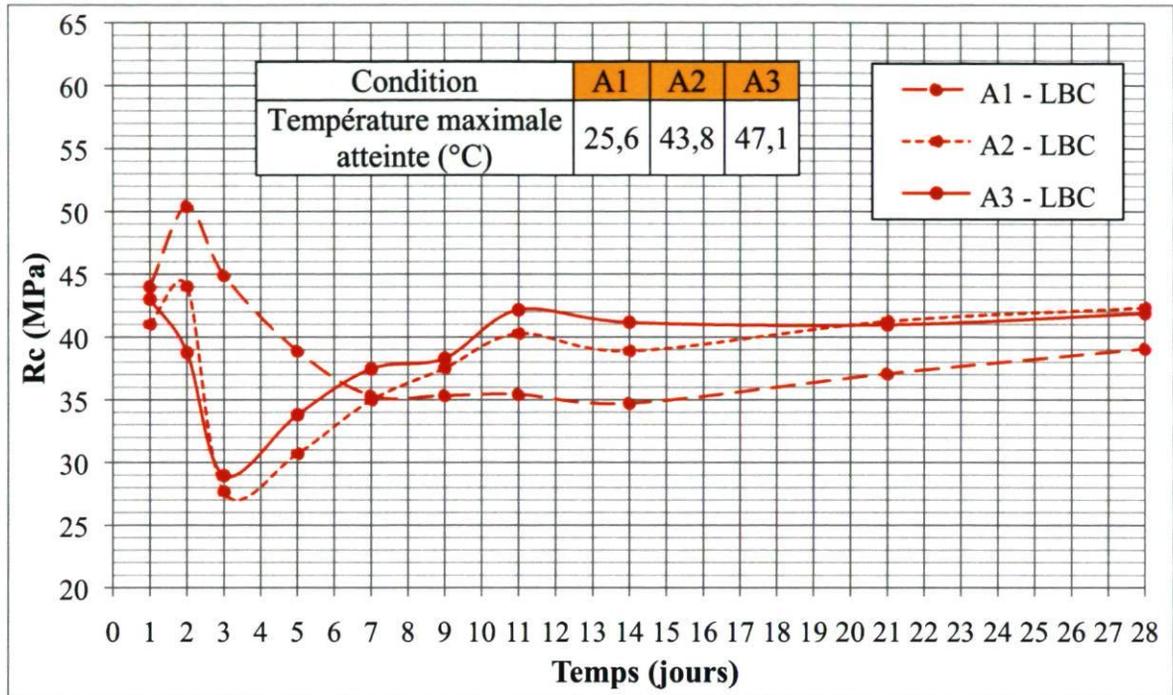


Figure 4.27 – Cure à 50 °C en Eau – LBC

Dans un premier temps, et comme pour le Ciment Fondu, on constate pour cette cure à 50 °C une diminution du temps de conversion par rapport aux précédentes températures. L'état « converti » pour les cylindres A1 est atteint à 7 jours comparativement à 42 jours à 38 °C. De la même manière que pour la cure à 38 °C en eau (figure 4.22), la conversion est plus longue pour les cylindres muris en condition A1 que pour les éprouvettes A2 et A3 qui, à 3 jours (2 jours de cure), passent par un point bas. Les cylindres issus de ces 2 dernières conditions semblent être constituées des mêmes hydrates, car l'évolution de leurs résistances est similaire tout au long de la cure. La faible différence qu'ils présentent peut s'expliquer par un degré d'hydratation différent, dû à la température atteinte pendant le durcissement (43,8 °C en A2 pour 47,1 °C en A3).

Le point particulier constaté sur la figure 4.27 est la valeur finale des résistances car, même si elles sont regroupées, elles sont inférieures de 5 MPa aux résistances observées à

28 jours pour la cure à 38 °C en eau. Comme constaté dans la revue de documentation (voir section 2.2.3), cela semble confirmer que le murissement à de hautes températures affecte les résistances en compression des mélanges CACs/laitier.

Une autre observation concerne la résistance légèrement inférieure à partir de 7 jours des cylindres A1 par rapport aux autres conditions A2 et A3. Ce phénomène sera à nouveau observé pour les cures à 50 °C présentées dans le chapitre 5. Cet état plus résistant (après conversion) des éprouvettes A2 et A3 par rapport aux cylindres A1 serait vraisemblablement dû à la formation plus importante de stratlingite. En effet, ce composé est une phase très proche des C_2AH_8 , et sa formation se trouve donc favorisée pour des températures de durcissement entre 30 °C et 60 °C. Il a été mis en évidence dans la revue de documentation que la stabilité de la stratlingite est affectée pour des températures de conditionnement ≥ 40 °C. Lorsque les cylindres A1 (constitués principalement de CAH_{10} à 24 heures) convertissent à un traitement thermique de 50 °C, la phase stable formée serait alors préférentiellement les C_3AH_6 , au détriment de la stratlingite. À long terme, la stratlingite formée dans les cylindres A2 et A3 se transformera probablement en C_3AH_6 , si le traitement à 50°C est poursuivie.

Afin de confirmer le degré de conversion, des analyses DRX ont été effectués à 7 jours sur un cylindre A1 (figure 4.28) et à 3 jours pour les cylindres A2 et A3 (figure 4.29 et figure 4.30). On constate dans les 3 cas l'absence d'hydrates métastable et la présence de C_3AH_6 . Il y a également présence pour les 3 types d'échantillons d'une certaine quantité de stratlingite (C_2ASH_8), qui était absente à 24 heures (figure 4.5, 4.6 et 4.7).

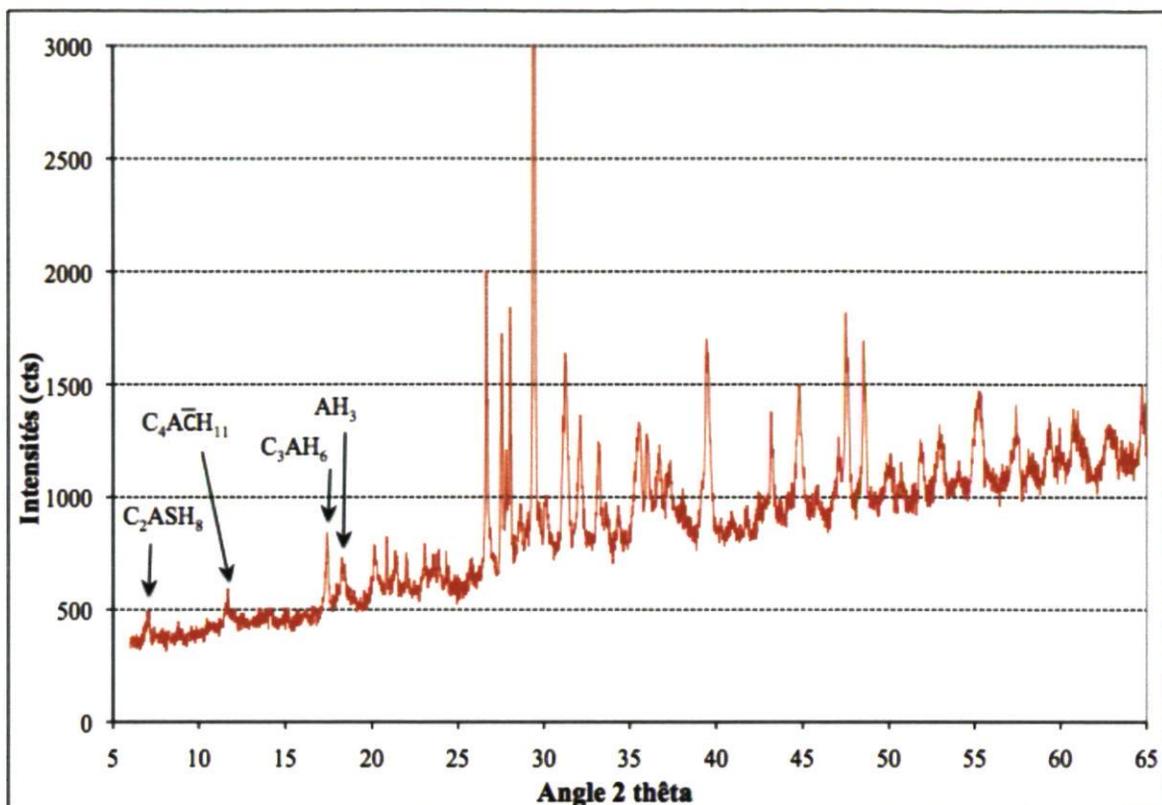


Figure 4.28 – Analyse DRX – A1 - Ciment LBC – 7 jours - cure à 50 °C

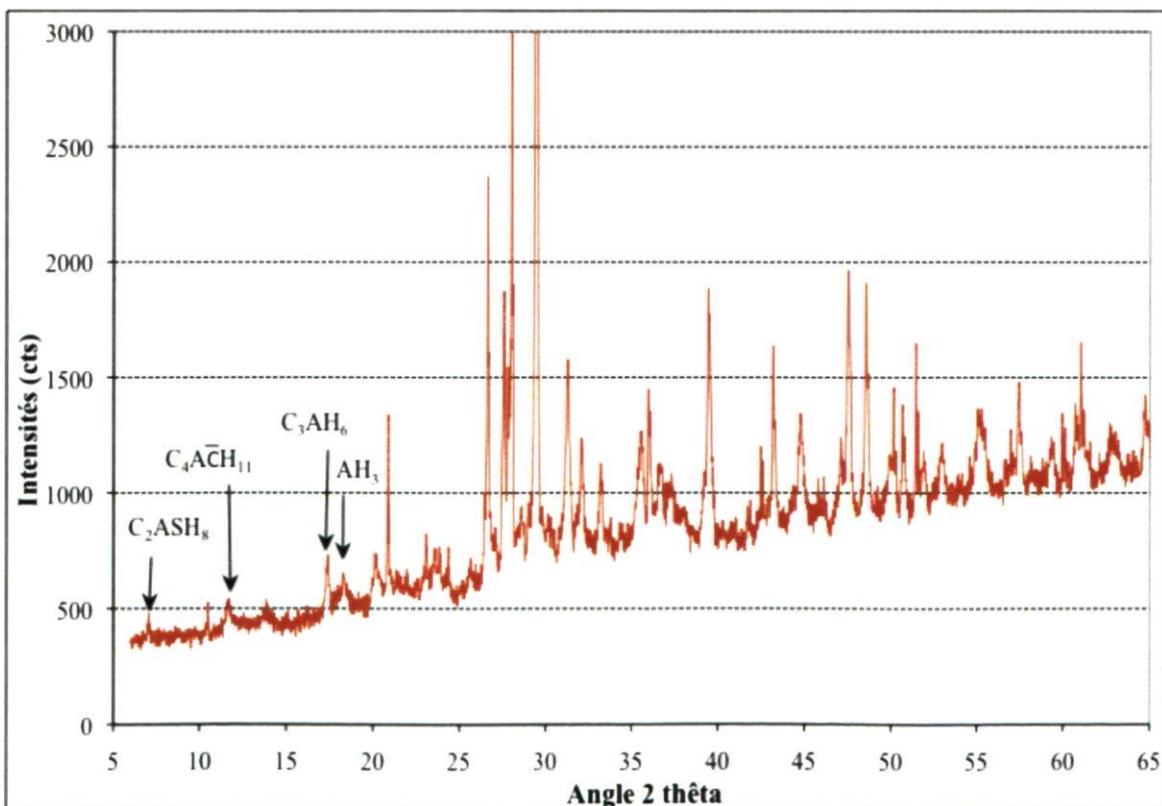


Figure 4.29 – Analyse DRX – A2 - Ciment LBC – 3 jours - cure à 50 °C

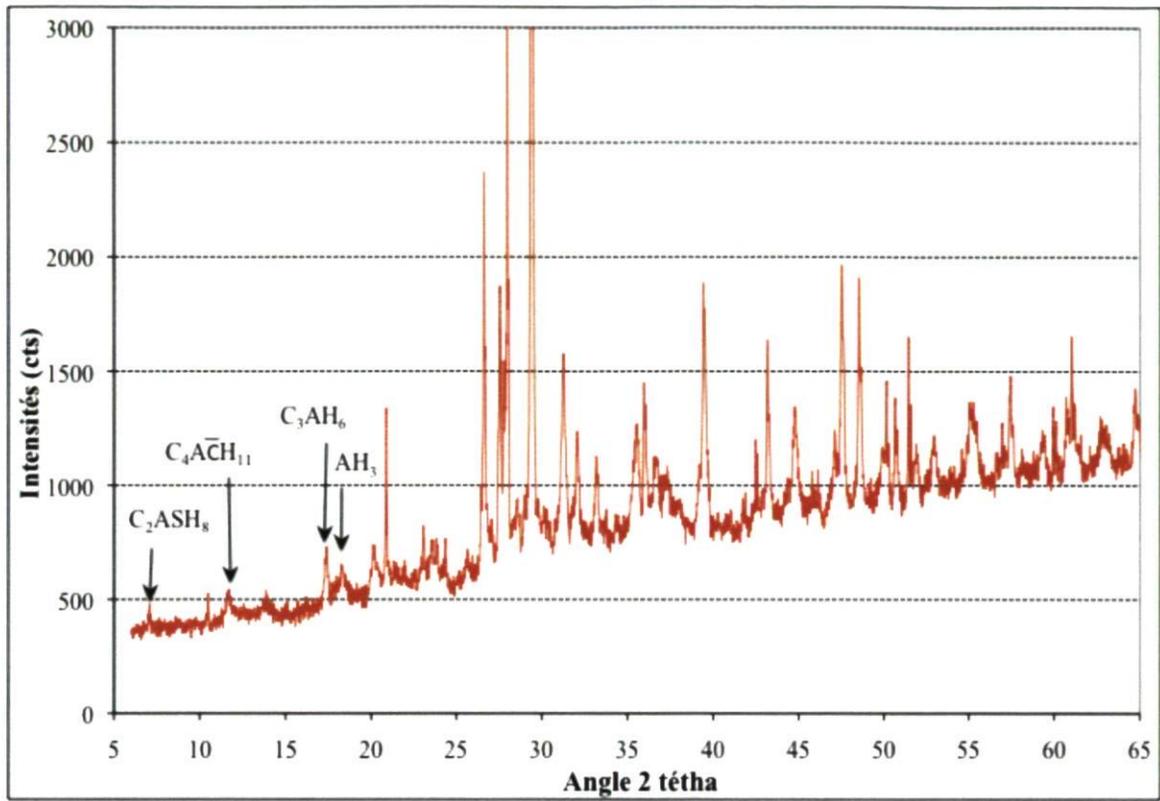


Figure 4.30 – Analyse DRX – A3 - Ciment LBC – 3 jours - cure à 50 °C

4.6 Conclusions et observations

Dans un premier temps, la cure à 38 °C en air a mis en évidence un phénomène de séchage des éprouvettes pouvant modifier l'évolution des résistances en compression. Dans l'objectif de développer un essai de contrôle de la qualité fiable, il a donc été décidé de se diriger vers une cure en eau. Après analyse des résultats pour les cures à 23 °C, 38 °C et 50 °C en eau, voici les principales informations à retenir. Pour le Ciment Fondu :

- les conditions A1, A2 et A3 conduisent à des états d'hydratation bien différenciés, traduits par des résistances à 1 jour et des évolutions différentes dans le temps ;
- la conversion des éprouvettes A1 et A2 est observée pour les 3 cures. Pour les cylindres A3, la croissance monotone des résistances signifie que ces éprouvettes ont déjà atteint un état stable (converti) à 24 heures ;
- plus la température de cure est importante, plus la cinétique de conversion est rapide ; par exemple, les éprouvettes A2 mettent 90 jours à rejoindre une résistance proche de celle d'A3 à 23 °C, 5 jours à 38 °C et seulement 2 jours à 50 °C en eau ;
- après conversion, la résistance finale pour toutes les éprouvettes est la même avec environ 35 MPa, quelle que soit la température de murissement.

Pour le ciment LBC :

- en raison du plus faible auto échauffement, la condition A3 ne conduit pas à un état converti à 24 heures ;
- les cures immergées entraînent des apports de résistance à long terme, en raison de l'eau qu'elles mettent à disponibilité pour le matériau ;
- la conversion est responsable de chutes de résistance moins importantes que pour le Ciment Fondu, en raison de la formation d'un nouvel hydrate stable (la stratlingite : C_2ASH_8), de plus faible densité que les C_3AH_6 . De la même manière, plus la température est élevée, plus la conversion survient rapidement.

4.7 Proposition d'essai

L'objectif du projet est de trouver un essai de caractérisation de la résistance en compression minimale d'un béton CACs, valable à la fois pour le Ciment Fondu et le ciment LBC. La méthode idéale est un traitement thermique en laboratoire, indépendant des conditions de murissement initiales (0-24 heures). Pour des raisons pratiques et de robustesse, une cure en eau est préconisée, car plus facile à reproduire en laboratoire qu'une cure en air, pour laquelle les conditions de ventilation et d'humidité peuvent varier d'un équipement à l'autre. Les cures en air occasionnent également un séchage des éprouvettes, ayant un impact sur les résistances en compression.

Pour le Ciment Fondu, la cure à 23 °C (figure 4.10) est peu adaptée pour obtenir rapidement une valeur de résistance représentative d'un béton converti. Il faudrait attendre plus de 3 mois.

La cure à 38 °C (figure 4.18) semble également ne pas convenir, car il faut trouver une échéance où les 3 conditions d'auto échauffement (A1, A2 et A3) présentent, à la fois la résistance minimum du mélange dans le temps, et une valeur similaire. En utilisant les données de la figure 4.18 (cure à 38 °C en eau), on aurait ainsi au plus tôt une caractérisation à 14 jours avec 36 MPa. Or, on s'aperçoit que la condition A2 est passée par un point inférieur (30 MPa) au 5^e jour. Dans ce cas précis, la caractérisation serait surestimée de 6 MPa.

La cure à 50 °C (figure 4.23) apparaît donc plus appropriée dans l'optique d'une caractérisation. La chaleur apportée génère une conversion presque aussi rapide dans le cas d'un cylindre A1 que d'un cylindre A2. Ainsi, leurs évolutions sont pratiquement identiques. L'échéance choisie serait ici 3 jours (donc 2 jours de cure) ce qui donne une résistance en compression de 28 MPa. C'est en effet la *résistance minimum garantie* du béton dans le temps car par la suite, aucune diminution n'est constatée. Cependant, cette méthodologie d'essai se complique avec l'analyse des comportements du ciment LBC (figure 4.27), car le minimum des résistances en compression n'intervient pas au même moment pour les cylindres A1, A2 et A3. Le traitement choisi pour le Ciment Fondu (2

jours de cure à 50 °C en eau) ne convient donc pas nécessairement pour le LBC, car la résistance des cylindres A1 serait en effet grandement surestimée, avec 45 MPa au lieu des 35 MPa observés après 6 jours de cure. Si on choisit ainsi une caractérisation à 7 jours, où les 3 conditions affichent une résistance identique, les points bas à 3 jours pour les cylindres A2 et A3 (27,5 MPa et 29,0 MPa) sont préjudiciables si le béton en service subit des températures de 50 °C. Cependant, en pratique, des températures de 50 °C pendant de longues périodes sont peu probables en raison des cycles jour/nuit, en particulier si l'hydratation initiale a été métastable (température maximale du béton ≤ 60 °C durant le durcissement). Ainsi, les faibles résistances observées à 3 jours semblent irréalistes pour un ouvrage en chantier. Un essai après 6 jours de cure à 50 °C devient alors cohérent pour le LBC, à condition de ne pas exposer durant la première semaine le béton à de hautes températures sur de longues périodes. Si l'on considère que le béton ne sera pas exposé à des températures ≥ 38 °C sur de longues périodes, la cure à 38 °C en eau (figure 4.19) serait ainsi le cas le plus défavorable. La résistance minimum qu'on y observe est celle des cylindres A3 à 14 jours (40 MPa). La valeur obtenue après 6 jours de cure à 50 °C (figure 4.27) est donc sécuritaire (35 MPa).

En pratiquant le même essai sur le Ciment Fondu, une caractérisation à 7 jours donnerait une valeur d'environ 30 MPa comparativement à 28 MPa pour la procédure sélectionnée précédemment pour ce liant (choix d'une caractérisation à 3 jours). La faible différence observée est très acceptable en comparaison du bénéfice apporté par un essai commun aux 2 liants.

L'essai de caractérisation proposé ici pour le mélange de référence (400 kg/m^3 et $E/L = 0,40$) est donc le suivant : après un jour dans les conditions thermiques aléatoires du chantier, les éprouvettes sont envoyés en laboratoire afin de subir une cure immergée à 50 °C pendant 6 jours. La valeur obtenue faisant alors foi de la *résistance minimum garantie* du béton pendant toute sa durée de vie. L'intérêt de cette durée de cure réside aussi dans le caractère pratique du procédé. Avec une caractérisation à exactement une semaine après le contact eau/liant, on s'assure en principe de l'ouverture du laboratoire le jour de l'essai.

Chapitre 5 - Robustesse de l'essai

5.1 Introduction

Les résultats générés jusqu'à présent montrent que la procédure la mieux adaptée pour l'évaluation de la résistance en compression *minimum garantie* d'un béton CACs est une immersion à 50 °C pendant 6 jours. Dans ce chapitre, la robustesse de l'essai est vérifiée en faisant varier plusieurs paramètres du mélange de référence afin d'en évaluer l'impact sur l'évolution des résistances mécaniques. Toutes les éprouvettes étudiées dans cette section sont ainsi soumises, à la suite des 3 conditions d'auto échauffement A1, A2 et A3, à une cure à 50 °C en eau pendant 28 jours.

D'abord, le comportement de mélanges préparés à 2 autres rapports E/C, à savoir 0,35 et 0,45, est étudié. Ensuite, l'influence du type de granulats (calcaire et siliceux) sur les résistances en compression et la conversion est mise en évidence. Certains mélanges ont aussi été fabriqués à 5 °C et à 35 °C (constituants et malaxage), influençant ainsi les températures atteintes dans les conditions A1, A2 et A3, et bien évidemment les résistances qui y sont associées. Enfin, l'effet de l'ajout de superplastifiant est vérifié. La plupart des résultats sont présentés par conditions d'auto échauffement (A1, A2 et A3) afin de pouvoir mieux comparer l'influence de ces paramètres.

Dans ce chapitre, certaines données de l'évolution thermique des éprouvettes pendant les premières 24 heures n'ont pas pu être mesurées en raison d'une défaillance de l'appareil de mesure.

5.2 Rapport eau/ciment

Le rapport eau/ciment est le paramètre principal affectant les résistances en compression d'un béton. Il détermine la porosité de la pâte de ciment hydraté, qui est directement reliée aux résistances mécaniques du béton. Dans cette section, les résultats du mélange fabriqué avec un rapport eau/liant de 0,40 sont issus des données du chapitre 4.

5.2.1 Ciment Fondu

5.2.1.1 Condition A1 (Auto 1)

Les résultats pour la cure A1 sont présentés sur la figure 5.1.

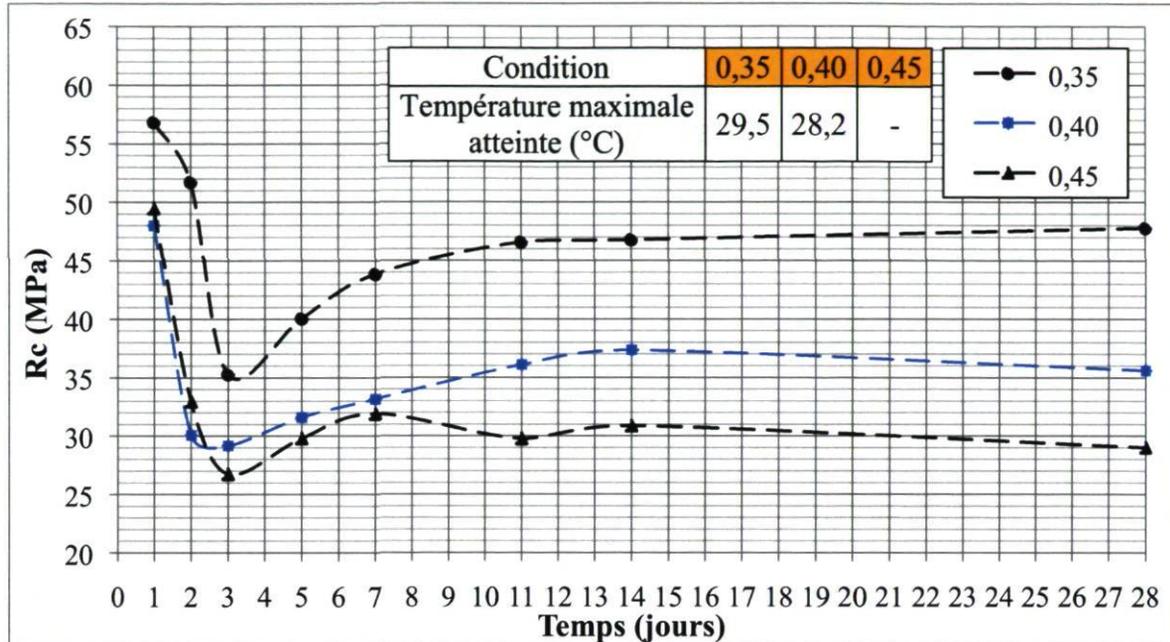


Figure 5.1 - 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

Pour les rapports E/C de 0,40 et 0,45, les éprouvettes A1 présentent des résistances à 24 heures pratiquement identiques (environ 49 MPa). En revanche, la résistance pour le ratio 0,35 est plus élevée de 8 MPa.

Pour les 3 courbes, la conversion a lieu exactement sur la même période. Peu importe la quantité d'eau dans le mélange, toutes les éprouvettes passent par un point bas après 2 jours de cure. Il est intéressant de noter que les 2 mélanges 0,35 et 0,45 chutent de 22 MPa pendant la conversion. Par la suite, on observe une légère augmentation des résistances jusqu'à 14 jours, attribuée précédemment à l'hydratation des phases anhydres restantes.

Les résistances après conversion sont, telles qu'attendu, inversement proportionnelle à la quantité d'eau dans le mélange. On observe à 28 jours, 29,0 MPa pour le ratio 0,45, 35,5 MPa pour le 0,40 et 47,5 MPa pour le ratio 0,35.

5.2.1.2 Condition A2 (Auto 2)

Les résultats pour la cure A2 sont présentés sur la figure 5.2.

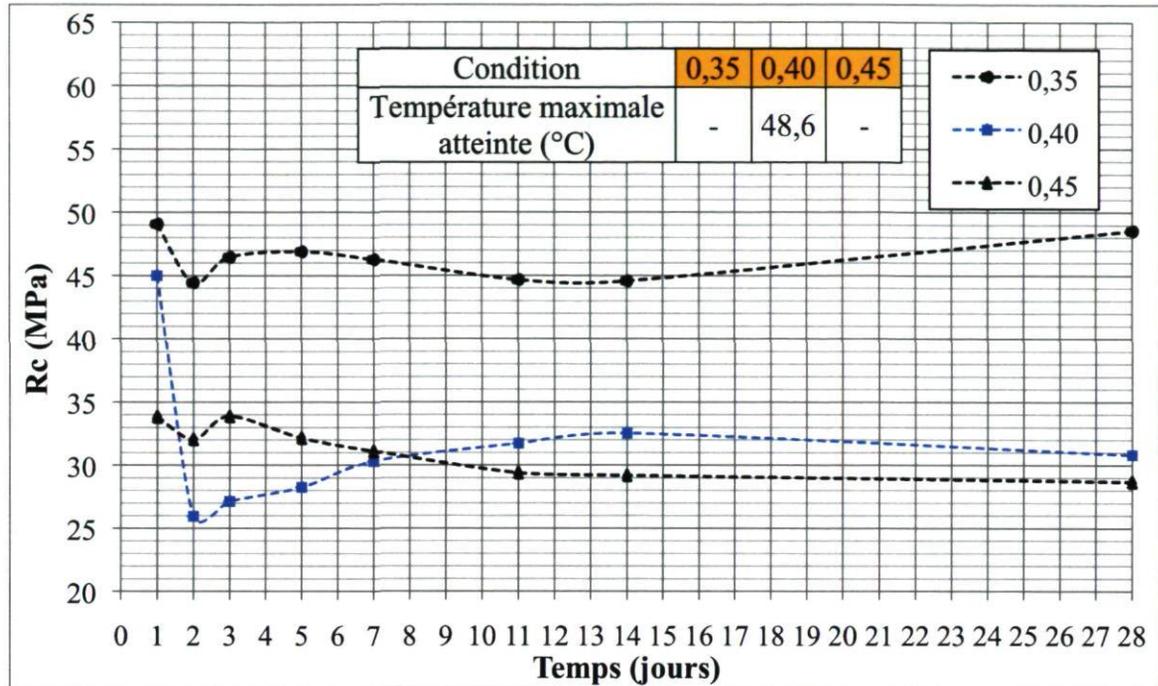


Figure 5.2 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

La première observation dans le cadre de la condition A2 est la faible diminution de résistance des cylindres 0,35 et 0,45 lorsque comparé au mélange de référence (E/C = 0,40). Malheureusement, les historiques de température subis par ces cylindres durant les premières 24 heures n'ont pas pu être mesurés (bris d'équipement).

La résistance à 1 jour pour E/C = 0,45 est assez faible, laissant supposer de hautes températures de durcissement et un état d'hydratation partiellement converti. Les faibles chutes de résistances observées à 2 jours pour ce mélange semblent confirmer cette hypothèse. Il semblerait que ce soit la même chose pour le ratio 0,35, où le comportement est pratiquement le même.

Les valeurs de résistance à 28 jours pour les ratios 0,40 et 0,45 sont approximativement de 30 MPa.

5.2.1.3 Condition A3 (Auto 3)

Les résultats pour la cure A3 sont présentés sur la figure 5.3.

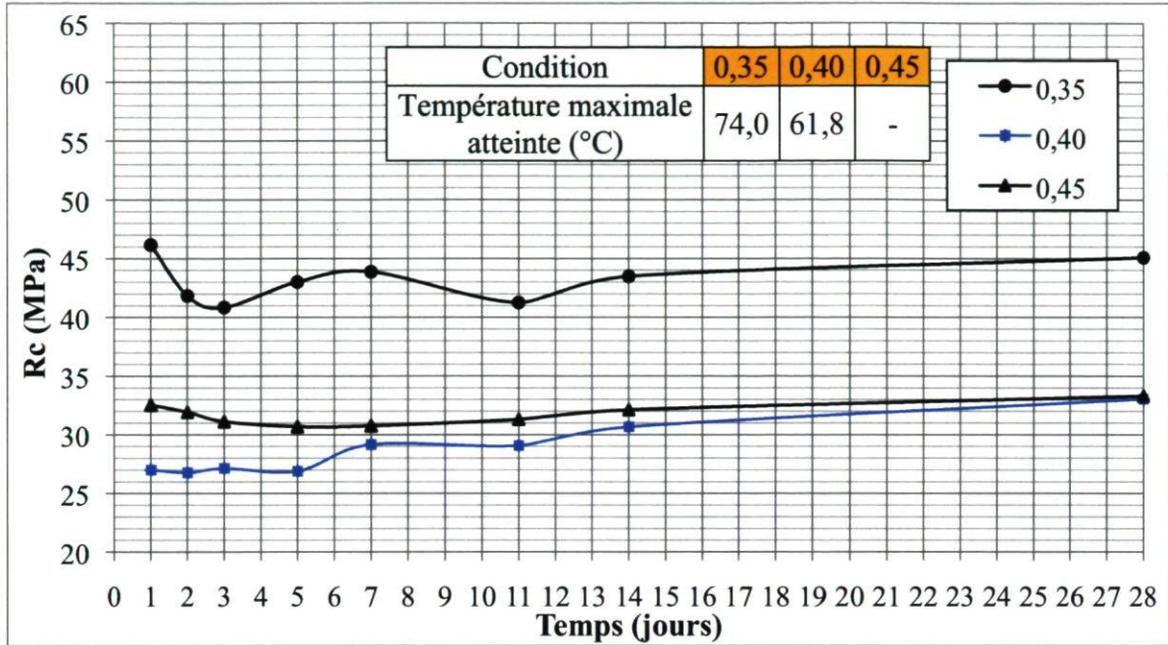


Figure 5.3 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

Sur la base de l'évolution des résistances, les 3 mélanges à l'étude peuvent être considérées comme converties à 24 heures. Comme constaté pour la condition A1, le mélange fabriqué au ratio 0,35 dégage plus de chaleur que le mélange de référence (74 °C contre 62 °C). Malgré un degré d'hydratation vraisemblablement plus faible (quantité d'eau moins importante), c'est supposément la présence de porosité non saturée qui s'oppose à la dissipation de la chaleur.

Pour ces cylindres issus de la condition A3, on observe une légère diminution des résistances pour E/C = 0,35, passant de 46 MPa à 41 MPa en 2 jours de cure. Ce cas particulier est difficile à expliquer.

On remarque à nouveau des résistances supérieures aux 2 autres pour le ratio 0,35, tout au long de l'expérimentation. Ceci a pour effet de diminuer l'écart de résistance à 24

heures entre les cylindres A1 et les cylindres A3, (approximativement 20 MPa pour les ratios 0,40 et 0,45 ; 10 MPa pour le ratio 0,35).

De la même manière que pour les cylindres issus de la condition A2, les résistances à 28 jours des éprouvettes fabriquées aux ratios 0,40 et 0,45 sont similaires. Il semblerait que pour des ratios E/C élevés, les effets de la conversion soit plus important que l'impact de la quantité d'eau du mélange.

5.2.2 Ciment LBC

5.2.1.1 Condition A1 (Auto 1)

Les résultats pour la condition A1 sont présentés sur la figure 5.4.

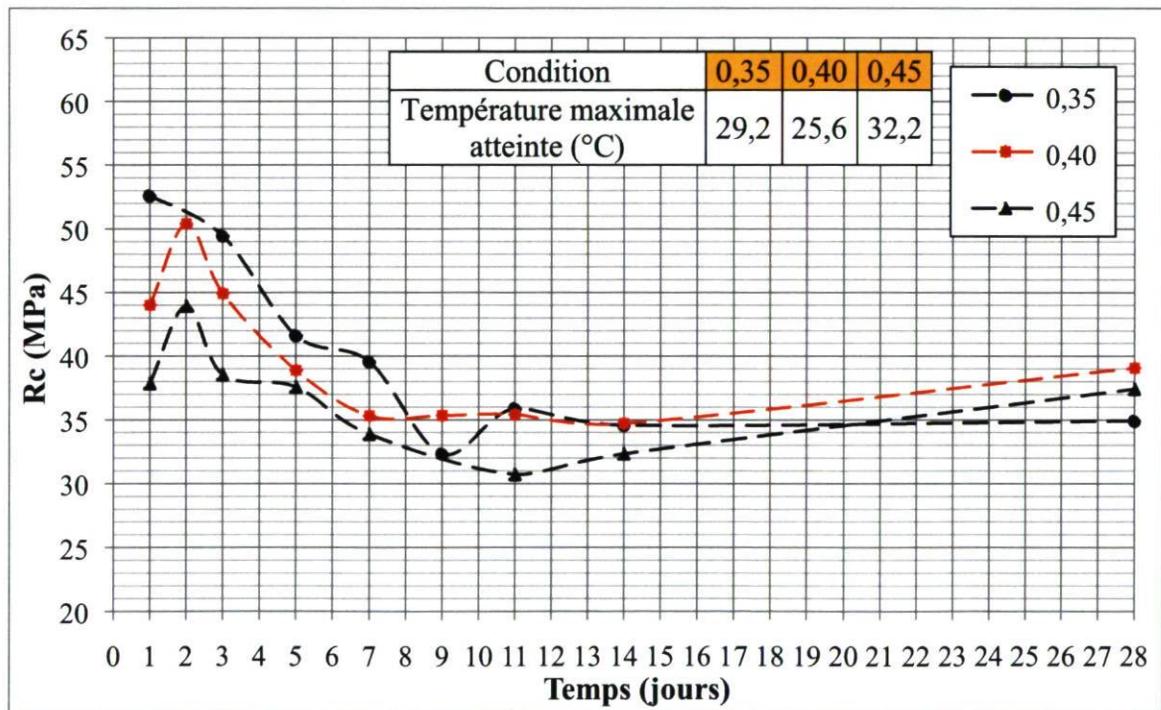


Figure 5.4 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

Les résultats observés pour le Ciment Fondu se répètent : le béton chauffe plus pour le rapport E/C de 0,35 que pour le mélange de référence. Cependant, les différences de température observées pour les 3 mélanges sont peu significatives en condition A1, et les résistances à 24 heures sont dans un ordre croissant : 38,0 MPa (0,35), 44,0 MPa (0,40) et

52,5 MPa (0,45). Dans le cas des cylindres ayant un ratio E/C de 0,35, aucune montée des résistances n'est constatée à court terme comparativement aux 2 autres.

Malgré qu'il ait plus chauffé, le mélange fabriqué à 0,45 de rapport E/C met plus de temps pour achever la conversion, avec un point bas observé à 11 jours contre 7 jours pour le mélange de référence.

Les résistances finales sont très proches les une des autres ce qui supporte l'idée que le mélange cimentaire du liant LBC a un effet positif à moyen terme sur la porosité des bétons stables, pour des quantités d'eau supérieures ou égales à un ratio E/C de 0,40.

5.2.1.1 Condition A2 (Auto 2)

Les résultats pour la condition A2 sont présentés sur la figure 5.5.

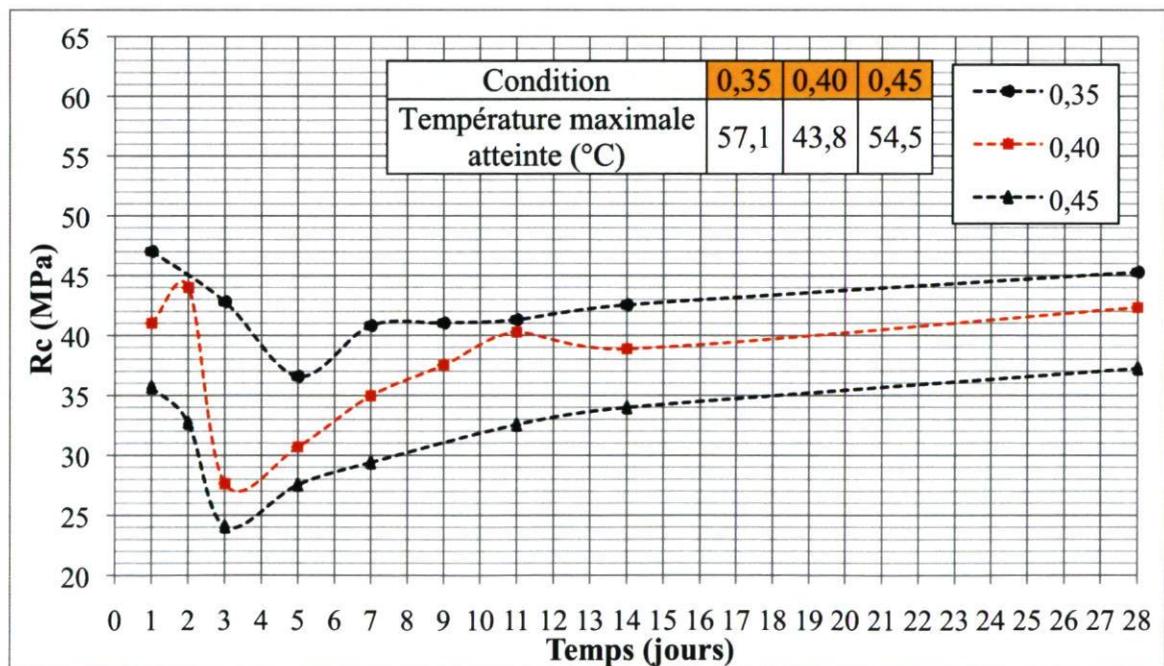


Figure 5.5 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

Comme pour la condition A1, les températures atteintes pendant le durcissement sont moins élevées pour le mélange de référence que pour les 2 autres. Dans le cas des cylindres fabriqués avec un ratio de 0,35, ce phénomène est attribué à l'effet isolateur de la porosité

non saturée du mélange. En ce qui concerne le mélange 0,45, cela pourrait être causé par un plus haut degré d'hydratation. Pour cette condition A2, les valeurs à 24 heures sont pratiquement les mêmes que celles obtenues après traitement à 28 jours. Entre les 2, on constate une diminution des résistance due à la conversion suivie d'une augmentation progressive.

La conversion se complète en 2 jours de cure pour les cylindres faits aux ratios 0,40 et 0,45, comparativement à 5 jours pour le ratio 0,35, qui atteint pourtant les températures les plus élevées lors du durcissement. Ainsi, dans le cas d'une microstructure constituée principalement de C_2AH_8 à 24 heures (température de durcissement entre 30 °C et 60 °C), il semblerait qu'une constitution moins poreuse retarde la cinétique de conversion.

5.2.1.1 Condition A3 (Auto 3)

Le graphique de l'évolution des cylindres A3 se trouve à la figure 5.6.

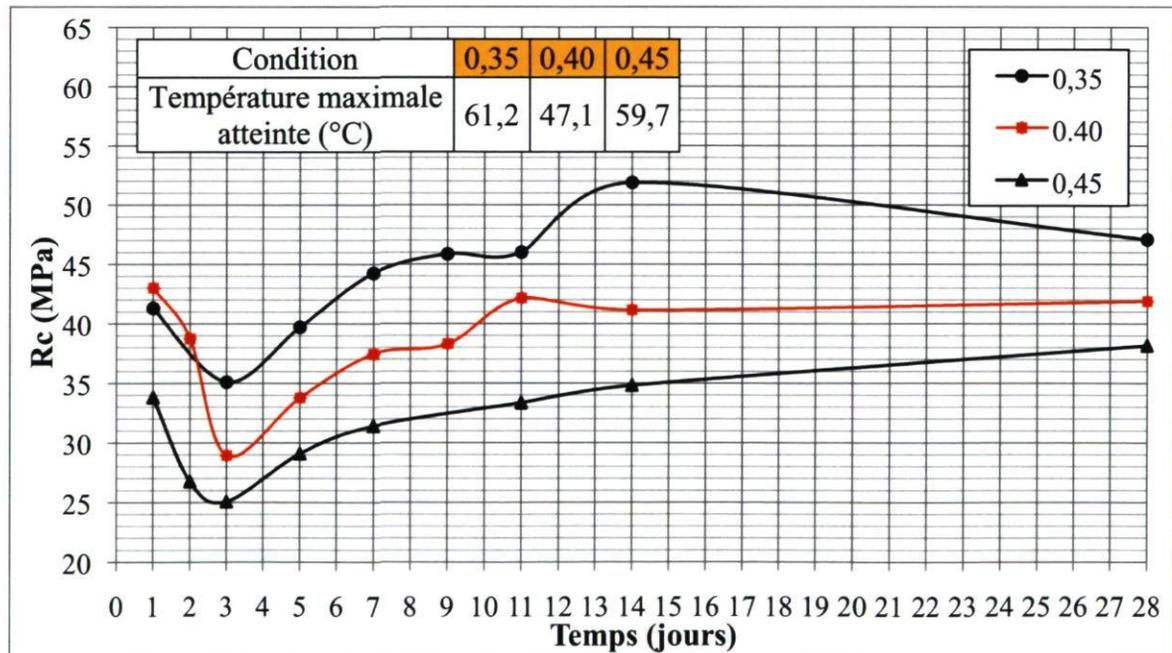


Figure 5.6 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3 (E/C = 0,35, 0,40 et 0,45)

Dans un premier temps, l'historique de température du béton ayant un rapport E/C de 0,35 conduit, pour la première fois de cette étude, un « béton LBC » à des températures

au-dessus de 60 °C pendant le durcissement. La résistance enregistrée à 24 heures pour ces cylindres de ratio 0,35 est inférieure à celle obtenue avec les cylindres de ratio 0,40, ce qui supporte l'hypothèse que ce béton a commencé sa conversion au terme de la condition A3. La diminution des résistances à court terme confirme qu'il n'était probablement que partiellement converti. Lorsque tous les cylindres s'approchent de l'état stable, les résistances sont à nouveau fonction du rapport E/C et le mélange 0,35 redevient le plus résistant.

Les comportements illustrés par ces 3 courbes sont à peu près identiques, avec une diminution des résistances pendant les 2 premiers jours de cure suivie d'une augmentation jusqu'au jour 14. Pour le rapport E/C de 0,35, on observe étonnamment une diminution des résistances entre le 14^e et le 28^e jour, qui est difficilement explicable.

5.3 Température de fabrication (5 °C et 35 °C)

Comme précisé dans le chapitre 3, le stockage des matériaux, le malaxage et la confection des éprouvettes ont été faits à 5 °C et à 35 °C. Ensuite, les cylindres ont immédiatement été placés dans les conditions A1, A2 et A3, à température ambiante du laboratoire.

5.3.1 Ciment Fondu

Dans cette partie, les résultats seront à nouveau présentés successivement par condition d'auto échauffement : A1 (figure 5.7), A2 (figure 5.8) et A3 (figure 5.9).

5.3.1.1 Condition A1 (Auto 1)

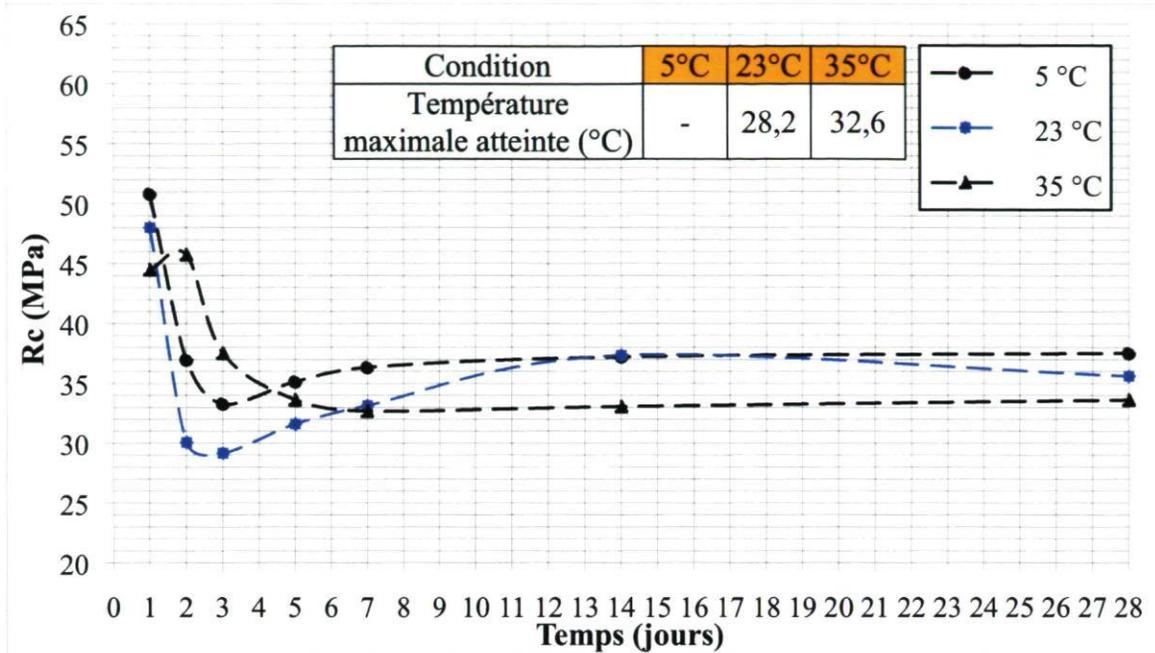


Figure 5.7 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

Même en l'absence de données thermiques pour la condition à 5 °C, on peut raisonnablement considérer, grâce aux températures atteintes par la gâchée à 23 °C, que cette dernière est restée sous les 30 °C lors du durcissement et ainsi constituée essentiellement de CAH_{10} à 24 heures. Lorsque les matériaux sont gâchés à 35 °C, la température n'augmente que de 4,4 °C dans cette configuration A1 par rapport aux constituants à température ambiante (23 °C). Avec 32.6 °C atteint, une fraction de C_2AH_8 a probablement nucléé, ce qui expliquerait la résistance la plus faible observée à 1 jour (44 MPa). Pourtant supposés plus proche d'un état stable, la conversion est plus longue de 4 jours pour ces éprouvettes. Les résistances finales sont similaires aux alentours de 35 MPa.

5.3.1.2 Condition A2 (Auto 2)

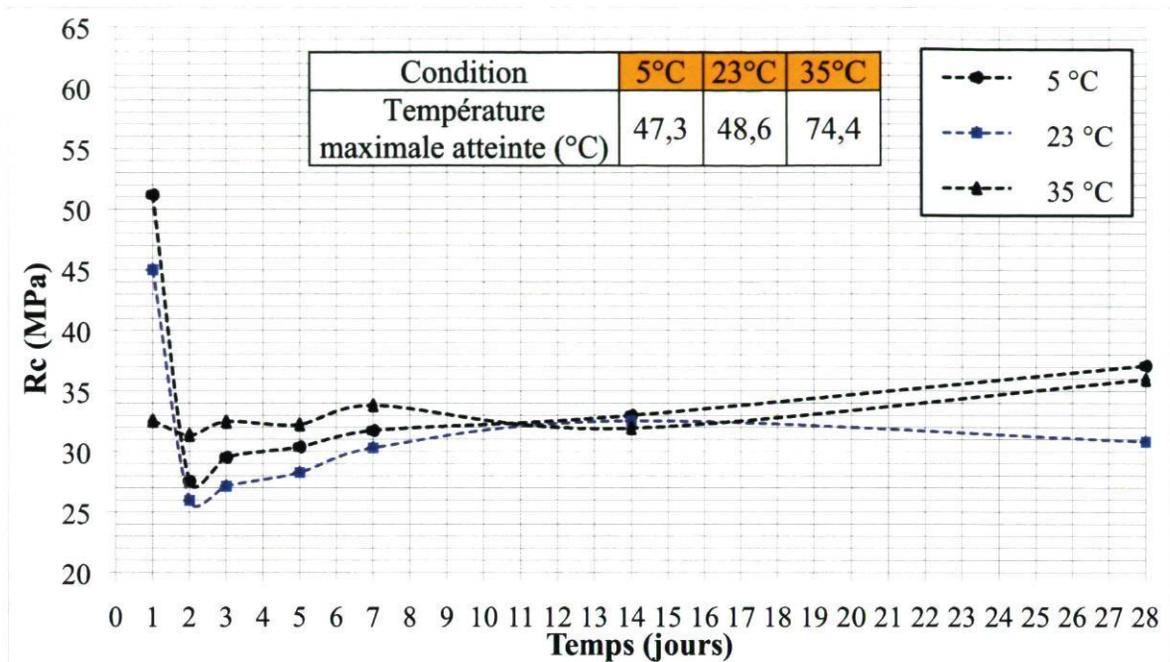


Figure 5.8 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

Dans le cas de la condition A2, l'information intéressante est la température maximale atteinte par le béton gâché à 35 °C (74.4 °C au lieu de 48.6 °C à température ambiante, voir annexe B.3). L'évolution des résistances dans le temps, et surtout la valeur à 1 jour témoignent de l'état converti atteint de cette manière dans la condition A2.

La résistance à 24 heures des cylindres fabriqués à 5 °C est supérieure de 7 MPa à celle obtenue par le malaxage à température ambiante, alors que la température maximale atteinte pendant le durcissement ne présente que 1 °C de différence. Sur les courbes de température (Annexe B.4), on observe que pour la fabrication à 5 °C, le béton a mis une heure de plus pour atteindre 45 °C. C'est sûrement ce retard qui explique la différence de résistance à 24 heures. Ces 2 mélanges évoluent de la même façon et la conversion s'achève en 1 jour de cure. Les résistances finales à 28 jours sont, comme pour la condition A1, toutes regroupées autour de 35 MPa.

5.3.1.3 Condition A3 (Auto 3)

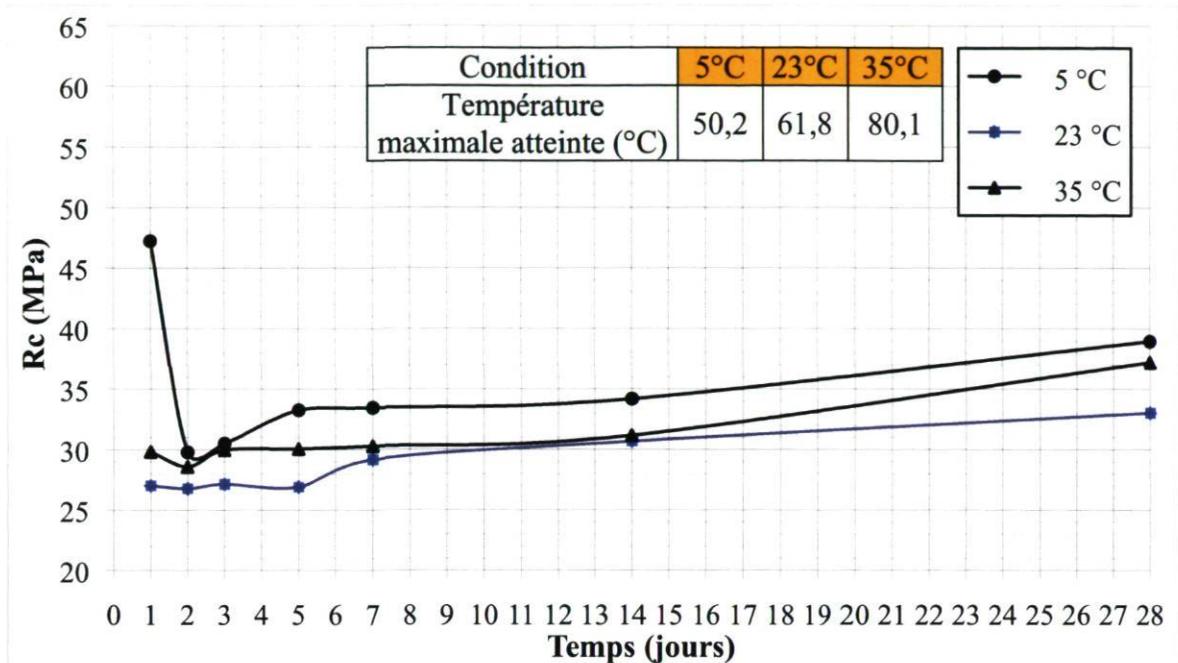


Figure 5.9 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

Lorsque les matériaux sont gâchés à 5 °C, le béton n'atteint pas 60 °C lors du durcissement dans la condition A3, et la température maximale atteinte n'est que de 3 °C supérieure au même béton mûri en condition A2. Ces cylindres fabriqués à 5 °C achèvent leur conversion en 1 jour de cure pour rejoindre un état proche des bétons gâchés à 23 °C et à 35 °C, déjà stables à 24 heures. Il est intéressant de voir qu'un bétonnage hivernal (températures ≤ 5 °C) peut conduire des ouvrages massifs à des constitutions métastables.

La différence de résistance entre un béton « converti » ayant atteint 61,8 °C, et 80,1 °C lors du durcissement n'est pas significative. Les résistances finales sont, comme pour la condition A1 et A2, de l'ordre de 35 MPa.

5.3.2 Ciment LBC

Comme pour la section précédente, les résultats sont présentés en fonction du durcissement durant les 24 premières heures soit la condition A1 (figure 5.10), la condition A2 (figure 5.11) et la condition A3 (figure 5.12).

5.3.2.1 Condition A1 (Auto 1)

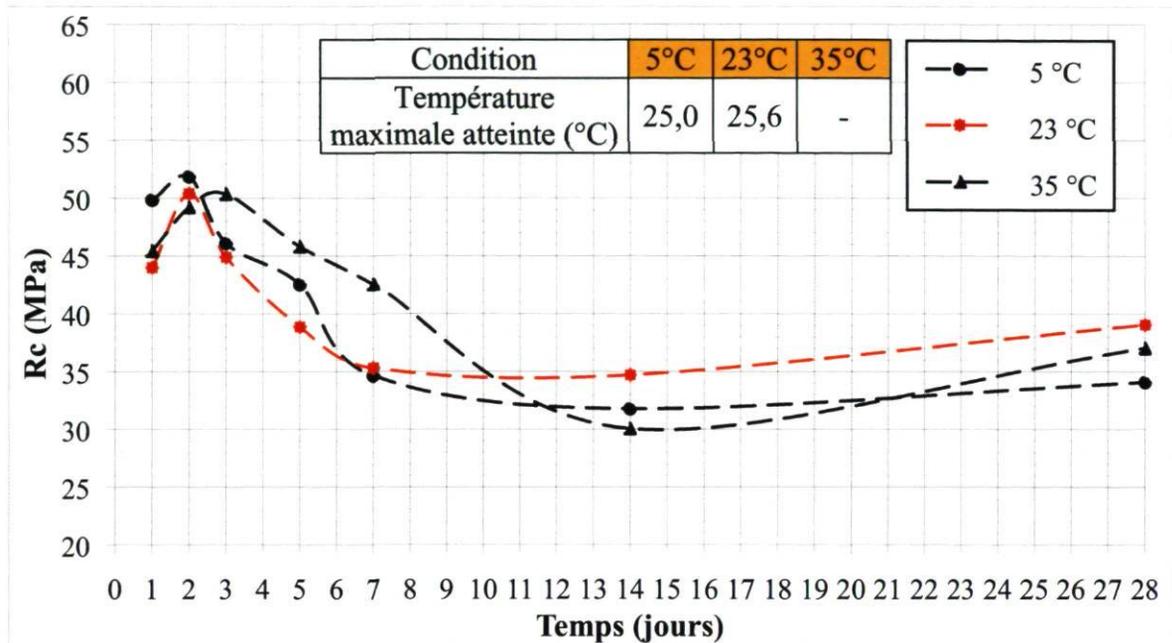


Figure 5.10 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

Pour le ciment LBC, le fait de fabriquer les éprouvettes à 5 °C ne change pratiquement rien de la température maximale atteinte en condition A1 comparé au mélange de référence. Le temps mis pour atteindre ces températures (annexe B.5) pourrait expliquer la différence de 5 MPa observée à 24 heures.

Au début de la cure, on observe dans les 3 cas une augmentation des résistances le premier jour. La conversion s'étend jusqu'au 14^e jour et, comme pour le mélange de référence, les résistances augmentent par la suite grâce à l'hydratation des CA et du laitier. Les résistances finales sont à quelques unités près de l'ordre de 35 MPa.

5.3.2.1 Condition A2 (Auto 2)

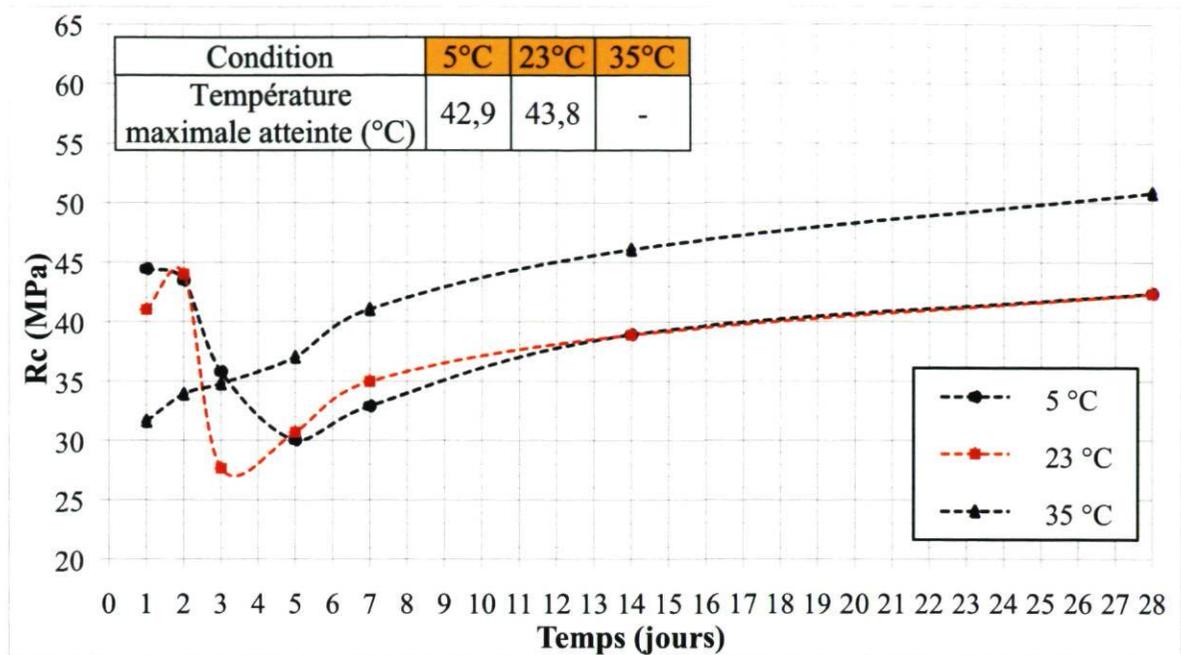


Figure 5.11 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

Dans le cas de la condition A2, il manque les données thermiques du durcissement pour le mélange fait à 35 °C, mais la faible résistance à 1 jour ainsi que l'absence de diminution laisse supposer que le béton était en grande partie stable au début de la cure.

Pour ce qui est des 2 autres températures de gâchage, la conversion est un peu plus lente pour les cylindres faits à 5 °C en raison des plus faibles températures atteintes durant les 24 premières heures (Annexe B.5).

Il est intéressant de voir qu'à la différence du Ciment Fondu, la conversion durant la cure est préjudiciable pour les résistances en compression à 28 jours lorsque le béton est mûri à 50 °C en eau, avec pratiquement 10 MPa de moins que les cylindres stables à 24 heures (cylindre gâchés à 35 °C).

5.3.2.1 Condition A3 (Auto 3)

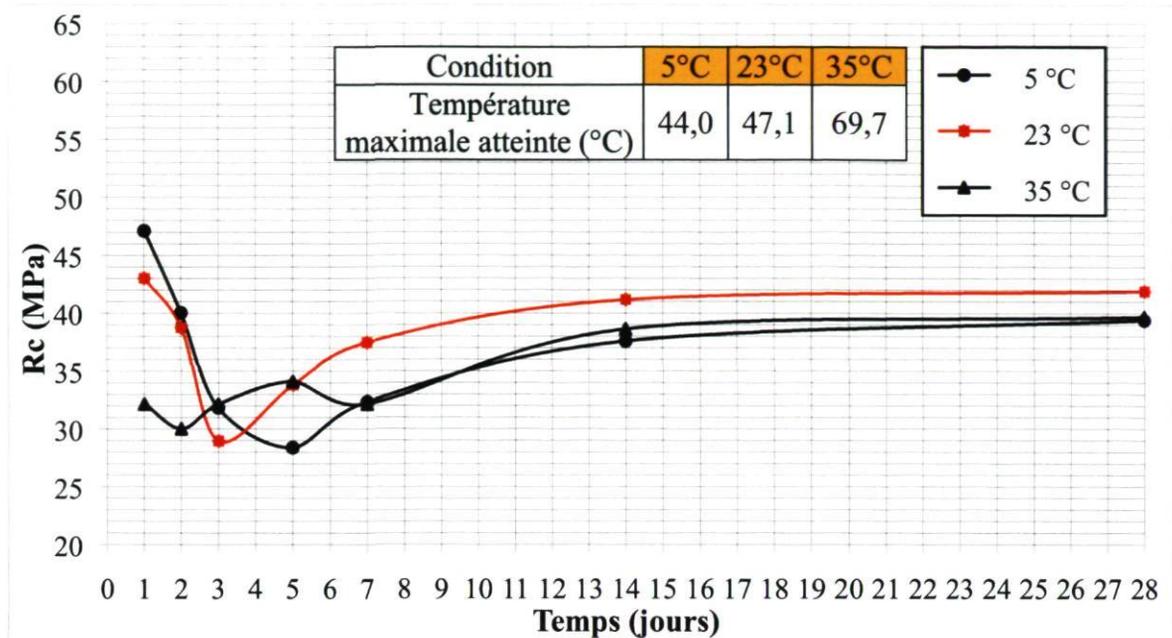


Figure 5.12 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3 (Gâché à 5, 23 et 35 °C)

La condition A3 permet aux éprouvettes fabriquées à 35 °C de monter à une température de pratiquement 70 °C. La résistance à 24 heures est donc typique d'un béton converti de rapport E/C égal à 0,40, soit 32 MPa. Il est à noter que cette résistance est exactement la même que celle obtenue pour la condition A2 gâchée à 35 °C.

Encore une fois, on constate une légère différence à 24 heures entre les cylindres faits à 5 °C et ceux à 23 °C (47 MPa et 43 MPa). La gâchée à température ambiante met 3 jours pour achever la conversion contre 5 jours pour le malaxage à 5 °C. Les résistances finales sont regroupées autour de 40 MPa.

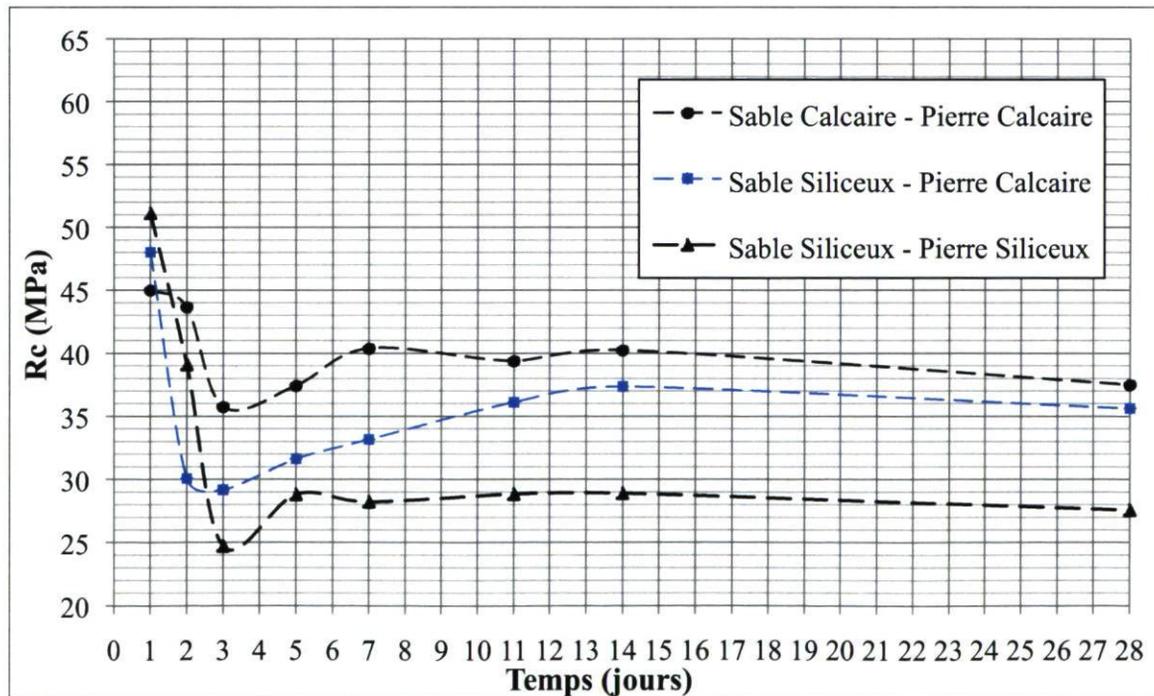
5.4 Influence des granulats

Il a été mis en évidence dans la revue de documentation l'influence des granulats calcaires sur les résistances en compression des CACs, par l'intermédiaire de la formation de mono-carbo-aluminates. Pour supporter ces informations, les mélanges constitués de différents types de granulats sont étudiés dans cette section. Une première série d'expériences est faite avec des granulats d'origine calcaire et une deuxième avec des granulats d'origine siliceuse et ce, sur le Ciment Fondu (figures 5.13 à 5.15) et sur le ciment LBC (figures 5.16 à 5.18). Il convient de rappeler que les résultats des mélanges fabriqués avec de la pierre calcaire et du sable siliceux sont issus des données du chapitre 4.

5.4.1 Ciment Fondu

5.4.1.1 Condition A1 (Auto 1)

Les résultats des cylindres muris en condition A1 sont présentés sur la figure 5.13.



Condition	SC/PC	SS/PC	SS/PS
Température maximale atteinte (°C)	30,8	28,2	27,3

Figure 5.13 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A1 (granulats calcaires et siliceux)

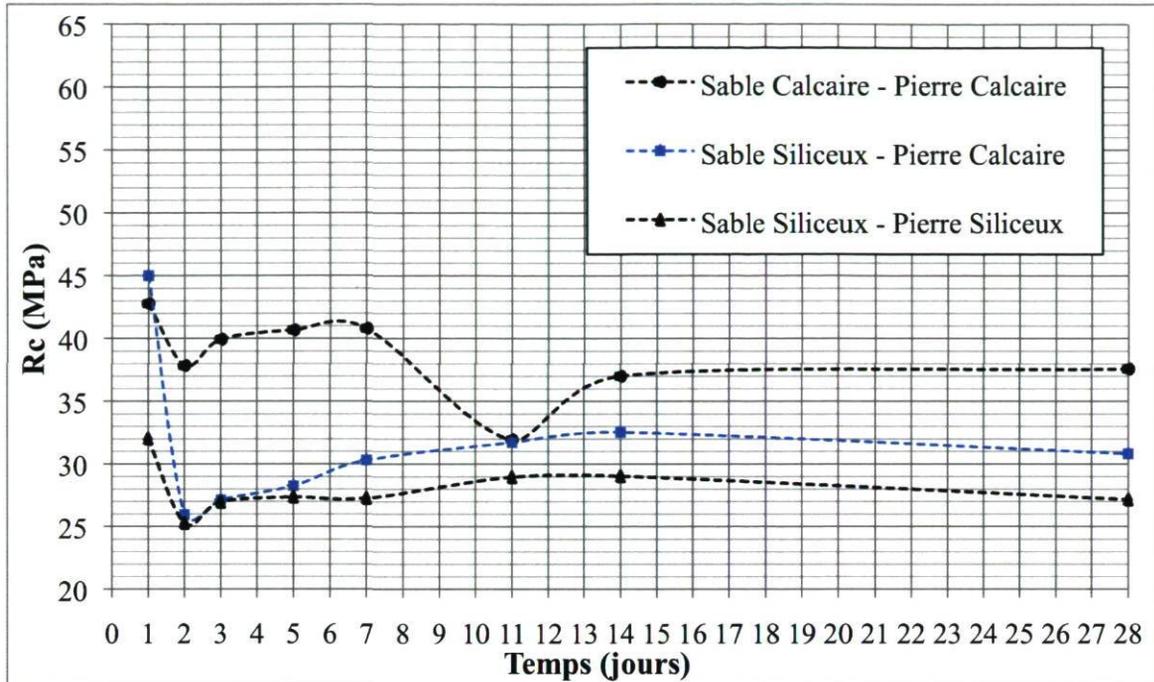
À 24 heures, dans le cas d'une hydratation à des températures ≤ 30 °C, les résistances sont d'approximativement 45-50 MPa. Le mélange formulé avec les granulats d'origine calcaire présente à 1 jour des résistances inférieures aux 2 autres cas. Il a été démontré dans plusieurs études l'effet bénéfique, après conversion, de la calcite (CaCO_3) contenu dans les granulats calcaires sur les résistances en compression des CACs, par la formation de mono-carbo-aluminates. Il est observé sur la figure 2.16 que leur formation peut débiter à partir de 25 °C. Dans le cas de la condition A1, on peut donc supposer que les mélanges contenant de la calcite forment une petite quantité de $\text{C}_4\text{ACH}_{11}$, au détriment des CAH_{10} . Plus denses, ils pourraient être responsables des plus faibles résistances initiales observées par rapport aux gâchées contenant des granulats siliceux.

Pour chacune des 3 combinaisons de granulats, la conversion se produit pendant les 2 premiers jours de cure, et la poursuite de l'hydratation des phases anhydres conduit à des augmentations de résistance jusqu'au 7^e jour. La première information importante est que le type de granulats n'influence pas la cinétique de conversion.

Lors de la transformation des phases métastable, une certaine quantité de mono-carbo-aluminates (densité : 2,18) se forme au détriment des C_3AH_6 (densité : 2,53), entraînant des effets positifs sur la porosité et sur les résistances mécaniques du béton (voir section 2.2.4). Ce comportement est confirmé par les résultats de la figure 5.13, car lors de la conversion, les chutes de résistances sont 3 fois moins importantes pour les granulats d'origine calcaire (diminution de 9 MPa) que pour ceux d'origine siliceuse (diminution de 27 MPa).

Une fois la conversion achevée, les résistances sont tout au long du traitement plus élevées pour le mélange constitué uniquement de granulats calcaire. À 28 jours, le mélange fait avec des granulats calcaire présente une résistance de 37,5 MPa, tandis que le mélange fait entièrement avec des granulats siliceux est mesuré à 27 MPa.

5.4.1.2 Condition A2 (Auto 2)



Condition	SC/PC	SS/PC	SS/PS
Température maximale atteinte (°C)	65,7	48,6	54,1

Figure 5.14 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A2 (granulats calcaires et siliceux)

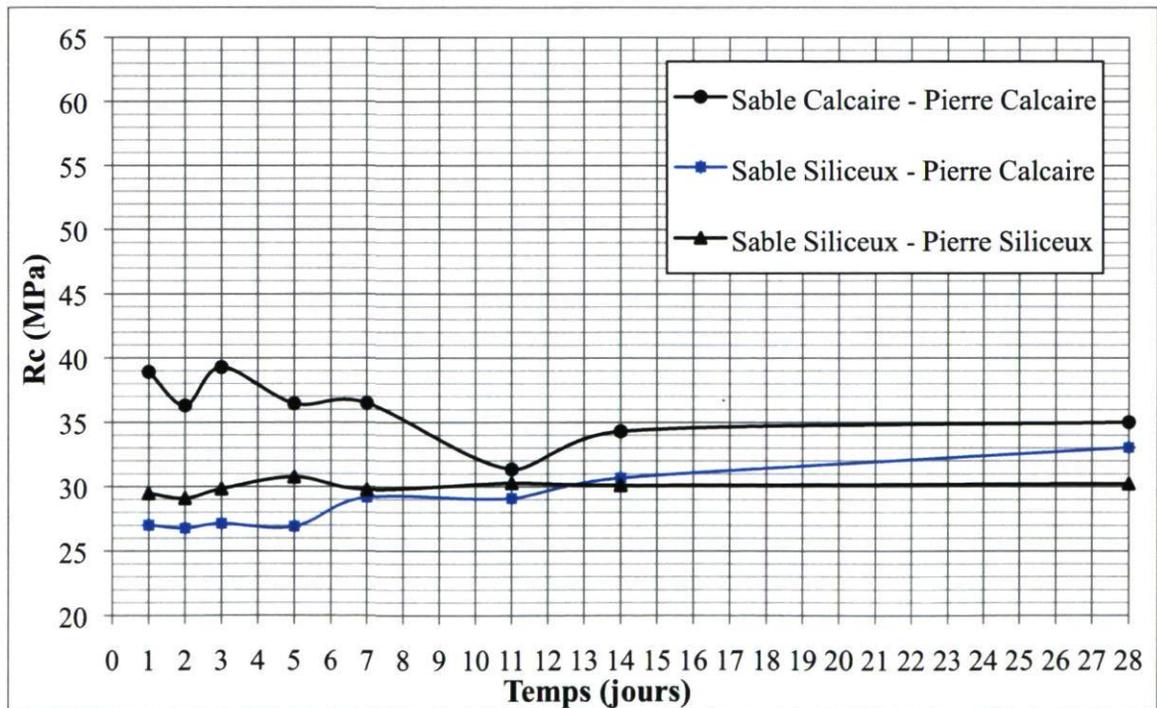
Dans le cas de la condition A2, le mélange avec les granulats entièrement calcaire a beaucoup plus chauffé que les 2 autres combinaisons de granulats, et est probablement en grande partie converti à 24 heures. Il semblerait que la présence d'une grande quantité de CaCO_3 génère plus de chaleur grâce à la formation de mono-carbo-aluminates lors du durcissement. Malgré une température maximale de 65,7 °C, la résistance à la sortie de la condition A2 est similaire à celle atteinte en condition A1, pourtant restée à 30,8 °C. Ainsi, la présence d'une grande quantité de calcite réduit dans ce cas à 2 MPa la différence entre un état de durcissement stable et métastable. On observe tout de même une diminution des résistances dans le premier jour de cure, probablement dû à la formation supplémentaire de $\text{C}_4\text{ACH}_{11}$, en remplacement de certaines phases métastables. Il est à rappeler que la

conversion des hydrates métastables en $C_4A\bar{C}H_{11}$ réduit la formation de C_3AH_6 , et limite donc la création de porosité lors du changement de phases.

Le mélange entièrement siliceux est, semble-t-il, proche d'un état 100 % converti à 24 heures, car de faibles diminutions de résistance sont observées pendant le premier jour de traitement.

Après conversion, les résistances sont, comme pour la condition A1, influencées par la quantité de granulats calcaires dans le mélange. Le mélange entièrement calcaire est le plus résistant, celui entièrement siliceux est le moins résistant et le mélange de référence se situe entre les 2.

5.4.1.3 Condition A3 (Auto 3)



Condition	SC/PC	SS/PC	SS/PS
Température maximale atteinte (°C)	72,5	61,8	69,5

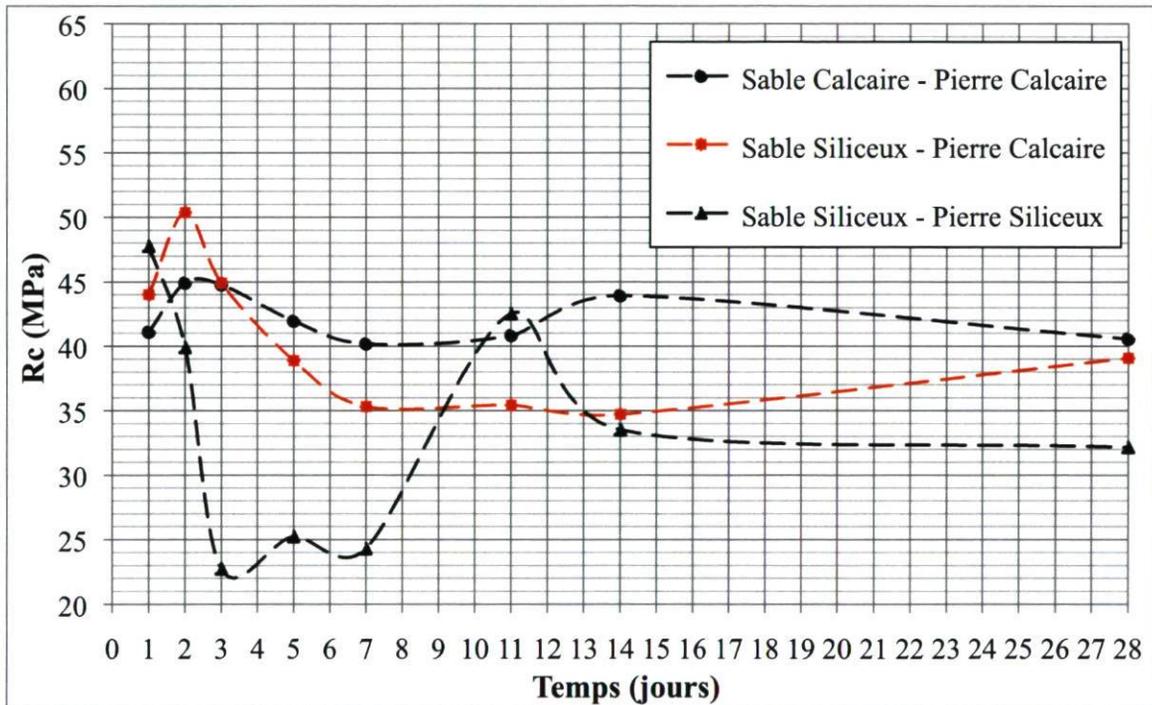
Figure 5.15 – 50 °C (Eau) – Ciment Fondu – Condition A3 (granulats calcaires et siliceux)

Les historiques de températures montrent que ces 3 bétons ont atteint des températures au dessus de 60 °C. Le mélange constitué de granulats d'origine calcaire présente des diminutions de résistance pendant les premiers jours de cure.

Les résistances à 28 jours sont, à quelques MPa près, les mêmes qu'en condition A1 et A2.

5.4.2 Ciment LBC

5.4.2.1 Condition A1 (Auto 1)



Condition	SC/PC	SS/PC	SS/PS
Température maximale atteinte (°C)	28,3	25,6	27,4

Figure 5.16 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A1 (granulats calcaires et siliceux)

Comme pour le Ciment Fondu en condition A1, le mélange présentant la résistance la plus faible à 24 heures est celui composé de granulats calcaires. Ce comportement a été

attribué précédemment à la formation de mono-carbo-aluminate, réduisant ainsi la quantité de CAH_{10} formé, de plus faible densité.

Moins il y a de calcite dans le mélange, plus la conversion entraîne des chutes de résistances importantes, passant de 47.5 MPa à 22.5 MPa en 2 jours pour les granulats siliceux en l'absence de $C_4A\bar{C}H_{11}$ pour atténuer ses effets.

5.4.2.2 Condition A2 (Auto 2)

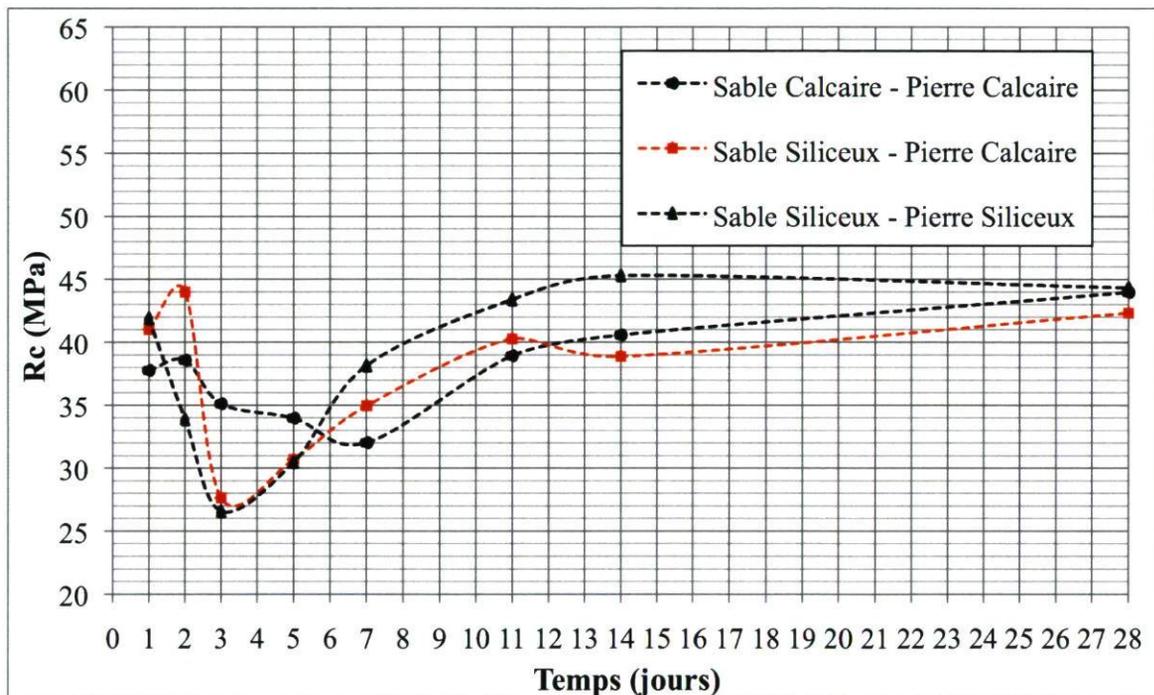


Figure 5.17 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A2 (granulats calcaires et siliceux)

Pour la condition A2, les mélanges contenant un ou plusieurs constituants siliceux ont un comportement similaire et la conversion se produit en 2 jours de cure. La conversion est un peu moins préjudiciable en terme de résistance mécanique pour le mélange entièrement calcaire avec une résistance minimum observée de 32 MPa à 7 jours comparativement à 26-27 MPa pour les 2 autres.

On remarque que les résistances se rejoignent à 28 jours et donc que le type de granulat a peu d'influence à long terme pour le ciment LBC ayant subi une hydratation de type A2. Le mélange entièrement siliceux est légèrement plus résistant que les autres après 7 jours.

5.4.2.3 Condition A3 (Auto 3)

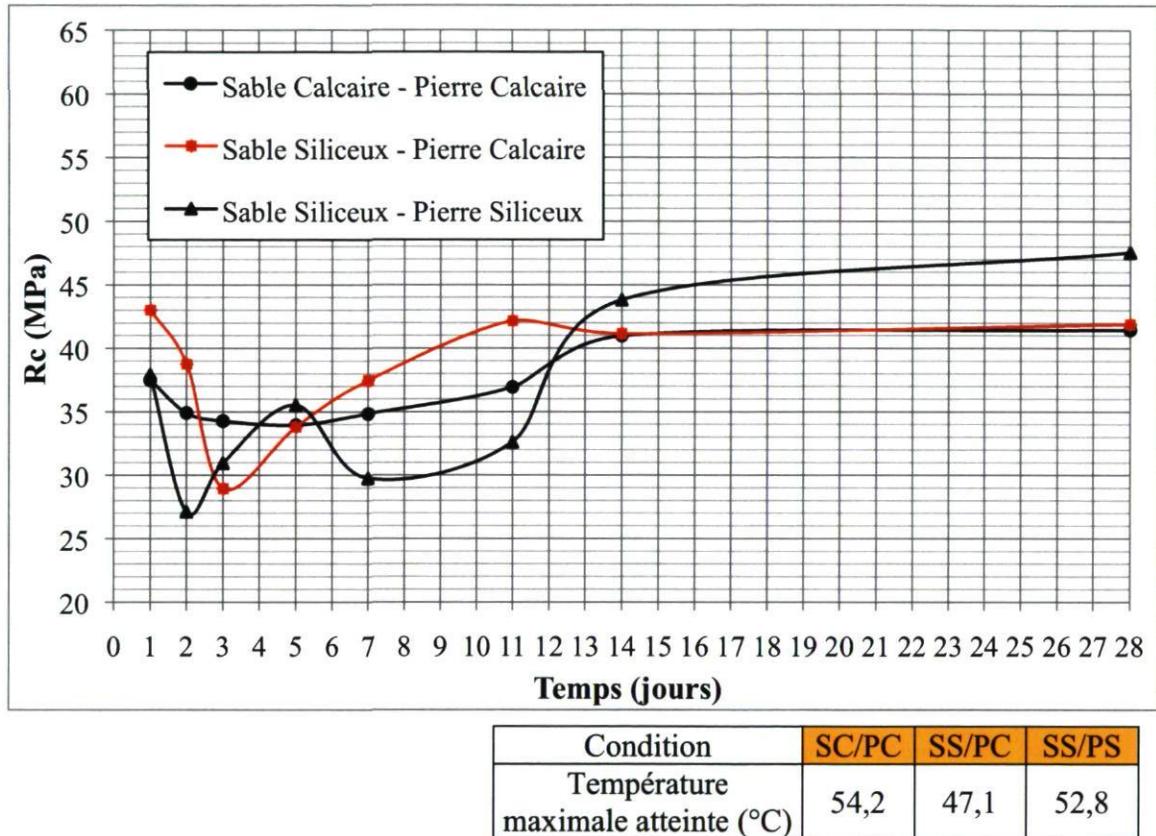


Figure 5.18 – 50 °C (Eau) – Ciment LBC – Condition A3 (granulats calcaires et siliceux)

Comme pour la condition A2 et comme pour la plupart des cas pour le Ciment Fondu, le mélange de référence se situe thermiquement entre les mélanges ayant une seule origine de granulat. Une conversion est observée dans les 3 cas.

De la même manière qu'en A2, le mélange entièrement siliceux est le plus résistant à long terme. L'hypothèse est qu'il reste, en l'absence de $C_4A\bar{C}H_{11}$ et en présence de

beaucoup de C_3AH_6 , beaucoup plus de place dans la microstructure pour l'hydratation du laitier. On aurait alors de plus hautes résistances à long terme.

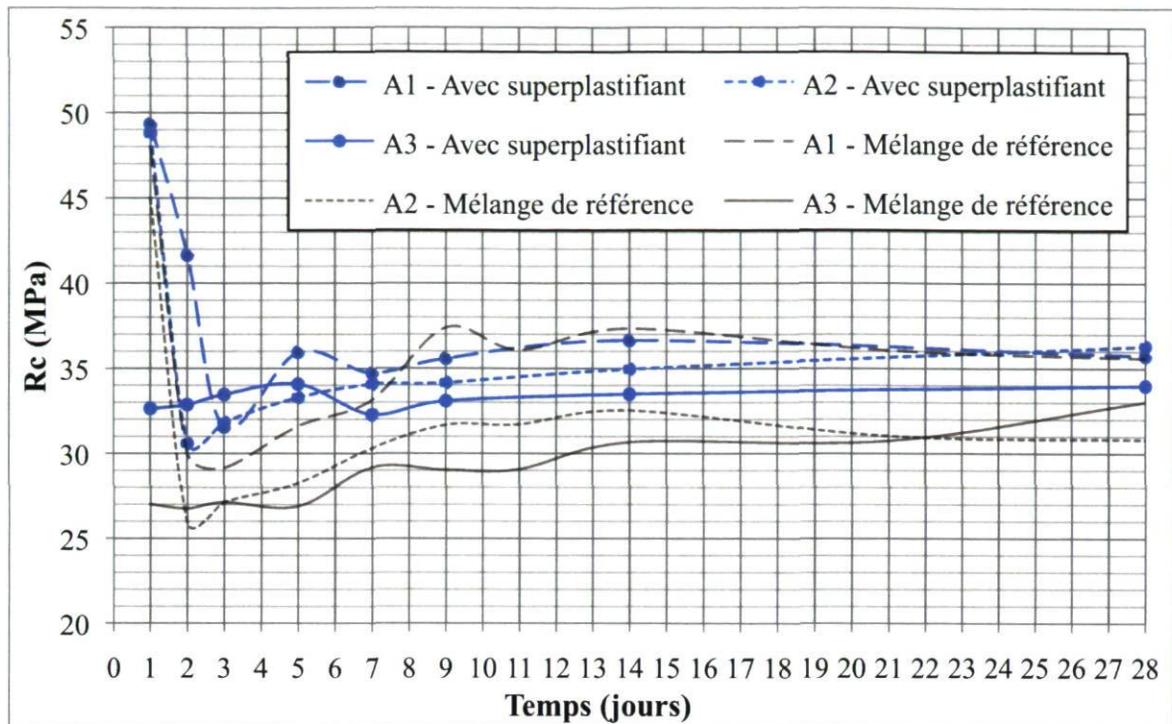
5.5 Influence d'un adjuvant fluidifiant

L'optima 203 utilisé pour cette étude est un superplastifiant de type polycarboxylate. Il est mélangé à l'eau, à une teneur de 0,2 % de la masse de ciment. En général, les bétons contenant du superplastifiant sont plus résistants, car ce type d'adjuvant permet de réduire la quantité d'eau requise pour un même affaissement. L'idée ici n'est pas de démontrer l'intérêt d'un tel produit, mais d'observer ses effets sur le comportement mécanique du béton durci (figure 5.19). Les mélanges auxquels est ajouté le superplastifiant sont donc de même composition que le mélange de référence (400kg/m^3 de ciment et un rapport $E/C = 0,40$).

L'ajout de superplastifiants dans un béton ne modifie pas fondamentalement la microstructure de la pâte de ciment hydraté. Il agit par défloculation des fines et a donc comme effet principal d'entraîner une meilleure distribution des grains de ciment dans l'espace, conduisant à une meilleure structuration. Neville (2000) explique que dans certains cas, pour un rapport E/C constant, l'ajout de superplastifiant améliore les résistances mécaniques du béton et qu'aucune diminution à long terme n'est constatée. Des augmentations pouvant atteindre 20 % ont été observées à 28 jours sur du ciment Portland.

5.5.1 Ciment Fondu

Les résultats pour le Ciment Fondu sont présentés sur la figure 5.19. Les résultats obtenus avec le mélange de référence (figure 4.23) sont également illustrés sur ce graphique, afin de faciliter la comparaison des résistances.



Condition	A1	A2	A3
Température maximale atteinte (°C)	27,2	51,6	63,0

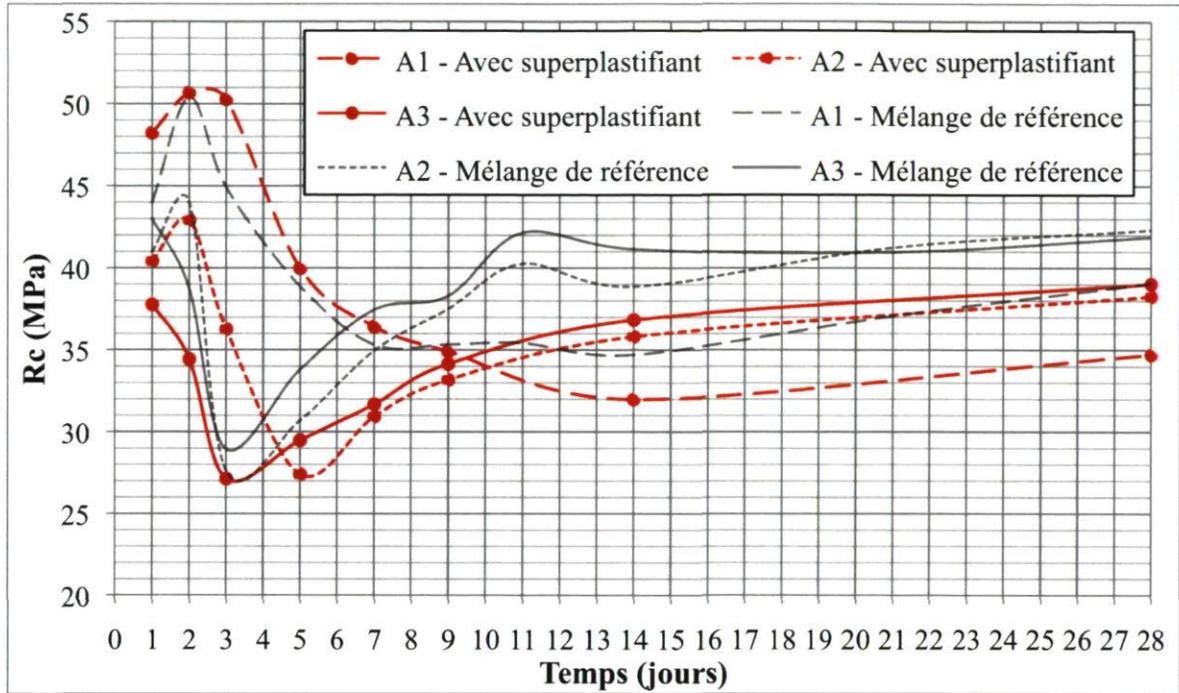
Figure 5.19 – Cure à 50 °C en Eau – Ciment Fondu – Superplastifiant

Lorsqu'on compare les résultats du béton fabriqué avec 0,2 % de superplastifiant à ceux du mélange de référence, des résistances légèrement supérieures sont constatés pour le mélange avec adjuvant, mais rien de très significatif. De la même manière que le mélange de référence, la conversion des cylindres A2 est atteinte à 2 jours. Pour les cylindres A1, le point bas est constaté à 3 jours. Les résistances à 28 jours sont pratiquement similaires pour les 2 mélanges, soit approximativement 35 MPa. Il est à conclure de cette expérience que l'ajout de 0,2 % de superplastifiant n'a aucune incidence significative sur l'évolution des résistances mécaniques du Ciment Fondu.

En revanche, les bétons étudiés dans cette partie mettent plus de temps à monter en température durant les 24 premières heures (murrissements A1, A2 et A3) que ceux fabriqués sans superplastifiant. On observe 2h30 au lieu de 2h00 en A1, et 3h00 au lieu de 2h30 pour la condition A3. Ces 2 historiques de température sont présentés en Annexe B.6.

5.5.2 Ciment LBC

Les résultats pour le ciment LBC sont présentés sur la figure 5.20.



Condition	A1	A2	A3
Température maximale atteinte (°C)	20,0	47,2	51,4

Figure 5.20 – Cure à 50 °C en Eau –LBC – Superplastifiant

Pour le ciment LBC, les bétons fabriqués en condition A1 atteignent des températures moins élevées que le mélange sans superplastifiant. À l'inverse, les bétons muris en conditions A2 et A3 atteignent des températures plus élevées (47.2 °C au lieu de 43.8 °C en A2 et 51.4 au lieu de 47.1 °C en A3). Aucune différence significative dans l'évolution des résistances n'est constatée. Les résistances finales sont de l'ordre de 35-40 MPa.

5.6 Discussion

L'objectif de ce projet est de développer un essai capable de prédire la *résistance minimum garantie* d'un béton à base de CACs, sans connaître, ni la cure initiale du béton (0-24 heures), ni sa formulation. L'essai proposé dans le chapitre précédent était une immersion des éprouvettes à 50 °C pendant une période de 6 jours. Dans ce chapitre, des comportements variés ont été observés et le protocole d'essai retenu précédemment (6 jours de traitement à 50 °C) n'est pas forcément valable dans tous ces cas.

- Pour le Ciment Fondu :

En ce qui concerne les ratios eau/ciment de 0,35 et 0,45, les cylindres A1 passent par un point beaucoup plus bas à 3 jours que la valeur de caractérisation préconisée à 7 jours. Il semblerait que le premier choix d'essai à 3 jours pour le Ciment Fondu soit mieux adapté dans ces situations. Toutefois, l'évolution des résistances lorsque la mise en œuvre s'est faite à 35 °C montre que la résistance A1 à 3 jours est beaucoup plus élevée que les autres (37 MPa contre 30 MPa pour la condition A3). En ce qui concerne le mélange avec des granulats d'origine calcaire, à 3 jours comme à 7 jours, les cylindres A1, A2 et A3 ne présentent pas les mêmes résistances, et la résistance minimum que présente chaque condition n'intervient pas au même moment.

- Pour le ciment LBC :

Pour le LBC, les mêmes problèmes sont mis en évidence avec par exemple pour le mélange entièrement siliceux, des résistances très différentes à 7 jours en fonction des conditions A1, A2 et A3. La même conclusion est faite pour la mise en œuvre à 35 °C.

En mettant de côté la possibilité de trouver un essai commun au Ciment Fondu et au ciment LBC, il devient même difficile de trouver une caractérisation à une seule échéance pour chaque liant considéré séparément. Afin de pouvoir déterminer la *résistance minimum garantie* du béton, par un traitement commencé 24 heures après le gâchage, une option est de faire plusieurs caractérisations au long de la cure à 50 °C en eau et de retenir la valeur la plus faible. Les échéances de 1, 2, 3, 7 et 14 jours sont recommandées.

Chapitre 6 - Conclusion

6.1 Introduction

Les nombreux résultats générés dans ce projet avaient pour but de déterminer un protocole d'essai pour la caractérisation mécanique des ciments alumineux, qui permette de connaître la *résistance minimum garantie* du béton au cours de sa vie utile. Cet essai doit être plus pratique que celui décrit dans la norme EN14647, qui requiert une immersion immédiate du béton frais à 38°C, difficile à mettre en œuvre en chantier. La proposition est de démarrer une procédure d'essai à la suite des 24 premières heures dans les conditions thermiques aléatoires du chantier. L'évolution spécifique de la résistance des CACs rend cette recherche particulière, car il faut tenir compte du phénomène de conversion qui peut entraîner des diminutions de résistances à long terme. Ce chapitre présente les conclusions de ce projet, autant sur la recherche de l'essai de caractérisation, que sur le comportement des CACs de manière générale.

6.2 Conclusions générales

D'un point de vue phénoménologique :

- Le dégagement de chaleur lors du durcissement dépend de la masse de béton, des conditions environnementales, ainsi que du rapport eau/liant et du type de granulats utilisé.
- Pour un rapport eau/liant de 0,40, la différence de résistance entre un béton converti et un béton non converti à la suite du durcissement initial peut atteindre 50 %.
- Pour le Ciment Fondu comme pour le LBC, plus la température de cure augmente, plus la cinétique de conversion est rapide.
- Les cures immergées contribuent à l'accroissement des résistances par rapport aux cures en air, en partie par suppression du phénomène de séchage.

- En fonction des conditions de température et d'humidité, les résistances de bétons initialement convertis et non convertis se rejoignent.
- L'ajout de laitier dans un ciment alumineux, comme c'est le cas pour le LBC, réduit les chutes de résistances associées à la conversion.
- Pour le ciment LBC, si la conversion se passe sur une longue période (quelques mois), ses effets négatifs sur les résistances sont cachés par la formation de stratlingite.
- L'utilisation de granulats calcaires dans un CACs entraîne la formation de carboaluminates de calcium (C_4ACH_{11}), conduisant à l'augmentation des résistances mécanique à court et à moyen terme.
- L'utilisation de 0,2 % de superplastifiant de type polycarboxylate n'a aucune influence significative sur l'évolution des résistances en compression lorsque les autres paramètres restent constants.

La recherche d'un essai de caractérisation de la *résistance minimum garantie* des bétons à base de CACs a montré que beaucoup de paramètres influencent l'évolution des résistances en compression du béton, en particulier lorsqu'on considère tous les états d'hydratation possibles à 24 heures (principalement CAH_{10} , C_2AH_8 ou C_3AH_6). La procédure retenue est un traitement thermique des éprouvettes en laboratoire, à 50 °C en eau, afin d'accélérer si nécessaire la cinétique de conversion et d'obtenir rapidement la résistance caractéristique du béton ayant achever la conversion. À la suite de nombreuses expérimentations, plusieurs essais au long de la cure sont indispensables pour une bonne caractérisation de la résistance minimum du matériau, à diverses échéances au jeune âge (1, 2, 3, 7 et 14 jours). La valeur caractérisant la *résistance minimum garantie* du matériau dans le temps est la plus faible enregistrée parmi ces échéances.

Bibliographie

Alt Charles, Wong Lana et Parr Christopher (2001) – *Measuring castable rheology by exothermic profile*

Argandona Antonio (1966) – Ethical aspects of an urban catastrophe

Auvray Jean-Michel (2003) – Élaboration et caractérisation à haute température de bétons réfractaires à base d'alumine spinelle

Bilodeau Josée (1997) – *Influence de polyélectrolytes sur la cinétique d'hydratation et les propriétés rhéologiques de ciments alumineux*

Chang Zhen-Tian, Song Xiu-Jiang, Munn Robert, Marosszeky Marton (2003) - *Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack*

Dunster et al. (1997) - An assessment of ageing calcium aluminate concrete from marine structures

Evans R.H., Hajnal Konyi K., Jensen V.P., Whitney C.S., Mensch L.J (1943) – The plastic theories for the ultimate strength of reinforced-concrete beams

Fentiman Charles. H. (1985) – Hydration of carbo-aluminous cement at different temperatures

Fishwick J.M. (1982) – Special purpose cement used in *calcium aluminate concrete*

French P.J., Montgomery R.G.J. et Robson T.D. (1971) – *High concrete strength within the hour*

Fryda H., Charpentier E. et Bertino J.M. (2008) – Accelerated test for conversion of calcium aluminates cement concrete

Fryda H., Lamberet S. et Dunster A. (2008) – Calcium aluminate cement concrete in an old marine structure

Gosselin Christophe (2009) - *Microstructural development of calcium aluminate cement based systems with and without supplementary cementitious materials*

Heikal M., Mahmoud Radwan M. et Saad Morsy M. (2004) – Influence of curing temperature on the physic mechanical, characteristics of calcium aluminate cement with air-cooled slag or water-cooled slag

Kuzel H.-J., Baier H. (1996) – *Hydration of calcium aluminate cements in the presence of calcium carbonate*

Lamour V.H.R., Monterro P.J.M., Scrivener K.L. et Fryda H. (2001) – *Mechanical properties of calcium aluminate cement concrete*

Majumdar A.J. and Singh B. (1992) – Properties of some blended high-alumina cement

Neville Adam M. (2000) – *Propriétés des bétons*

Newman John et Seng Choo Ban – *Advanced Concrete Technology*

Ollivier J.P., Grandet J. et Hakim F. (1984) – *Réactions entre granulats calcaires et pâte de ciment alumineux*

Oliveira I.R., Ortega F.S. et Pandolfelli V.C. (2008) - *Hydration of CAC cement in a castable refractory matrix containing processing additives*

Roy D.M. (1992) – The effect of blast furnace slag and related materials on the hydration and durability of concrete

Schmitt N., Lamour V., Berthaud Y., Meunier P. et Poirier J. (2002) – *Modélisation du retrait induit par la déshydratation des bétons alumineux*

Scrivener Karen L. (2003) – *Historical and present day applications of calcium aluminate cements*

Sir Frederick Lea (auteur original) et réédité par Peter C. Hewlett – *LEA's Chemistry of Cement and Concrete (Version 2004)*

Sivasundaram V. and Malhotra V. M. (1992) – Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag

Yudenfreund M., Hanna K. M., Skalny J., Odler I. et Brunauer S. (1972) - *Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity Compressive Strength*

Annexe A : Fiches matériaux

AFNOR
Association Française
de Normalisation

www.afnor.fr

NF EN 14647

Décembre 2006

Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients Normes en ligne.
Toute mise en réseau, reproduction et rediffusion, sous quelque forme que ce soit,
même partielle, sont strictement interdites.

This document is intended for the exclusive and non collective use of AFNOR Webshop
(Standards on line) customers. All network exploitation, reproduction and re-dissemination,
even partial, whatever the form (hardcopy or other media), is strictly prohibited.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. La violation de ces dispositions impératives soumet le contrevenant et toutes personnes responsables aux poursuites pénales et civiles prévues par la loi.

Boutique AFNOR

Pour : KERNEOS

Client 3885900

Commande N-20070212-198850-TA

le 12/2/2007 15:09

Diffusé par



norme européenne

norme française

NF EN 14647
Décembre 2006

Indice de classement : **P 15-111**

ICS : 91.100.10

Ciment d'aluminates de calcium

Composition, spécifications et critères de conformité

E : Calcium aluminate cement — Composition, specifications
and conformity criteria

D : Tonerdezement — Zusammensetzung, Anforderungen
und Konformitätskriterien

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 15 décembre 2006 pour prendre effet le 31 décembre 2006.

Remplace la norme homologuée NF P 15-315 et le fascicule de documentation P 15-316, d'avril 1991.

Correspondance

La Norme européenne EN 14647:2005, avec son corrigendum AC:2006, a le statut d'une norme française.

Analyse

Le présent document définit et fournit les spécifications pour le ciment d'aluminates de calcium et ses constituants. Il indique également les lignes directrices pour l'emploi du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et le mortier afin d'assurer le bon comportement et la pérennité des ouvrages.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : ciment, aluminate, calcium, composition, constitution, définition, spécification, caractéristique physique, caractéristique mécanique, résistance à la compression, caractéristique chimique, essai de conformité, référence aux normes, désignation.

Modifications

Par rapport aux documents remplacés, les exigences chimiques ont été complétées, les valeurs de résistances à 28 jours ont été supprimées et des critères de conformité ont été introduits. En outre les dispositions relatives à l'application de la Directive UE «Produits de construction» ont été ajoutées en annexe ZA.

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

Ciment**BNLH P15A****Membres de la commission de normalisation**

Président : M BOUCHON

Secrétariat : M DELORT — BNLH

MME	BADOZ	CERIB
MME	BAROGHEL-BOUNY	LCPC
M	BERGOIN	SOC. DORDOGNAISE DES CHAUX ET CIMENTS DE SAINT ASTIER
M	BESOZZI	UNION NATIONALE DES FEDERATIONS D'ORGANISMES D'HLM
M	BONNET	ATILH
M	BOUCHON	SETRA
M	CAPMAS	ATILH
M	COURION	VICAT
MME	DELATOUCHE	ETERNIT IND.
M	DEVILLEBICHOT	EGF — BTP
M	DIVET	LCPC
M	FOUCARD	LEMVP
M	GARCIA	SNBPE
MME	GAUTHIER	SETRA
M	GERMANEAU	CIMENTS CALCIA
M	GIVELET	CHAMBRE SYNDICALE NATIONALE DES FABRICANTS DE CHAUX GRASSES ET MAGNESIENNES
M	HESLING	AFNOR
M	HUVELIN	SNBPE
M	KESSLER	LAFARGE TCEA
M	LABRU	ATILH
M	LEBON	HOLCIM
MME	LEGO	FFB
M	MORIN	SNCF
M	PAILLE	SOCOTEC
M	PIMIENTA	CSTB
M	PINCON	BNTEC
M	PLAY	EDF — DE — SWR — TEGG
M	PLUMAT	LAFARGE CIMENTS
M	SAUCIER	LAFARGE ALUMINATES
M	THOMAS	SNBPE
M	TRINH	CETEN — APAVE
M	VERHEE	USIRF
M	WAGNER	AFAQ-AFNOR

Avant-propos national*Références aux normes françaises*

La correspondance entre les normes mentionnées à l'article «Références normatives» et les normes françaises identiques est la suivante :

EN 196-1	: NF EN 196-1 (indice de classement : P 15-471-1)
En 196-2	: NF EN 196-2 (indice de classement : P 15-471-2)
EN 196-3	: NF EN 196-3 (indice de classement : P 15-471-3)
EN 196-7	: NF EN 196-7 (indice de classement : P 15-477)
EN 197-2	: NF EN 197-2 (indice de classement : P 15-101-2)

**NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD**

EN 14647
Octobre 2005
+ AC
Novembre 2006

ICS : 91.100.10

Version française

**Ciment d'aluminates de calcium —
Composition, spécifications et critères de conformité**

Tonerdezement —
Zusammensetzung, Anforderungen
und Konformitätskriterien

Calcium aluminate cement —
Composition, specifications and conformity criteria

La présente Norme européenne a été adoptée par le CEN le 22 juillet 2005.

Le corrigendum a pris effet le 29 novembre 2006 pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de l'EN.

Les membres du CEN sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Centre de Gestion ou auprès des membres du CEN.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CEN dans sa langue nationale et notifiée au Centre de Gestion, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Centre de Gestion : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

© CEN 2005 Tous droits d'exploitation sous quelque forme et de quelque manière que ce soit réservés dans le monde entier aux membres nationaux du CEN.

Réf. n° EN 14647:2005 F

EN 14647:2005 (F)

Sommaire

	Page
Avant-propos	3
Introduction	4
1 Domaine d'application	4
2 Références normatives	4
3 Termes et définitions	5
4 Ciment d'aluminates de calcium (CAC)	5
5 Constituants	6
5.1 Clinker d'aluminates de calcium	6
5.2 Agents de mouture	6
6 Type de ciment et composition	6
7 Exigences mécaniques, physiques et chimiques	6
7.1 Résistance à la compression	6
7.2 Temps de début de prise	7
7.3 Exigences chimiques	7
8 Désignation normalisée	7
9 Critères de conformité	8
9.1 Exigences générales	8
9.2 Critères de conformité et méthode d'évaluation	9
Annexe A (informative) Lignes directrices pour l'emploi du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et le mortier	13
A.1 Introduction	13
A.2 Caractéristiques spécifiques du ciment d'aluminates de calcium	13
A.3 Propriétés hydrauliques	15
A.4 Production du béton de ciment d'aluminates de calcium	18
A.5 Adjuvants	20
A.6 Utilisation du ciment d'aluminates de calcium dans des conditions particulières	20
A.7 Essai rapide d'évaluation de la résistance minimale à long terme des bétons de ciment d'aluminates de calcium	21
A.8 Bibliographie	22
Annexe B (informative) Chrome hexavalent soluble dans l'eau	23
Annexe ZA (informative) Articles de la présente Norme Européenne concernant les dispositions de la Directive UE Produits de Construction	24
ZA.1 Domaine d'application et caractéristiques pertinentes	24
ZA.2 Procédure d'attestation de conformité des produits	26
ZA.3 Marquage CE et étiquetage	28
Bibliographie	30

Avant-propos

Le présent document (EN 14647:2005) a été élaboré par le Comité Technique CEN/TC 51 «Ciment et chaux de construction», dont le secrétariat est tenu par IBN/BIN.

Cette Norme européenne devra recevoir le statut de norme nationale, soit par publication d'un texte identique, soit par entérinement, au plus tard en avril 2006, et toutes les normes nationales en contradiction devront être retirées au plus tard en juillet 2007.

Le présent document a été élaboré dans le cadre d'un mandat donné au CEN par la Commission Européenne et l'Association Européenne de Libre Échange et vient à l'appui des exigences essentielles de la (de) Directive(s) UE.

Pour la relation avec la (les) Directive(s) UE, voir l'annexe ZA, informative, qui fait partie intégrante du présent document.

Les exigences définies dans la présente norme européenne sont fondées sur les résultats d'essais réalisés sur le ciment conformément aux EN 196-1, -2, -3, -5, -6, et -7. Le schéma d'évaluation de la conformité du ciment d'aluminates de calcium est spécifié dans l'EN 197-2.

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus de mettre cette Norme européenne en application : Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

EN 14647:2005 (F)**Introduction**

Le ciment d'aluminates de calcium a été développé vers la fin du dix-neuvième siècle comme alternative au ciment de silicates de calcium (ciment Portland) afin d'éviter, pour les éléments structuraux, de graves attaques par les sulfates.

En plus de son aptitude à la résistance aux sulfates, il possède un durcissement exceptionnellement rapide et il résiste aux températures élevées. Cette propriété de durcissement rapide a entraîné une utilisation plus large, en particulier pour des applications en préfabrication.

L'hydratation du ciment d'aluminates de calcium est très différente de celle du ciment Portland, puisque les aluminates de calcium hydratés formés dépendent de la température d'hydratation. À des températures basses ou normales (moins de 40 °C), le processus d'hydratation lui confère temporairement une résistance élevée. Cette situation peut durer plusieurs jours, voire plusieurs années, en fonction principalement de la température et de l'humidité, avant que des hydrates stables à long terme se développent. Ce processus, connu sous le terme de conversion, est inévitable. Il est le résultat d'une transition de phase dans la pâte de ciment durcie et s'accompagne d'une réduction de la résistance jusqu'à l'obtention d'un niveau minimum stable.

La méconnaissance de ce processus de conversion, associée à des tentatives infructueuses pour pérenniser la résistance élevée temporaire, ont donné lieu à des sinistres dans plusieurs pays au cours des années 60 et 70. Pour l'un des sinistres rapportés, la résistance du béton fabriqué avec du ciment d'aluminates de calcium a été encore plus réduite du fait de l'attaque chimique. La résistance chimique diminue à mesure que la porosité du béton augmente du fait d'un rapport eau/ciment élevé et de la conversion. En conséquence dans certains pays, le ciment d'aluminates de calcium a été, et demeure, exclu de la liste des ciments autorisés dans les bétons de structure.

Des lignes directrices sont données en Annexe A pour une utilisation correcte de ce ciment. Cette annexe comprend une méthode qui permet de prévoir la résistance à long terme, c'est-à-dire après conversion.

NOTE 1 Le ciment d'aluminates de calcium peut être produit en haut fourneau, par un procédé de fusion réductrice (une méthode utilisée en Allemagne jusqu'aux années 80), mais dans ce cas le ciment présente une teneur élevée en sulfures, ce qui l'exclut du domaine d'application de la présente norme européenne.

NOTE 2 Le ciment d'aluminates de calcium a précédemment été désigné sous plusieurs noms dans d'autres pays, par exemple :

- ciment à haute teneur en alumine ;
- ciment alumineux ;
- ciment fondu à haute teneur en alumine.

1 Domaine d'application

La présente Norme européenne donne une définition générale du ciment d'aluminates de calcium et de sa composition. Il fixe les exigences relatives aux propriétés mécaniques, physiques et chimiques, et établit également les critères de conformité ainsi que les règles correspondantes.

La présente Norme européenne ne couvre pas le ciment d'aluminates de calcium lorsqu'il est utilisé comme constituant de préparations formulées pour des applications spécifiques (comme par exemple les mélanges secs).

NOTE L'Annexe A fournit des lignes directrices pour l'utilisation correcte du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et les mortiers.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application de la présente norme européenne. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

EN 197-2:2000, *Ciment — Partie 2 : Évaluation de la conformité.*

EN 196-1, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination de la résistance.*

EN 196-2, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 2 : Analyse chimique des ciments.*

EN 196-3, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité.*

EN 196-7, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 7 : Méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment.*

3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente norme européenne, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

essai d'autocontrôle

essai effectué en continu par le fabricant sur des échantillons ponctuels de ciment prélevés au(x) point(s) de délivrance de l'usine ou du dépôt

3.2

période de contrôle

période de production et de distribution identifiée pour l'évaluation des résultats des essais d'autocontrôle

3.3

valeur caractéristique

valeur correspondant à une propriété requise en dehors de laquelle se situe un pourcentage spécifié, le percentile P_k de toutes les valeurs de la population étudiée

3.4

valeur caractéristique spécifiée

valeur caractéristique d'une propriété mécanique, physique ou chimique qui ne doit pas être dépassée dans le cas d'une limite supérieure ou doit au minimum être atteinte dans le cas d'une limite inférieure

3.5

valeurs limites applicables à chacun des résultats

valeur d'une propriété mécanique, physique ou chimique qui, pour chaque résultat d'essai, ne doit pas être dépassée dans le cas d'une limite supérieure ou doit au minimum être atteinte dans le cas d'une limite inférieure

3.6

probabilité admissible d'acceptation

CR

pour un plan d'échantillonnage donné, probabilité admissible d'acceptation d'un ciment présentant une valeur caractéristique s'écartant de la valeur caractéristique spécifiée

3.7

plan d'échantillonnage

plan spécifique définissant le(s) effectif(s) (statistique(s)) de l'échantillon à utiliser, le percentile P_k ainsi que la probabilité admissible d'acceptation CR

3.8

échantillon ponctuel

échantillon prélevé à un instant et à un endroit donnés, en fonction des essais prévus. Il peut être obtenu par une prise ou par la combinaison de plusieurs prises élémentaires immédiatement consécutives (voir EN 196-7)

4 Ciment d'aluminates de calcium (CAC)

Le ciment d'aluminates de calcium est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement broyé qui, lorsqu'il est mélangé à l'eau, forme une pâte qui prend et durcit par des réactions et des processus d'hydratation et qui, une fois que le processus d'hydratation a produit des phases hydratées stables après conversion, conserve sa résistance et sa stabilité.

EN 14647:2005 (F)

Le ciment conforme à la présente norme européenne doit, lorsqu'il est gâché et malaxé convenablement avec des granulats et de l'eau, pouvoir produire du béton ou du mortier qui conserve son ouvrabilité suffisamment longtemps. Il doit également pouvoir atteindre, à des échéances définies, des niveaux spécifiés de résistance et son volume doit rester stable à long terme.

Son principal constituant est l'aluminat monocalcique ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). Les autres constituants minéralogiques sont les aluminoferrites de calcium, le silicate bicalcique et le silico-aluminat de calcium ou géhénite.

Le durcissement hydraulique du ciment d'aluminates de calcium est principalement dû à l'hydratation de l'aluminat monocalcique. Toutefois, d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement.

Le ciment d'aluminates de calcium est constitué de petits grains de clinker d'aluminates de calcium de composition statistiquement homogène, du fait d'une assurance qualité couvrant les procédés de fabrication et de manutention des matériaux. Le lien entre ces procédés de fabrication et de manutention des matériaux et la conformité du ciment d'aluminates de calcium à la présente norme européenne est développé dans l'EN 197-2.

5 Constituants**5.1 Clinker d'aluminates de calcium**

Le clinker d'aluminates de calcium est produit par fusion ou frittage d'un mélange aux spécifications précises de matériaux alumineux et calcaires.

5.2 Agents de mouture

Les agents de mouture sont des substances chimiques ou autres produits de marque ajoutés au clinker d'aluminates de calcium pendant le processus de broyage pour améliorer son efficacité. La quantité totale d'agents de mouture, sous forme d'extrait sec, ne doit pas dépasser 0,2 % en masse du ciment. Les agents de mouture ne doivent pas favoriser la corrosion des armatures ou altérer les caractéristiques du ciment ou du béton et du mortier fabriqués avec ce ciment.

6 Type de ciment et composition

À l'exception des agents de mouture qui peuvent être ajoutés en cours de fabrication, comme indiqué en 5.2, le ciment d'aluminates de calcium doit être uniquement composé de clinker d'aluminates de calcium.

7 Exigences mécaniques, physiques et chimiques**7.1 Résistance à la compression**

La résistance à la compression du ciment d'aluminates de calcium ne doit pas être inférieure à 18,0 MPa à 6 h et à 40,0 MPa à 24 h lorsque le ciment est soumis aux essais selon l'EN 196-1 à 6 h et à 24 h (voir également le Tableau 1) dans les conditions suivantes :

- le mortier doit être constitué de 1 350 g de sable normalisé CEN, de 500 g de ciment d'aluminates de calcium et de 200 g d'eau, c'est-à-dire un rapport eau/ciment de 0,40 ;
- toutes les éprouvettes doivent être démoulées au bout de $6 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$;
- les éprouvettes destinées à l'essai à 6 h doivent être soumises à l'essai immédiatement après le démoulage ;
- les éprouvettes destinées à l'essai à 24 h doivent être conservées dans l'eau après démoulage, et soumises à l'essai à $24 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$.

7.2 Temps de début de prise

Le temps de début de prise, déterminé conformément à l'EN 196-3, ne doit pas être inférieur à 90 min (voir également le Tableau 1).

D'autres méthodes que celles de l'EN 196-3 peuvent être utilisées à condition qu'elles produisent des résultats corrélés et équivalents à ceux obtenus avec la méthode de l'EN 196-3.

Tableau 1 — Exigences mécaniques et physiques données comme valeurs caractéristiques

Résistance à la compression (MPa)		Temps de début de prise (min)
à 6 h	à 24 h	
≥ 18,0	≥ 40,0	≥ 90

NOTE 1 Les ciments d'aluminates de calcium ont un durcissement très rapide et par conséquent les valeurs de résistance à 28 jours, à 20 °C, ne sont pas significatives. Il est habituel de contrôler la conformité de la résistance à ces jeunes âges.

NOTE 2 Il convient de ne pas utiliser les valeurs obtenues à partir de ces essais pour le calcul des structures en béton. L'Annexe A donne une explication de l'évolution de la résistance des bétons de ciment d'aluminates de calcium ainsi qu'une méthode de prévision de cette résistance minimale à long terme.

7.3 Exigences chimiques

Les propriétés du ciment d'aluminates de calcium doivent être conformes aux exigences du Tableau 2, lorsque le ciment est soumis aux essais selon la norme européenne indiquée.

NOTE Certains pays européens disposent de réglementations applicables à la teneur en chrome hexavalent soluble dans l'eau (voir l'Annexe B).

Tableau 2 — Exigences chimiques données comme valeurs caractéristiques

Propriété	Référence de l'essai	Exigences ^{a)}
Teneur en alumine (exprimée en Al ₂ O ₃)	EN 196-2	35 % ≤ Al ₂ O ₃ ≤ 58 %
Teneur en sulfure (exprimée en S ²⁻)	EN 196-2	≤ 0,10 %
Teneur en chlorure	EN 196-2	≤ 0,10 %
Teneur en alcalis ^{b)}	EN 196-2	≤ 0,4 %
Teneur en sulfate (exprimée en SO ₃)	EN 196-2	≤ 0,5 %

a) Ces exigences sont données en pourcentage en masse du ciment produit fini.

b) Exprimés en équivalent Na₂O (Na₂O + 0,658 K₂O).

8 Désignation normalisée

Le ciment d'aluminates de calcium conforme à la présente norme européenne doit être identifié par la désignation suivante :

Ciment d'aluminates de calcium EN 14647 CAC

La notation CAC couvre la définition (Article 4), la composition (Articles 5 et 6) et les exigences (Articles 7 et 9).

EN 14647:2005 (F)

NOTE 1 Les ciments européens sont normalement identifiés par un type et par un nombre indiquant la classe de résistance. Pour le ciment d'aluminates de calcium, des précautions doivent être prises lors de l'évaluation de la résistance, en raison de la différence observée dans l'hydratation du ciment et, par conséquent, de l'évolution de la résistance. Il est, en conséquence, normal que la désignation du ciment d'aluminates de calcium ne fasse pas référence à une classe de résistance.

NOTE 2 L'Annexe A donne une description plus détaillée de l'évolution de la résistance du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et le mortier.

9 Critères de conformité**9.1 Exigences générales**

La conformité du ciment d'aluminates de calcium à la présente norme européenne doit être évaluée de manière continue sur la base d'essais effectués sur des échantillons ponctuels. Les propriétés, les méthodes d'essai et les fréquences minimales d'essai s'appliquant aux essais d'autocontrôle du fabricant, sont spécifiées dans le Tableau 3. Voir l'EN 197-2 pour ce qui concerne les fréquences d'essai du ciment non fourni en continu, ainsi que pour les autres détails.

Pour la certification de conformité par un organisme de certification agréé, la conformité du ciment avec la présente Norme européenne doit être évaluée conformément à l'EN 197-2.

NOTE La présente Norme européenne ne traite pas du contrôle de réception à la livraison.

Tableau 3 — Propriétés, méthodes d'essai, fréquences minimales d'essai d'autocontrôle du fabricant et méthode d'évaluation statistique

Propriété	Méthode d'essai ^{a), b)}	Fréquence minimale d'essai		Méthode d'évaluation statistique	
		Situation courante	Période initiale	Contrôle par	
				mesures ^{d)}	attributs ^{e)}
Résistance	EN 196-1	2/semaine	4/semaine	x	
Temps de début de prise	EN 196-3	2/semaine	4/semaine	x	
Teneur en alumine	EN 196-2	2/mois	1/semaine		x
Teneur en chlorure	EN 196-2	2/mois ^{c)}	1/semaine		x
Teneur en alcalis	EN 196-2	1/mois	1/semaine		x
Teneur en sulfate	EN 196-2	1/mois	1/semaine		x
Teneur en sulfure	EN 196-2	1/mois	1/semaine		x

a) Lorsque la partie appropriée de l'EN 196 l'autorise, d'autres méthodes que celles qui sont indiquées peuvent être utilisées sous réserve qu'elles produisent des résultats corrélés et équivalents à ceux obtenus avec la méthode de référence.

b) Les méthodes utilisées pour prélever et préparer les échantillons doivent être conformes à l'EN 196-7.

c) Lorsque aucun des résultats d'essai, sur une période de 12 mois, ne dépasse 50 % de la valeur caractéristique, il est admis de réduire la fréquence à une fois par mois.

d) Si les données ne présentent pas une distribution normale, la méthode d'évaluation peut alors être choisie au cas par cas.

e) Si le nombre d'échantillons est d'au moins un par semaine pendant la période de contrôle, l'évaluation peut se faire par mesures.

9.2 Critères de conformité et méthode d'évaluation

9.2.1 Généralités

Le ciment d'aluminates de calcium est estimé conforme à la présente norme européenne si les critères de conformité spécifiés en 9.2.2 et 9.2.3 sont respectés. La conformité doit être évaluée sur la base d'un échantillonnage continu, en utilisant des échantillons ponctuels prélevés au point de délivrance et en fonction des résultats d'essais obtenus sur l'ensemble des échantillons d'autocontrôle prélevés pendant la période de contrôle.

9.2.2 Critères de conformité statistiques

9.2.2.1 Généralités

La conformité doit être formulée en termes de critère statistique fondé sur :

- les valeurs caractéristiques spécifiées pour les propriétés mécaniques, physiques et chimiques, telles que données en 7.1, 7.2 et 7.3 ;
- le percentile P_k sur lequel est fondée la valeur caractéristique spécifiée, tel que donné dans le Tableau 4 ;
- la probabilité admissible d'acceptation CR , telle que donnée dans le Tableau 4.

Tableau 4 — Valeurs requises pour P_k et CR

	Exigences mécaniques		Exigences physiques et chimiques
	Résistance à 6 h (Limite inférieure)	Résistance à 24 h (Limite inférieure)	
Percentile P_k sur lequel est fondée la valeur caractéristique	10 %	5 %	10 %
Probabilité admissible d'acceptation CR	5 %		

NOTE L'évaluation de la conformité par une méthode fondée sur un nombre fini de résultats d'essais ne peut donner qu'une valeur approximative du pourcentage de résultats s'écartant de la valeur caractéristique pour la population étudiée. Plus l'effectif de l'échantillon (nombre de résultats d'essais) est important, meilleure est l'approximation. La probabilité d'acceptation adoptée CR conditionne le degré d'approximation du plan d'échantillonnage.

La conformité aux exigences de la présente Norme européenne doit être vérifiée par mesures ou par attributs, tel que décrit en 9.2.2.2 et 9.2.2.3, comme spécifié dans le Tableau 3.

La période de contrôle doit être de 12 mois.

9.2.2.2 Contrôle par mesures

Pour ce type de contrôle, il est supposé que les résultats d'essais présentent une distribution normale.

La conformité est vérifiée lorsque les équations (1) et (2) suivantes, selon le cas, sont satisfaites :

$$\bar{x} - k_A \times s \geq L \quad \dots (1)$$

et

$$\bar{x} + k_A \times s \leq U \quad \dots (2)$$

où :

\bar{x} est la moyenne arithmétique de l'ensemble des résultats des essais d'autocontrôle obtenus pendant la période de contrôle ;

s est l'écart-type de l'ensemble des résultats des essais d'autocontrôle obtenus pendant la période de contrôle ;

k_A est la constante d'acceptabilité ;

L est la limite inférieure spécifiée, donnée dans les Tableaux 1 et 2 cités en 7.1 et 7.3 ;

U est la limite supérieure spécifiée, donnée dans le Tableau 2 cité en 7.3.

EN 14647:2005 (F)

La constante d'acceptabilité k_A dépend du percentile P_K sur lequel la valeur caractéristique est fondée, ainsi que de la probabilité admissible d'acceptation CR et du nombre n de résultats d'essais. Les valeurs de k_A sont énumérées dans le Tableau 5.

Tableau 5 — Constante d'acceptabilité k_A

Nombre de résultats d'essais n	k_A ^{a)}	
	pour $P_K = 5\%$ (Résistance à 24 h, limite inférieure)	pour $P_K = 10\%$ (autres propriétés)
20 à 21	2,40	1,93
22 à 23	2,35	1,89
24 à 25	2,31	1,85
26 à 27	2,27	1,82
28 à 29	2,24	1,80
30 à 34	2,22	1,78
35 à 39	2,17	1,73
40 à 44	2,13	1,70
45 à 49	2,09	1,67
50 à 59	2,07	1,65
60 à 69	2,02	1,61
70 à 79	1,99	1,58
80 à 89	1,97	1,56
90 à 99	1,94	1,54
100 à 149	1,93	1,53
150 à 199	1,87	1,48
200 à 299	1,84	1,45
300 à 399	1,80	1,42
> 400	1,78	1,40

NOTE Les valeurs données dans ce tableau sont valables pour $CR = 5\%$.

a) Il est également admis d'utiliser des valeurs de k_A correspondant à des valeurs intermédiaires de n .

9.2.2.3 Contrôle par attributs

Le nombre c_D de résultats d'essais s'écartant de la valeur caractéristique doit être compté et comparé avec un nombre acceptable c_A , calculé à partir du nombre n de résultats d'essais d'autocontrôle et du percentile P_K , tels que spécifiés dans le Tableau 6.

La conformité est vérifiée lorsque l'équation (3) est satisfaite :

$$c_D \leq c_A \quad \dots (3)$$

La valeur de c_A dépend du percentile P_K sur lequel la valeur caractéristique est fondée, ainsi que de la probabilité admissible d'acceptation CR et du nombre n de résultats d'essais. Les valeurs de c_A sont énumérées dans le Tableau 6.

Tableau 6 — Valeurs de c_A

Nombre de résultats d'essais $n^a)$	c_A pour $P_K = 10\%$
20 à 39	0
40 à 54	1
55 à 69	2
70 à 84	3
85 à 99	4
100 à 109	5
110 à 123	6
124 à 136	7

NOTE Les valeurs données dans ce tableau sont valables pour $CR = 5\%$.

a) Si le nombre de résultats d'essais est $n < 20$ (pour $P_K = 10\%$), il n'est pas possible d'utiliser un critère de conformité à base statistique. Un critère de $c_A = 0$ doit être utilisé malgré tout dans le cas où $n < 20$.

EN 14647:2005 (F)**9.2.3 Critères de conformité applicables à chacun des résultats**

Outre les critères de conformité statistiques, la conformité des résultats d'essais aux exigences de la présente norme européenne implique de vérifier que chaque résultat d'essai respecte les valeurs limites applicables à chacun des résultats spécifiés dans le Tableau 7.

Tableau 7 — Valeurs limites applicables à chacun des résultats

Propriété		Valeurs limites applicables à chacun des résultats
Résistance (MPa)	6 h	15,0
valeur limite inférieure	24 h	38,0
Temps de début de prise (min)		75
valeur limite inférieure		
Teneur en alumine (%) ^{a)}	valeur limite inférieure	33
	valeur limite supérieure	60
Teneur en sulfure (%) ^{a)}	valeur limite supérieure	0,15
Teneur en chlorure (%) ^{a)}	valeur limite supérieure	0,10
Teneur en alcalis (%) ^{a), b)}	valeur limite supérieure	0,5
Teneur en sulfate (%) ^{a)}	valeur limite supérieure	0,6
<i>a) Exprimé en masse de ciment produit fini.</i> <i>b) Exprimé en équivalent Na₂O (Na₂O + 0,658 K₂O).</i>		

Annexe A (informative)

Lignes directrices pour l'emploi du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et le mortier

A.1 Introduction

Sous réserve que les réglementations nationales l'autorisent, le ciment d'aluminates de calcium produit conformément avec la présente norme européenne peut être utilisé en construction pour des applications qui requièrent les propriétés particulières des bétons et mortiers fabriqués avec ce ciment. La présente annexe a pour but de fournir des lignes directrices pour l'emploi du ciment d'aluminates de calcium dans le béton et le mortier.

NOTE L'application de la présente annexe A n'implique pas une conformité aux dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton de CAC.

Pour s'assurer que les exigences de stabilité et de durabilité sont satisfaites, il est essentiel de tenir compte du phénomène de conversion. Pour la conception, seule la résistance après conversion doit être prise en compte. Comme pour tous les bétons conventionnels, les performances finales dépendent du rapport eau/ciment, du type et de la granulométrie du granulat, des proportions de mélange, de la production et de la mise en place. Il faut notamment prêter une attention particulière à l'impact du rapport eau/ciment sur le niveau de résistance après conversion.

Pour des raisons historiques, il est recommandé, pour l'utilisation du béton à base de ciment d'aluminates de calcium dans les applications structurales, d'appliquer un rapport eau totale/ciment inférieur ou égal à 0,40 (correspondant à un rapport eau/ciment efficace d'environ 0,33 à 0,36) pour obtenir une résistance satisfaisante après conversion. À ce niveau de rapport eau/ciment, lorsqu'il n'est pas utilisé d'adjuvant, la teneur minimale en ciment pour assurer un volume de pâte compatible avec une bonne ouvrabilité est de 400 kg/m³.

Cependant, il convient de choisir toute conception de mélange de manière à satisfaire aux exigences de résistance et de durabilité correspondant à l'application prévue. Pour des applications non structurales, des valeurs convenables de résistance et de durabilité après conversion peuvent être obtenues avec un rapport eau totale/ciment supérieur à 0,40.

Pour toute utilisation de béton à base de ciment d'aluminates de calcium, la résistance après conversion doit toujours être estimée par des méthodes appropriées permettant d'assurer la conformité aux spécifications de conception (voir A.7). Par ailleurs, il convient également de prêter une attention particulière à la durabilité du béton.

Le ciment d'aluminates de calcium n'est pas destiné à être utilisé, de façon générale, en remplacement des ciments courants de l'EN 197-1. Il sera employé dans des domaines spécialisés choisis en fonction de ses propriétés particulières :

- temps de prise normal, mais durcissement rapide ;
- résistance à la température, à l'abrasion et aux attaques chimiques ;
- vitesse de durcissement normale par temps froid (voir A.6.1).

La préparation du béton conformément aux principes donnés dans la présente annexe, n'implique en aucun cas une conformité à des codes de conception nationaux ou internationaux.

A.2 Caractéristiques spécifiques du ciment d'aluminates de calcium

A.2.1 Hydratation du ciment d'aluminates de calcium

Le principal constituant du ciment d'aluminates de calcium étant l'aluminate monocalcique, son hydratation produit des aluminates de calcium hydratés et du trihydrate d'alumine insoluble sans libérer d'hydroxyde de calcium (ou portlandite). En conséquence, le béton de CAC a une bonne résistance à de nombreux agents agressifs (voir A.3.5 et A.6.3).

EN 14647:2005 (F)

A.2.2 Nature des hydrates et processus de conversion

Les abréviations courantes, définies ci-après, sont utilisées :

A = Al_2O_3 ;

C = CaO ;

H = H_2O .

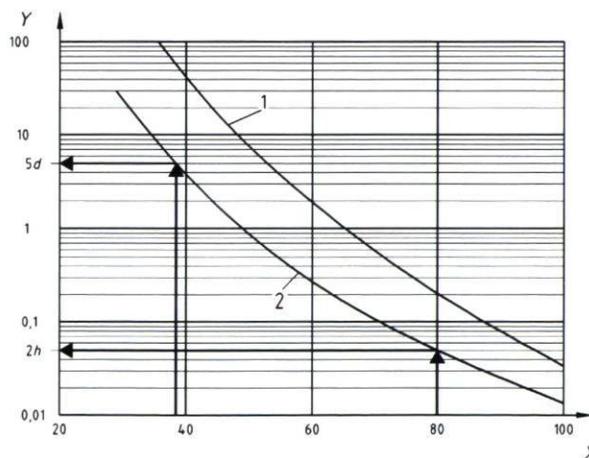
L'hydratation du CAC commence toujours par la formation d'hydrates hexagonaux métastables CAH_{10} et C_2AH_8 . À terme, les substances CAH_{10} et C_2AH_8 évoluent pour former un hydrate cubique stable, C_3AH_6 et de la gibbsite AH_3 , selon les réactions décrites ci-dessous :



Cette évolution, connue sous le terme «conversion», est inévitable et est irréversible ; il est cependant possible d'estimer le niveau minimal de résistance après conversion. Une conversion complète peut prendre plusieurs années à 20 °C, mais elle s'accélère rapidement au fur et à mesure que la température augmente, comme le montre la Figure A.1 qui fournit deux exemples des effets de la température sur la durée nécessaire pour atteindre la résistance minimale après conversion. Par exemple, lorsque la température du béton est maintenue au-dessus de 80 °C, il peut se former des hydrates stables en quelques heures à peine.

Du fait des différences de densités des hydrates, la conversion s'accompagne d'une augmentation de la porosité. La résistance après conversion est donc notablement plus faible qu'avant la conversion. Ceci explique pourquoi la résistance transitoire initiale du béton de CAC peut être plus élevée que sa résistance stable à long terme (voir A.3.4). Il est par conséquent recommandé de maintenir le rapport eau totale/ciment au plus à 0,40 pour l'emploi du CAC en structure. Cependant, la conformité à la présente spécification n'exclue pas une vérification de la conformité de la formulation à d'éventuelles autres exigences de performances.

La Figure A.1 illustre deux exemples de l'influence de la température sur la conversion. Pour cette figure, le temps pour réaliser la conversion est défini comme le temps pour atteindre la résistance minimale.



Légende

- 1 Les échantillons ont été conservés pendant 24 h à 20 °C et ensuite dans l'eau à la température donnée.
 - 2 Les échantillons ont été placés directement dans l'eau (sans conservation préliminaire) à la température de conservation donnée
- Y Temps pour atteindre la résistance minimale (échelle logarithmique en jours)
X Température de conservation (°C)

Figure A.1 — Temps pour atteindre la résistance minimale après conversion à différentes températures de conservation

A.2.3 Hydratation en présence de chaux

En présence d'hydroxyde de calcium, la vitesse de prise est fortement accrue, le durcissement est moins rapide et les résistances finales sont plus faibles.

Du fait de cette sensibilité, des précautions doivent être prises pour s'assurer que de la chaux ou du ciment à base de Portland ne s'est pas accidentellement mélangé pendant la préparation du béton.

Des mélanges de ciment d'aluminates de calcium et de ciment à base de Portland et/ou de chaux peuvent cependant être utilisés pour réaliser des mélanges à prise rapide (voir A.8 [1]). Ces mélanges ne sont pas pris en compte dans la présente annexe et doivent être étudiés au cas par cas.

A.3 Propriétés hydrauliques

A.3.1 Temps de prise

Un allongement du temps de prise peut survenir (voir A.8 [1] et A.8 [2]) à environ 28 °C. Généralement, cette anomalie du temps de prise est beaucoup moins importante dans des conditions de chantier que dans des conditions de laboratoire où tous les matériaux sont maintenus à une température donnée.

A.3.2 Propriétés spécifiques des pâtes, des mortiers et des bétons de ciment d'aluminates de calcium

La stabilité mesurée conformément à l'EN 196-3 est inférieure à la sensibilité minimale de l'instrument de mesure et, pour cette raison, la présente norme européenne ne prévoit pas de spécification pour la stabilité. En outre, du fait de l'absence de quantités significatives de chaux surcuite, de magnésie ou de sulfate, une expansion tardive n'est pas à craindre avec le ciment d'aluminates de calcium.

La chaleur d'hydratation totale du ciment d'aluminates de calcium s'échelonne de 400 J/g à 500 J/g. Elle se dégage beaucoup plus rapidement que celle du ciment Portland. Une température maximale de 70 °C à 80 °C peut être atteinte dans du béton de masse en moins de 6 h.

La variation du volume absolu de la pâte, due à la formation d'hydrates, est plus importante que pour les ciments Portland (contraction Le Chatelier).

En général, le retrait à l'air après prise se développe plus tôt que dans les mortiers et bétons de ciment Portland, mais atteint des valeurs très similaires à 28 jours.

Pour ces raisons, il convient d'appliquer des mesures de conservation appropriées afin d'éviter une fissuration précoce (voir A.4.3).

A.3.3 Protection de l'armature

Le pH de la solution interstitielle, aux alentours de 12, associé à la très faible solubilité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ dans une plage de pH 4 à 11, assure une protection satisfaisante de l'armature à condition qu'une structure dense de la pâte durcie soit obtenue et maintenue après conversion. Il est de ce fait recommandé pour les applications structurales, de maintenir le rapport eau totale/ciment inférieur ou égal à 0,40 (voir A.2.2).

Dans un environnement agressif (principalement : chlorures, sulfures, CO_2), le compactage et l'épaisseur du béton d'enrobage doivent être suffisants pour éviter une baisse du pH au niveau de l'armature, ce qui pourrait conduire à la suppression de la protection.

L'épaisseur recommandée du béton d'enrobage est celle indiquée dans les Tableaux 4-2 de l'EN 1992-1-1:2004 (voir A.8 [3]).

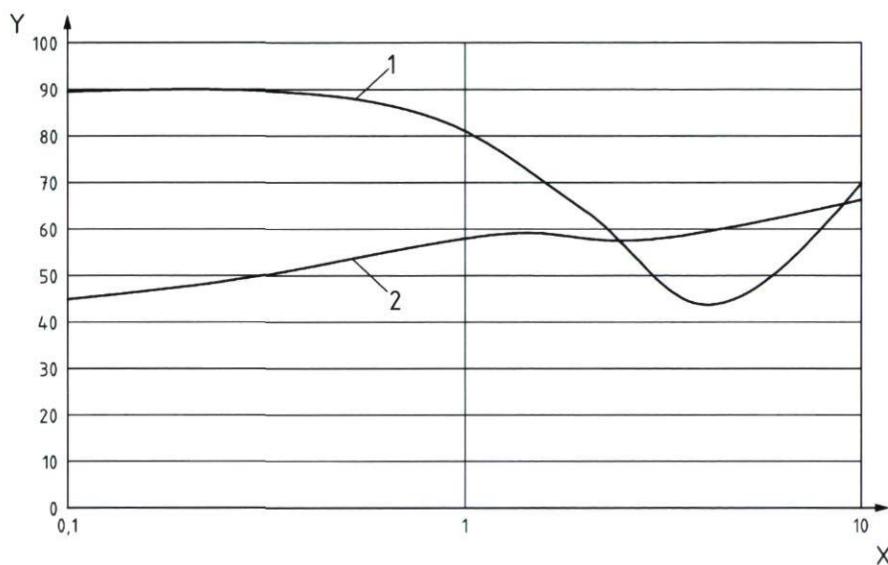
EN 14647:2005 (F)

A.3.4 Évolution des résistances

Du fait du processus de conversion décrit en A.2.2, la résistance se développe différemment selon que l'hydratation a lieu à basse ou à haute température. La Figure A.2 illustre ces différences dans le développement de la résistance sur une période de 10 ans.

Les bétons de faibles sections, maintenus à environ 20 °C, conservent leur forme métastable pendant plusieurs années, en présentant de très hautes résistances. À terme, au fur et à mesure de la progression du processus de conversion, la résistance sera réduite à un niveau stable minimal caractéristique de la formulation. Une fois la conversion terminée, la résistance se stabilisera ou même augmentera légèrement s'il y a encore hydratation.

Dans des structures en béton de forte section où une température de 75 °C peut aisément être atteinte, la conversion a lieu plus rapidement et la résistance restera stable à terme.



Légende

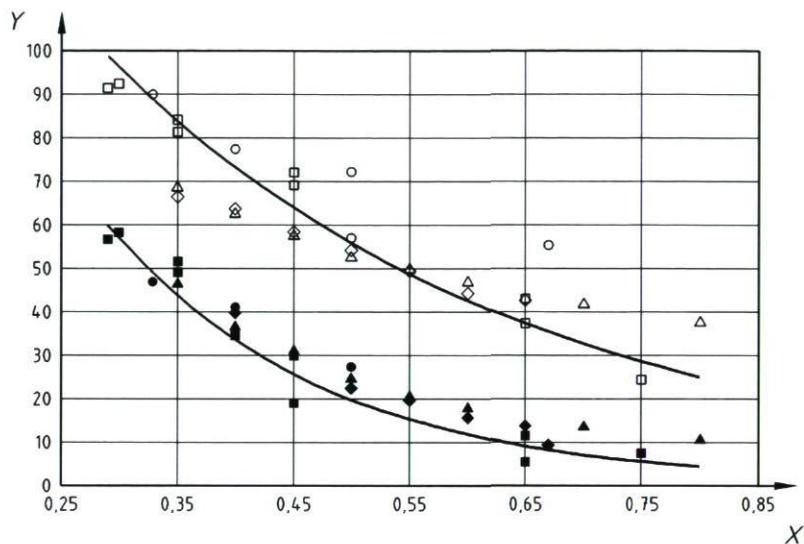
- 1 Hydratation initiale à 20 °C pendant 2 jours, puis conditions protégées en extérieur
- 2 Hydratation initiale à 70 °C pendant 2 jours, puis conditions protégées en extérieur
- Y Résistance à la compression sur cube (MPa)
- X Temps en années (échelle logarithmique)

Figure A.2 — Exemple de l'évolution de la résistance à long terme
(eau totale/ciment = 0,40 ; dosage en ciment : 400 kg/m³)

Pour les besoins de la conception, seule la résistance minimale après conversion doit être prise en compte et une méthode d'estimation de cette résistance minimale est donnée en A.7.

La Figure A.3 illustre l'influence critique du rapport E/C sur le niveau de résistance à la compression, avant et après conversion (A.8 [1] [2] [4] [5] [10] et [11]). Elle montre que la résistance après conversion ne peut pas être estimée à partir de la résistance avant conversion car le rapport entre ces deux résistances n'est pas constant. De ce fait, la résistance après conversion est la seule valeur de résistance pertinente pour les besoins de conception. Comme pour tout type de béton, il convient d'observer le rapport E/C spécifié pendant la production du béton pour obtenir les propriétés requises. La Figure A.3 illustre l'influence d'un rapport E/C s'écartant de la valeur spécifiée.

La Figure A.4 illustre l'influence du rapport E/C sur la porosité de la pâte pure de ciment avant et après conversion (A.8 [12]). La porosité joue un rôle important pour la durabilité du béton et augmente avec le rapport E/C, il est donc important de se conformer au rapport E/C spécifié pour obtenir la résistance de calcul et la durabilité.

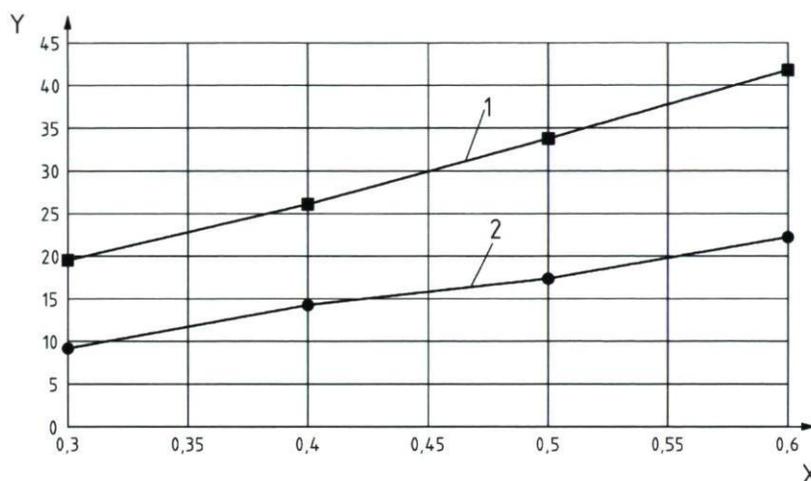


Légende

- George (1990) — Avant conversion
- George (1990) — Après conversion
- Neville (1994) — Avant conversion
- Neville (1994) — Après conversion
- ◇ Robson (1962) — Avant conversion
- ◆ Robson (1962) — Après conversion
- △ BRE (1988) — Avant conversion
- ▲ BRE (1988) — Après conversion
- Y Résistance à la compression sur cubes (MPa)
- X Rapport eau totale/ciment

Figure A.3 — Relation entre le rapport eau totale/ciment et la résistance à la compression du béton de CAC avant et après conversion

EN 14647:2005 (F)



Légende

Y	Porosimétrie au mercure (%)	1	Après conversion
X	Rapport eau/ciment	2	Avant conversion

Figure A.4 — Relation entre le rapport eau/ciment et la porosité de la pâte pure de CAC

A.3.5 Résistance aux attaques chimiques

La composition chimique particulière du ciment d'aluminates de calcium et l'absence de libération d'hydroxyde de calcium pendant l'hydratation permettent à des bétons convenablement compactés, préparés avec ce ciment, de résister à de nombreux agents agressifs (voir A.6.3). Néanmoins, si la porosité ou la perméabilité est élevée, du fait de la conversion des bétons réalisés avec des rapports E/C anormalement élevés ou du fait de la mauvaise qualité d'exécution durant la mise en place, ils peuvent devenir vulnérables aux attaques par les alcalis ou les sulfates. Dans ce cas, les alcalins libérables (K et Na), qu'ils aient pour origine les granulats, l'eau de gâchage ou le milieu ambiant (par exemple, béton poreux de ciment Portland), peuvent migrer dans le béton de CAC. En présence du CO₂ atmosphérique, des carbonates alcalins peuvent se former et déclencher la réaction connue sous le nom d'hydrolyse alcaline accompagnée de carbonatation, entraînant la perte d'intégrité de la pâte de ciment.

De la même manière, les sulfates provenant du milieu ambiant, par exemple d'eaux souterraines sulfatées ou de plâtre, peuvent migrer dans ces bétons et mortiers, ce qui peut entraîner une attaque sulfatique destructrice.

A.4 Production du béton de ciment d'aluminates de calcium

A.4.1 Choix des granulats

N'utiliser que des granulats satisfaisant aux exigences normalisées pour les granulats pour béton (voir EN 12620 ; voir A.8 [6]) ou pour mortier (EN 13139 ; voir A.8 [7]). Éviter d'utiliser des granulats contenant des sables avec des alcalins libérables, en particulier des schistes et des roches contenant des micas et des feldspaths.

Pour obtenir le rapport E/C spécifié, il est essentiel de tenir compte de l'absorption des granulats et de la teneur réelle en humidité.

A.4.2 Malaxage du béton

A.4.2.1 Généralités

Les techniques habituelles de production de béton, utilisées pour du béton de ciment courant, s'appliquent également au béton de CAC. Les recommandations spécifiques mentionnées ci-dessous revêtent une importance toute particulière.

A.4.2.2 Propreté du matériel

Éviter tout contact avec des traces d'autres types de ciments ou de bétons ou avec de la chaux, de manière à éviter une prise accélérée. Il convient que le matériel soit propre et exempt de toute trace de béton durci. Il convient que le silo utilisé pour stocker le ciment soit entièrement vidé et nettoyé avant de recevoir du ciment d'aluminates de calcium.

A.4.2.3 Dosage en ciment

Le dosage en ciment optimal dépend du type de granulats, de leur granulométrie maximale, du rapport E/C, de l'ouvrabilité recherchée et des exigences de résistance spécifiées. Pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante avec un rapport eau totale/ciment $\leq 0,40$ sans adjuvant, un dosage minimal en ciment de 400 kg/m^3 est recommandé.

A.4.2.4 Eau de gâchage

Il est essentiel que l'eau de gâchage soit propre et conforme à l'EN 1008 (voir A.8 [8]) avec comme exigence complémentaire l'interdiction d'utiliser de l'eau recyclée. L'eau de mer retardant la prise, il convient de ne pas l'utiliser pour le béton de CAC.

A.4.2.5 Rapport eau/ciment

Comme illustré dans les Figures A.3 et A.4, la résistance et la durabilité potentielle après conversion diminuent notablement au fur et à mesure que le rapport E/C augmente. Il convient de tenir dûment compte de ce fait lors de la conception du béton de CAC. Pour des applications structurales, il est recommandé que le rapport eau totale/ciment ne soit pas supérieur à 0,40. Pour des applications non structurales, il est possible d'obtenir une résistance et une durabilité appropriées après conversion avec un rapport eau totale/ciment supérieur à 0,40.

A.4.3 Mise en place et cure

Comme pour tout type de béton, il est important d'assurer un bon compactage du béton de ciment d'aluminates de calcium. Il convient d'utiliser les méthodes de serrage appropriées (aiguilles vibrantes, par exemple).

Il est essentiel que le coffrage soit propre. Toute perte de laitance doit être soigneusement évitée.

Il est nécessaire d'empêcher la dessiccation du béton en surface en utilisant une méthode de cure appropriée. Le ciment d'aluminates de calcium s'hydrate plus vite que le ciment Portland et par conséquent la température de ce béton pendant le durcissement est souvent plus élevée. Il convient donc de prêter une attention toute particulière aux éventuelles fissures thermiques et de prendre les précautions nécessaires pour assurer une conservation correcte. En fonction du type de construction, il convient d'appliquer des méthodes de cure appropriées, conformes aux règles de l'art.

EN 14647:2005 (F)**A.5 Adjuvants**

Le béton de ciment d'aluminates de calcium utilisé en construction est généralement mis en place sans aucun adjuvant. L'utilisation de dosages en ciment élevés permet d'obtenir une bonne ouvrabilité et, associée à de faibles rapports eau/ciment, une bonne qualité de compactage.

Il est possible d'utiliser des adjuvants avec des bétons de CAC afin de modifier les caractéristiques du béton frais et/ou durci. Il est cependant important de noter que les adjuvants conformes à l'EN 934-2 (A.8 [12]) recommandés pour des ciments courants selon l'EN 197-1 peuvent avoir des effets différents lorsqu'ils sont associés à des ciments d'aluminates de calcium. Il est nécessaire d'effectuer des essais préliminaires pour démontrer que les résultats prévus sont obtenus avec un adjuvant spécifique.

A.6 Utilisation du ciment d'aluminates de calcium dans des conditions particulières**A.6.1 Bétonnage par temps froid**

L'exothermicité précoce et rapide du ciment d'aluminates de calcium permet le bétonnage par temps froid.

Le béton peut être mis en place à des températures allant jusqu'à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, à condition de prendre les précautions suivantes :

- ne pas utiliser de granulats gelés ;
- utiliser de l'eau tiède pour le gâchage ;
- empêcher le béton de geler jusqu'à ce qu'il commence à durcir et que la température commence à s'élever, c'est-à-dire environ 4 à 5 h après la mise en place ; ceci peut être réalisé en l'isolant avec des sacs secs, des paillassons ou des planches etc.

A.6.2 Bétonnage par temps chaud

Le bétonnage par temps chaud peut être effectué à condition de prendre les précautions suivantes :

- ne pas exposer les constituants du béton au soleil ;
- utiliser de l'eau glacée pour le gâchage ;
- réaliser, dès que possible, une cure soignée du béton par une méthode appropriée pour éviter qu'il ne se dessèche en surface, sous l'action combinée de la température élevée de l'air et de la chaleur libérée pendant l'hydratation (A.4.3).

Lors de la mise place du béton à haute température, pour maintenir une ouvrabilité appropriée à terme, il peut être nécessaire d'utiliser un adjuvant à effet retardateur. Il est recommandé d'effectuer des essais préliminaires afin de confirmer le choix de l'adjuvant et de son dosage.

Dans le cas très particulier où tous les matériaux seraient à la même température, aux alentours de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, le durcissement peut être retardé du fait de l'anomalie sur la courbe temps de prise/température.

A.6.3 Utilisation dans des environnements chimiquement agressifs

Un béton de CAC de bonne qualité, préparé conformément aux lignes directrices de la présente annexe, peut présenter une bien meilleure résistance que celle du béton de ciment Portland vis-à-vis de nombreuses substances agressives. Ces substances comprennent les eaux pures, les sulfates contenus dans l'eau et dans le sol, l'eau de mer, les acides organiques ou minéraux dilués, ainsi que des solutions de produits organiques (sucres, huiles, bières, vins et hydrocarbures) dans une plage de pH de 4 à 11 (voir également A.3.5).

Le granulats doit aussi être choisi en fonction de sa propre résistance à l'agent corrosif considéré.

A.6.4 Entretien et réparation d'ouvrages

Il est possible d'utiliser les mortiers et les bétons de CAC pour l'entretien et la réparation d'ouvrages réalisés avec du béton de ciment courant.

L'adhérence est généralement obtenue entre les deux matériaux. Dans les cas où des alcalins solubles et du CO₂ pourraient migrer d'un béton poreux et humide de ciment courant vers le mortier ou le béton de CAC (voir A.6.3), il est recommandé d'utiliser un adhésif à base d'époxy.

A.6.5 Utilisation pour du béton à propriétés particulières

Le béton de CAC produit conformément à la présente annexe a une bonne résistance aux températures élevées, aux chocs thermiques et à l'abrasion, à condition de choisir correctement les granulats.

A.7 Essai rapide d'évaluation de la résistance minimale à long terme des bétons de ciment d'aluminates de calcium

A.7.1 Principe

La conversion est accélérée à des températures ambiantes élevées et par conséquent le temps nécessaire à l'obtention de la résistance minimale est plus court. À 38 °C, cette durée est de 5 jours et des études ont montré que la résistance minimale à long terme ne chutera pas en dessous de cette valeur (voir A.8 [5]). Les résultats de cet essai rapide peuvent donc être utilisés pour estimer les résistances de calcul maximales à long terme des bétons de CAC.

NOTE Cette période de 5 jours a été déterminée par de nombreuses études au cours desquelles le béton était immédiatement immergé après coulage, à 38 °C. Cependant, si la mise en conservation à 38 °C est retardée, la résistance minimale apparaît plus tard. Par exemple, si la mise en conservation est retardée de 24 heures après coulage, la résistance minimale apparaît à 3 mois (voir A.8 [4] et Figure A.1). Par ailleurs, il a été démontré que certains granulats et fillers, en particulier ceux contenant des carbonates (par exemple, le calcaire), peuvent retarder la conversion et donc l'obtention de la résistance minimale. Pour établir la résistance minimale, d'autres essais peuvent être nécessaires à des âges plus avancés.

A.7.2 Matériel

- a) Malaxeur à béton de laboratoire ou de chantier, d'un modèle courant ;
- b) moules de forme et de dimensions adaptées, de préférence en métal (éviter d'utiliser des matériaux calorifuges) ;
- c) moyens de mise en place et de compactage du béton ;
- d) bac de conservation thermorégulé de dimensions adaptées, capable de maintenir la température de l'eau à $(38 \pm 1) \text{ °C}$;
- e) machine d'essai à la compression normalisée.

A.7.3 Méthode d'essai

Aussitôt après le malaxage du béton, couler les éprouvettes pour essai dans les moules en assurant un serrage correct. Couvrir les moules remplis d'une plaque de verre ou de métal qui doit être en contact étroit avec la surface du béton et le bord supérieur du moule.

Placer le moule rempli et couvert dans le bac (A.7.2 d) en s'assurant qu'il est entièrement immergé.

Au bout de $(24 \pm 1) \text{ h}$, retirer le moule du bac et démouler l'éprouvette de béton. Replacer immédiatement l'éprouvette dans le bac pour éviter de refroidir le béton.

Après 4 jours supplémentaires (5 jours après la mise en place), retirer les éprouvettes du bac et mesurer la résistance à la compression conformément à la norme européenne appropriée.

NOTE Les éprouvettes peuvent, si nécessaire, être transférées dans un second bac d'eau à 20 °C pour stockage avant essai. Il convient cependant que cette durée n'excède pas 1 h.

Doubler ou tripler les essais et calculer la résistance moyenne.

EN 14647:2005 (F)**A.8 Bibliographie**

- [1] Robson T.D., High alumina cements and concretes, Contractors Records Ltd., London, 1962, fig. 23, p. 127.
- [2] George C.M., Industrial aluminous cements, Structure and performance of cements, P. Barnes Ed., London, Applied Science publishers, 1983, fig. 3, p. 423.
- [3] EN 1992-1-1, *Eurocode 2 : Calcul des structures en béton — Partie 1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.*
- [4] Collins R.J., Gutt W., Research on long-term properties of high alumina cement concrete, Magazine of concrete research, Vol. 40, N° 145, December 1988, 195-208.
- [5] Teychenné D.C., Long term research into the characteristics of high alumina cement concrete, Magazine of concrete research, Vol. 27, N° 91, June 1975, 78-102.
- [6] EN 12620, *Granulats pour béton.*
- [7] EN 13139, *Granulats pour mortiers.*
- [8] EN 1008, *Eau de gâchage pour bétons — Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.*
- [9] George C.M., Manufacture and performance of aluminous cement: a new perspective, Calcium aluminate cements, R.J. Mangabhai Ed., E.&F.N. Spon, London (1990), 181-207.
- [10] Neville A.M., Properties of concrete, 4th and Final edition, Longman, 1995, p. 99.
- [11] Cottin B., Reif P., Paramètres physiques régissant les propriétés mécaniques des pâtes pures de liants alumineux, Revue des matériaux de construction, N° 661, octobre 1970, 293-306.
- [12] EN 934-2, *Adjuvants pour béton, mortier et coulis — Partie 2 : Adjuvants pour bétons — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.*

Annexe B

(informative)

Chrome hexavalent soluble dans l'eau

Certains pays membres du CEN disposent de réglementations applicables à la teneur en chrome hexavalent soluble dans l'eau.

La modification de ces réglementations nationales ne relève pas pour l'heure de la compétence des membres du CEN/CENELEC. Dans les pays concernés, ces réglementations sont valables, outre les exigences pertinentes spécifiées dans la présente norme européenne, jusqu'à ce qu'elles aient été retirées.

Pour la présente norme européenne, les réglementations nationales des pays suivants ont été appliquées selon la Directive CE 90/531 : Allemagne, Danemark, Finlande, Islande, Norvège et Suède :

- Danemark : Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 661 af 28. November 1983 om vandopløseligt chromat i cement.
- Finlande : Decision of the Council of State concerning the content of chromate in cement for concrete et masonry cement, No. 593, July 24, 1986. (Décision du Conseil d'Etat concernant la teneur en chrome dans le ciment destiné au béton et au ciment à maçonner)
- Allemagne : Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) et TRGS 613 «Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkungen für chromathaltige Zemente und chromathaltige zementhaltige Zubereitungen, April 1993 (BArbBI Nr. 4.1993)».
- Islande : Reglur nr. 330/1989 um króm i sementi, Order No. 330 of 19 June 1989.
- Norvège : Directorate of Labour Inspection (Direction de l'Inspection du travail) : Regulations relating to the Working Environment, laid down on 23 October 1987 (Réglementations relatives à l'environnement de travail, établies le 23 octobre 1987).
- Suède : Kemikalieinspektionens föreskrifter om kemiska produkter och biotekniska organismer, KIFS 1998:8, 9 kapitlet §§ 10-13, Kemikalieinspektionens allmänna råd till föreskrifterna om krom i cement, 1989:1.

NOTE Les réglementations existantes sont en cours de remplacement par transposition de la Directive 2003/53/CE.

EN 14647:2005 (F)

Annexe ZA

(informative)

Articles de la présente Norme Européenne concernant les dispositions de la Directive UE Produits de Construction**ZA.1 Domaine d'application et caractéristiques pertinentes**

La présente Norme européenne a été élaborée dans le cadre du Mandat M/114 «Ciment, chaux de construction et autres liants hydrauliques» donné au CEN par la Commission Européenne et l'Association Européenne de Libre Échange.

Les articles/paragraphes de la présente Norme européenne, énumérés dans la présente annexe, satisfont aux exigences du Mandat donné dans le cadre de la Directive UE Produits de construction (89/106/CEE).

La conformité à ces articles/paragraphes confère une présomption d'aptitude à l'emploi des ciments d'aluminates de calcium couverts par la présente annexe pour les usages prévus et mentionnés dans les présentes ; il doit être fait référence aux informations qui accompagnent le marquage CE.

AVERTISSEMENT — D'autres exigences et d'autres Directives UE, ne traitant pas de l'aptitude à l'emploi pour des usages prévus, peuvent être applicables à un produit de construction relevant du domaine d'application de la présente norme européenne.

NOTE 1 Outre les articles spécifiques relatifs aux substances dangereuses présents dans la présente Norme européenne, il peut exister d'autres exigences applicables aux produits relevant de son domaine d'application (par exemple, législation européenne et lois nationales, dispositions administratives et réglementations transposées). Afin de satisfaire aux dispositions de la Directive UE Produits de construction, ces exigences doivent être également satisfaites au moment et sur le lieu de leur application.

NOTE 2 Une base de données informative des dispositions européennes et nationales relatives aux substances dangereuses est disponible sur le site internet de la Construction sur EUROPA à l'adresse <http://europa.eu.int/comm/enterprise/construction/internal/dangsub/dangmain.htm>.

La présente annexe fixe les conditions d'apposition du marquage CE du ciment d'aluminates de calcium destinés aux usages prévus indiqués dans le Tableau ZA.1 et présente les articles pertinents applicables :

Le domaine d'application de la présente annexe est défini par le Tableau ZA.1.

Tableau ZA.1 — Articles/paragraphes harmonisés

Produit de construction : Usage(s) prévu(s) :		Ciment d'aluminates de calcium traité dans le domaine d'application de la présente norme européenne Préparation de béton, mortier et coulis et autres mélanges pour la construction et la fabrication de produits de construction (voir les notes du présent tableau)			Notes
Exigences/caractéristiques de performance		Articles/paragraphes harmonisés dans la présente norme européenne	Article 3.2 de la DPC «Niveau(x) et/ou classe(s)»		
Ciment d'aluminates de calcium, constituants et composition du ciment	4	Constitution du ciment d'aluminates de calcium, définie sur la base de ses constituants et de sa composition.	Sans objet	Les États membres doivent choisir l'utilisation du ciment d'aluminates de calcium dans leurs réglementations techniques.	
	5				
Résistance à la compression (6 h et 24 h)	7.1	Exigences de résistance à la compression, exprimées en termes de limites inférieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Temps de prise	7.2	Exigences exprimées en termes de limites inférieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Teneur en alumine	7.3	Exigences exprimées en termes de limites inférieures et supérieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Teneur en sulfure	7.3	Exigences exprimées en termes de limites supérieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Teneur en chlorure	7.3	Exigences exprimées en termes de limites supérieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Teneur en alcalis	7.3	Exigences exprimées en termes de limites supérieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Teneur en sulfate (exprimée en SO ₃)	7.3	Exigences exprimées en termes de limites supérieures.	Sans objet	Réussite / Échec	
	9				
Durabilité	4			La durabilité concerne le béton, le mortier et autres mélanges pour la construction, fabriqués à partir de ciment d'aluminates de calcium, conformément aux règles d'application en vigueur sur le lieu d'utilisation.	
	5				

EN 14647:2005 (F)

L'exigence relative à une certaine caractéristique n'est pas applicable dans les Etats Membres (EM) où il n'existe pas d'exigences réglementaires concernant ladite caractéristique pour l'usage prévu du produit. Dans ce cas, les fabricants des produits mis sur le marché de ces Etats Membres ne sont pas tenus de déterminer ni de déclarer les performances de leurs produits eu égard à cette caractéristique et l'option «Performance Non Déterminée» (PND) peut être utilisée dans les informations accompagnant le marquage CE (voir ZA.3). L'option PND ne peut cependant pas être utilisée lorsque la caractéristique est soumise à un niveau de seuil.

ZA.2 Procédure d'attestation de conformité des produits**ZA.2.1 Système d'attestation de conformité**

Le système d'attestation de conformité du ciment d'aluminates de calcium indiqué dans le Tableau ZA.1 est présenté dans le Tableau ZA.2 pour le(s) usage(s) prévu(s) spécifié(s), conformément à la Décision du 14 juillet 1997 de la Commission (97/555/CE) publiée au Journal Officiel des Communautés Européennes et donnée à l'Annexe 3 du Mandat relatif à la famille de produits «Ciments».

Tableau ZA.2 — Système d'attestation de conformité

Produit(s)	Usage(s) prévu(s)	Niveau(x) ou classe(s)	Système(s) d'attestation de conformité
Ciment d'aluminates de calcium	Préparation de béton, mortier et coulis et autres mélanges pour la construction et la fabrication de produits de construction	1+
Système 1+ : Voir l'annexe III Section 2 point (i) de la Directive 89/106/CEE, avec essais par sondage d'échantillons prélevés en usine.			

L'attestation de conformité du ciment d'aluminates de calcium défini dans le Tableau ZA.1 doit être fondée sur l'évaluation des procédures de conformité indiquées dans le Tableau ZA.3, résultant de l'application des articles/paragraphes de la présente norme européenne qui y sont mentionnés. L'article 6 de l'EN 197-2:2000 donne les règles relatives aux actions à entreprendre dans le cas d'une non conformité.

L'article 9 de l'EN 197-2:2000, qui définit les règles relatives aux centres de distribution, ne fait pas partie intégrante de la procédure d'attestation de conformité pour l'apposition du marquage CE dans le cadre de la DPC. Toutefois, les États membres, de par leurs obligations en termes de surveillance du marché, doivent s'assurer de l'utilisation correcte du marquage CE (Article 15.1 de la DPC). Il convient d'utiliser l'article 9 de l'EN 197-2:2000 pour les dispositions nationales correspondantes concernant les centres de distribution.

Tableau ZA.3 — Affectation des tâches relatives à l'évaluation de la conformité

Tâches		Domaine d'application des tâches	Articles/paragraphes à appliquer
Tâches du fabricant	Contrôle de la production en usine	Paramètres relatifs à toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1	Article 9 et EN 197-2:2000, Article 4
	Essais complémentaires d'échantillons prélevés en usine/dépôt ^{c)}	Toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1 ^{a)}	
Tâches de l'organisme notifié	Essais de type initiaux	Toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1 ^{a)}	Article 9 et EN 197-2:2000, Articles 5 ^{b)} et 7
	Inspection initiale de l'usine et du contrôle de la production en usine	Paramètres relatifs à toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1 ^{a)}	
	Surveillance continue, évaluation et approbation du contrôle de la production en usine	Paramètres relatifs à toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1 ^{a)}	
	Essais par sondage d'échantillons prélevés en usine/dépôt	Toutes les caractéristiques pertinentes du Tableau ZA.1 ^{a)}	
<p>a) À l'exception de la durabilité.</p> <p>b) Pour le ciment d'aluminates de calcium, les critères numériques suivants doivent s'appliquer en lieu et place des valeurs données au A.3.3 et au A.3.4 de l'EN 197-2 (énumérées dans l'Article 5 de l'EN 197-2:2000) :</p> <ul style="list-style-type: none"> — $M_A - M_B \leq 3,0 \text{ MPa}$ — $S_D \leq 5,0 \text{ MPa}$ — $M_B - M_C \leq 5,0 \text{ MPa}$. <p>c) Définis comme essais d'autocontrôle par le fabricant en 9.1 et dans le Tableau 3.</p>			

ZA.2.2 Certificat de conformité et déclaration de conformité CE

Lorsque les conditions de la présente annexe sont satisfaites, l'organisme de certification doit rédiger un certificat de conformité (certificat de conformité CE), qui autorise le fabricant à apposer le marquage CE. Le certificat doit comprendre :

- le nom, l'adresse et le numéro d'identification de l'organisme de certification ;
- le nom et l'adresse du fabricant ou de son mandataire autorisé établi dans l'EEE, et le lieu de production ;
- la description du produit (type, identification, utilisation, ...) ;
- les dispositions auxquelles répond le produit (par exemple l'Annexe ZA de la présente EN) ;
- les conditions particulières d'utilisation du produit (par exemple des dispositions pour l'utilisation dans certaines conditions, etc.) ;
- le numéro du certificat ;
- les conditions et la durée de validité du certificat, le cas échéant ;
- le nom et la qualité de la personne habilitée à signer le certificat.

EN 14647:2005 (F)

Par ailleurs, le fabricant doit rédiger une déclaration de conformité (Déclaration de conformité CE) comprenant les informations suivantes :

- le nom et l'adresse du fabricant ou de son mandataire autorisé établi dans l'EEE ;
- le nom et l'adresse de l'organisme de certification ;
- la description du produit (type, identification, utilisation, ...) et une copie des informations accompagnant le marquage CE ;
- les dispositions auxquelles répond le produit (par exemple l'Annexe ZA de la présente EN) ;
- les conditions particulières d'utilisation du produit (par exemple des dispositions pour l'utilisation dans certaines conditions, etc.) ;
- le numéro du certificat de conformité CE joint ;
- le nom et la qualité de la personne habilitée à signer la déclaration au nom du fabricant ou de son mandataire autorisé.

La déclaration et le certificat susmentionnés doivent être présentés dans la ou les langues officielles de l'État Membre dans lequel le produit est destiné à être utilisé.

ZA.3 Marquage CE et étiquetage

Le fabricant ou son mandataire autorisé établi dans l'EEE est chargé d'apposer le marquage CE. Le symbole de marquage CE à apposer doit être conforme à la Directive 93/68/CE et doit figurer sur le sac de ciment d'aluminates de calcium (ou, lorsque cela n'est pas possible, il peut être apposé sur l'étiquette d'accompagnement, l'emballage ou sur les documents commerciaux d'accompagnement, par exemple le bon de livraison). Les informations suivantes doivent accompagner le symbole de marquage CE :

- le numéro d'identification de l'organisme de certification ;
- le nom ou la marque distinctive et l'adresse légale du fabricant ;
- les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage ;
- le numéro du certificat de conformité CE ou du certificat de contrôle de la production en usine ;
- la référence à la présente norme européenne ;
- la description du produit : la dénomination générique, ... et l'usage prévu ;
- les informations concernant les caractéristiques essentielles pertinentes énumérées dans le Tableau ZA.1 qui doivent être présentées sous la forme :
 - de valeurs déclarées et, le cas échéant, de niveau ou de classe (y compris le critère «réussite» pour les exigences relatives à la réussite/échec, si nécessaire) à déclarer pour chaque caractéristique essentielle, telle qu'indiquée dans la partie «Notes» du Tableau ZA.1 ;
 - ou de désignation(s) générique(s), seule(s) ou combinée(s) aux valeurs déclarées ci-dessus, et ;
 - l'option «Performance non déterminée» pour les caractéristiques concernées.

L'option «Performance non déterminée» (PND) ne peut pas être utilisée lorsque la caractéristique est soumise à un niveau de seuil. Autrement, l'option PND peut être utilisée à condition que la caractéristique, pour une application prévue déterminée, ne soit pas soumise à des exigences réglementaires dans l'État Membre de destination.

La Figure ZA.1 donne un exemple des informations à fournir concernant le produit, l'étiquette, l'emballage et/ou les documents commerciaux.

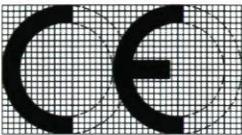
 0123	<i>Marquage de conformité CE, constitué du symbole «CE» donné dans la Directive 93/68/CEE</i>
Société Adresse légale Usine Année 04 (ou emplacement du marquage de la date) 0123-DPC-0456 EN 14647 CAC	<i>Numéro d'identification de l'organisme de certification</i> <i>Le nom ou la marque distinctive du fabricant</i> <i>L'adresse enregistrée du fabricant</i> <i>Nom ou marque distinctive de l'usine de production du ciment ¹⁾</i> <i>Les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage ²⁾</i> <i>Numéro du certificat de conformité CE</i> <i>Numéro de la Norme européenne</i> <i>Exemple de désignation normalisée, mentionnant le type de ciment tel que spécifié à l'Article 8 de la présente Norme européenne</i>

Figure ZA.1 — Exemple d'informations relatives au marquage CE

Pour des raisons pratiques, il est possible de choisir parmi les différentes dispositions suivantes, pour le ciment ensaché, concernant la présentation des informations d'accompagnement :

- a) Lorsque le marquage CE est apposé sur le sac (ce qui représente la situation normale préférable), les éléments mentionnés à la Figure ZA.1 doivent être fournis.
- b) Lorsque les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage CE sont préimprimés sur le sac, il convient que l'année ainsi imprimée fasse référence à la date d'apposition avec une précision de plus ou moins trois mois.
- c) Lorsque les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage doivent être présentés mais non préimprimés sur le sac, ils peuvent être appliqués sous la forme d'un marquage de la date sur le sac en un emplacement facilement visible. Il convient d'indiquer l'emplacement d'apposition de la date dans les informations d'accompagnement du marquage CE.

Dans le cas de ciment en vrac, il convient d'apposer le marquage de conformité CE, le numéro d'identification de l'organisme de certification et les informations d'accompagnement énumérées précédemment pour le ciment ensaché, sur les documents commerciaux d'accompagnement, sous une forme pratique appropriée.

En complément de toutes les informations spécifiques relatives aux substances dangereuses présentées ci-dessus, il convient également d'accompagner le produit, lorsque cela est exigé et dans la forme appropriée, d'une liste stipulant toute autre législation relative aux substances dangereuses à laquelle le produit prétend être conforme, ainsi que de toutes les informations exigées par cette législation.

NOTE Il n'est pas nécessaire de mentionner la législation européenne sans dérogations nationales.

1) *Considérée comme nécessaire pour les exigences de l'EN 197-2 mais non obligatoire.*

2) *Il convient que l'année de marquage corresponde soit à la date d'ensachage soit à la date d'expédition de l'usine ou du dépôt.*

NF EN 14647 - Boutique AFNOR pour : KERNEOS le 12/2/2007 15:09

EN 14647:2005 (F)

Bibliographie

[13] EN 197-1, *Ciment — Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.*

Annexe A.2



À : Madame Julie Conseiller
UNIVERSITÉ LAVAL
Pavillon Adrien-Pouliot
Département de génie civil
Local 2928-N
Québec, Canada
G1K 7P4

De : Mathieu Dubé
COREM
1180, rue de la Minéralogie
Québec (Québec)
G1N 1X7

Date : 2009-02-16

Sujet : Mesures de densité, blaine et analyses chimiques

Madame,

Voici les résultats obtenus sur les échantillons que vous nous avez fait parvenir:

Mesure de densité

Le tableau 1 présente le résultat de mesure de densité effectuée sur les échantillons reçus. La mesure a été effectuée à l'aide d'un pycnomètre à l'hélium de marque Micromeritics.

Identification	Densité (g/cm ³)
L-08-012	3.21
L-08-013	3.05

Mesure de Blaine

Le tableau 2 présente le résultat de mesure de Blaine effectuée sur les échantillons reçus. La mesure a été effectuée selon la norme ASTM C 204 - 00.

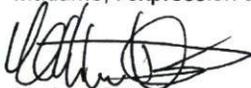
Identification	Blaine (cm ² /g)
L-08-012	3235
L-08-013	4680

Notez que le calcul de Blaine a été effectué à l'aide de la constante spécifique du ciment spécifié dans la norme ASTM (donc b_s et $b = 0.9$ voir annexe 2). La détermination de la constante b pour un matériel autre que le ciment pourrait être effectuée. Par contre, cela nécessite plusieurs mesures. Pour plus de détails ou si vous possédez déjà les constantes b de ce matériel et désirez refaire les calculs de Blaine, n'hésitez pas à me contacter.

Analyses chimiques

L'annexe 1 présente les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons reçus. Les analyses chimiques ont été faites par fluorescence X (oxide majeur).

En espérant que le tout vous donnera satisfaction, nous vous prions d'agréer Madame, l'expression de nos sentiments distingués.



Mathieu Dubé Ing.
COREM

Annexe 1



RAPPORT D'ANALYSE version 1

Votre référence ...: C0000049

Michel Garant
COREM

Date de réception : 2009-02-10

Certificat émis le : 2009-02-11

Numéro COREM :	26300- 1	26300- 2
Nature :	SOLIDES	SOLIDES
Désignation :	Ciment fondueL08-012	LBC-47-R6 L08-013
A01- 2 Analyse	2009-02-11	2009-02-11
A01- 2 SiO2	4.65 %	14.7 %
A01- 2 Al2O3	39.2 %	34.0 %
A01- 2 Fe2O3	15.6 %	11.6 %
A01- 2 MgO	0.80 %	2.31 %
A01- 2 CaO	37.8 %	34.9 %
A01- 2 Na2O	< 0.10 %	< 0.10 %
A01- 2 K2O	0.12 %	0.19 %
A01- 2 TiO2	1.85 %	1.59 %
A01- 2 MnO	0.21 %	0.11 %
A01- 2 P2O5	0.16 %	0.07 %
A01- 2 Cr2O3	0.11 %	0.08 %
A01- 2 PAF	0.20 %	0.35 %

Responsable :

Bernard Montminy, chimiste, M.Sc.
Directeur adjoint à la réalisation technique

Ce rapport contient des renseignements protégés et confidentiels à l'intention du destinataire. Les résultats ne se rapportent qu'aux échantillons soumis à l'analyse.
Cette version remplace et annule toute version antérieure, le cas échéant. * Analyse faite par un sous-traitant.

COREM

1180, rue de la Minéralogie, Québec (Québec) Canada G1N 1X7

Téléphone : (418) 527-8211

Télécopieur : (418) 527-4818

F-GEN-53

Page : | de |

Annexe 2

Calcul de la valeur de Blaine à partir des données expérimentales et celles fournies par le client :

En utilisant l'équation 7 de la norme ASTM C204-00 :

$$S = \frac{S_s \rho_s (b_s - \varepsilon_s) \sqrt{\varepsilon^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \varepsilon) \sqrt{\varepsilon_s^3} \sqrt{T_s}}$$

où

S = Surface spécifique de l'échantillon (Blaine)

S_s = Surface spécifique de la référence de calibration (National Institute of Standards & Technology - Standard Reference Material 114p = 3774 cm²/g ou 377.4 m²/kg)

T = Temps mesuré sur l'échantillon

T_s = Temps mesuré sur la référence de calibration

ε = Porosité du lit préparé avec l'échantillon

ε_s = Porosité du lit préparé avec la référence de calibration

ρ = Densité de l'échantillon (fournie par le client ou mesuré)

ρ_s = Densité de la référence de calibration (3.15 g/cm³)

b = Constante spécifique au matériel (0.9 pour du ciment)

b_s = Constante spécifique la référence de calibration (0.9)



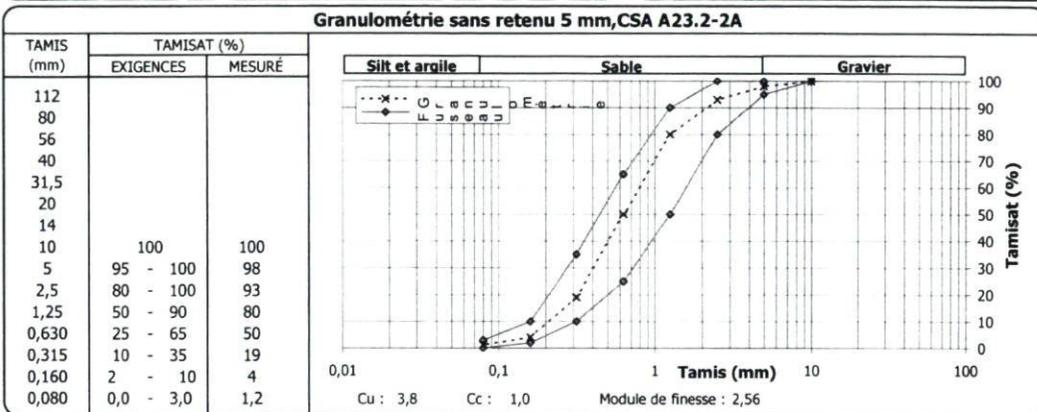
Laboratoire de matériaux de Québec (1987) inc.

Annexe A.3

2445, av. Dalton
Québec (QC) G1P 3S5
Téléphone : 418-659-5115Essais sur sols, granulats
et autres matériaux

Client : UNIVERSITE LAVAL Pavillon Adrien-Pouliot	Dossier : P008090-508
Projet : SERVICES DE LABORATOIRE (Université Laval CRIB)	Réf. client :
Endroit : Université Laval, Québec (Québec)	Rapport n° : 1 Rév. 0 Page 1 de 1

Échantillonnage		Spécification n° 1	
N° d'échantillon	: 1	Référence	: CCDG du MTQ
N° d'échantillon client	: L06-207	Usage	: Granulats pour béton de ciment
Type de matériau	: Sable tamisé	Calibre	: BC 80µm-5
Source première	: Sablière LADUFO Inc	Classe	:
Ville	: St-Joachim	Prélevé le	:
Endroit échantillonné	: Banc de la voirie	Par	:
		Reçu le	: 2007-01-22



Masse vol. sèche maximale kg/m ³	Humidité optimale %	Retenu 5 mm %	Proportions selon analyse granulométrique (%)	
			Cailloux : 0,0%	Sable : 96,8%
			Gravier : 2,0%	Silt et argile : 1,2%

Autres essais	Exigé	Mesuré
Dens. relative < 5 mm, CSA A23.2-6A		2,688
Absorption (%)		0,54

Remarques

UN ASTERISQUE ACCOMPAGNE TOUT RESULTAT INDIVIDUEL NON CONFORME

Préparé par : <i>Michel Rousseau</i> Michel Rousseau, resp. labo.	Date : 2007-01-24	Approuvé par : <i>Pierre Simard</i> Pierre Simard, tech.princ.	Date : 2007-01-30
--	-----------------------------	---	-----------------------------

EQ-09-IM-229 rév. 00 (06-03)

Cliant :	UNIVERSITÉ LAVAL - Centre de recherche sur les infrastructures	Dossier :	P018824-0510
Projet :	Service de laboratoire	Réf. cliant :	BC-600254
	; Essais sur granulats (U.L.)	Rapport n° :	1 Rév. 0
Endroit :	Québec		Page 1 de 1

Échantillonnage		Spécification n° 1	
N° d'échantillon	: 1	Référence	: CCDG
N° d'échantillon client	: L08-301	Usage	: Gros granulats
Type de matériau	: Pierre concassée	Calibre	: BC 5-14
Source première; ville	: Carrière Graymont(Portneuf)	Classe	:
Endroit échantillonné	: Réserve U.Laval;	Prélevé le	: 2008-10-02
		Par	: le client
		Reçu le	: 2008-10-02

Analyse granulométrique (CSA A23,2-2A)		
TAMIS (mm)	TAMISAT (%)	
	EXIGENCES	MESURÉ
112		
80		
56		
40		
28		
20	100	100
14	90 - 100	87 *
10	45 - 75	10 *
5	0 - 15	2
2,5	0 - 5	1

Proportions selon analyse granulométrique (%)		
Masse vol. sèche maximale kg/m ³	Humidité optimale %	Retenu 5 mm %
	Cailloux :	Sable :
	Gravier :	Silt et argile :

Autres essais		Exigé	Mesuré
Densité relative brute (CSA A23,2-12A)			2,659
Densité relative brute S.S.S. (CSA A23,2-12A)			2,674
Densité relative apparente (CSA A23,2-12A)			2,700
Absorption (CSA A23,2-12A) (%)			0,58

Remarques

UN ASTERISQUE ACCOMPAGNE TOUT RESULTAT INDIVIDUEL NON CONFORME

Préparé par :	Date :	Approuvé par :	Date :
Sylvie Hamel, Chef laboratoire	2008-10-08	Pierre Simard, tech. princ.	

Annexe A.5

LVM
TECHNISOL

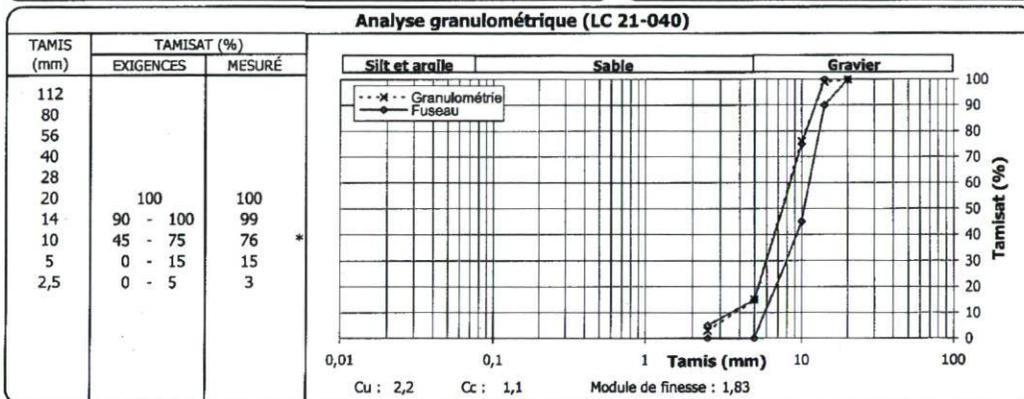
325, rue de l'Espina
Québec, G1L 2J2
Téléphone: (418) 647-1402

**Essais sur sols, granulats
et autres matériaux**

Cliant : UNIVERSITÉ LAVAL - Centre de recherche infrastructures en béton
Projet : Service de laboratoire ; Essais sur granulats (U.L.)
Endroit : Québec

Dossier : P018824-0510
Réf. client : BC : 642286
Rapport n° : 13 Rév. 0
Page : 1 de 1

Échantillonnage		Spécification n° 1	
N° d'échantillon	: 13	Référence	: CCDG
N° d'échantillon client	: L09-303	Usage	: Gros granulats
Type de matériau	: Pierre concassée	Callibre	: BC 5-14
Source première; ville	: Bédard Québec	Classe	: granitique
Endroit échantillonné	: Réserve BP;	Prélevé le	: le client
		Par	: 2009-08-13
		Reçu le	: 2009-08-13



Masse vol. sèche maximale kg/m ³	Humidité optimale %	Retenu 5 mm %	Proportions selon analyse granulométrique (%)	
			Cailloux : 0,0	Sable : 14,5
			Gravier : 85,5	Silt et argile : 0,0

Autres essais		Exigé	Mesuré
Densité relative brute (LC 21-067)			2,690
Densité relative brute S.S.S. (LC 21-067)			2,706
Densité relative apparente (LC 21-067)			2,735
Absorption (LC 21-067) (%)			0,61

Remarques

UN ASTERISQUE ACCOMPAGNE TOUT RÉSULTAT NON CONFORME

Préparé par : Sylvie Hamel, Chef laboratoire	Date : 2009-08-17	Approuvé par : Pierre Simard, tech. princ.	Date : 2009-08-17
--	-----------------------------	--	-----------------------------

EQ-09-IM-229 rév. 00 (06-03)

LVM
TECHNISOL

Annexe A.6

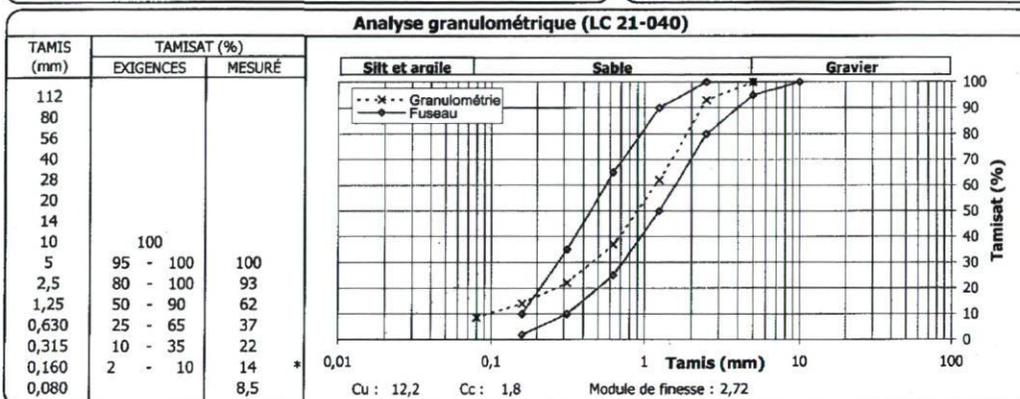
325, rue de l'Éspinay
Québec, G1L 2J2
Téléphone: (418) 647-1402

Essais sur sols, granulats et autres matériaux

Client : UNIVERSITÉ LAVAL - Centre de recherche infrastructures en béton
Projet : Service de laboratoire ; Essais sur granulats (U.L.)
Endroit : Québec

Dossier : P018824-0510
Réf. client :
BC : 642286
Rapport n° : 14
Rév. : 0
Page : 1 de 1

Échantillonnage		Spécification n° 2	
N° d'échantillon	: 14	Référence	: CCDG
N° d'échantillon client	: L09-202	Usage	: Granulats fins
Type de matériau	: Sable (calcaire)	Calibre	: BC 80µm-5
Source première; ville	: St-Eugène	Classe	:
Endroit échantillonné	: Réserve Béton Alliance;	Prélevé le	:
		Par	: le client
		Reçu le	: 2009-08-13



Masse vol. sèche maximale kg/m ³	Humidité optimale %	Retenu 5 mm %	Proportions selon analyse granulométrique (%)	
			Cailloux : 0,0	Sable : 91,5
			Gravier : 0,0	Silt et argile : 8,5

Autres essais		Exigé	Mesuré
Densité relative brute (LC 21-065)			2,691
Densité relative brute S.S.S. (LC 21-065)			2,704
Densité relative apparente (LC 21-065)			2,726
Absorption (LC 21-065) (%)			0,48

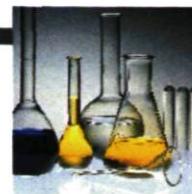
Remarques

UN ASTÉRISQUE ACCOMPAGNE TOUT RESULTAT NON CONFORME

Préparé par : Sylvie Hamer, Chef laboratoire	Date : 2009-08-21	Approuvé par : Pierre Simard, tech. princ.	Date : 2009-08-21
--	-----------------------------	--	-----------------------------



Annexe A.7



1.1-14

CHRYSO® Fluid Optima 203

Plastifiant – Réducteur d'eau

**Descriptif**

CHRYSO® Fluid Optima 203 est un plastifiant – réducteur d'eau à fonction superplastifiant de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est particulièrement adapté pour l'obtention de long maintien d'ouvrabilité avec des ciments pour lesquels cette propriété est difficilement réalisable.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi.

CHRYSO® Fluid Optima 203 permet la réalisation des bétons auto-plaçants homogènes.

Caractéristiques

- Nature : liquide
- Couleur : vert-brun
- Densité (20 °C) : 1,04 ± 0,01
- pH : 7,0 ± 2,0
- Teneur en ions Cl⁻ : ≤ 0,10 %
- Na₂O équivalent : ≤ 1,0 %
- Extrait sec (halogène) : 21,5 % ± 1 %
- Extrait sec (EN 480-8) : 21,7 % ± 1 %

Conditionnement

- Vrac
- Tonnelets de 60 L
- Fûts plastiques de 215 L
- Cubitainers de 1000 L

Conformité

CHRYSO® Fluid Optima 203 est un plastifiant - réducteur d'eau qui satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site internet.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est également conforme au référentiel de certification NF 085, dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est conforme à la norme ASTM C494 – Types A/F/G.

Adresse AFNOR – 11 avenue F. de Pressensé – 93571 Saint Denis La Plaine Cedex

Application**Domaines d'application**

- BPE
- BHP et BTHP
- Bétons plastiques ou fluides
- Bétons auto-plaçants

Mode d'emploi

Plaque de dosage : 0,3 à 3,0 kg pour 100 kg de ciment.

CHRYSO® Fluid Optima 203 peut être utilisé dans l'eau de gâchage ou en différé sur le béton.

Utilisé en temps que fluidifiant, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse 1 minute par m³ de béton (avec un minimum total de 6 minutes).

Précautions

- Eviter l'exposition du produit à de fortes chaleurs.
- Stocker à l'abri du gel.
- En cas de gel, le produit conserve ses propriétés une fois dégelé et homogénéisé par agitation.
- Conditionnement et stockage en matériaux plastiques, hors PVC.
- Durée de vie : 12 mois.



1.1-14

CHRYSO® Fluid Optima 203

Plastifiant – Réducteur d'eau



Références

- Tunnel de Nancy Creek – USA

Sécurité

CHRYSO® Fluid Optima 203 est un produit "sans danger". Le port d'équipements de protection individuelle est recommandé.

Pour plus d'informations, consulter la fiche de données de sécurité sur le site internet www.chryso.com.

Les informations contenues dans la présente notice sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un souci constant d'objectivité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application défectueuse. Des essais préalables à chaque utilisation permettront de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application du produit sont satisfaisants. Nos spécialistes sont à la disposition des utilisateurs pour les aider à résoudre au mieux leurs problèmes.

« Se renseigner sur la dernière mise à jour »

Dernière modification : 09/08

Annexe A.8

Designation: C 39/C 39M – 05^{ε1}

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C 39/C 39M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

^{ε1} Note—Note 1 was corrected editorially in September 2006.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of compressive strength of cylindrical concrete specimens such as molded cylinders and drilled cores. It is limited to concrete having a unit weight in excess of 50 lb/ft³ [800 kg/m³].

1.2 The values stated in either inch-pound or SI units are to be regarded separately as standard. The SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (**Warning**—Means should be provided to contain concrete fragments during sudden rupture of specimens. Tendency for sudden rupture increases with increasing concrete strength and it is more likely when the testing machine is relatively flexible. The safety precautions given in the Manual of Aggregate and Concrete Testing are recommended.)

1.4 The text of this standard references notes which provide explanatory material. These notes shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:²

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing Concrete for Strength.

Current edition approved Nov. 1, 2005. Published November 2005. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2004 as C 39/C 39M – 04a.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- C 31/C 31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C 42/C 42M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete
- C 192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C 873 Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds
- C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation
- C 1231/C 1231M Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines
- E 74 Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines
- Manual of Aggregate and Concrete Testing

3. Summary of Test Method

3.1 This test method consists of applying a compressive axial load to molded cylinders or cores at a rate which is within a prescribed range until failure occurs. The compressive strength of the specimen is calculated by dividing the maximum load attained during the test by the cross-sectional area of the specimen.

4. Significance and Use

4.1 Care must be exercised in the interpretation of the significance of compressive strength determinations by this test method since strength is not a fundamental or intrinsic property of concrete made from given materials. Values obtained will depend on the size and shape of the specimen, batching, mixing

 C 39/C 39M – 05*1

procedures, the methods of sampling, molding, and fabrication and the age, temperature, and moisture conditions during curing.

4.2 This test method is used to determine compressive strength of cylindrical specimens prepared and cured in accordance with Practices C 31/C 31M, C 192/C 192M, C 617, and C 1231/C 1231M and Test Methods C 42/C 42M and C 873.

4.3 The results of this test method are used as a basis for quality control of concrete proportioning, mixing, and placing operations; determination of compliance with specifications; control for evaluating effectiveness of admixtures; and similar uses.

4.4 The individual who tests concrete cylinders for acceptance testing shall meet the concrete laboratory technician requirements of Practice C 1077, including an examination requiring performance demonstration that is evaluated by an independent examiner.

NOTE 1—Certification equivalent to the minimum guidelines for ACI Concrete Laboratory Technician, Level 1 or ACI Concrete Strength Testing Technician will satisfy this requirement.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—The testing machine shall be of a type having sufficient capacity and capable of providing the rates of loading prescribed in 7.5.

5.1.1 Verify calibration of the testing machines in accordance with Practices E 4, except that the verified loading range shall be as required in 5.3. Verification is required under the following conditions:

5.1.1.1 At least annually, but not to exceed 13 months.

5.1.1.2 On original installation or immediately after relocation.

5.1.1.3 Immediately after making repairs or adjustments that affect the operation of the force applying system or the values displayed on the load indicating system, except for zero adjustments that compensate for the mass of bearing blocks or specimen, or both, or

5.1.1.4 Whenever there is reason to suspect the accuracy of the indicated loads.

5.1.2 *Design*—The design of the machine must include the following features:

5.1.2.1 The machine must be power operated and must apply the load continuously rather than intermittently, and without shock. If it has only one loading rate (meeting the requirements of 7.5), it must be provided with a supplemental means for loading at a rate suitable for verification. This supplemental means of loading may be power or hand operated.

5.1.2.2 The space provided for test specimens shall be large enough to accommodate, in a readable position, an elastic calibration device which is of sufficient capacity to cover the potential loading range of the testing machine and which complies with the requirements of Practice E 74.

NOTE 2—The types of elastic calibration devices most generally available and most commonly used for this purpose are the circular proving ring or load cell.

5.1.3 *Accuracy*—The accuracy of the testing machine shall be in accordance with the following provisions:

5.1.3.1 The percentage of error for the loads within the proposed range of use of the testing machine shall not exceed $\pm 1.0\%$ of the indicated load.

5.1.3.2 The accuracy of the testing machine shall be verified by applying five test loads in four approximately equal increments in ascending order. The difference between any two successive test loads shall not exceed one third of the difference between the maximum and minimum test loads.

5.1.3.3 The test load as indicated by the testing machine and the applied load computed from the readings of the verification device shall be recorded at each test point. Calculate the error, E , and the percentage of error, E_p , for each point from these data as follows:

$$E = A - B \quad (1)$$

$$E_p = 100(A - B)/B$$

where:

A = load, lbf [kN] indicated by the machine being verified, and

B = applied load, lbf [kN] as determined by the calibrating device.

5.1.3.4 The report on the verification of a testing machine shall state within what loading range it was found to conform to specification requirements rather than reporting a blanket acceptance or rejection. In no case shall the loading range be stated as including loads below the value which is 100 times the smallest change of load estimable on the load-indicating mechanism of the testing machine or loads within that portion of the range below 10% of the maximum range capacity.

5.1.3.5 In no case shall the loading range be stated as including loads outside the range of loads applied during the verification test.

5.1.3.6 The indicated load of a testing machine shall not be corrected either by calculation or by the use of a calibration diagram to obtain values within the required permissible variation.

5.2 The testing machine shall be equipped with two steel bearing blocks with hardened faces (Note 3), one of which is a spherically seated block that will bear on the upper surface of the specimen, and the other a solid block on which the specimen shall rest. Bearing faces of the blocks shall have a minimum dimension at least 3% greater than the diameter of the specimen to be tested. Except for the concentric circles described below, the bearing faces shall not depart from a plane by more than 0.001 in. [0.02 mm] in any 6 in. [150 mm] of blocks 6 in. [150 mm] in diameter or larger, or by more than 0.001 in. [0.02 mm] in the diameter of any smaller block; and new blocks shall be manufactured within one half of this tolerance. When the diameter of the bearing face of the spherically seated block exceeds the diameter of the specimen by more than 0.5 in. [13 mm], concentric circles not more than 0.03 in. [0.8 mm] deep and not more than 0.04 in. [1 mm] wide shall be inscribed to facilitate proper centering.

NOTE 3—It is desirable that the bearing faces of blocks used for compression testing of concrete have a Rockwell hardness of not less than 55 HRC.

5.2.1 Bottom bearing blocks shall conform to the following requirements:


C 39/C 39M - 05^{e1}

5.2.1.1 The bottom bearing block is specified for the purpose of providing a readily machinable surface for maintenance of the specified surface conditions (Note 4). The top and bottom surfaces shall be parallel to each other. If the testing machine is so designed that the platen itself is readily maintained in the specified surface condition, a bottom block is not required. Its least horizontal dimension shall be at least 3% greater than the diameter of the specimen to be tested. Concentric circles as described in 5.2 are optional on the bottom block.

NOTE 4—The block may be fastened to the platen of the testing machine.

5.2.1.2 Final centering must be made with reference to the upper spherical block. When the lower bearing block is used to assist in centering the specimen, the center of the concentric rings, when provided, or the center of the block itself must be directly below the center of the spherical head. Provision shall be made on the platen of the machine to assure such a position.

5.2.1.3 The bottom bearing block shall be at least 1 in. [25 mm] thick when new, and at least 0.9 in. [22.5 mm] thick after any resurfacing operations.

5.2.2 The spherically seated bearing block shall conform to the following requirements:

5.2.2.1 The maximum diameter of the bearing face of the suspended spherically seated block shall not exceed the values given below:

Diameter of Test Specimens, in. [mm]	Maximum Diameter of Bearing Face, in. [mm]
2 [50]	4 [105]
3 [75]	5 [130]
4 [100]	6.5 [165]
6 [150]	10 [255]
8 [200]	11 [280]

NOTE 5—Square bearing faces are permissible, provided the diameter of the largest possible inscribed circle does not exceed the above diameter.

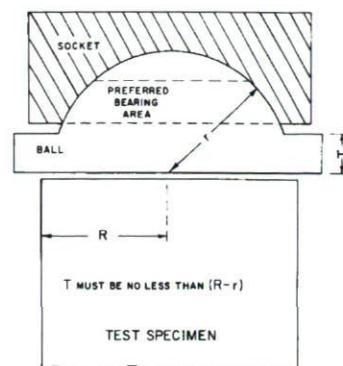
5.2.2.2 The center of the sphere shall coincide with the surface of the bearing face within a tolerance of $\pm 5\%$ of the radius of the sphere. The diameter of the sphere shall be at least 75% of the diameter of the specimen to be tested.

5.2.2.3 The ball and the socket shall be designed so that the steel in the contact area does not permanently deform when loaded to the capacity of the testing machine.

NOTE 6—The preferred contact area is in the form of a ring (described as preferred “bearing” area) as shown on Fig. 1.

5.2.2.4 The curved surfaces of the socket and of the spherical portion shall be kept clean and shall be lubricated with a petroleum-type oil such as conventional motor oil, not with a pressure type grease. After contacting the specimen and application of small initial load, further tilting of the spherically seated block is not intended and is undesirable.

5.2.2.5 If the radius of the sphere is smaller than the radius of the largest specimen to be tested, the portion of the bearing face extending beyond the sphere shall have a thickness not less than the difference between the radius of the sphere and radius of the specimen. The least dimension of the bearing face shall be at least as great as the diameter of the sphere (see Fig. 1).



NOTE—Provision shall be made for holding the ball in the socket and for holding the entire unit in the testing machine.

FIG. 1 Schematic Sketch of a Typical Spherical Bearing Block

5.2.2.6 The movable portion of the bearing block shall be held closely in the spherical seat, but the design shall be such that the bearing face can be rotated freely and tilted at least 4° in any direction.

5.2.2.7 If the ball portion of the upper bearing block is a two-piece design composed of a spherical portion and a bearing plate, a mechanical means shall be provided to ensure that the spherical portion is fixed and centered on the bearing plate.

5.3 Load Indication:

5.3.1 If the load of a compression machine used in concrete testing is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that is readable to at least the nearest 0.1% of the full scale load (Note 7). The dial shall be readable within 1% of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment located outside the dialcase and easily accessible from the front of the machine while observing the zero mark and dial pointer. Each dial shall be equipped with a suitable device that at all times, until reset, will indicate to within 1% accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 7—Readability is considered to be 0.02 in. [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of a scale interval is readable with reasonable certainty when the spacing on the load indicating mechanism is between 0.04 in. [1 mm] and 0.06 in. [2 mm]. When the spacing is between 0.06 and 0.12 in. [2 and 3 mm], one third of a scale interval is readable with reasonable certainty. When the spacing is 0.12 in. [3 mm] or more, one fourth of a scale interval is readable with reasonable certainty.

5.3.2 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read.


C 39/C 39M – 05^{e1}

The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

6. Specimens

6.1 Specimens shall not be tested if any individual diameter of a cylinder differs from any other diameter of the same cylinder by more than 2 %.

NOTE 8—This may occur when single use molds are damaged or deformed during shipment, when flexible single use molds are deformed during molding, or when a core drill deflects or shifts during drilling.

6.2 Prior to testing, neither end of test specimens shall depart from perpendicularity to the axis by more than 0.5° (approximately equivalent to 0.12 in. in 12 in. [1 mm in 100 mm]). The ends of compression test specimens that are not plane within 0.002 in. [0.050 mm] shall be sawed or ground to meet that tolerance, or capped in accordance with either Practice C 617 or, when permitted, Practice C 1231/C 1231M. The diameter used for calculating the cross-sectional area of the test specimen shall be determined to the nearest 0.01 in. [0.25 mm] by averaging two diameters measured at right angles to each other at about midheight of the specimen.

6.3 The number of individual cylinders measured for determination of average diameter is not prohibited from being reduced to one for each ten specimens or three specimens per day, whichever is greater, if all cylinders are known to have been made from a single lot of reusable or single-use molds which consistently produce specimens with average diameters within a range of 0.02 in. [0.5 mm]. When the average diameters do not fall within the range of 0.02 in. [0.5 mm] or when the cylinders are not made from a single lot of molds, each cylinder tested must be measured and the value used in calculation of the unit compressive strength of that specimen. When the diameters are measured at the reduced frequency, the cross-sectional areas of all cylinders tested on that day shall be computed from the average of the diameters of the three or more cylinders representing the group tested that day.

6.4 If the purchaser of the testing services requests measurement of density of test specimens, determine the mass of specimens before capping. Remove any surface moisture with a towel and measure the mass of the specimen using a balance or scale that is accurate to within 0.3 % of the mass being measured. Measure the length of the specimen to the nearest 0.05 in. [1 mm] at three locations spaced evenly around the circumference. Compute the average length and record to the nearest 0.05 in. [1 mm]. Alternatively, determine the cylinder density by weighing the cylinder in air and then submerged under water at 73.5 ± 3.5 °F (23.0 ± 2.0 °C), and computing the volume according to 8.3.1.

6.5 When density determination is not required and the length to diameter ratio is less than 1.8 or more than 2.2, measure the length of the specimen to the nearest 0.05 D.

7. Procedure

7.1 Compression tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practicable after removal from moist storage.

7.2 Test specimens shall be kept moist by any convenient method during the period between removal from moist storage and testing. They shall be tested in the moist condition.

7.3 All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible time tolerances prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	± 0.5 h or 2.1 %
3 days	2 h or 2.8 %
7 days	6 h or 3.6 %
28 days	20 h or 3.0 %
90 days	2 days 2.2 %

7.4 *Placing the Specimen*—Place the plain (lower) bearing block, with its hardened face up, on the table or platen of the testing machine directly under the spherically seated (upper) bearing block. Wipe clean the bearing faces of the upper and lower bearing blocks and of the test specimen and place the test specimen on the lower bearing block. Carefully align the axis of the specimen with the center of thrust of the spherically seated block.

7.4.1 *Zero Verification and Block Seating*—Prior to testing the specimen, verify that the load indicator is set to zero. In cases where the indicator is not properly set to zero, adjust the indicator (**NOTE 9**). As the spherically seated block is brought to bear on the specimen, rotate its movable portion gently by hand so that uniform seating is obtained.

NOTE 9—The technique used to verify and adjust load indicator to zero will vary depending on the machine manufacturer. Consult your owner's manual or compression machine calibrator for the proper technique.

7.5 *Rate of Loading*—Apply the load continuously and without shock.

7.5.1 The load shall be applied at a rate of movement (platen to crosshead measurement) corresponding to a stress rate on the specimen of 35 ± 7 psi/s [0.25 ± 0.05 MPa/s] (See **Note 10**). The designated rate of movement shall be maintained at least during the latter half of the anticipated loading phase.

NOTE 10—For a screw-driven or displacement-controlled testing machine, preliminary testing will be necessary to establish the required rate of movement to achieve the specified stress rate. The required rate of movement will depend on the size of the test specimen, the elastic modulus of the concrete, and the stiffness of the testing machine.

7.5.2 During application of the first half of the anticipated loading phase, a higher rate of loading shall be permitted. The higher loading rate shall be applied in a controlled manner so that the specimen is not subjected to shock loading.

7.5.3 Make no adjustment in the rate of movement (platen to crosshead) as the ultimate load is being approached and the stress rate decreases due to cracking in the specimen.

7.6 Apply the compressive load until the load indicator shows that the load is decreasing steadily and the specimen displays a well-defined fracture pattern (Types 1 to 4 in Fig. 2). For a testing machine equipped with a specimen break detector,

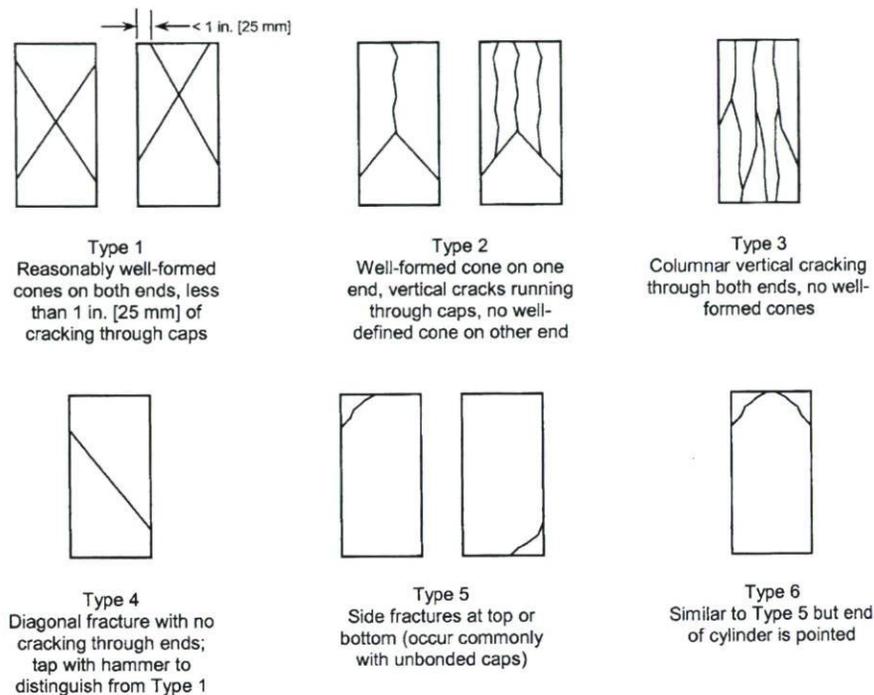

C 39/C 39M – 05^{e1}


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

automatic shut-off of the testing machine is prohibited until the load has dropped to a value that is less than 95 % of the peak load. When testing with unbonded caps, a corner fracture similar to a Type 5 or 6 pattern shown in Fig. 2 may occur before the ultimate capacity of the specimen has been attained. Continue compressing the specimen until the user is certain that the ultimate capacity has been attained. Record the maximum load carried by the specimen during the test, and note the type of fracture pattern according to Fig. 2. If the fracture pattern is not one of the typical patterns shown in Fig. 2, sketch and describe briefly the fracture pattern. If the measured strength is lower than expected, examine the fractured concrete and note the presence of large air voids, evidence of segregation, whether fractures pass predominantly around or through the coarse aggregate particles, and verify end preparations were in accordance with Practice C 617 or Practice C 1231/C 1231M.

8. Calculation

8.1 Calculate the compressive strength of the specimen by dividing the maximum load carried by the specimen during the test by the average cross-sectional area determined as described in Section 6 and express the result to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

8.2 If the specimen length to diameter ratio is 1.75 or less, correct the result obtained in 8.1 by multiplying by the appropriate correction factor shown in the following table Note 11:

L/D:	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor:	0.98	0.96	0.93	0.87

Use interpolation to determine correction factors for L/D values between those given in the table.

NOTE 11—Correction factors depend on various conditions such as moisture condition, strength level, and elastic modulus. Average values are given in the table. These correction factors apply to low-density concrete weighing between 100 and 120 lb/ft³ [1600 and 1920 kg/m³] and to normal-density concrete. They are applicable to concrete dry or soaked at the time of loading and for nominal concrete strengths from 2000 to 6000 psi [14 to 42 MPa]. For strengths higher than 6000 psi [42 MPa] correction factors may be larger than the values listed above³.

8.3 When required, calculate the density of the specimen to the nearest 1 lb/ft³ [10 kg/m³] as follows:

$$\text{Density} = \frac{W}{V} \quad (2)$$

³ Bartlett, F.M. and MacGregor, J.G., "Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength," ACI Materials Journal, Vol 91, No. 4, July-August, 1994, pp. 339-348.

 C 39/C 39M - 05^{e1}

where:

W = mass of specimen, lb [kg], and
 V = volume of specimen computed from the average diameter and average length or from weighing the cylinder in air and submerged, ft³ [m³]

8.3.1 When the volume is determined from submerged weighing, calculate the volume as follows:

$$V = \frac{W - W_s}{\gamma_w} \quad (3)$$

where:

W_s = apparent mass of submerged specimen, lb [kg], and
 γ_w = density of water at 73.5 °F [23 °C] = 62.27 lbs/ft³ [997.5 kg/m³].

9. Report

- 9.1 Report the following information:
 - 9.1.1 Identification number.
 - 9.1.2 Diameter (and length, if outside the range of 1.8 D to 2.2 D), in inches [millimetres].
 - 9.1.3 Cross-sectional area, in square inches [square millimetres].
 - 9.1.4 Maximum load, in pounds-force [kilonewtons].
 - 9.1.5 Compressive strength calculated to the nearest 10 psi [0.1 MPa].
 - 9.1.6 Type of fracture, if other than the usual cone (see Fig. 2).
 - 9.1.7 Defects in either specimen or caps, and.
 - 9.1.8 Age of specimen.
 - 9.1.9 When determined, the density to the nearest 1 lb/ft³ [10 kg/m³].

10. Precision and Bias

10.1 Precision

10.1.1 *Within-Test Precision*—The following table provides the within-test precision of tests of 6 by 12 in. [150 by 300 mm] and 4 by 8 in. [100 by 200 mm] cylinders made from a well-mixed sample of concrete under laboratory conditions and under field conditions (see 10.1.2).

	Coefficient of Variation ⁴	Acceptable Range ⁴ of Individual Cylinder Strengths	
		2 cylinders	3 cylinders
6 by 12 in. [150 by 300 mm]			
Laboratory conditions	2.4 %	6.6 %	7.8 %
Field conditions	2.9 %	8.0 %	9.5 %
4 by 8 in. [100 by 200 mm]			
Laboratory conditions	3.2 %	9.0 %	10.6 %

⁴These numbers represent respectively the (1s%) and (d2s%) limits as described in Practice C 670.

10.1.2 The within-test coefficient of variation represents the expected variation of measured strength of companion cylinders prepared from the same sample of concrete and tested by one laboratory at the same age. The values given for the within-test coefficient of variation of 6 by 12 in. [150 by 300 mm] cylinders are applicable for compressive strengths between 2000 and 8000 psi [15 to 55 MPa] and those for 4 by 8 in. [100 by 200 mm] cylinders are applicable for compressive strengths between 2500 and 4700 psi [17 to 32 MPa]. The within-test coefficients of variation for 6 by 12 in. [150 by 300 mm] cylinders are derived from CCRL concrete proficiency sample data for laboratory conditions and a collection of 1265 test reports from 225 commercial testing laboratories in 1978.⁵ The within-test coefficient of variation of 4 by 8 in. [100 by 200 mm] cylinders are derived from CCRL concrete proficiency sample data for laboratory conditions.⁶

10.1.3 *Multilaboratory Precision*—The multi-laboratory coefficient of variation for compressive strength test results of 6 by 12 in. [150 by 300 mm] cylinders has been found to be 5.0 %⁷; therefore, the results of properly conducted tests by two laboratories on specimens prepared from the same sample of concrete are not expected to differ by more than 14 %⁴ of the average (See Note 12). A strength test result is the average of two cylinders tested at the same age.

NOTE 12—The multilaboratory precision does not include variations associated with different operators preparing test specimens from split or independent samples of concrete. These variations are expected to increase the multilaboratory coefficient of variation.

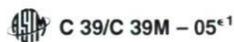
10.1.4 The multilaboratory data were obtained from six separate organized strength testing round robin programs⁸ where 6 x 12 in [150 x 300 mm] cylindrical specimens were prepared at a single location and tested by different laboratories. The range of average strength from these programs was 2500 to 13 000 psi [17.0 to 90 MPa].

NOTE 13—Subcommittee C09.61 will continue to examine recent concrete proficiency sample data and field test data and make revisions to precisions statements when data indicate that they can be extended to cover a wider range of strengths and specimen sizes.

10.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material, no statement on bias is being made.

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR.C09-1006.

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR.C09-1027.

**C 39/C 39M – 05^{e1}**

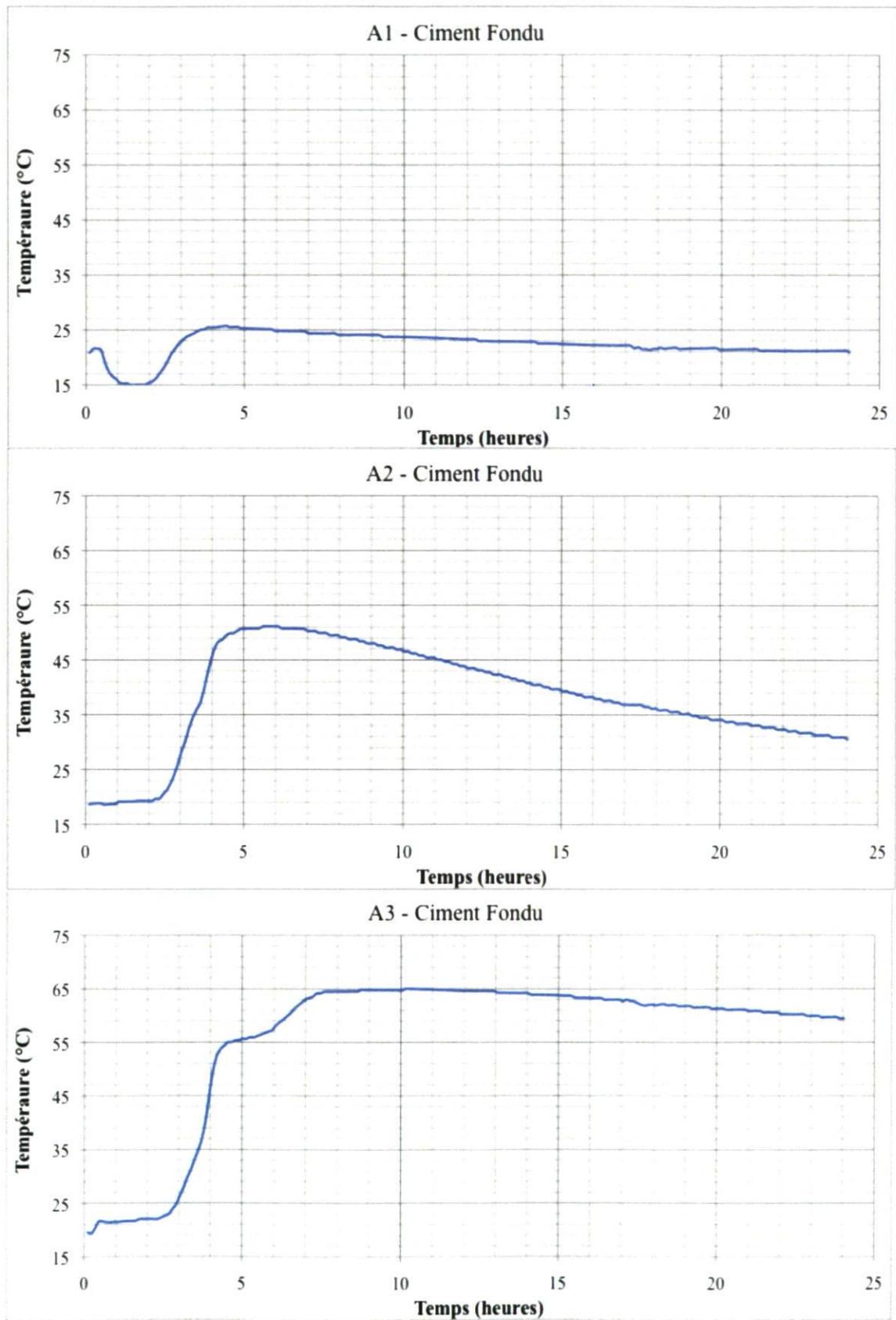
ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

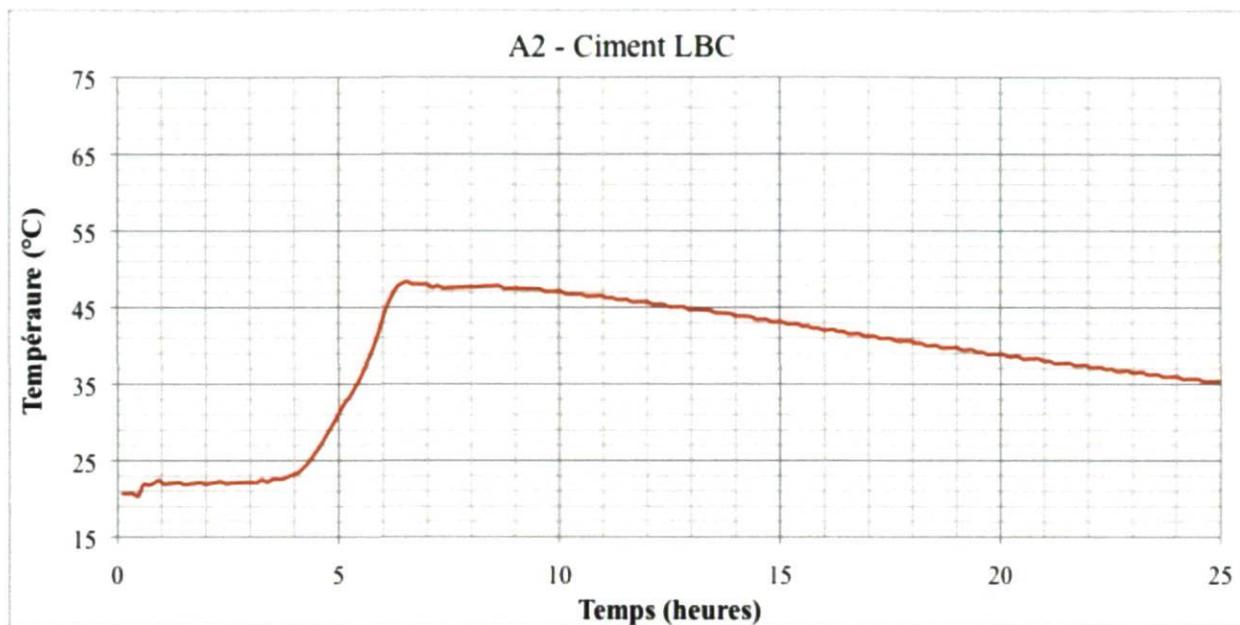
This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

Annexe B : Températures

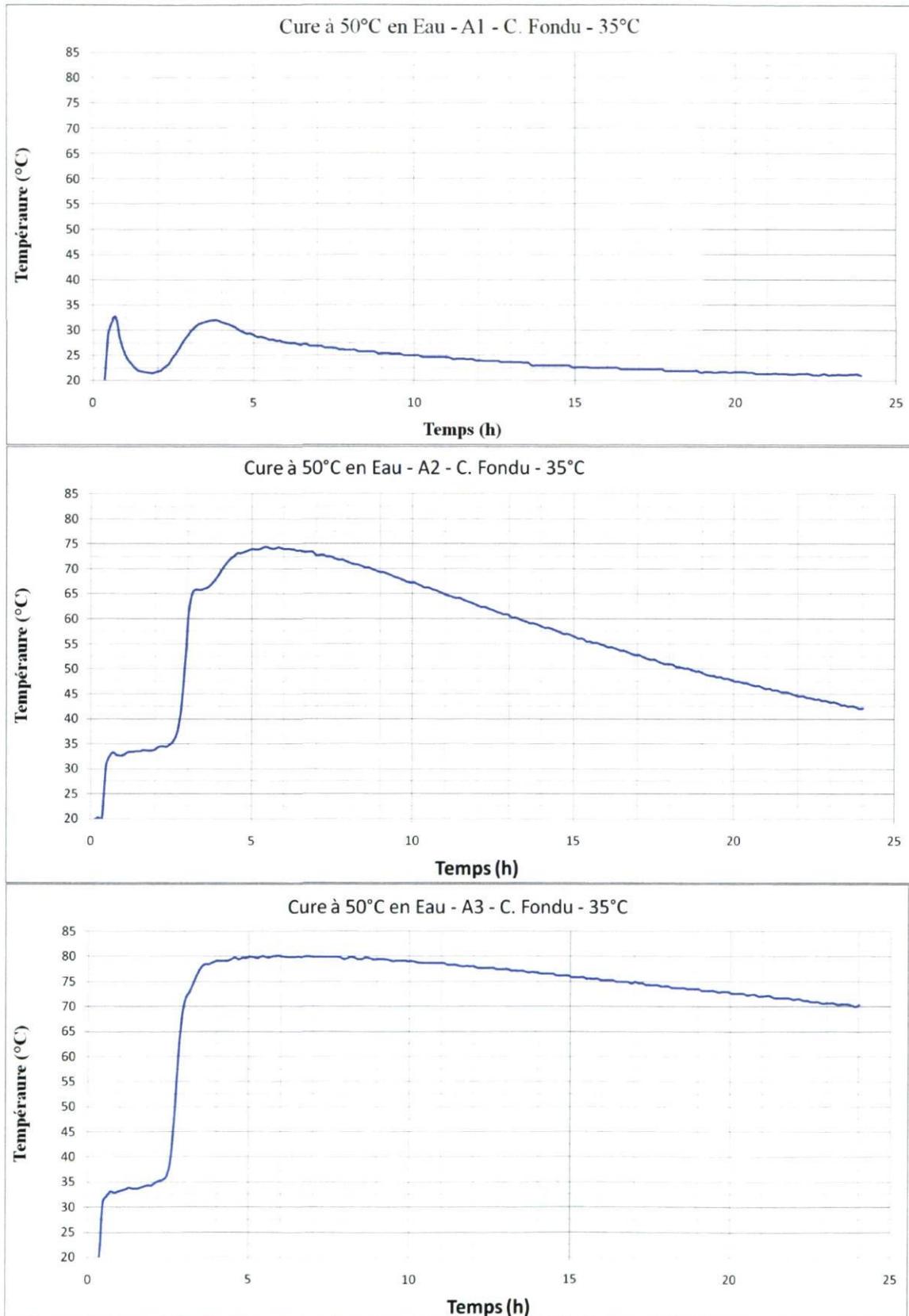
B.1 : Analyses DRX à 24 heures – Ciment Fondu

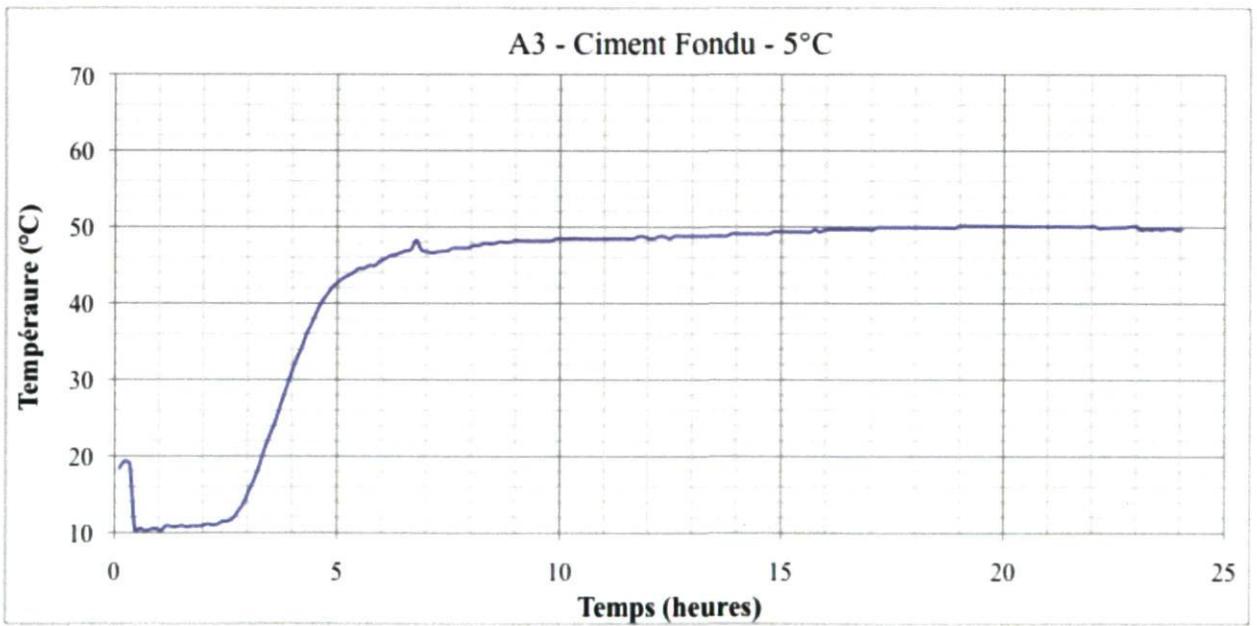
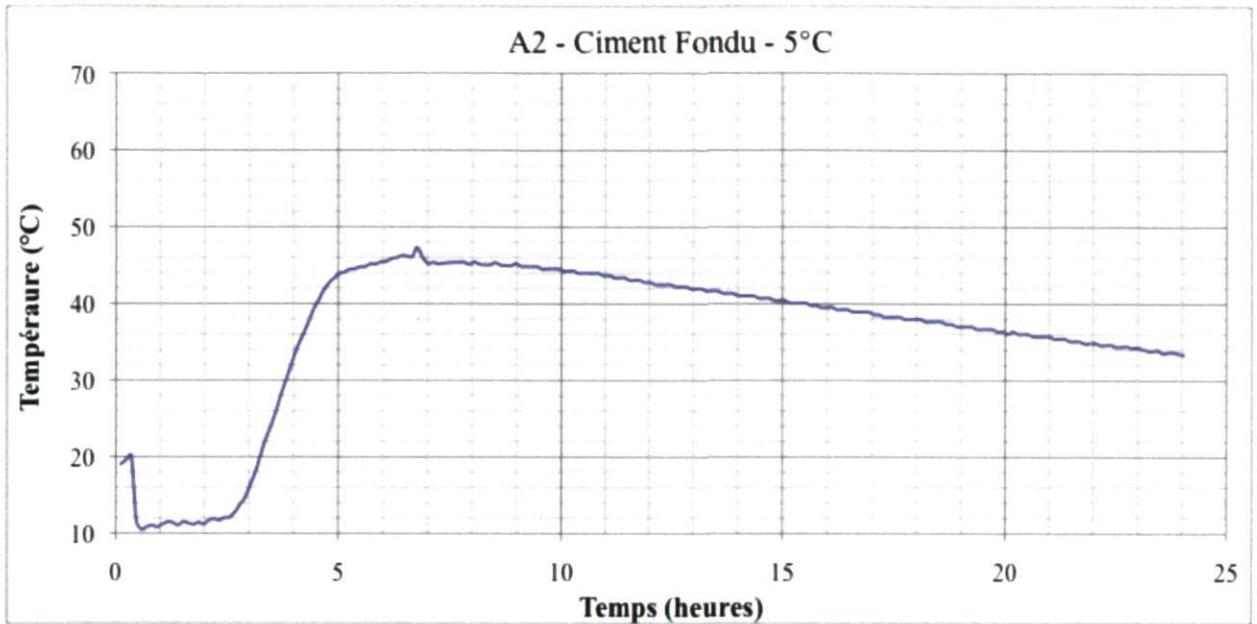


B.2 : Analyses DRX à 24 heures – Ciment LBC

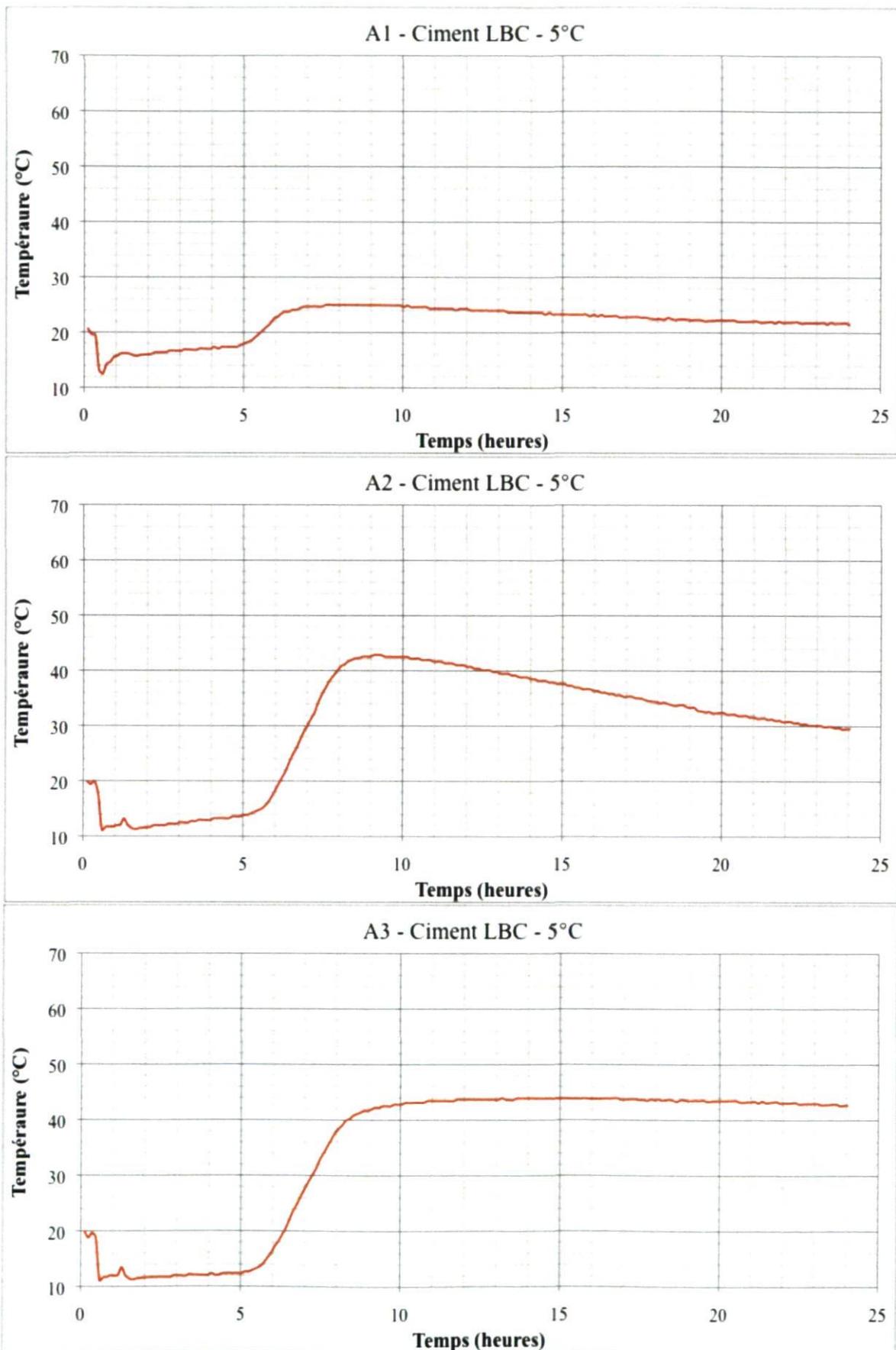


B.3 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 35 °C

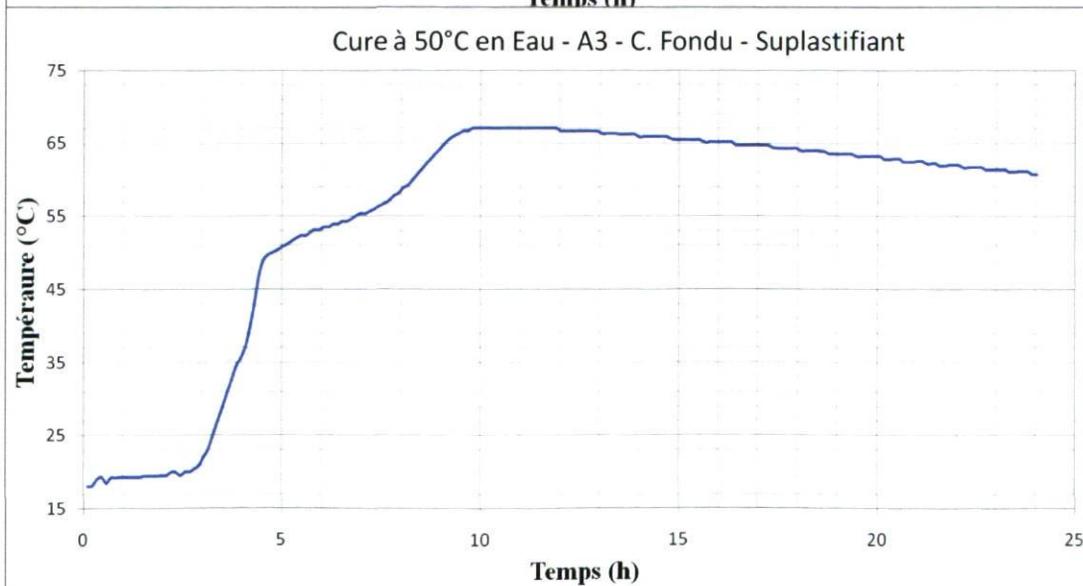
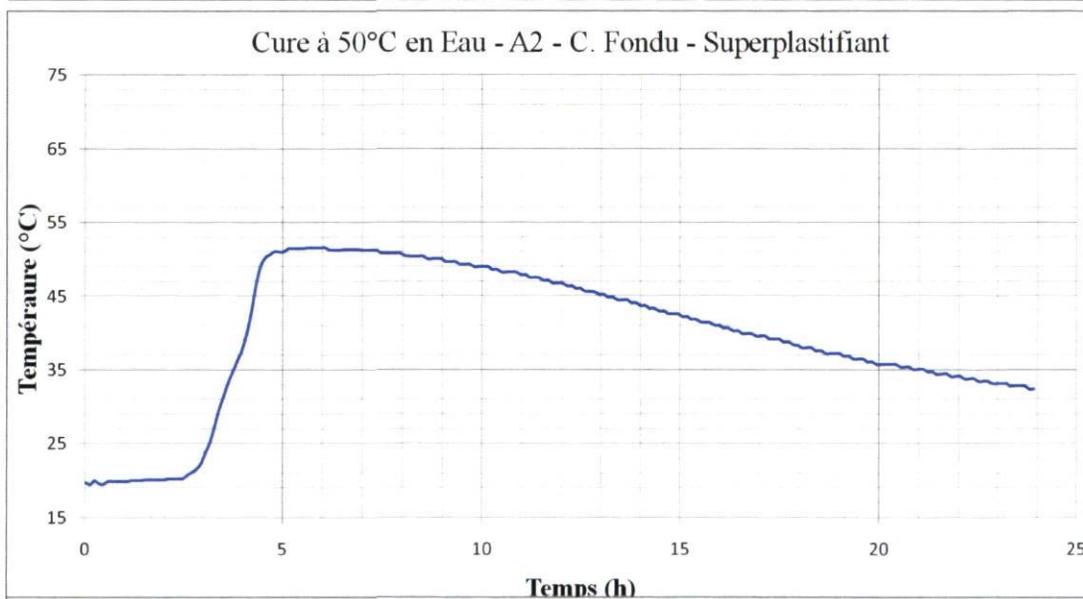
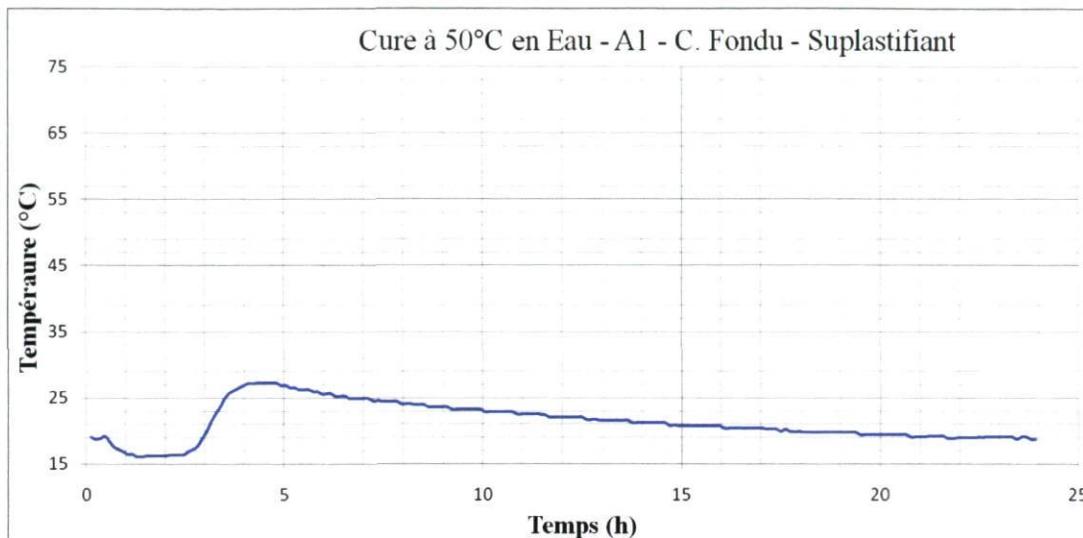


B.4 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 5 °C

B.5 : Cure à 50 °C en eau – Ciment LBC – 5 °C



B.6 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – Superplastifiant



Annexe C : Résistances en compression

C.1 : Cure à 23 °C en air – Ciment Fondu

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
1 j	42,0	41,3	Ok	42,3	43,6	Ok	27,9	29,0	Ok
			41,7			43,0			28,4
			1,2			2,1			2,8
3 j	48,7	49,8	Ok	45,4	44,2	Ok	33,1	31,7	Ok
			49,3			44,8			32,4
			1,6			2,0			2,8
5 j	50,7		Ok	45,1	48,6	Ok	34,4	31,2	Ok
			50,7			46,9			32,8
						5,3			6,7
7 j	47,9		Ok	49,3	46,8	Ok	35,2	35,1	Ok
			47,9			48,1			35,1
						3,8			0,1
14 j	47,7		Ok	46,4	46,3	Ok	35,9	36,1	Ok
			47,7			46,4			36,0
						0,1			0,4
28 j	52,7		Ok	42,0	45,8	Ok	36,7	35,5	Ok
			52,7			43,9			36,1
						6,0			2,4
4 m	39,4		Ok	37,4	36,1	Ok	38,1	40,5	Ok
			39,4			36,7			39,3
						2,5			4,3
1 an									

C.3 : Cure à 23 °C en air – LBC

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
1 j	42,8	41,50	Ok	37,9	38,8	Ok	39,7	45,7	Non
			42,1			38,3			42,7
			2,2			1,6			10,0
3 j	51,8	51,11	Ok	49,1	43,8	Ok	49,1	48,9	Ok
			51,5			46,4			49,0
			1,0			8,1			0,3
5 j	55,1		Ok	48,5	50,7	Ok	53,1	49,5	Ok
			55,1			49,6			51,3
						3,0			4,9
7 j	57,6		Ok	49,9	51,6	Ok	52,0	51,1	Ok
			57,6			50,8			51,5
						2,4			1,2
14 j	58,2		Ok	54,7	54,0	Ok	50,2	51,1	Ok
			58,2			54,3			50,7
						0,9			1,1
28 j	60,9		Ok	54,5	51,4	Ok	55,6	46,1	Non
			60,9			52,9			55,6
						4,2			17,2
4 m	51,7		Ok	42,1	42,7	Ok	48,5	47,1	Ok
			51,7			42,4			48,5
						0,9			2,9
1 an									

C.4 : Cure à 23 °C en eau – Ciment Fondu

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
1 j	43,0	48,6	Ok	44,7	44,7	Ok	29,7	27,9	Ok
			45,8			44,7			28,8
			8,6			0,1			4,5
3 j	49,2	46,2	Ok	42,0	46,8	Ok	28,7	27,7	Ok
			47,7			44,4			28,2
			4,3			7,6			2,5
5 j	51,1	51,4	Ok	46,2	43,8	Ok	29,7	29,9	Ok
			51,3			45,0			29,6
			0,4			3,9			0,4
7 j	53,0	52,3	Ok	44,6	47,3	Ok	31,6	32,6	Ok
			52,6			46,0			32,1
			0,9			4,1			2,4
14 j	51,9	53,3	Ok	52,1	52,2	Ok	35,2	36,5	Ok
			52,6			52,1			35,9
			1,9			0,1			2,5
28 j	60,2	56,2	Ok	56,4	56,6	Ok	41,5	40,3	Ok
			58,2			56,5			40,9
			4,9			0,2			2,2
3 mois	60,6	56,3	Ok	46,6	46,3	Ok	45,6	45,3	Ok
			58,4			46,4			45,4
			5,1			0,4			0,4
1an									

C.5 : Cure à 23 °C en eau – LBC

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc(Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
1 j	44,6	46,0	Ok	44,6	44,0	Ok	47,1	45,3	Ok
			45,3			44,3			46,2
			2,2			1,0			2,8
3 j	50,2	46,0	Ok	42,0	42,6	Ok	45,6	44,7	Ok
			48,1			42,3			45,1
			6,2			1,0			1,4
5 j	50,8	49,4	Ok	43,4	42,8	Ok	44,9	45,1	Ok
			50,1			43,1			45,0
			2,0			0,9			0,3
7 j	54,9	53,2	Ok	46,8	42,9	Ok	50,5	51,8	Ok
			54,0			44,8			51,1
			2,2			6,1			1,8
14 j	54,8	58,3	Ok	54,6	52,8	Ok	55,1	50,7	Ok
			56,5			53,7			52,9
			4,6			2,4			5,8
28 j	57,5	56,8	Ok	57,00	53,6	Ok	55,2	54,0	Ok
			57,2			55,3			54,6
			0,8			4,3			1,5
3 mois	63,5	64,5	Ok	58,7	60,6	Ok	58,2	58,2	Ok
			64,0			59,7			58,2
			1,2			2,3			0,00
1an									

C.6 : Cure à 38 °C en air – Ciment Fondu

Temps	Echantillons scellés												Echantillons non-scellés											
	A1				A2				A3				A1				A2				A3			
	Rc(Mpa)		Moy,		Rc (Mpa)		Moy,		Rc (Mpa)		Moy,		Rc (Mpa)		Moy,		Rc (Mpa)		Moy,		Rc (Mpa)		Moy,	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1 j	50,1	47,5	Ok	48,8	46,3	43,6	45,0	27,3	27,2	Ok	27,2	45,4	48,2	46,8	43,3	47,0	45,1	27,8	25,2	Ok	26,5	7,0	Ok	26,5
4 j	53,0	50,3	Ok	3,8	27,7	29,0	4,2	29,1	31,5	Ok	30,3	47,4	48,9	48,1	30,1	27,6	5,9	34,6	34,4	Ok	34,5	0,4	Ok	34,5
5 j	50,3	47,7	Ok	3,6	31,0	29,0	3,2	30,8	31,4	Ok	31,1	40,6	44,1	42,3	29,3	33,2	8,8	34,6	34,9	Ok	34,7	0,7	Ok	34,7
6 j	39,1	42,0	Ok	4,9	30,5	29,6	4,8	30,9	32,5	Ok	3,6	32,9	35,5	34,2	30,5	29,7	1,7	34,1	34,5	Ok	34,3	0,7	Ok	34,3
7 j	37,3	36,6	Ok	1,4	32,0	33,2	2,5	33,6	33,2	Ok	3,6	28,9	29,0	29,0	33,3	35,0	3,4	33,7	34,6	Ok	34,2	1,7	Ok	34,2
8 j	39,4	36,2	Ok	6,1	32,8	31,0	3,9	34,6	32,2	Ok	5,0	27,7	28,1	27,9	34,4	33,6	1,7	34,3	34,8	Ok	34,6	1,2	Ok	34,6
10 j	33,1	31,5	Ok	3,6	34,7	35,0	0,5	31,6	33,0	Ok	32,3	25,5	27,1	26,3	35,8	35,9	0,1	36,6	38,3	Ok	37,5	3,2	Ok	37,5
14 j	34,5	34,0	Ok	1,0	34,9	37,8	5,6	33,7	36,9	Ok	6,5	29,9	29,6	29,8	35,3	37,1	3,5	36,0	34,2	Ok	35,1	3,6	Ok	35,1

C.7 : Cure à 38 °C en air – LBC

Temps	Echantillons scellés												Echantillons non-scellés											
	A1				A2				A3				A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)		Moy.	Ok	Rc (Mpa)		Moy.	Ok	Rc (Mpa)		Moy.	Ok	Rc (Mpa)		Moy.	Ok	Rc (Mpa)		Moy.	Ok	Rc (Mpa)		Moy.	Ok
	1	2	1		2	1	2		1	2	1		2	1	2		1	2	1		2	1	2	
1 j	47,6	52,0	49,8	Ok	42,5	41,8	42,1	Ok	43,5	45,4	44,5	Ok	43,0	43,6	43,3	Ok	40,9	37,9	39,4	Ok	43,8	42,2	43,0	Ok
			6,2	Ok			1,1	Ok			3,1	Ok			1,0	Ok			5,4	Ok			2,6	Ok
4 j	59,7	59,2	59,5	Ok	49,7	50,1	49,9	Ok	49,8	51,2	50,5	Ok	56,4	56,0	56,2	Ok	46,9	46,1	46,5	Ok	46,3	46,1	46,2	Ok
			0,5	Ok			0,7	Ok			1,9	Ok			0,5	Ok			1,2	Ok			0,4	Ok
5 j	61,8	60,1	60,9	Ok	50,0	50,4	50,2	Ok	45,6	49,0	47,3	Ok	58,1	56,3	57,2	Ok	45,3	43,9	44,6	Ok	45,9	46,3	46,1	Ok
			2,0	Ok			0,6	Ok			5,2	Ok			2,2	Ok			2,4	Ok			0,6	Ok
6 j	59,2	63,5	61,3	Ok	48,0	49,9	49,0	Ok	47,4	48,2	47,8	Ok	54,9	52,7	53,8	Ok	39,1	41,6	40,3	Ok	42,8	42,5	42,6	Ok
			5,0	Ok			2,7	Ok			1,2	Ok			2,9	Non			4,4	Ok			0,4	Ok
7 j	63,3	58,1	60,7	Ok	48,0	47,4	47,7	Ok	44,3	48,0	46,1	Ok	58,5	49,6	54,1	Ok	40,4	38,5	39,4	Ok	39,7	40,4	40,1	Ok
			6,0	Ok			0,9	Ok			5,7	Ok			11,5	Non			3,3	Ok			1,3	Ok
8 j	62,1	62,3	62,2	Ok	46,8	49,4	48,1	Ok	43,1	45,5	44,3	Ok	56,6	48,7	52,7	Ok	39,1	39,8	39,4	Ok	39,6	39,4	39,5	Ok
			0,2	Ok			3,8	Ok			3,7	Ok			10,5	Non			1,2	Ok			0,5	Ok
10 j	62,0		62,0	Ok	45,8		45,8	Ok	43,0		43,0	Ok	47,9	44,7	46,3	Ok	37,0	36,2	36,6	Ok	36,4	37,6	37,0	Ok
				Ok				Ok				Ok			4,9	Ok			1,5	Ok			2,3	Ok
14 j	63,4		63,4	Ok	39,9		39,9	Ok	41,4		41,4	Ok	38,7	38,6	38,6	Ok	37,2	34,5	35,8	Ok	37,8	39,0	38,4	Ok
				Ok				Ok				Ok			0,2	Ok			5,3	Ok			2,3	Ok

C.8 : Cure à 38 °C en eau – Ciment Fondu

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	51,1	50,2		Ok 50,7 1,3	41,2	41,7		Ok 41,5 1,0	26,8	28,3		Ok 27,6 3,8
3 j	57,1	55,2		Ok 56,2 2,4	44,5	40,7		Ok 42,6 6,3	27,4	29,6		Ok 28,5 5,5
5 j	49,4	50,3	48,1	Ok 49,3 2,3	31,0	29,1		Ok 30,1 4,4	31,3	30,7	32,1	Ok 31,4 2,3
7 j	37,5	39,8	37,5	Ok 38,3 3,4	31,2	31,8		Ok 31,5 1,4	32,5	33,1	33,8	Ok 33,2 1,9
9 j	37,6	36,2	35,9	Ok 36,6 2,5	32,3	33,1		Ok 32,7 1,7	33,6	34,9	33,3	Ok 34,0 2,5
14 j	36,5	36,4	36,1	Ok 36,3 0,5	38,5	36,5		Ok 37,5 3,8	35,5	35,9	35,4	Ok 35,6 0,7
28 j	37,6	39,8		Ok 38,7 3,9	40,5	34,8	38,6	Ok 38,0 7,5	36,9	38,6	36,7	Ok 37,4 2,9
42 j	34,3	37,7	38,0	Ok 36,7 5,6	37,7	37,1	35,4	Ok 36,7 3,3	37,6	38,3	34,3	Ok 36,7 5,7
56 j	39,4	38,6	40,0	Ok 39,3 1,9	32,7	34,4	35,3	Ok 34,2 3,9	38,2	37,9	39,6	Ok 38,6 2,3
70 j	39,2	36,5	36,8	Ok 37,5 4,0	36,3	34,2	36,9	Ok 35,8 3,9	36,6	38,5	36,5	Ok 37,2 3,0
84 j	35,9	35,3	38,0	Ok 36,4 3,9	32,5	35,8	34,8	Ok 34,3 4,9	37,2	35,6	33,8	Ok 35,5 4,7
98 j	34,5	35,8	35,1	Ok 35,1 1,9	34,5	35,0	33,6	Ok 34,4 2,2	35,4	35,8	37,7	Ok 36,3 3,3
112 j	34,8	35,1		Ok 34,9 0,6	35,8	33,0	33,5	Ok 34,1 4,4	36,7	38,8	34,3	Ok 36,6 6,2

C.9 : Cure à 38 °C en eau – LBC

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	43,7	43,0		Ok	41,5	43,4		Ok	43,1	42,7		Ok
				43,4				42,5				42,9
				1,1				3,2				0,7
3 j	54,0	51,7		Ok	46,2	45,5		Ok	45,0	45,1		Ok
				52,9				45,9				45,1
				3,0				1,2				0,2
5 j	54,0	56,6	56,8	Ok	48,3	48,1		Ok	45,0	46,6	46,4	Ok
				55,8				48,2				46,0
				2,8				0,3				1,9
7 j	53,5	54,6	55,8	Ok	45,1	48,0	44,5	Ok	45,2	45,7	43,2	Ok
				54,6				45,9				44,7
				2,2				4,1				2,9
9 j	53,2	51,8	55,8	Ok	45,1	46,1	46,0	Ok	42,8	43,8	42,4	Ok
				53,6				45,7				43,0
				3,8				1,2				1,7
14 j	53,6	51,5		Ok	43,2	42,7	42,2	Ok	40,5	39,2	40,3	Ok
				52,6				42,7				40,0
				2,7				1,1				1,7
28 j	53,1	50,4	51,9	Ok	45,0	47,7		Ok	41,5	45,5	44,3	Ok
				51,8				46,3				43,8
				2,6				4,2				4,6
42 j	51,3	50,1	48,5	Ok	46,9	47,0	50,6	Ok	44,5	41,6	49,2	Ok
				50,0				48,2				45,1
				2,8				4,3				8,5
56 j	52,6	50,9	51,4	Ok	54,7	57,8	54,6	Ok	50,3	52,8	52,7	Ok
				51,6				55,7				51,9
				1,7				3,2				2,8
70 j	52,4	50,6	57,6	Ok	53,5	55,9	50,2	Non	53,3	53,4	54,1	Ok
				53,5				54,7				53,6
				6,7				6,3				0,8
84 j	54,2	57,5	59,1	Ok	54,3	56,0	55,5	Ok	55,2	54,3	54,4	Ok
				56,9				55,3				54,6
				4,4				1,6				0,9
98 j	61,3	60,0	60,4	Ok	57,2	53,8	55,4	Ok	56,3	54,0	55,3	Ok
				60,6				55,5				55,2
				1,1				3,1				2,1
112 j	59,8	59,9	61,9	Ok	55,8	54,4	56,9	Ok	56,0	53,3	56,2	Ok
				60,5				55,7				55,2
				1,9				2,3				2,9

C.10 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
2 j	30,5	29,6	Ok	25,7	26,2	Ok	26,5	27,1	Ok
			30,1			25,9			26,8
			2,1			1,4			1,5
3 j	29,3	29,0	Ok	26,3	28,0	Ok	26,6	27,6	Ok
			29,2			27,1			27,1
			0,5			4,5			2,6
5 j	31,0	32,2	Ok	28,6	27,9	Ok	26,6	27,2	Ok
			31,6			28,2			26,9
			2,5			1,7			1,7
7 j	32,7	33,6	Ok	30,7	29,9	Ok	28,8	29,5	Ok
			33,1			30,3			29,2
			1,7			1,6			1,8
9 j	36,5	38,3	Ok	30,6	32,7	Ok	29,4	28,7	Ok
			37,4			31,7			29,0
			3,5			4,6			1,8
11 j	36,2	36,0	Ok	31,8	31,6	Ok	28,1	30,0	Ok
			36,1			31,7			29,1
			0,3			0,5			4,6
14 j	38,2	36,5	Ok	32,5	28,6	Non	30,6	30,7	Ok
			37,3			32,5			30,7
			3,1			12,0			0,1
21 j	36,1	36,0	Ok	30,6	31,5	Ok	31,1	30,4	Ok
			36,1			31,0			30,7
			0,3			2,1			1,6
28 j	35,8	35,4	Ok	30,2	31,4	Ok	32,2	33,9	Ok
			35,6			30,8			33,0
			0,7			2,6			3,6

C.11 : Cure à 50 °C en eau – LBC

Temps	A1			A2			A3		
	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne	Rc (Mpa)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2		Essai 1	Essai 2	
2 j	51,2	49,6	Ok	45,0	42,9	Ok	37,8	39,7	Ok
			50,4			44,0			38,7
			2,3			3,4			3,5
3 j	44,9	39,1	Non	27,9	27,3	Ok	28,5	29,4	Ok
			44,9			27,6			28,9
			13,0			1,6			2,1
5 j	38,3	39,5	Ok	30,7	30,7	Ok	33,5	34,1	Ok
			38,9			30,7			33,8
			2,2			0,2			1,3
7 j	34,1	36,5	Ok	34,0	35,9	Ok	36,7	38,2	Ok
			35,3			34,9			37,4
			4,8			3,8			2,7
9 j	35,3	35,3	Ok	38,0	37,0	Ok	37,9	38,7	Ok
			35,3			37,5			38,3
			0,1			1,8			1,6
11 j	35,1	35,7	Ok	38,0	42,5	Ok	40,8	43,5	Ok
			35,4			40,3			42,1
			1,1			7,9			4,6
14 j	28,1	34,7	Non	38,5	39,2	Ok	41,4	40,9	Ok
			34,7			38,9			41,1
			19,0			1,3			0,9
21 j	35,8	38,4	Ok	41,8	40,7	Ok	40,6	41,3	Ok
			37,1			41,2			41,0
			5,0			1,8			1,2
28 j	39,1		Ok	42,4	42,2	Ok	43,1	40,7	Ok
			39,1			42,3			41,9
						0,4			4,0

C.12 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 0,35

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	54,9	57,3	58,3	Ok	46,4	50,4	50,5	Ok	48,0	44,1	46,4	Ok
				56,8				49,1				46,2
				3,1				4,7				4,3
2 j	53,3	50,1		Ok	44,5	37,2		Non	41,5	42,2		Ok
				51,7				44,5				41,8
				4,4				16,4				1,1
3 j	33,4	37,2		Ok	46,5	46,4		Ok	41,0	40,7		Ok
				35,3				46,5				40,9
				7,7				0,1				0,4
5 j	39,4	40,7		Ok	33,9	46,9		Non	42,0	44,0		Ok
				40,1				46,9				43,0
				2,4				27,6				3,2
7 j	43,4	44,3		Ok	46,8	45,8		Ok	45,2	42,5		Ok
				43,8				46,3				43,9
				1,5				1,5				4,4
11 j	47,4	45,8		Ok	44,9	44,4		Ok	38,7	43,8		Ok
				46,6				44,7				41,3
				2,4				0,7				8,7
14 j	45,0	46,7	48,7	Ok	42,7	45,3	45,7	Ok	45,4	43,9	41,3	Ok
				46,8				44,6				43,5
				3,9				3,6				4,8
28 j	47,0	47,9	48,5	Ok	48,8	50,4	46,5	Ok	40,8	46,5	48,0	Ok
				47,8				48,5				45,1
				1,6				4,0				8,4

C.13 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 0,45

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	2		1	2	3		1	2	3	
1 j	50,9	46,4	51,2	Ok	32,2	34,7	34,6	Ok	32,2	33,4	32,0	Ok
				49,5				33,8				32,5
				5,5				4,1				2,3
2 j	32,5	33,4		Ok	32,4	31,7		Ok	31,9	31,9		Ok
				32,9				32,1				31,9
				2,0				1,7				0,0
3 j	26,7	26,8		Ok	34,5	33,2		Ok	30,7	31,6		Ok
				26,8				33,9				31,1
				0,2				2,7				2,2
5 j	29,1	30,5		Ok	32,1	32,3		Ok	30,0	31,4		Ok
				29,8				32,2				30,7
				3,2				0,4				3,1
7 j	31,4	32,3	32,0	Ok	31,6	30,6	23,9	Non	31,1	31,0	30,2	Ok
				31,9				31,1				30,8
				1,4				16,5				1,7
11 j	28,9	30,6		Ok	29,8	29,0		Ok	31,1	31,5		Ok
				29,8				29,4				31,3
				4,0				1,8				0,8
14 j	31,1	30,6		Ok	27,0	31,4		Non	31,8	32,5		Ok
				30,9				29,2				32,1
				1,2				10,6				1,5
28 j	30,2	28,6	28,2	Ok	27,6	30,0	28,4	Ok	34,4	33,3	32,3	Ok
				29,0				28,7				33,3
				3,8				4,1				3,1

C.14 : Cure à 50 °C en eau – LBC – 0,35

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	2		1	2	3		1	2	2	
1 j	52,6	51,8	53,5	Ok	47,1	46,6	47,3	Ok	41,2	42,1	40,5	Ok
				52,6				47,0				41,3
				1,6				0,7				1,9
3 j	49,7	49,3	49,4	Ok	41,7	41,8	44,9	Ok	35,1	38,1	32,2	Ok
				49,5				42,8				35,1
				0,4				4,2				8,4
5 j	40,7	42,6		Ok	35,5	37,6		Ok	40,2	39,2		Ok
				41,6				36,6				39,7
				3,2				4,0				1,9
7 j	38,7	40,4		Ok	40,2	41,4		Ok	43,7	44,8		Ok
				39,6				40,8				44,2
				2,9				2,1				1,7
9 j	32,7	32,0		Ok	40,0	42,0		Ok	47,3	44,5		Ok
				32,3				41,0				45,9
				1,4				3,4				4,3
11 j	26,6	35,9		Non	40,7	41,9		Ok	47,4	44,6		Ok
				35,9				41,3				46,0
				25,9				1,9				4,2
14 j	34,9	34,3		Ok	43,4	41,7		Ok	51,9	44,5		Non
				34,6				42,5				44,5
				1,2				2,7				16,5
28 j	34,6	35,8	34,3	Ok	46,6	44,0	45,2	Ok	46,9	46,6	47,7	Ok
				34,9				45,3				47,1
				2,3				2,8				1,1

C.15 : Cure à 50 °C en eau – LBC – 0,45

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	39,1	38,6	35,8	Ok	35,6	35,6	35,8	Ok	33,9	33,3	34,3	Ok
				37,8				35,7				33,8
				4,6				0,2				1,4
2 j	44,2	43,7		Ok	34,0	31,4		Ok	28,3	25,2		Ok
				43,9				32,7				26,8
				0,9				5,6				8,0
3 j	38,4	38,6		Ok	23,6	24,5		Ok	25,2	25,0		Ok
				38,5				24,1				25,1
				0,4				2,7				0,5
5 j	38,8	36,3		Ok	27,7	27,3		Ok	29,7	28,5		Ok
				37,6				27,5				29,1
				4,7				1,1				3,0
7 j	34,2	33,5		Ok	28,6	30,2		Ok	31,3	31,5		Ok
				33,9				29,4				31,4
				1,4				4,0				0,6
11 j	29,9	31,6		Ok	31,7	33,4		Ok	32,1	34,6		Ok
				30,7				32,6				33,4
				3,9				3,8				5,2
14 j	32,7	32,0		Ok	34,7	33,2		Ok	33,5	36,1		Ok
				32,3				34,0				34,8
				1,5				3,1				5,1
28 j	37,7	38,1	36,4	Ok	37,0	37,5	29,4	Non	39,1	37,1	38,3	Ok
				37,4				37,2				38,2
				2,4				15,0				2,7

C.16 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 5 °C

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	51,9	52,8	47,7	Ok	50,5	51,9	42,6	Non	38,2	46,6	47,9	Non
				50,8				51,2				47,2
				5,3				11,9				13,6
2 j	37,2	36,7		Ok	27,2	27,8		Ok	28,6	30,9		Ok
				37,0				27,5				29,8
				0,9				1,5				5,5
3 j	34,9	31,7		Ok	29,8	29,2		Ok	22,6	30,5		Non
				33,3				29,5				30,5
				6,8				1,4				25,9
5 j	34,4	35,9		Ok	30,1	30,6		Ok	34,0	32,5		Ok
				35,1				30,4				33,3
				3,0				1,2				3,3
7 j	35,6	37,1		Ok	30,9	32,6		Ok	34,2	32,7		Ok
				36,3				31,7				33,5
				2,8				3,7				3,3
14 j	38,6	36,4	36,7	Ok	35,1	33,3	30,5	Ok	31,5	36,0	35,0	Ok
				37,2				33,0				34,2
				3,3				7,0				6,9
28 j	37,0	23,8	38,0	Non	37,3	38,0	36,0	Ok	38,8	40,1	38,0	Ok
				37,5				37,1				39,0
				25,9				2,7				2,7

C.17 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – 35 °C

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	44,4	44,6		Ok	31,0	33,3	33,4	Ok	29,3	29,9	30,3	Ok
				44,5				32,5				29,8
				0,4				4,2				1,8
2 j	47,0	44,5		Ok	31,6	31,1		Ok	28,3	28,9		Ok
				45,7				31,4				28,6
				3,8				1,2				1,5
3 j	36,9	38,2		Ok	32,1	32,8		Ok	30,4	29,6		Ok
				37,5				32,5				30,0
				2,4				1,4				1,9
5 j	33,5	33,7		Ok	32,6	31,8		Ok	30,3	29,9		Ok
				33,6				32,2				30,1
				0,4				1,7				0,9
7 j	32,4	33,0		Ok	34,2	33,4		Ok	29,9	30,6		Ok
				32,7				33,8				30,3
				1,4				1,5				1,6
14 j	32,6	33,5	33,7	Ok	30,2	32,7	32,9	Ok	30,3	23,9	32,0	Non
				33,3				31,9				31,2
				1,8				4,6				16,8
28 j	32,1	35,1		Ok	35,8	35,8	36,2	Ok	38,4	37,4	35,8	Ok
				33,6				36,0				37,2
				6,4				0,7				3,5

C.18 : Cure à 50 °C en eau – LBC – 5 °C

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	50,1	51,0	48,4	Ok	44,0	44,4	45,0	Ok	47,2	47,4	46,8	Ok
				49,9				44,5				47,1
				2,6				1,2				0,6
2 j	50,7	53,0		Ok	42,4	44,6		Ok	41,1	39,0		Ok
			51,9	43,5			40,0					
			3,1	3,6			3,6					
3 j	46,0	46,2		Ok	36,2	35,3		Ok	32,9	30,8		Ok
			46,1	35,8			31,8					
			0,4	1,8			4,6					
5 j	42,8	42,3		Ok	30,5	29,5		Ok	28,3	28,5		Ok
			42,6	30,0			28,4					
			0,8	2,3			0,4					
7 j	33,0	36,3		Ok	33,6	32,2		Ok	32,4	32,3		Ok
			34,7	32,9			32,3					
			6,7	2,9			0,1					
14 j	31,8	31,1	32,4	Ok	38,6	29,1	39,2	Non	37,7	38,2	36,9	Ok
				31,8				38,9				37,6
				2,1				17,9				1,7
28 j	34,1	32,2	36,0	Ok	41,0	43,3	42,9	Ok	41,3	38,1	38,8	Ok
				34,1				42,4				39,4
				5,5				2,9				4,2

C.19 : Cure à 50 °C en eau – LBC – 35 °C

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	46,3	44,9	45,2	Ok	29,2	33,0	32,7	Ok	32,1	31,7	32,6	Ok
				45,5				31,6				32,1
				1,7				6,7				1,5
2 j	50,5	48,0		Ok	32,1	35,8		Ok	30,5	29,6		Ok
				49,2				33,9				30,0
				3,6				7,8				2,0
3 j	50,2	50,5		Ok	34,8	34,8		Ok	32,9	31,3		Ok
				50,4				34,8				32,1
				0,4				0,2				3,5
5 j	46,7	45,0		Ok	38,6	35,5		Ok	32,5	35,7		Ok
				45,8				37,0				34,1
				2,6				6,0				6,7
7 j	40,9	44,2		Ok	39,3	42,8		Ok	31,0	33,3		Ok
				42,6				41,1				32,1
				5,5				5,9				5,2
14 j	28,8	32,5	28,9	Ok	46,8	48,4	43,0	Ok	38,8	39,6	37,5	Ok
				30,1				46,1				38,6
				6,9				6,0				2,8
28 j	36,9	37,1	37,2	Ok	49,0	55,9	47,6	Ok	39,9	40,8	38,3	Ok
				37,1				50,8				39,7
				0,5				8,8				3,2

C.20 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – CC

Temps	A1				A2				A3			
	Rc(Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	44,0	45,1	46,0	Ok	42,3	42,9	43,2	Ok	39,7	38,9	38,2	Ok
				45,0				42,8				38,9
				2,3				1,1				2,0
2 j	43,8	43,5		Ok	38,8	36,9		Ok	35,4	37,2		Ok
				43,7				37,8				36,3
				0,5				3,5				3,3
3 j	26,6	35,8		Non	39,3	40,6		Ok	39,6	39,0		Ok
				35,8				39,9				39,3
				25,7				2,4				1,2
5 j	39,4	35,4		Ok	41,0	40,4		Ok	34,2	38,7		Ok
				37,4				40,7				36,5
				7,6				1,1				8,8
7 j	39,9	40,8		Ok	38,8	42,8		Ok	36,5	28,6		Non
				40,4				40,8				36,5
				1,6				6,9				21,6
11 j	40,3	38,5		Ok	32,9	31,0		Ok	26,6	31,4		Non
				39,4				31,9				31,4
				3,2				4,1				15,3
14 j	41,7	39,4	39,7	Ok	39,5	37,3	34,2	Ok	34,4	31,4	37,1	Ok
				40,3				37,0				34,3
				3,2				7,2				8,3
28 j	39,4	37,8	35,3	Ok	36,2	38,9		Ok	34,3	35,4	35,3	Ok
				37,5				37,6				35,0
				5,4				5,0				1,8

C.21 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – SS

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	50,7	51,5		Ok	29,7	31,7	34,7	Ok	29,2	29,2	30,1	Ok
				51,1				32,0				29,5
				1,1				7,9				1,7
2 j	38,8	39,4		Ok	26,7	25,7	23,4	Ok	28,8	29,4		Ok
				39,1				25,3				29,1
				1,0				6,7				1,3
3 j	23,9	25,5		Ok	28,2	25,7		Ok	29,3	30,3		Ok
				24,7				27,0				29,8
				4,6				6,5				2,4
5 j	28,8	24,9		Non	27,7	27,0		Ok	30,6	30,9		Ok
				28,8				27,4				30,8
				13,5				1,6				0,7
7 j	28,6	27,8		Ok	25,5	29,0		Non	29,0	30,6		Ok
				28,2				27,3				29,8
				2,0				9,2				3,7
11 j	28,3	29,4		Ok	28,5	29,4		Ok	30,2	30,4		Ok
				28,8				29,0				30,3
				2,6				2,4				0,5
14 j	31,4	27,8	27,5	Ok	30,2	27,9		Ok	30,6	28,9	30,9	Ok
				28,9				29,0				30,1
				7,4				5,5				3,6
28 j	28,6	26,5	27,6	Ok	27,5	27,1	27,0	Ok	30,1	28,6	32,0	Ok
				27,6				27,2				30,2
				3,8				0,9				5,6

C.22 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – CS

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	45,4	43,8	51,3	Ok	47,4	47,2	43,4	Ok	41,2	38,2	39,6	Ok
				46,8				46,0				39,7
				8,5				4,9				3,8
2 j	32,7	35,3		Ok	42,4	40,6		Ok	34,0	35,8		Ok
			34,0	41,5			34,9					
			5,3	3,0			3,5					
3 j	35,7	31,2		Non	38,7	30,3		Non	35,9	34,9		Ok
			35,7	38,7			35,4					
			12,4	21,7			1,9					
5 j	37,8	33,0		Non	35,8	25,7		Non	31,5	24,7		Non
			37,8	35,8			31,5					
			12,8	28,1			21,4					
7 j	36,0	34,4		Ok	34,7	23,0		Non	25,2	33,8		Non
			35,2	34,7			33,8					
			3,2	33,7			25,5					
11 j	29,4	31,1		Ok	32,2	29,8		Ok	32,7	33,6		Ok
			30,3	31,0			33,1					
			3,9	5,5			1,8					
14 j	36,8	37,3	35,2	Ok	38,4	38,4	37,9	Ok	36,8	34,1	36,3	Ok
				36,4				38,2				35,7
				2,9				0,8				4,0
28 j	36,8	35,3		Ok	38,1	37,5	37,4	Ok	39,6	38,4	37,4	Ok
			36,1	37,7				38,5				
			3,1	1,0				2,9				

C.23 : Cure à 50 °C en eau – LBC – CC

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	41,5	41,6	40,2	Ok	37,8	37,1	38,4	Ok	36,7	38,0	37,8	Ok
				41,1				37,8				37,5
				1,8				1,8				2,0
2 j	47,1	42,7		Ok	39,2	38,0		Ok	35,0	34,8		Ok
				44,9				38,6				34,9
				7,0				2,2				0,3
3 j	45,1	44,4		Ok	34,5	35,7		Ok	35,0	33,5		Ok
				44,8				35,1				34,3
				1,1				2,3				3,1
5 j	40,3	43,6		Ok	33,4	34,5		Ok	34,3	33,6		Ok
				42,0				34,0				34,0
				5,6				2,3				1,3
7 j	39,5	40,9		Ok	30,2	33,9		Ok	34,1	35,6		Ok
				40,2				32,0				34,8
				2,4				8,3				3,0
11 j	41,0	40,7		Ok	39,1	38,7		Ok	38,1	35,8		Ok
				40,8				38,9				36,9
				0,6				0,7				4,4
14 j	42,0	46,7	43,1	Ok	37,7	41,9	42,2	Ok	41,2	40,3	41,4	Ok
				43,9				40,6				41,0
				5,5				6,2				1,4
28 j	43,3	41,3	37,0	Ok	47,8	42,1	41,9	Ok	41,6	40,4	42,5	Ok
				40,6				44,0				41,5
				7,9				7,6				2,6

C.24 : Cure à 50 °C en eau – LBC – SS

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	47,5	48,1		Ok	43,2	41,6	41,0	Ok	41,3	36,1	36,4	Ok
				47,8				41,9				37,9
				0,9				2,7				7,7
2 j	41,0	38,8		Ok	33,1	34,7		Ok	25,6	28,7		Ok
				39,9				33,9				27,1
				3,9				3,3				8,2
3 j	22,9	22,6		Ok	27,2	26,0		Ok	31,0	30,9		Ok
				22,7				26,6				31,0
				0,7				3,3				0,1
5 j	24,7	25,8		Ok	30,9	30,1		Ok	35,8	35,2		Ok
				25,2				30,5				35,5
				2,9				1,8				1,3
7 j	20,4	24,3		Non	29,9	38,1		Non	28,3	31,2		Ok
				24,3				38,1				29,8
				15,9				21,5				7,0
11 j	42,8	42,3		Ok	43,9	42,8		Ok	31,2	34,0		Ok
				42,5				43,4				32,6
				0,9				1,8				6,0
14 j	31,6	34,2	34,7	Ok	44,6	45,7	45,6	Ok	43,2	44,3	43,9	Ok
				33,5				45,3				43,8
				5,0				1,4				1,3
28 j	31,8	32,9	31,8	Ok	44,8	43,3	44,9	Ok	47,2	47,9		Ok
				32,2				44,3				47,6
				1,9				1,9				1,1

C.25 : Cure à 50 °C en eau – LBC – CS

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Résistance en compression (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	45,1	45,4	47,17	Ok	42,0	42,3	40,8	Ok	38,6	41,5	38,4	Ok
				45,9				41,7				39,5
				2,5				1,8				4,4
2 j	48,0	49,6		Ok	42,7	41,5		Ok	37,9	36,4		Ok
				48,8				42,1				37,2
				2,3				2,0				2,9
3 j	46,8	45,9		Ok	42,4	42,1		Ok	37,7	34,5		Ok
				46,4				42,2				36,1
				1,5				0,5				6,3
5 j	44,0	45,1		Ok	39,4	36,6		Ok	36,4	40,0		Ok
				44,6				38,0				38,2
				1,8				5,2				6,6
7 j	48,1	46,1		Ok	40,5	35,0		Non	38,9	34,5		Ok
				47,1				40,5				36,7
				3,0				13,5				8,4
11 j	46,0	41,5		Ok	43,2	42,1		Ok	45,2	42,2		Ok
				43,8				42,7				43,7
				7,3				1,8				4,9
14 j	48,3	44,7	44,4	Ok	43,9	43,2	44,00	Ok	41,8	42,3	42,9	Ok
				45,8				43,7				42,3
				4,7				1,0				1,3
28 j	47,0	48,6	44,9	Ok	47,3	47,1	46,7	Ok	48,7	46,9	47,5	Ok
				46,8				47,0				47,7
				4,0				0,7				2,0

C.26 : Cure à 50 °C en eau – Ciment Fondu – Superplastifiant

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	48,9	47,6	51,5	Ok	49,1	48,0	49,2	Ok	33,9	31,4	27,0	Non
				49,3				48,8				32,6
				4,1				1,4				12,7
2 j	31,3	41,7		Non	31,7	29,5		Ok	32,5	33,3		Ok
				41,7				30,6				32,9
				24,9				5,1				1,7
3 j	31,2	31,9		Ok	32,7	31,0		Ok	32,9	34,1		Ok
				31,6				31,8				33,5
				1,7				3,7				2,6
5 j	37,7	34,2		Ok	31,8	34,8		Ok	34,0	34,2		Ok
				35,9				33,3				34,1
				7,0				6,5				0,5
7 j	35,4	34,1		Ok	34,1	34,0		Ok	30,4	34,1		Ok
				34,7				34,1				32,3
				2,7				0,1				8,2
9 j	36,3	34,8		Ok	34,1	34,2		Ok	33,1	33,1		Ok
				35,6				34,1				33,1
				2,9				0,3				0,0
14 j	36,8	36,5		Ok	34,2	35,7		Ok	33,3	33,7		Ok
				36,6				35,0				33,5
				0,5				3,1				0,8
28 j	35,5	34,5	37,2	Ok	36,1	35,8	37,0	Ok	34,6	36,5	30,8	Ok
				35,7				36,3				34,0
				3,8				1,6				8,5

C.27 : Cure à 50 °C en eau – LBC – Superplastifiant

Temps	A1				A2				A3			
	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,	Rc (Mpa)			Moy,
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1 j	49,4	48,2	47,1	Ok	39,3	41,0	41,0	Ok	36,7	38,4	38,2	Ok
				48,2				40,4				37,8
				2,4				2,4				2,5
2 j	49,9	51,5		Ok	41,8	44,0		Ok	34,6	34,3		Ok
			50,7	42,9			34,4					
			2,2	3,7			0,5					
3 j	50,5	50,1		Ok	35,6	36,9		Ok	28,4	25,8		Ok
			50,3	36,3			27,1					
			0,5	2,5			6,8					
5 j	42,3	37,7		Ok	27,2	27,6		Ok	29,9	29,1		Ok
			40,0	27,4			29,5					
			8,2	1,0			1,7					
7 j	37,4	35,5		Ok	31,8	30,1		Ok	31,7	31,7		Ok
			36,4	30,9			31,7					
			3,6	3,8			0,1					
9 j	34,9	35,0		Ok	33,0	33,4		Ok	33,1	35,2		Ok
			34,9	33,2			34,2					
			0,2	0,9			4,4					
14 j	30,8	33,3		Ok	35,3	36,3		Ok	37,7	36,0		Ok
			32,0	35,8			36,9					
			5,5	1,9			3,4					
28 j	34,5	36,0	33,7	Ok	37,1	39,3	38,5	Ok	37,7	39,6	39,7	Ok
				34,7				38,3				39,0
				3,4				2,9				2,9