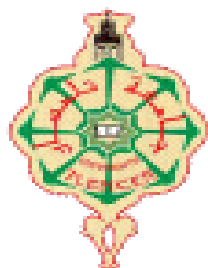


République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil  
Laboratoire EOLE



**M E M O I R E**  
de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de MASTER en Génie Civil  
Spécialité : Ingénierie des Structures

**Thème :**

**EFFET DE LA TEMPERATURE DE MURISSEMENT SUR LE  
GAIN DE LA RESISTANCE DES ECO-BETONS**

Présenté par :

**M<sup>elle</sup> SAIMI Wassila**

**M<sup>elle</sup> OUANES Imene**

Soutenu le 22 / 06 / 2019 devant le jury composé de :

<b>Mr. Fouad GHOMARI</b>	Professeur	Président
<b>Mr. Abderrahmane MERIOUA</b>	MCB	Examineur
<b>Mr. Omar TALEB</b>	MCB	Encadrant
<b>Mr. Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE</b>	Professeur	Encadrant

Année Universitaire 2018 - 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ  
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي  
يُحْيِي الْمَوْتَى  
وَالَّذِي يُخْرِجُ  
الْحَبَّ وَالذُّرِّيَّةَ  
وَالَّذِي يُسَوِّدُ  
الْبَهْرَ وَاللَّيْلَ  
وَالَّذِي يُضَوِّدُ  
النَّجْمَ وَالشَّمْسَ  
وَالْقَمَرَ وَالَّذِي  
يُخْرِجُ النَّوْمَ  
وَالَّذِي يُخْرِجُ  
الْبَهْرَ وَاللَّيْلَ  
وَالَّذِي يُضَوِّدُ  
النَّجْمَ وَالشَّمْسَ  
وَالْقَمَرَ وَالَّذِي  
يُخْرِجُ النَّوْمَ

## *Remerciements*

*En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, notre Créateur tout puissant, pour tous ses bienfaits et de nous avoir aidés pour atteindre ce niveau d'études.*

*Nous tenons à remercier vivement nos encadrants : Docteur **TALEB Omar** pour ses orientations, sa disponibilité et sa gentillesse et Professeur **BOUKLI HACENE Sidi Mohammed Al Amine** qui nous a dirigés tout au long de ce semestre, avec beaucoup de compétence et d'enthousiasme. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.*

*Notre pleine reconnaissance revient aussi à notre enseignant, Professeur **Ghomari Fouad** pour avoir accepté de présider le jury et examiner ce modeste travail.*

*Nous tenons aussi à remercier chaleureusement Docteur **Merioua Abderrahmane** pour avoir accepté de participer au jury en tant qu'examineur.*

*Nous remercions également tout le personnel du laboratoire structure et au personnel de la bibliothèque pour leur précieuse aide en particulier **Monsieur Henaoui Mustapha**. Nous n'oublierons jamais le soutien qu'ils nous ont toujours réservé.*

*Nos remerciements s'adressent à tous nos enseignants pour leurs contributions durant notre cursus universitaire et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de projet de fin d'étude.*

*Merci*

## **Dédicaces**

*Nous remercions ALLAH qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie et me protéger.*

*Que dieu les gardes en bonne santé et leur procure une longue vie. A mon frère **Salah Eddine**, A ma sœur **Kawther**. Et tout membre de ma grande famille mes Oncles et mes Tantes Cousin et Cousines (Ayoub, Yousef, Sara, Siham, Abdelrahmane, Hadjer, Djoud, Yasser, Soumia, Mohamed, Fadaï, Zaki, Abdeïllah, Marwan, Merime.....) n'oublie pas mes grande mère (Rokaya, Khira).*

*Je N'oublie Pas Un remerciement spécial pour mon fiancé **B.Kamel**.*

*A ma nouvelle famille B  
A ma chère binôme imen et sa famille  
A tous mes amis sans exception  
A tous qui mon soutenue dans mes moments pires  
A mes camarades de master génie civil chacun avec son nom  
A tous mes enseignants durant tout mon cursus  
Et toute la promotion 2019  
A tous ceux qui m'aiment  
Et tous ceux que j'aime*

*Saïmî Wassîla*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*A mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs Nawel et Faïza pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, A mon cher frère Mohamed, pour leur appui et leur encouragement, A mon cher frère Abd kader, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une sœur qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

*A ma chère binôme : Saimi wassila pour sa entente et sa sympathie*

*A toute mes professeurs pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*A tous mes chères amis(es) sans exception qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A tous ceux que j'aime.*

*Merci...*

***Ouanse Imene***

# RÉSUMÉ

Le développement actuel que connaît le secteur du bâtiment exige plus d'investigations sur le comportement des bétons surtout dans des conditions extrêmes telle que l'exposition aux différentes températures ou lorsqu'il n'y a pas assez de retour d'expérience surtout dans le cas des nouvelles familles de béton.

L'objectif de cette étude à caractère expérimentale est de mettre en évidence l'influence de la température de mûrissement sur le développement des résistances mécaniques entre 3 et 28 jours d'une nouvelle génération de bétons dites semi autoplaçants (BSAP).

Dans ce travail, nous nous sommes inspirés de la méthode Japonaise pour formuler les BSAP. Cette démarche peut être utilisée pour formuler ce type de béton mais doit cependant être perfectionnée.

Par ailleurs, la température joue un grand rôle dans l'accroissement de la résistance au cours des premiers jours de mûrissement. Cependant, une durée prolongée de maturation du béton à des températures élevées a tendance à faire diminuer la résistance à 28 jours à cause de la réaction d'hydratation qui devient non équilibrée au cours de cette période.

## Mots clés

Béton semi-autoplaçant, mûrissement, température, résistance.

# **ABSTRACT**

The current development of the building sector requires more investigation of the behavior of concretes, especially in extreme conditions such as exposure to different temperatures or when there is not enough experience feedback, especially in the case of new families of concrete.

The objective of this experimental study is to highlight the influence of the wall temperature on the development of mechanical strengths between 3 and 28 days of a new generation of so-called semi-self-compacting concretes (BSAP).

In this work, we were inspired by the Japanese method to formulate BSAP. This approach can be used to formulate this type of concrete but must be improved.

In addition, temperature plays a big role in increasing resistance during the first days of ripening. However, a prolonged period of maturation of the concrete at elevated temperatures tends to decrease the resistance to 28 days because of the hydration reaction which becomes unbalanced during this period.

## **Key words**

Semi-self-compacting concrete, ripening, temperature, resistance.

## ملخص

التطور الحالي لقطاع البناء يتطلب مزيداً من التحقيق في سلوك الخرسانة، خاصة في الظروف القاسية مثل التعرض لدرجات حرارة مختلفة أو عندما لا يكون هناك ما يكفي من ملاحظات الخبرة، خاصة في حالة ضهور خرسانة جديدة.

الهدف من هذه الدراسة التجريبية هو تسليط الضوء على تأثير درجة حرارة النضج على تطور المقاومة الميكانيكية بين 3 و 28 يوماً من جيل جديد من ما يسمى بالخرسانة شبه ذاتية الضخم «BSAP».

في هذا العمل ، استلهمنا من الطريقة اليابانية في الصياغة «BSAP». يمكن استخدام هذا النهج لصياغة هذا النوع من الخرسانة ولكن يجب تحسينه

بالإضافة إلى ذلك ، تلعب درجة الحرارة دوراً كبيراً في زيادة المقاومة خلال الأيام الأولى للنضج. ومع ذلك ، تميل فترة طويلة من نضج الخرسانة في درجات حرارة مرتفعة إلى تقليل المقاومة خلال 28 يوماً بسبب تفاعل الماء الذي يصبح غير متوازن خلال هذه الفترة.

### الكلمات الرئيسية:

خرسانة شبه ذاتية الضغط ملموسة ، والنضج ، ودرجة الحرارة ، والقوة.



## *TABLE DES MATIÈRES*

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Résumé

Abstract

Notation

Liste des figures

Liste des tableaux

## INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte et Problématique .....I

1.2 Organisation du document.....II

## PARTIE 1 : ETAT DE L'ART

### ASPECTS THEORIQUES ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

#### CHAPITRE I : BETON SEMI AUTO-PLAÇANT

I.1 Introduction .....1

I.2 Historique de béton semi Auto-plaçant .....1

I.3 Définition de béton semi-auto plaçant.....1

I.4 Avantages de BSAP.....2

I.5 Domaines d'application .....3

I.5.1 Exemple d'application de BSAP.....3

I.6 Classes de consistance des bétons.....5

I.7 Les composants d'un béton semi autoplaçant (BSAP).....5

I.7.1 Matériaux de base.....6

I.7.1.1 Les granulats des BSAP.....	6
I.7.1.2. Le ciment.....	7
I.7.1.3. L'eau de gâchage.....	7
I.7.2 Additions minérales.....	7
I.7.3 Adjuvants chimiques.....	8
I.7.3.1 Les supers plastifiants.....	8
I.7.3.2. Les agents colloïdaux.....	10
a. Polymères naturels.....	10
b. Polymères semi-synthétiques.....	10
c. Polymères synthétiques.....	10
I.7.4 Autres additions.....	11
I.8 Bilan.....	11
I.9 Procédure de malaxage.....	12
I.10 Caractéristiques de BSAP.....	12
I.10.1 À l'état frais .....	12
➤ Essai d'étalement.....	12
➤ T400.....	13
➤ Teneur en air.....	13
➤ Essai de stabilité au tamis.....	13
I.10.2 A l'état durci.....	15
a- Résistance à la compression .....	15
I.11 Méthodes de formulation des bétons semi auto-plaçant.....	15
I.12 Conclusion.....	17

## **CHAPITRE II : CURE ET MURISSEMENT**

II.1 Introduction.....	18
II.2 transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie .....	18
II.2.1 Analyse thermique .....	18
II.3 la cure.....	21
II.3.1 Méthode de cure (mûrissement).....	22
II.3.1.1 Vaporisation de produits de cure formant membrane.....	22
II.3.1.2 L'arrosage et la vaporisation d'eau.....	22
II.3.1.3 L'application des toiles imbibées d'eau.....	22
II.3.1.4 Nappe d'eau et l'immersion.....	23
II.3.1.5 Pellicules de plastique ou de papiers imperméables.....	23
II.3.2 importance et conséquences de la cure.....	24
II.3.3 Influence de la cure sur la résistance.....	25
II.3.4 Évaluation de la résistance en fonction de la cure.....	28
II.3.5 Influence de la cure sur la durabilité des bétons.....	28
II.4 Influence de la température sur le comportement du béton .....	29
II.4.1 Influence de la température sur le développement microstructural.....	29
II.4.1.1 Développement microstructural.....	29
II.4.2 Effet de la température sur la résistance mécanique du béton.....	31
II.5 Conclusion.....	37

## **PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE**

### **CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX**

III.1 Introduction.....	38
-------------------------	----

III.2 Caractéristiques du ciment.....	38
III.2.1 Composition chimique et minéralogique.....	38
III.2.2 Caractéristiques physiques.....	39
III.2.2.1 Masses volumiques (apparente et absolue) .....	39
III.2.2.2 Essai de consistance.....	40
III.2.2.3 Essai de prise.....	40
III.2.3 Caractéristiques mécaniques du ciment.....	41
III.2.3.1 Essais mécaniques sur les mortiers normalisés .....	41
III.3 Caractéristiques du sable et gravier.....	41
III.3.1 Carrière de Mazari à Tagma – Tlemcen.....	41
III.3.1.1 Situation géographique.....	41
III.3.1.2 Mode d'extraction.....	42
III.3.2 Analyses granulométrique.....	43
III.3.3 Propreté des granulats.....	45
III.3.4 Masse volumiques des granulats.....	47
III.3.5 Essai Micro-Deval.....	48
III.3.6 Coefficient d'absorption des granulats.....	49
III.3.6.1 Graviers .....	49
III.3.6.2 Sable.....	50
III.3.7 La compacité des granulats.....	52
III.3.8 Foisonnement des sables.....	53
III.4 Eau de gâchage.....	55
III.5 Caractéristiques de fille de calcaire.....	56

III.6 Caractéristiques l'adjuvant.....	57
III.7 Conclusion.....	58
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION</b>	
IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Formulation du béton semi-autoplaçant.....	59
IV.3 Détermination massique des constituants.....	59
IV.3.1 Dosage des gravillons.....	59
IV.3.2 Dosage du sable.....	60
IV.3.3 Dosage du ciment.....	60
IV.3.4 Dosage en eau.....	60
IV.3.5 Dosage d'addition (filler calcaire).....	60
IV.4 Préparation des échantillons de béton semi-autoplaçant.....	61
IV.5 Caractéristiques des bétons semi auto-plaçant à l'état frais.....	62
IV.5.1 Essai étalement.....	62
IV.5.2 Essai de la stabilité au tamis.....	63
IV.6 Mode de cure.....	63
IV.7 Caractéristiques des bétons semi auto-plaçant à l'état durci.....	65
IV.7.1 Résistance à la compression des bétons.....	65
IV.7.2 Effet de la température de mûrissement sur la résistance du BSAP.....	65
IV.7.3 Influence d'une maturation combinée sur l'évolution de la résistance.....	69
IV.8 Conclusion .....	72
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>75</b>

## *Notation*

# Notation

**BAP** : Béton Auto-plaçant

**AFGC** : L'Association Française de Génie Civil

**BHP** : Béton à haute performance

**BCV** : Béton courant vibré

**BO** : Béton ordinaire

**BSAP** : Béton semi Auto-plaçant

**EN** : La norme européenne

**E/C** : Le rapport massique entre l'eau et le ciment

**E/L** : le rapport massique entre l'eau et liant

**E.N.G** : l'Entreprise Nationale Algérienne des Granulats

**S.O.C**: SARL Orachem Concrete

**M<sub>v</sub>** : Masse volumiques

**$\rho_{abs}$** : Masse volumiques absolue

**M<sub>DE</sub>** : Coefficient Micro-Deval

**SP** : super plastifiant

**$\gamma$**  : La compacité

**Mg** : Proportion du gravier



## *LISTE DES FIGURES*

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Bétons fluides : rapport entre l'affaissement et l'étalement [LECLERC, 2011].....	2
<b>Figure I.2</b> : la pile centrale après bétonnage (Sherbrooke) [Olivier Bonneau, 2011].....	4
<b>Figure I.3</b> : Glissière ancrée après le décoffrage (Québec) [Nadia Pouliot, 2013].....	4
<b>Figure I.4</b> : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	6
<b>Figure I.5</b> : Pâte de ciment non adjuvante.....	9
<b>Figure I.6</b> : Pâte de ciment additionnée d'un super plastifiant.....	10
<b>Figure I.7</b> : Représentation schématique de l'essai d'étalement.....	11
<b>Figure I.8</b> : Essai de stabilité au tamis.....	12
<b>Figure II.1</b> : ATG d'une pâte de ciment soumise à des hautes températures [Alarcon-Ruiz, & al., 2005].....	19
<b>Figure II.2</b> : Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique [Alonso et al. ,2003-a].....	20
<b>Figure II.3</b> : Récapitulatif des transformations physico-chimiques de la pâte du ciment.....	21
<b>Figure II.4</b> : Toile imbibée.....	23
<b>Figure II.5</b> : Papiers imperméables.....	24
<b>Figure II.6</b> : Fissuration due au départ d'eau.....	25
<b>Figure II.7</b> : Effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression du béton (%) [Tan et Gjorv, 1996].....	26
<b>Figure II.8</b> : Développement de la résistance à la compression d'un béton avec ciment portland sous différents modes de cure [Mak et Torii, 1995].....	27
<b>Figure II.9</b> : Développement de la résistance à la compression du BHP avec la fumée de silice sous différents modes de cure Mak et Torii [1995].....	28
<b>Figure II.10</b> : Micrographies caractéristiques après 1 jour et 1 an d'hydratation.....	29

<b>Figure II.11</b> : l'influence de la température de mûrissement sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [BOUKLI HACENE, 2009].....	31
<b>Figure II.12</b> : Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur la résistance du béton [Neville, 2000].....	32
<b>Figure II.13</b> : Développement de résistance des bétons en fonction de la température [E.Gallucci et al, 2006].....	33
<b>Figure II.14</b> : l'influence de la température de mûrissement sur la résistance à la compression à 1 jour et à 28 jours [TAKLA, 2010].....	34
<b>Figure II.15</b> : Relation entre la résistance à la compression et la durée de mûrissement [taylor, 1976].....	35
<b>Figure II.16</b> : Développement de la résistance d'un béton à différents températures de mûrissement [verbeck et al, 1972].....	36
<b>Figure III.1</b> Composition du ciment.....	39
<b>Figure III.2</b> Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment.....	40
<b>Figure III.3</b> Essai de consistance (l'appareil Vicat).....	40
<b>Figure III.4</b> Essai de prise (l'appareil Vicat).....	41
<b>Figure III.5</b> Plan de situation du gisement de carrière de Mazari à Tagma-Tlemcen.....	43
<b>Figure III.6</b> Gisement de carrière de Mazari à Tagma-Tlemcen.....	43
<b>Figure III.7</b> Courbes granulométriques de sable (classe 0/3,0/5).....	44
<b>Figure III.8</b> Courbes granulométriques des graviers (classe 3/8,8/16,16/25).....	46
<b>Figure III.9</b> Essai d'équivalent de sable.....	47
<b>Figure III.10</b> Essai propreté des graviers.....	48
<b>Figure III.11</b> détermination de la masse volumique absolue (Méthode du l'éprouvette graduée).....	48
<b>Figure III.12</b> détermination de la masse volumique absolue (Méthode du ballon).....	49
<b>Figure III.13</b> L'essai de Micro-Deval.....	50

<b>Figure III.14</b> : La méthode utilisée pour déterminer le coefficient d'absorption de Gravier.....	50
<b>Figure III.15</b> : La détermination du coefficient d'absorption du sable.....	51
<b>Figure III.16</b> : L'essai de compacité des granulats.....	52
<b>Figure III.17</b> : l'essai de foisonnement de sable.....	53
<b>Figure III.18</b> : Super plastifiant utilisé pour le béton semi autoplaçant.....	56
<b>Figure IV.1</b> : Méthodologie de malaxage des bétons semi auto-plaçants.....	61
<b>Figure IV.2</b> : Essai d'étalement.....	62
<b>Figure IV.3</b> : Essai de stabilité au tamis.....	63
<b>Figure IV.4</b> : Cure à l'étuve.....	64
<b>Figure IV.5</b> : Différents modes de cure.....	64
<b>Figure IV.6</b> : Essai de compression.....	65
<b>Figure IV.7</b> : Evolution de la résistance en fonction de l'âge du béton et de la température de murissement.....	66
<b>Figure IV.8</b> : Evolution de la résistance en fonction du mode de maturation de murissement (T35-T20).....	69
<b>Figure IV.9</b> : Evolution de la résistance en fonction du mode de maturation de murissement (T50-T20).....	70

*LISTE DES TABLEAUX*

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> Classes des bétons selon la norme européenne EN-206-1.....	4
<b>Tableau I.2</b> Valeurs préconisées pour les essais A.F.G.C.....	13
<b>Tableau III.1</b> Composition chimique minéralogiques du ciment utilisé(TOUIL, 2009)...	39
<b>Tableau III.2</b> Caractéristiques physiques du ciment de Béni-saf.....	41
<b>Tableau III.3</b> Résistance à la compression et à la flexion du ciment.....	42
<b>Tableau III.4</b> équivalent de sable.....	47
<b>Tableau III.5</b> Caractéristiques du sable et gravier.....	54
<b>Tableau III.6</b> Composition de l'eau de gâchage (mg/l).....	55
<b>Tableau III.7</b> Propretés chimiques des fillers calcaires (Taleb2009).....	55
<b>Tableau III.8</b> Caractéristiques physiques du fillers calcaires.....	55
<b>Tableau III.9</b> Caractéristique de l'ORAFLOW THM 17200.....	56
<b>Tableau IV.1</b> La composition du béton de référence.....	60
<b>Tableau IV.2</b> Caractéristiques du BSAP de référence.....	62
<b>Tableau IV.3</b> Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 3 jours.....	65
<b>Tableau IV.4</b> Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 7 jours.....	66
<b>Tableau IV.5</b> Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 28 jours.....	67
<b>Tableau IV.6</b> perte de masse pour les bétons soumis à des modes de maturation.....	80

*INTRODUCTION GENERALE*

# INTRODUCTION GENERALE

## 1. Contexte et Problématique

Le béton est aujourd'hui le premier matériau de construction utilisé au monde en raison de sa facilité d'utilisation, de la disponibilité des matières premières, mais également par les exploits techniques qu'il permet d'accomplir en termes de résistances mécaniques et de durée de vie pour un coût relativement faible.

L'avancement de la technologie, notamment dans le domaine de la chimie a permis l'apparition de plusieurs nouveaux bétons de nature très fluides et donc facile à mettre en place dans les coffrages même ceux fortement ferrailés. Nous pouvons citer à titre d'exemple les bétons autoplaçants (BAP) qui ont vu une évolution spectaculaire au cours de ces deux dernières décennies. Cependant, les BAP peuvent nécessiter une quantité importante de liant ou de produits chimiques tels que les adjuvants qui peuvent rendre son coût élevé.

Les ingénieurs du secteur du bâtiment s'intéressent de plus en plus à ce genre de béton pour récompenser le manque crucial des ouvriers qualifiés dans la vibration des bétons.

Un béton fluide moins couteux et moins compliqué à formuler et à caractériser tel que le béton semi autoplaçant (BSAP) serait encore plus intéressant au niveau de nos chantiers. Malheureusement, très peu d'études ont traité ce matériau ; même une méthode appropriée pour la formulation de ce béton n'est pas encore déterminée.

Ce travail de recherche a pour premier objectif d'essayer de formuler un BSAP en s'inspirant d'une méthode adaptée plutôt pour les BAP dite la méthode Japonnaise.

En parallèle, nous essayerons de traiter dans ce mémoire une deuxième problématique, celle de l'effet de la température de murissement sur l'évolution de la résistance à très court terme et à 28 jours.

En effet, notre grand pays où la température peuvent fluctuer de  $-5^{\circ}$  jusqu'à  $50^{\circ}$  voir plus dans certaines régions peut influencer significativement sur le comportement mécanique du béton.



L'augmentation de la température de murissement raccourci peut raccourcir la période dormante et accélérer l'hydratation du liant. Par conséquent, la résistance à jeune âge peut être augmentée. Mais qu'en est-il de la résistance à des échéances plus longues ? Est-ce qu'une augmentation de la température aboutira forcément toujours à des résistances nettement plus élevés ? Est-ce qu'un changement climatique combinant des températures élevés et ambiantes aura aussi une influence sur le développement de la résistance mécanique des bétons ?

L'objectif principal de ce travail a aussi pour but de répondre à ces questionnements et de mettre en évidence l'influence de la température de murissement sur la résistance des bétons à court et à 28 jours surtout pour les BSAP dont le comportement mécanique reste sujet à des expérimentations.

## **2. organisation du document**

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre présente un état de l'art sur le matériau béton semi auto plaçant et s'intéresse aux constituants d'un BSAP ainsi qu'aux méthodes utilisés pour sa formulation et sa caractérisation.
- ❖ Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur l'influence du mûrissement sur les bétons.
- ❖ Le troisième chapitre fait le point sur les caractéristiques physico-chimiques, et mécaniques des matériaux utilisés dans la partie expérimentale.
- ❖ Le quatrième chapitre regroupe des résultats expérimentaux interprétés.
- ❖ Enfin une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

*PARTIE 1 : ETAT DE L'ART*

*ASPECTS THEORIQUES ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE*

## *CHAPITRE I : BETON SEMI AUTO PLAÇANT*

## **CHAPITRE I :**

### **BETON SEMI AUTO PLAÇANT**

#### **I.1 Introduction**

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton semi auto plaçant en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord l'historique de leur développement ainsi que leur définition. Ce chapitre donne aussi une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BSAP et ces caractéristiques à l'état frais et durci.

Finalement, il met en relief les innovations et les avantages apportés par les BSAP.

#### **I.2 Historique de béton semi Auto plaçant**

Afin de bonifier la gamme des bétons disponibles pour la réparation et la construction, un nouveau type de béton, le béton semi-auto plaçant (BSAP), a été développé entre 2008 et 2011 et a été ajouté aux «Béton de masse volumique normale».

Le BSAP a été élaboré dans le cadre de la Chaire de recherche CRSNG sur les bétons à haute performance fluides à rhéologie adaptée de l'Université de Sherbrooke.

Ce type de béton exige une vibration minimale pour la construction de bâtiments et d'infrastructure [Leclerc, 2010].

#### **I.3 Définition de béton semi-auto plaçant**

Un béton semi-autoplaçant (BSAP), est un mélange granulaire ayant une maniabilité à la frontière entre le BAP et le béton courant vibré (BCV) et une résistance à la compression à 28 jours de 30 MPa.

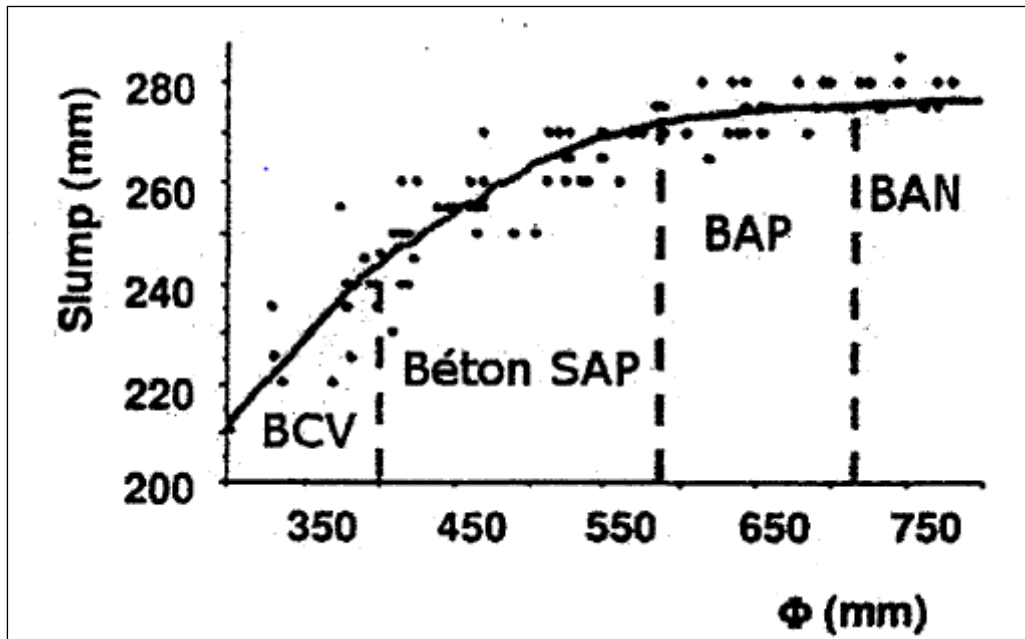


Figure I.1 : Bétons fluides : rapport entre l'affaissement et l'étalement [LECLERC, 2011]

#### I.4 Avantages de BSAP

Le BSAP étant un béton fluide, il peut remplir les coffrages et enrober l'armature avec une légère consolidation mécanique, sans toutefois subir de séparation importante des constituants.

Le BSAP nécessite une énergie de vibration inférieure de l'ordre de 50 % par rapport à un béton ordinaire. Le vibreur doit être introduit dans le béton jusqu'à sa consolidation complète, sans toutefois provoquer de la ségrégation.

Le BSAP permet donc d'accélérer la cadence de bétonnage d'ouvrages fortement armés en réalisant une vibration réduite, tout en diminuant les risques de nids de cailloux. Le BSAP offre une meilleure robustesse, un coût de production moindre et des pressions de coffrage plus faibles que le béton auto plaçant. Tout comme pour le béton auto plaçant, les coffrages du BSAP doivent être étanches.

Le réseau d'air du BSAP est généralement plus stable après pompage que celui d'un béton auto plaçant.

Lors de la réalisation d'éprouvettes, il faut consolider le BSAP en utilisant 40 % du nombre de coups par couche indiqué par la norme de référence pour un béton vibré puisque le BSAP est considéré comme ayant un affaissement supérieur à 180 mm.

A titre d'exemple, lors de la confection d'un cylindre de 110 mm de diamètre selon la norme, le nombre de coups par couche passe de 25 à 8.

## **I.5 Domaines d'application**

Le BSAP est une solution bien adapté pour :

- ✓ Tous les types de dalles.
- ✓ Compression sur poutrelles hourdis.
- ✓ Radiers.
- ✓ Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- ✓ Rattrapage de niveau en rénovation.
- ✓ Fondation superficielles.
- ✓ Voiles, poteaux, poutres.

### **I.5.1 Exemple d'application de BSAP**

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BSAP :

- En 2011, dans le cadre des activités de la chaire de recherche de l'Université de Sherbrooke, le Ministère a saisi l'opportunité d'utiliser le BSAP lors d'un premier projet pilote. Il s'agissait du bétonnage d'une pile centrale fortement armée avec motif architectural d'un pont à Sherbrooke (figure 1.2).



**Figure I.2** : la pile centrale après bétonnage (Sherbrooke) [Olivier Bonneau, 2011]

- Le deuxième projet pilote sur l'utilisation du BSAP a été réalisé lors du bétonnage d'une glissière ancrée à la base de murs de soutènement d'un pont à Québec en 2013 (figure 1.3).



**Figure I.3** : Glissière ancrée après le décoffrage (Québec) [Nadia Pouliot, 2013]

## I.6 Classes de consistance des bétons

La norme européenne EN 206-1 classe les bétons en fonction de leur affaissement et étalement. Nous pouvons observer que selon cette norme, les bétons SAP font partie des classes F3 à F4 (voir tableau 1.1).

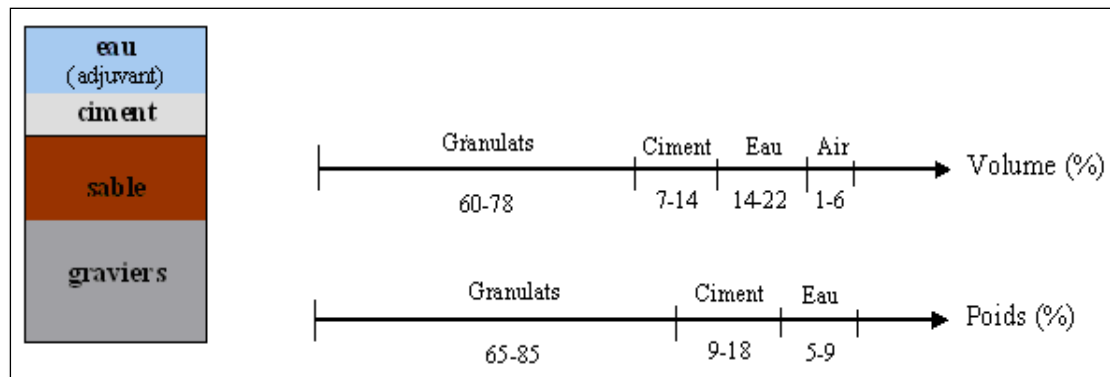
**Tableau I.1** Classes des bétons selon la norme européenne EN-206-1.

	Classe	Diamètre d'étalement en mm
BCV	F1	$\leq 340$
	F2	de 350 à 410
BSAP	F3	de 420 à 480
	F4	de 490 à 550
BAP	F5	de 560 à 620
	F6	$\geq 630$

## I.7 Les composants d'un béton semi autoplaçant (BSAP)

Le mélange d'un béton ordinaire est constitué de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier en plus des adjuvants dans certains cas (figure 1.4). Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup> ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5  $\mu$ m (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales dans quelque rares cas [Chanvillard et d'Aloia, 1994].





**Figure I.4 :** Constituents et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [BOUKLI, 2010].

Cependant, les constituants des BSAP peuvent être assez différents de ceux des bétons ordinaire ou même encore des BAP. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BSAP, les constituants entrant dans la fabrication du BSAP, selon leur utilisation sont répartis en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

### I.7.1 Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans les mélanges de cimentaires.

#### I.7.1.1 Les granulats dans les BSAP

Les granulats roulés ou concassés peuvent normalement être utilisés. Les granulats roulés présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage du BSAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm comme c'est le cas des BAP.

L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, avec un l'optimum entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. [KADID.S & BOUCETHA.Z, 2017].

### **I.7.1.2 Le ciment**

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication des BSAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

### **I.7.1.3 L'eau de gâchage**

Toute eau du réseau public potable convient pour la fabrication des bétons Semi Auto plaçant. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la fluidité, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est aussi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats, spécialement celle du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

## **I.7.2. Additions minérales**

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées.

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BSAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes,...

### **I.7.3 Adjuvants chimiques**

Afin d'obtenir une très grande fluidité requise d'un béton semi autoplaçant on utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, à base de poly carboxylates. Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité avec liant). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un viscosant permet de réduire le risque de ségrégation du BSAP (ressuage, séparation des classes granulaires), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C.

Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires afin d'éviter recourir à des dosages. Élevés en super plastifiants, ou encore à voir l'apparition d'un raidissement prononcé avec la perte des performances recherchées du BSAP.

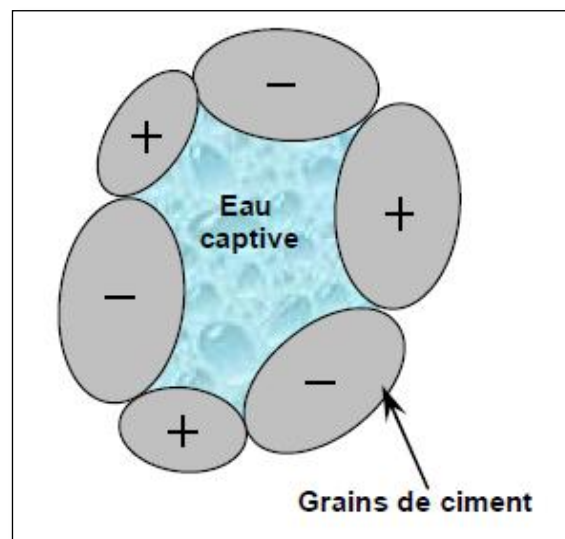
#### **I.7.3.1 Les supers plastifiants**

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

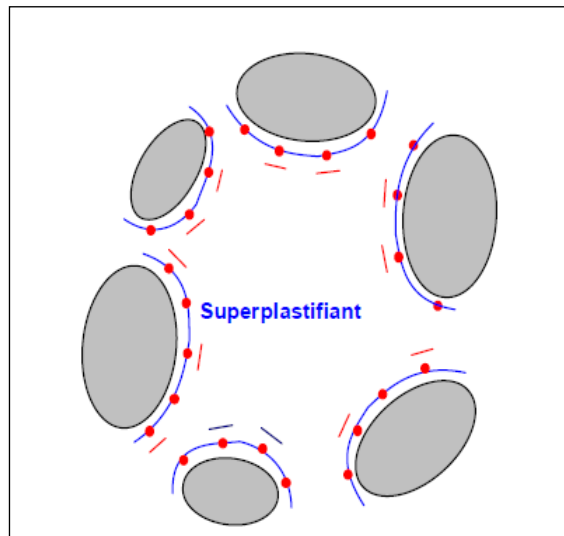
Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du poly naphthalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly mélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché.[ B.NECIRA, 2010].

Le mode d'action des super plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit:

- Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.
- Les super plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.



**Figure I.5** : Pâte de ciment non adjuvante [B.NECIRA, 2010].



**Figure I.6 :** Pâte de ciment additionnée d'un super plastifiant [B.NECIRA, 2010].

### 1.7.3.2 Les agents colloïdaux

Ces adjuvants, se présentant généralement sous forme de poudre, et sont fréquemment utilisés pour empêcher le dévalement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des bétons fluides. Toutefois, ils présentent l'inconvénient d'être relativement chers comparés aux autres adjuvants.

La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau [B.NECIRA, 2010]. Ils sont classés selon leur origine en trois catégories [HOLCIM, 2011] :

**a. Polymères naturels :** Ils comprennent des gommes naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon.

**b. Polymères semi-synthétiques :** Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propylée de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'alignole de sodium

**c. polymères synthétiques :** Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle.

- Le mécanisme d'action des agents colloïdaux :

**1. Adsorption** : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau. La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.

**2. Association** : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.

**3. Entrelacement** : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

## I.7.4 Autres additions

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BSAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées:

- ✓ Les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- ✓ Les fibres d'acier comme armature constructive
- ✓ Les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- ✓ Les fibres de polypropylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

## I.8 Bilan

La masse minimale de liant exigée pour le BSAP est plus petite que celle d'un béton auto plaçant de construction, soit 400 kg/m<sup>3</sup> pour un liant binaire et 420 kg/m<sup>3</sup> pour un liant ternaire. Le rapport eau/liant maximal sou traité est de 0,40. Cela confère au BSAP d'excellentes propriétés mécaniques et de durabilité. Les fuseaux granulométriques permis pour les gros granulats sont 5-14 et 5-20 mm. La teneur en air du BSAP frais doit se situer entre 6 et 9 %.

**I.9 Procédure de malaxage**

Le but de malaxer les constituants du béton est de le rendre plus ou moins homogène. Il s'agit d'appliquer une bonne séquence d'introduction des matériaux à l'intérieur du malaxeur en assurant une bonne combinaison entre eux (surtout entre les adjuvants et le ciment à court terme, ainsi que les ajouts et les produits d'hydratation du ciment à moyen terme) pour avoir une masse homogène et conférer au béton des performances les plus élevés. Le malaxage des BSAP peut se faire à l'aide d'une bétonnière ou d'un malaxeur à axe de rotation vertical.

**I.10 Caractéristiques des BSAP**

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

**I.10.1 À l'état frais****➤ Essai d'étalement**

- L'étalement des BSAP doit varier entre 420 et 590 mm, c'est-à-dire entre l'étalement d'un béton ordinaire vibré et celui d'un béton autoplaçant.
- Le temps de passe de la galette à un diamètre de 400 mm lors de l'essai d'étalement (T400) doit être entre 2 et 7 secondes.
- Le seuil de cisaillement doit varier entre une valeur presque nulle (limite su BAP) jusqu'à 246 Pa (seuil d'un béton ordinaire vibré).
- La viscosité doit varier entre 35 et 82 Pas [Leclerc, 2010].

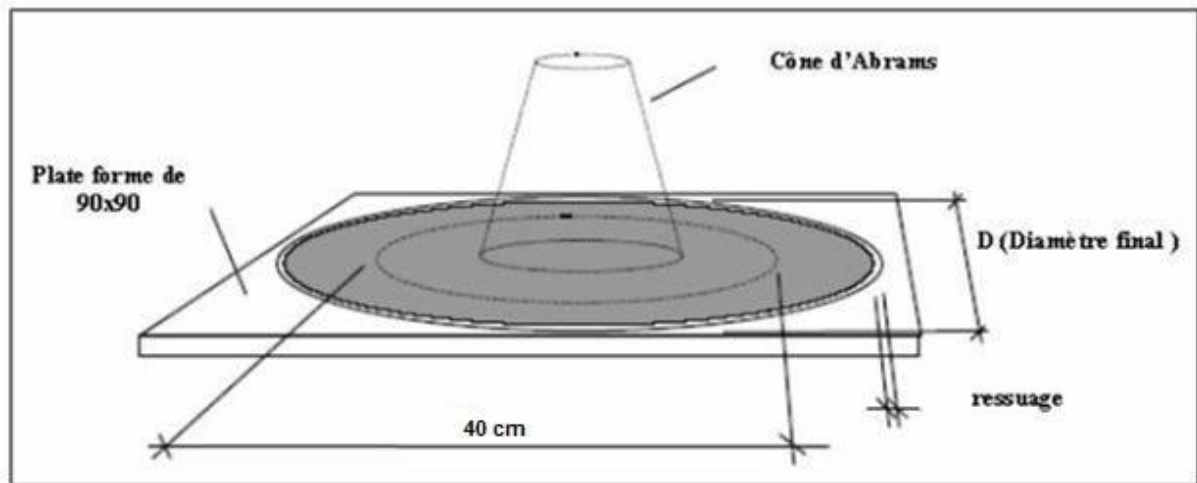


Figure I.7 : Représentation schématique de l'essai d'étalement.

➤ **T400**

Cet essai, analogue au mesure de T500 pour le BAP, consiste à mesurer le temps nécessaire au béton pour former un cercle de 400 mm de diamètre lors de l'essai d'étalement à partir du moment où le cône est soulevé. Pour un même niveau d'étalement, plus le béton est visqueux et plus il mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T400 sera élevée.

➤ **Teneur en air**

La mesure de la teneur en air du béton frais a été déterminée selon la méthode pressiométrique en suivant la norme ASTM G231.

➤ **Essai de stabilité au tamis**

Cet essai vise à qualifier les bétons très fluides vis-à-vis du risque de ségrégation.

Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto nivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [AFGC].

Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10 L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg et de précision de 20 g.

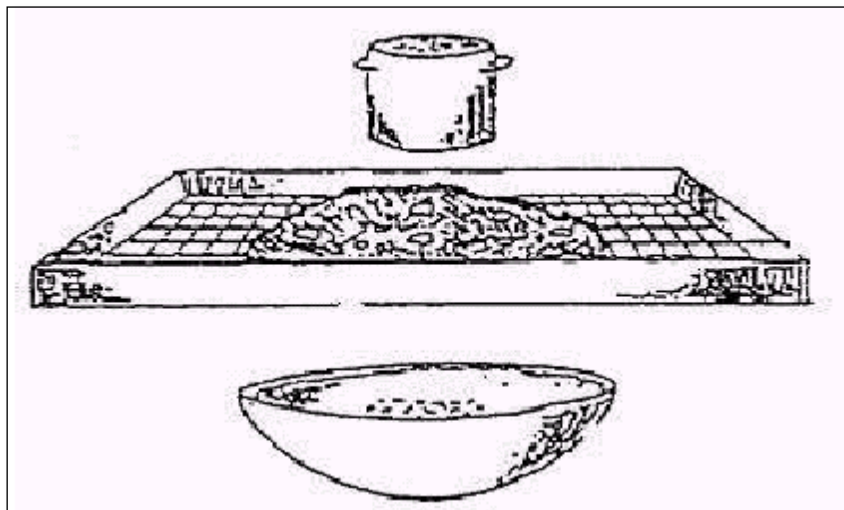


Le mode opératoire d'après les recommandations de l' [AFGC] est le suivant : A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation, la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante:

- ✓  $0 \leq \pi \leq 15 \%$       stabilité satisfaisante.
- ✓  $15 \% \leq \pi \leq 30 \%$     stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- ✓  $\pi \geq 30 \%$                 stabilité très mauvaise, béton inutilisable.

**Tableau I.2** Valeurs préconisées pour les essais A.F.G.C

Etallement	de 60cm à 75cm
H2/H1	$\geq 0.8$
Laitance	$\leq 15\%$



**Figure I.8** : Essai de stabilité au tamis.

**I.10.2 A l'état durci**

Le béton frais va évoluer pour aboutir au produit durci recherché. Il est incontournable de suivre l'évolution du béton sous différents aspects :

- ✓ Chimique, car il s'agit bien d'un ensemble de réactions,
- ✓ Physique, car le développement de la microstructure s'accompagne de phénomènes physiques qui définiront un état initial de la structure,
- ✓ Mécanique, car les aspects précédents conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence [chanvillard, 1999].

Le béton durci est un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment, il apparaît donc en première analyse, que ses propriétés mécaniques dépendent :

- de celles de la pâte liante.
- de celles des granulats.
- de l'adhérence pâte-granulats.

**a- Résistance à la compression**

Les BSAP se caractérisent par un rapport E/C plus faible que celui des bétons ordinaires, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. L'utilisation des fillers dans une formulation de BSAP peut générer une accélération de sa résistance mécanique au jeune Age. Les particules fines des fillers, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

**I.11 Méthodes de formulation des bétons semi auto-plaçant**

Jusqu'à ce jour, aucune méthode de formulation des BSAP n'a été élaborée à travers le monde. Cependant, certains auteurs s'inspirent de la méthode japonaise ou passe par des méthodes statistiques

On peut citer dans ce qui suit les démarches de la méthode japonaise.

**❖ Méthode Japonaise :**

La formulation des BSAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants

**1. Dosage des gravillons :** Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>.

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

**2. Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

**3. Dosage du liant :**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

**4. Dosage de l'eau et du super plastifiant :**

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

**I.12 Conclusion**

Le béton semi autoplaçant (BSAP) est un matériau qui savère innovant dans le domaine de la construction car il permet de réduire la quantité de liant par rapport à un BAP pour obtenir des caractéristiques rhéologiques presque identique à ce dernier. Tout fois, les BSAP peuvent nécessiter une légère vibration.

De plus, la caractérisation des BSAP est moins pénible que celle des BAP car elle nécessite moins d'essais.

Malheureusement, aucune méthode de formulation n'a été développée pour la formulation des BSAP. Certains auteurs utilisent la méthode des plans d'expérience pour formuler les BSAP.

En plus, le suivi des protocoles recommandés pour caractériser ces bétons est nécessaire afin de mettre en œuvre un BSAP capable de concilier une grande fluidité et une bonne stabilité et surtout pour conférer une bonne performance structurelle et un rapport cout/qualité optimal.

## *CHAPITRE II : MURISSEMENT*

## **CHAPITRE II :**

# **MURISSEMENT**

### **II.1 Introduction**

La maturation du béton est communément admise comme étant le paramètre primordial responsable du bon développement des propriétés du matériau. Dans des conditions de température élevée, la pâte de ciment subit des changements physiques et chimiques susceptibles d'affecter significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des structures en béton.

Des nombreuses études ont été menées afin d'élucider l'influence de la température de mûrissement sur les différents mécanismes impliqués durant l'hydratation

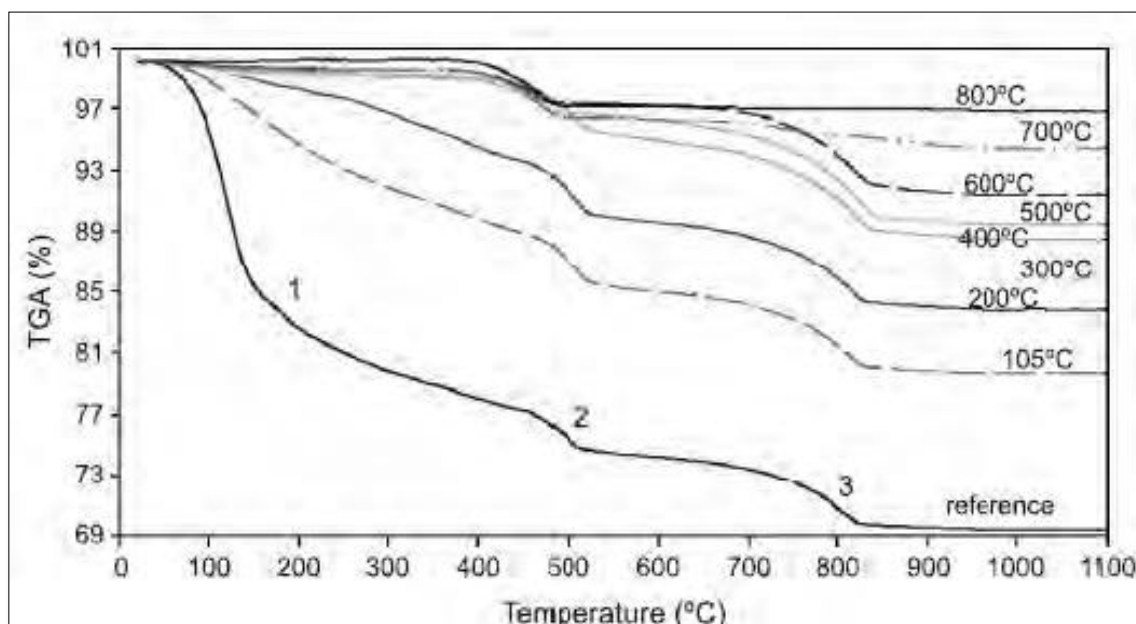
On présente dans ce chapitre l'influence de la température de mûrissement sur la résistance du béton à court et à long terme.

### **II.2 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie**

Au sein du matériau béton se déroulent des nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques plus ou moins rapides. Ainsi tout au long de la vie du béton, celui-ci est sensible aux conditions d'humidité et de température de son environnement qui modifie ses caractéristiques Macroscopiques (durabilité, résistance...), nous présentons maintenant les intervalles de température pour lesquels se produisent des changements physico-chimiques de la pâte de ciment et du béton.

#### **II.2.1 Analyse thermique**

Une analyse thermogravimétrique ou thermo différentielle met en avant les transformations Physico-chimiques qui se produisent suite à l'élévation de la température. Ces modifications sont représentées sur les thermographes. Ces essais aident à analyser les différentes étapes et les modifications qui se produisent au sein du béton.

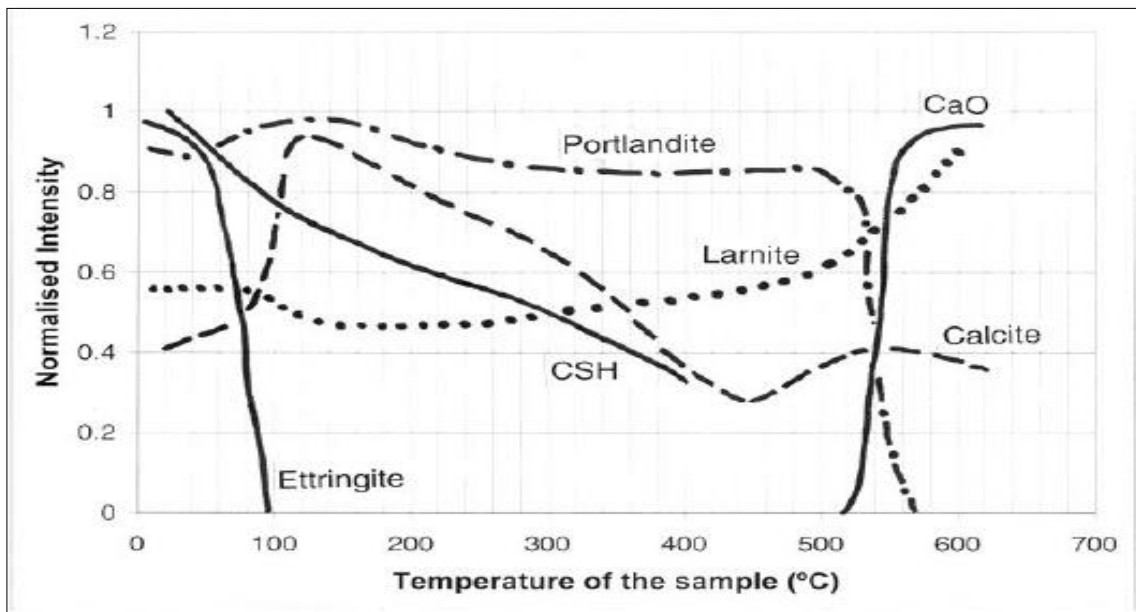


**Figure II.1** : ATG d'une pâte de ciment soumise à des hautes températures

[Alarcon-Ruiz, & al., 2005]

Nous observons trois stades importants :

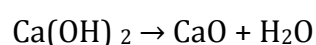
- **1er perte de masse** : Avant 100°C Cette perte correspond au départ de l'eau libre [Noumowé, 1995].
- **2eme perte de masse** : 450°C Décomposition de l'hydroxyde de calcium (CH) en chaux libre et eau suivant la réaction :  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  [Platret, 2002] et [Noumowé, 1995].
- **3eme perte de masse** : 700°C Décomposition de  $\text{CaCO}_3$  qui résulte de la présence de calcaire dans la pâte testée :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  [Noumowé, 1995].



**Figure II.2 :** Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique [Alonso et al., 2003-a]

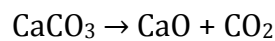
Mais parallèlement à ces principales modifications, les autres constituants de la pâte de ciment subissent des transformations au cours du traitement thermique. L'élévation de la température entraîne les processus suivants :

- Entre 30°C et 120°C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent. [Castellote, 2004] montre aussi une décomposition de l'ettringite, qui consomme 26 molécules d'eau ( $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 26H_2O$ ) et son élimination complète avant 100°C.
- Entre 130°C et 170°C : le gypse se décompose d'après [Noumowe, 1995] et [Alarcon, 2005].
- En dessous de 100°C jusque 400°C, d'après [Castellote, 2004] : le gel C-S-H se déshydrate essentiellement en  $\beta - C_2S$ ,  $\beta - CS$  et en eau d'après [Bažant, 1996].
- Entre 450°C et 550°C: décomposition de la Portlandite selon l'équation:





- autour de 570°C: transformation des granulats quartziques de la phase α a la phase β. Ceci s'accompagne d'un gonflement, [Noumowe, 1995] et [Gaweska Hager, 2004].
- Entre 600°C et 700°C: deuxième phase de déshydratation du gel C-S-H d'après [Noumowe, 1995].
- À partir de 650°C: décomposition endothermique du calcaire selon l'équation:



- À partir de 1300°C : début de fusion de la pâte et des granulats, éliminations des sulfates et évaporations des alcalins d'après [Schneider, 1987].

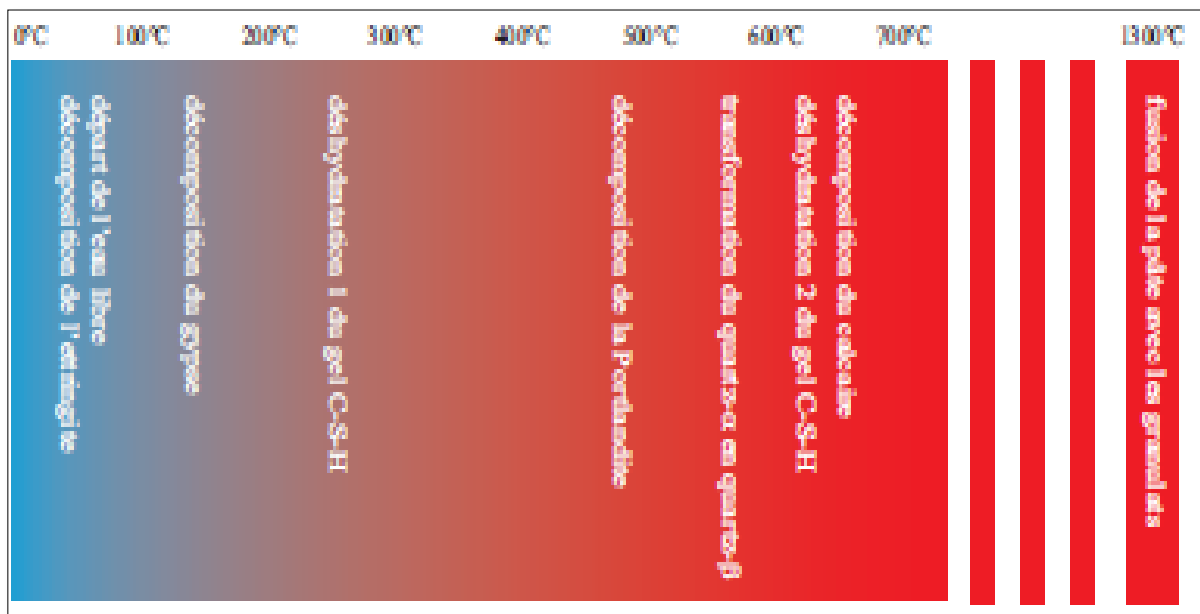


Figure II .3 : Récapitulatif des transformations physico-chimiques de la pâte du ciment[Schneider, 1987].

### II.3 la cure

L'humidité relative et les conditions climatiques défavorables lors de la mise en place d'un béton exposé peuvent contribuer à sa perte rapide d'eau. La cure du béton est un procédé lui permettant de maintenir des taux d'humidité et de température adéquats durant une période définie après coulage, dans le but de favoriser son bon durcissement. Essentielle, elle permet au béton de développer les propriétés requises

telle que la durabilité, l'étanchéité, la résistance à la compression et à l'usure, la stabilité volumique [BEN KHADDA, 2006].

### **II.3.1 Méthode de cure (mûrissement)**

#### **II.3.1.1 Vaporisation de produits de cure formant membrane**

Les produits de cure formant membrane sont composés de cire, de résines, de caoutchouc chloré et de solvants très volatils et servent à réduire on a retardé l'évaporation de l'eau du béton. Ils doivent être appliqués rapidement sur le béton frais ou sur les surfaces du béton après le décoffrage. De plus, ces produits doivent être vaporisés manuellement ou mécaniquement, en respectant le taux d'application recommandée par le manufacturier, et être appliqués au moment opportun. Leur utilisation est à éviter pendant la période de ressuage du béton [BEN KHADDA, 2006].

#### **II.3.1.2 L'arrosage et la vaporisation d'eau**

L'arrosage continu ou la vaporisation sont des méthodes de cure souhaitables lorsque la température ambiante est à 10°C et que le taux d'humidité relative est très faible. Le béton doit demeurer humide, car l'alternance de cycles de mouillage/séchage altère la qualité de surface [BEN KHADDA, 2006].

#### **II.3.1.3 L'application des toiles imbibées d'eau**

Les toiles imbibées d'eau sont faites de coton, de jute, de géotextiles ou d'autres matières capables de retenir l'eau et sont fréquemment utilisées. Les toiles doivent être exemptes d'apprêt ou d'autres substances incompatibles avec le béton ou qui peuvent le décolorer. Elles doivent être maintenues continuellement humides durant la période de cure afin d'éviter d'absorber l'eau du béton. Une pellicule de polyéthylène recouvrant la toile diminue le nombre d'arrosage et peut-être utilisé lorsqu'un arrosage soutenu est optionnel pour refroidir le béton [BEN KHADDA, 2006].

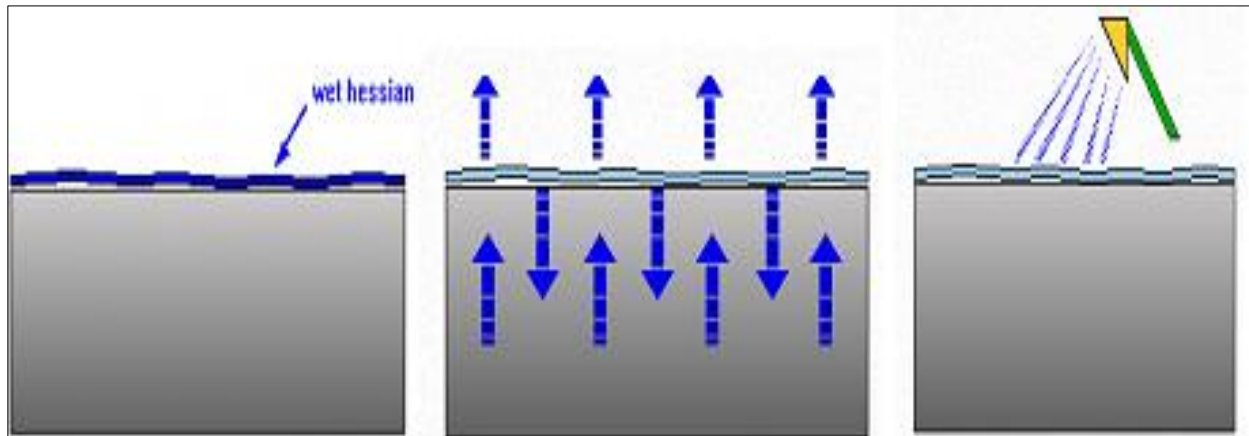


Figure II.4 : Toile imbibée [BEN KHADDA, 2006].

#### II.3.1.4 Nappe d'eau et l'immersion

L'utilisation de nappes d'eau et l'immersion restent les méthodes les plus efficaces pour éviter les pertes d'humidité et maintenir le béton à une température uniforme. Les surfaces planes telles que les planchers peuvent être recouvertes d'une nappe d'eau. La différence de température entre l'eau et le béton doit être de moins 10°C afin d'éviter les fissures de retrait thermique [BEN KHADDA, 2006].

#### II.3.1.5 Pellicules de plastique ou de papiers imperméables

L'utilisation de pellicules de plastique ou de papiers imperméables peut s'avérer suffisante sur des surfaces horizontales ou sur des bétons structuraux ayant des formes simples. Ces méthodes diminuent le besoin d'apports d'eau continue et assurent une hydratation adéquate du ciment en empêchant l'eau de s'évaporer. Elles sont à éviter lorsque les surfaces apparentes du béton sont importantes, ainsi que par temps chaud à cause de l'effet de serre. Si le papier imperméable est abîmé pendant la période de protection, il faut réparer et sceller la partie endommagée [BEN KHADDA, 2006].



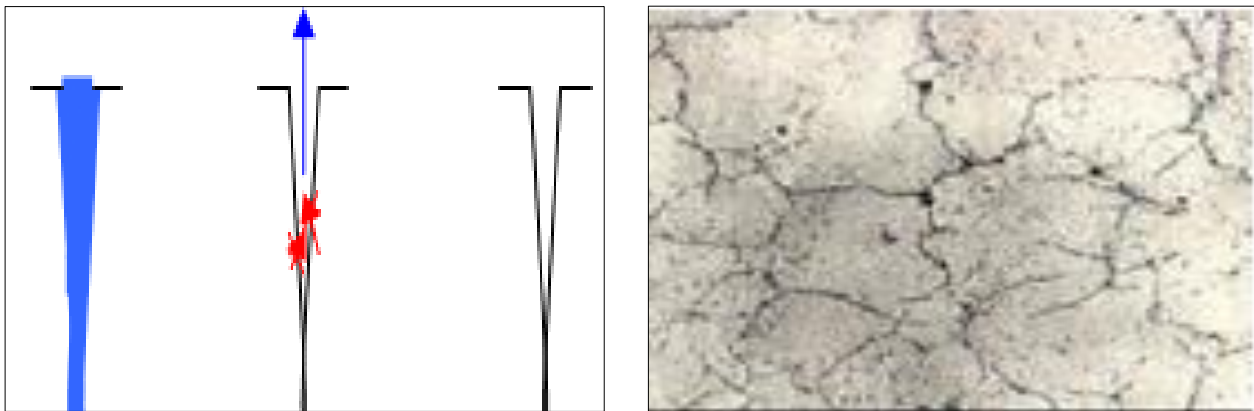
**Figure II.5 :** Papiers imperméables [BEN KHADDA, 2006].

### II.3.2 Importance et conséquences de la cure

La cure du béton est importante au début de sa prise et de son durcissement. L'eau peut quitter le béton fraîchement coulé par évaporation sur les surfaces non protégées.

- L'évaporation empêche la réaction chimique de prise du béton de se faire correctement mettant en cause la résistance du béton. En effet, s'il y a moins d'eau que celle nécessaire à l'hydratation, il y aura moins de liaisons chimiques donc moins de force de cohésion entre les composés [ACC, 2014].
- L'évaporation de l'eau provoque l'augmentation de la porosité. L'eau en partant crée des vides qui seront des espaces libres pour la venue des agents agressifs (chlorures, carbonates, les sulfates, les alcalins, les acides) et un logement pour l'eau gelée, ... Cette porosité aurait donc pour conséquence une diminution de la durabilité du béton [ACC, 2014].
- Des fissures peuvent également apparaître. L'eau de surface, en s'en allant à tendance à entraîner la matière avec elle. On a alors création de fissures,

qui ont le même effet que les vides sur la durabilité et la résistance [ACC, 2014].



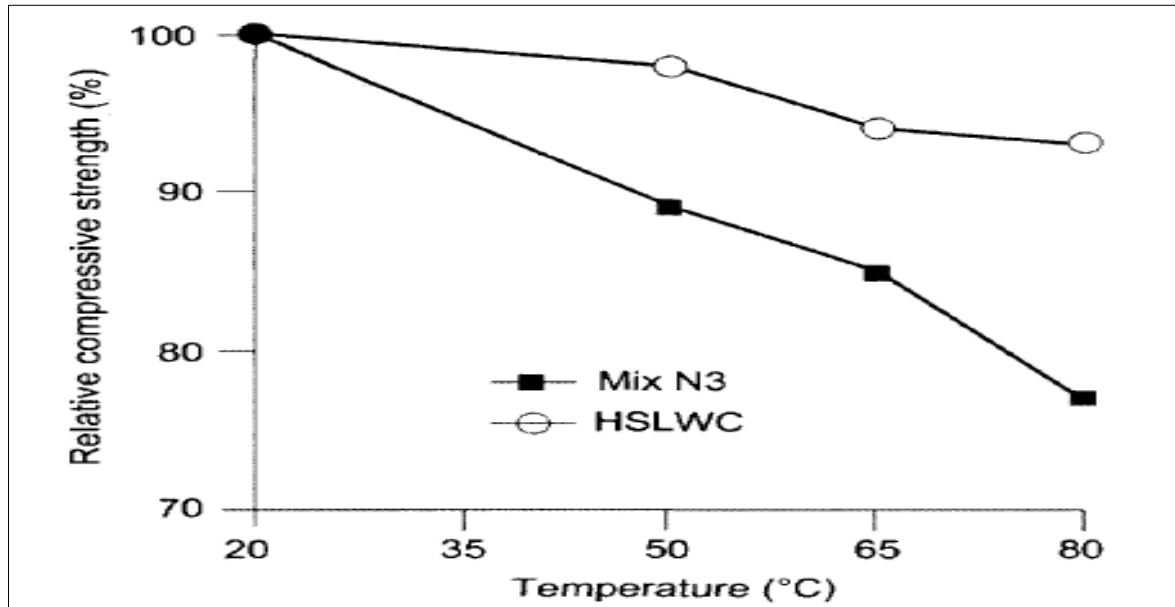
**Figure II.6 :** Fissuration due au départ d'eau [ACC, 2014].

### II.3.3 Influence de la cure sur la résistance

Les conditions de conservation (cure) peuvent aussi influencer sur la résistance. Il faut distinguer ici deux aspects différents du problème : l'absence de cure au jeune âge et l'interruption de la cure avant l'essai de compression. Au jeune âge, l'absence de cure provoque un ralentissement ou un arrêt précoce de l'hydratation et donc conduit à des résistances ultimes plus faibles de 10% à 25% plus faible selon la durée d'exposition à une humidité relative à 50% [Byfors, 1980].

Des travaux menés par [Tan et Gjorv, 1996] ont montré que l'effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression exprime en pourcentage de diminution, est plus petit dans le cas de BHP que dans le cas du béton usuel. La figure II.7 montre que la résistance à la compression à 28 jours diminue de 11 %, 15 % et 23 % lorsque la température augmente de 20 à 50, 65 et 80 °C respectivement pour le béton usuel (Mix N3). Tandis que, elle est de 2 %, 6 % et 7 % dans le cas de béton léger à haute performance (HSLWC). [Tan et Gjorv, 1996] relie cela, au fait que, les grains de ciment sont tellement proches de façon que la quantité des hydrates formes dans la période initiale de mûrissement, sera suffisante pour remplir tous les espaces inters granulaires. Par conséquent, la diminution du taux d'hydratation dans la période qui suit, cause par l'augmentation de la température de mûrissement, n'affecte pas la résistance à long terme.

Toutefois, l'influence de la température de mûrissement sur la résistance à la compression à long terme des BHP dépend du type de liant [Mak et Torii, 1995].

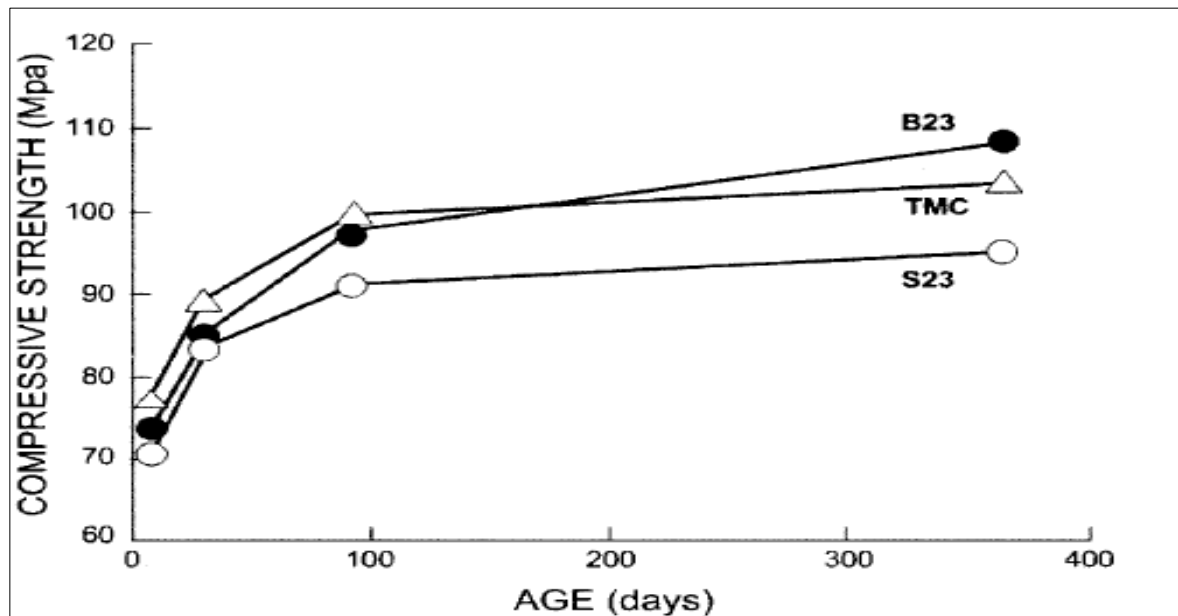


**Figure II.7 :** Effet de la température de mûrissement sur la résistance à la compression du béton (%) [Tan et Gjørsv, 1996]

Les auteurs ont utilisé deux BHP avec le même E/L de 0,3, le premier contient seulement du ciment portland et le deuxième contient de plus de ciment de la fumée de silice. Trois types de cure ont été adoptés. Le premier mode de cure (B23) se fait dans un réservoir d'eau à 23 °C et est équivalent au mûrissement standard. Le deuxième (S23) se fait en couvrant les échantillons par une couche plastique collante à 23 °C qui peut être analogue à la partie du béton proche de la surface du béton in situ. Le troisième mode de cure (TMC) se fait dans un réservoir d'eau dont la température est réglée de façon à avoir le même scénario que celle à l'intérieur d'un poteau et qui peut atteindre une température maximum de 70 °C après quelques heures.

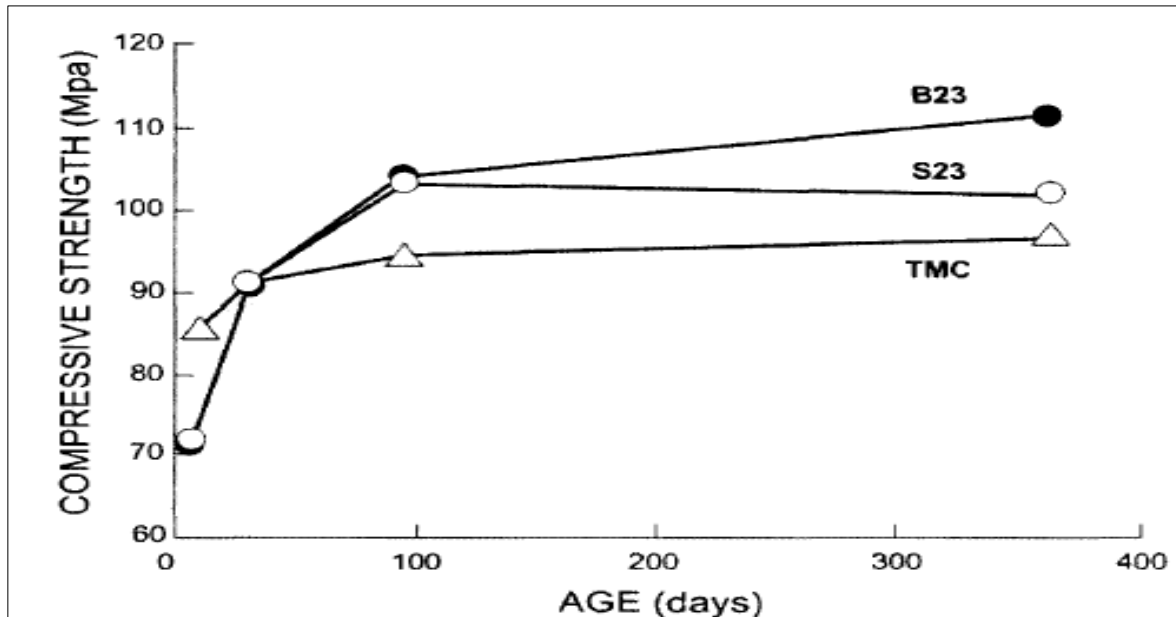
La figure II.8 montre que la résistance à la compression du béton avec ciment portland est plus grande à jeune âge dans le cas de mûrissement (TMC) que dans le cas du (B23). Le développement de la résistance des cylindres mûris a (TMC) continue jusqu'à 1 an mais avec un taux plus lent que celui des cylindres mûris a (B23). De plus,

à 1 an la résistance à la compression des cylindres mûris à (B23) est plus grande que celle des mélanges mûris à (TMC).



**Figure II.8** Développement de la résistance à la compression d'un béton avec ciment portland sous différents modes de cure [Mak et Torii, 1995]

La figure II.9 montre que la résistance à la compression du béton avec fumée de silice mûries à (TMC) est inférieure significativement à celui-ci mûrie à (B23). De plus, contrairement au cas du béton avec ciment portland, la résistance du béton avec fumée de silice à jeune âge est plus grande dans le cas du mûrissement (B23) que dans le cas de mûrissement (TMC). De même, la résistance à long terme pour un mûrissement (TMC) est plus petite que pour un mûrissement (S23).



**Figure II.9 :** Développement de la résistance à la compression du BHP avec la fumée de silice sous différents modes de cure Mak et Torii [1995]

Ces études discutent les facteurs influençant sur le développement de la résistance à la compression à court et à long terme, tout en analysant l'effet du type de liant (ajouts cimentaires), E/L, de la température et même les différents modes de cure.

### II.3.4 Évaluation de la résistance en fonction de la cure

Il a été démontré en laboratoire que des échantillons de béton mûris dans un environnement sec peuvent perdre jusqu'à 50% de leur résistance à la compression comparativement à des échantillons mûris dans un environnement humide. Par contre lors du bétonnage par temps froid, étant donné que l'hydratation du ciment est ralentie il est requis de prolonger la période de cure à l'eau et de maintenir en place les coffrages jusqu'à ce que la résistance à la compression spécifiée soit atteinte au moment du décoffrage et de la mise en service de l'ouvrage [BEN KHADDA, 2006].

### II.3.5 Influence de la cure sur la durabilité des bétons

La cure a une forte influence sur les propriétés du béton durci. Les surfaces exposées des dalles sont particulièrement sensibles puisque c'est la qualité des premiers millimètres du béton qui protège les dalles des différentes agressions. À titre d'exemple la résistance au gel/dégel et les propriétés mécaniques du béton peuvent diminuer de façon importante lorsque la cure est inadéquate [BEN KHADDA, 2006].



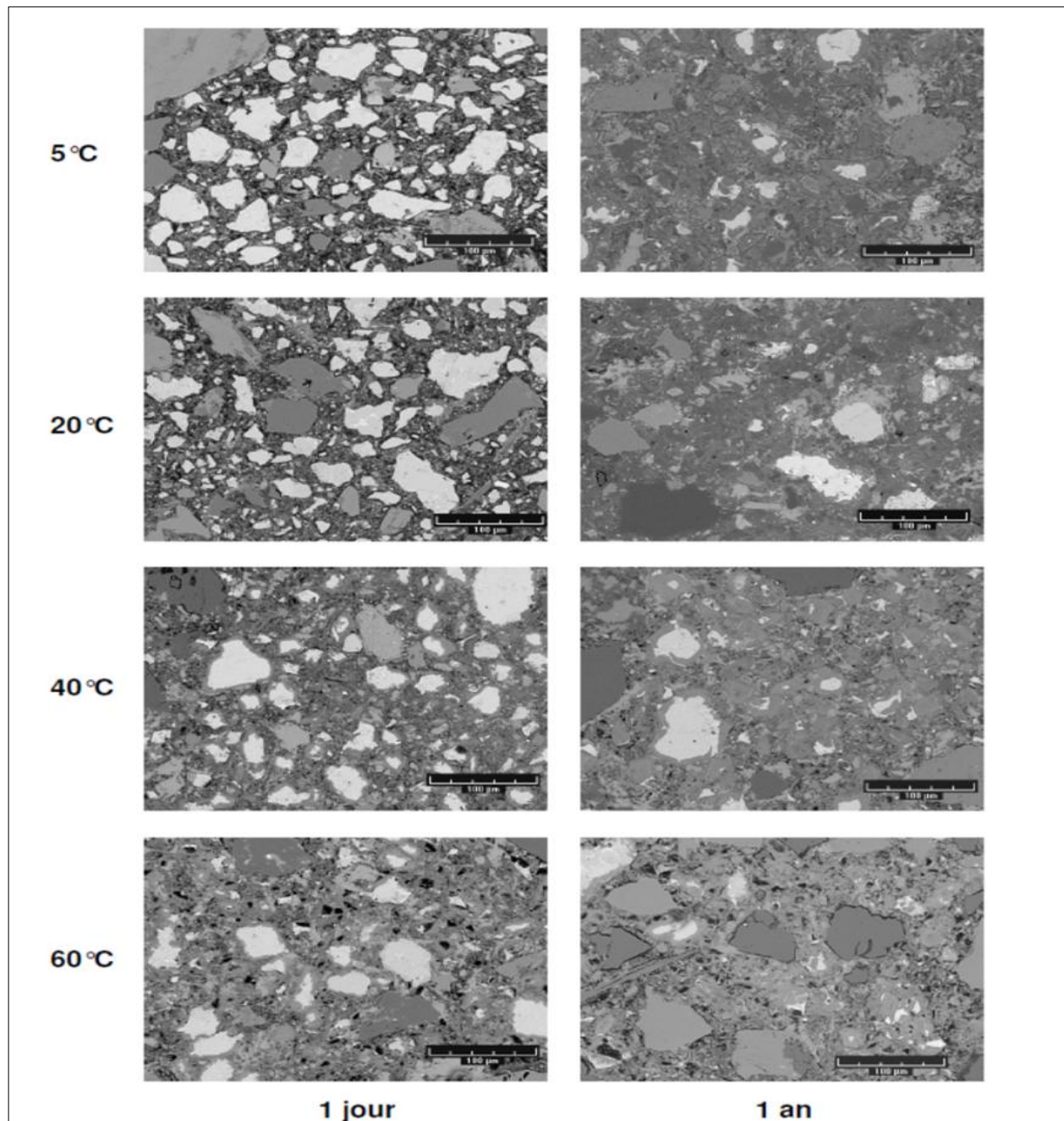
## **II.4 Influence de la température sur le comportement du béton**

Lorsque le béton est exposé à des variations de température, sa microstructure subit des modifications physico-chimiques tout au long du chauffage entraînant une déshydratation du gel de ciment (CSH). Cette déshydratation induit une évolution de la microstructure du matériau, donc une évolution des propriétés mécaniques, thermiques et de transport. Elle induit aussi la création d'eau libre à l'intérieur du matériau et donc une augmentation de pression inertielle [E.Gallucci et al, 2006].

### **II.4.1 Influence de la température sur le développement microstructural**

#### **II.4.1.1 Développement microstructural**

La Figure II.10 présente des micrographies caractéristiques des bétons étudiés à différentes températures (variantes de 5°C à 60°C) à 1 jour et à 1 an. À basse température, après un jour d'hydratation, la réaction d'hydratation est moins avancée qu'à haute température. À température plus élevée, on observe pour le béton à 60°C, de nombreux (petits grains totalement hydratés). À 40°C, la matrice cimentaire semble être remplie de manière plus homogène qu'à 60 °C [E.Gallucci et al, 2006].



**Figure II.10 :** Micrographies caractéristiques après 1 jour et 1 an d'hydratation

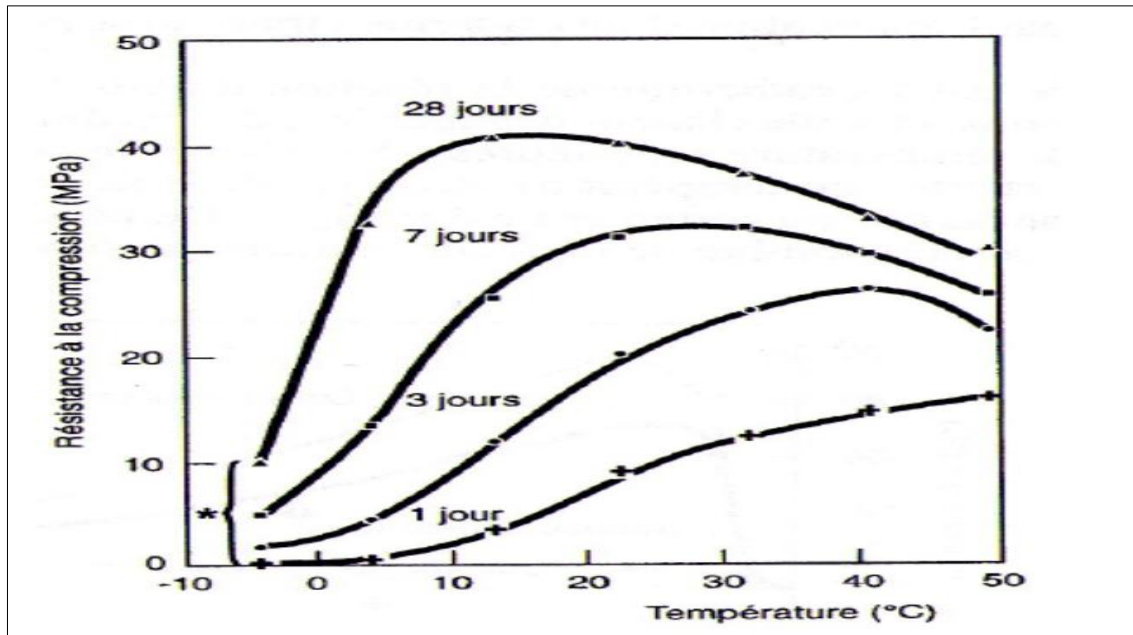
Après 1 an d'hydratation, quelle que soit la température, la microstructure des bétons est plus dense. L'hydratation est très avancée dans tous les cas. L'homogénéité des matrices est en revanche significativement différente : plus la température augmente plus les différentes phases sont distribuées de manière hétérogène. À 60°C, la microstructure a peu évolué depuis 1 jour, particulièrement en ce qui concerne la porosité capillaire. À basse température, la matrice est remplie de façon plus homogène par les produits d'hydratation alors que plus la température augmente,

plus ces produits se concentrent autour des grains de ciment laissant un réseau de pores capillaire plus large [E.Gallucci et al, 2006].

#### **II.4.2 Effet de la température sur la résistance mécanique du béton**

La température est une variable clé des conditions de durcissement des bétons, car il influe sur l'hydratation et les propriétés de la pâte de ciment ou du béton durci. La température d'hydratation a un impact significatif sur l'hydratation de la pâte de ciment et du béton [BERRABAH et al, 2016].

- **À court terme** : selon [Neville, 2000], du fait de cette croissance accélérée des produits d'hydratations au sein de la matrice cimentaire, l'augmentation de la température de mûrissement accélère la prise et le durcissement du béton ce qui permet un décoffrage rapide à court terme, se traduisant par un gain accéléré de résistance. La résistance en compression à 28 jours peut être atteinte en seulement 24 heures.
- **À long terme** : Cet effet sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours d'hydratation du fait qu'une hydratation rapide présente une structure physique moins compacte [Neville, 2000]. En effet, une vitesse d'hydratation initiale rapide due à des températures élevées retarde l'hydratation subséquente et conduit à une distribution non uniforme des produits hydratés. Selon [Klieger, 1996], plus la température de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances [BERRABAH et al, 2016].



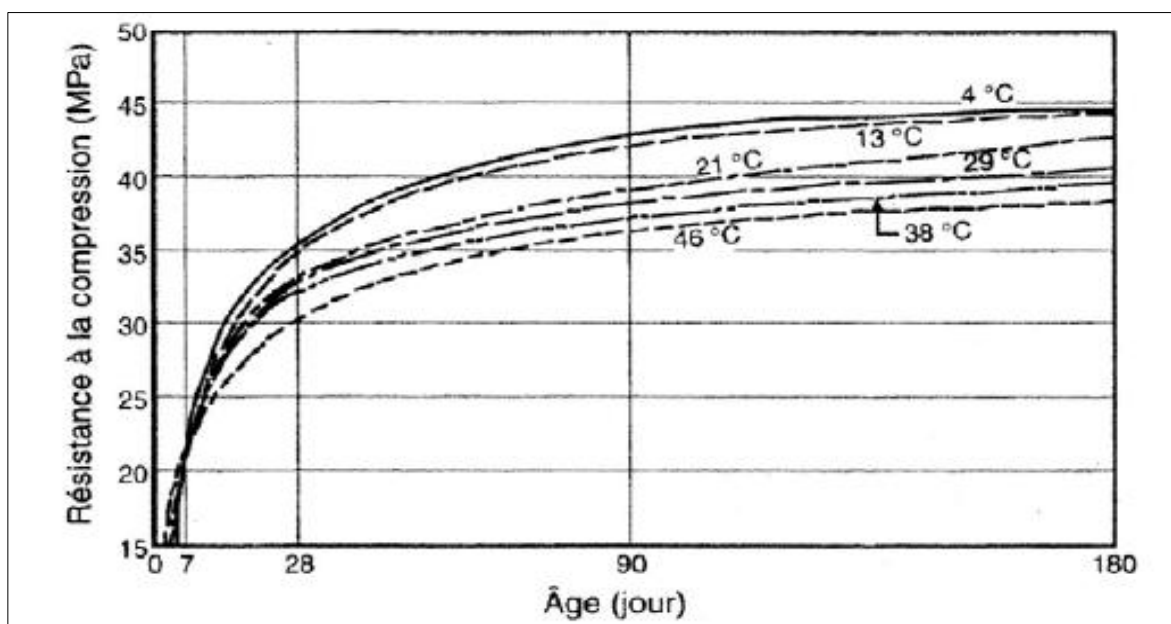
**Figure II.11** : Influence de la température de mûrissement du béton sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [BOUKLI HACENE, 2009]

La figure II.11 montre que plus la température de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée ; alors que pour les âges de trois à vingt-huit jours l'influence de la température change radicalement. En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance. En fait, cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente. Cependant, les causes à l'origine des réductions de résistances observées à long terme pour les bétons mûris à des températures élevées sont beaucoup plus complexes et suscitent encore l'intérêt des chercheurs jusqu'à ce jour.

Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli. Cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel CSH/espace élevé sera éventuellement atteint [TAKLA et al, 2010].

Cette explication sur les effets néfastes d'une température initiale élevée sur la résistance à long terme a été avancée par [Verbeck et Helmuth, 1968], qui suggèrent que la vitesse initiale d'hydratation rapide à des températures plus élevées retarde l'hydratation subséquente et cause une distribution non uniforme des produits d'hydratation à l'intérieur de la pâte. En effet, à une vitesse initiale d'hydratation élevée, les produits d'hydratation n'ont pas suffisamment de temps pour diffuser loin du grain de ciment et pour se précipiter uniformément dans l'espace interstitiel (comme c'est le cas pour des températures plus basses). Par la suite, une concentration élevée de produits d'hydratation se retrouve au voisinage des grains qui s'hydratent, ce qui retarde leur hydratation subséquente et affecte défavorablement la résistance à long terme.

La figure II.12 présente les résultats de Price cité par [Neville, 2000] sur l'effet de la température âge sur le développement de la résistance d'un béton ayant un rapport eau/ciment proche de 0,5. La plage des températures considérées était comprise entre 4 et 46°C. Les éprouvettes avaient été scellées pour empêcher tout mouvement d'humidité. Les résultats d'essais sur cylindres montrent qu'au-delà de 7 jours les résistances à la compression du béton diminuent par suite d'une température plus élevée durant les deux premières heures.

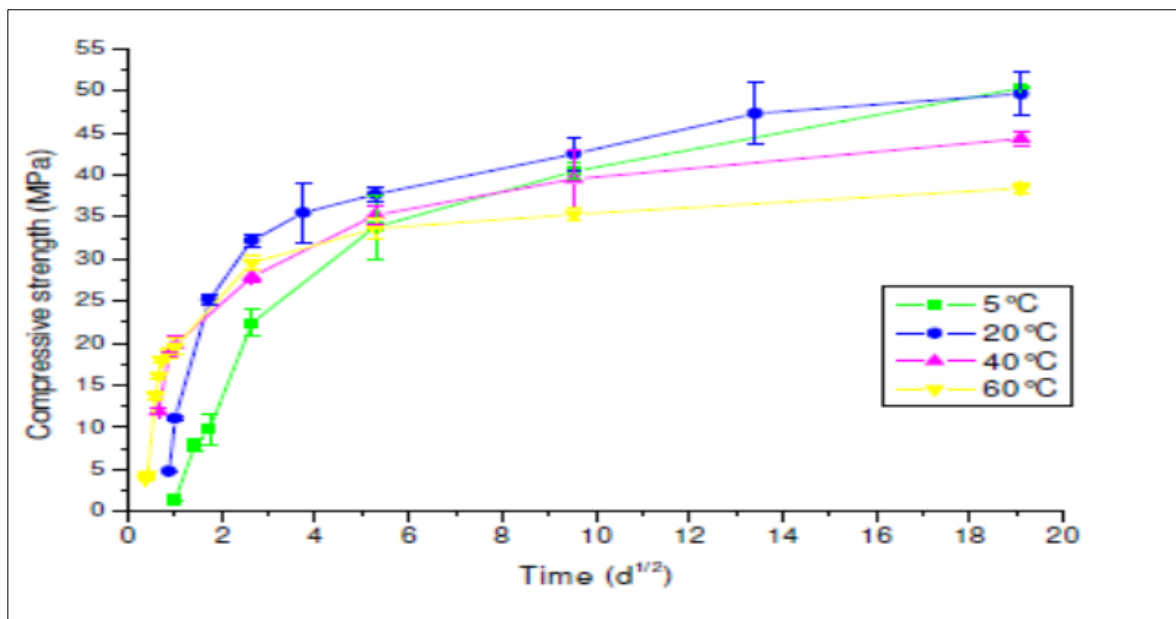


**Figure II.12 :** Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur la résistance du béton [Neville, 2000]

Dans une autre étude réalisée par [Barnes et al, 1977] que lorsque les éprouvettes sont mûries à 20°C durant les premières 24 heures, elles présentent une résistance de 28 jours supérieurs de 10% par rapport à celles qui sont mûries à 18°C pendant les premières 24 heures.

Dans une étude, les auteurs ont montré que plus la température est élevée, plus le développement de la résistance à jeune âge est rapide (Figure II.13). Après trois jours d'hydratation, la résistance du béton à 20°C rattrape celle des bétons à 40 et 60°C. Après 28 jours, elle les dépasse, alors que le développement du béton à 60°C semble s'arrêter [E.Gallucci et al, 2006].

Après un an, la résistance à 5°C rattrape celle à 20°C. La résistance à 60°C est de 25% inférieure. Ces résultats sont aussi en accord avec ceux rapportés par d'autres auteurs (Verbeck 1968, Kim 2002) et montrent bien que le développement de résistances optimales passe par un développement microstructural singulier et optimisé.



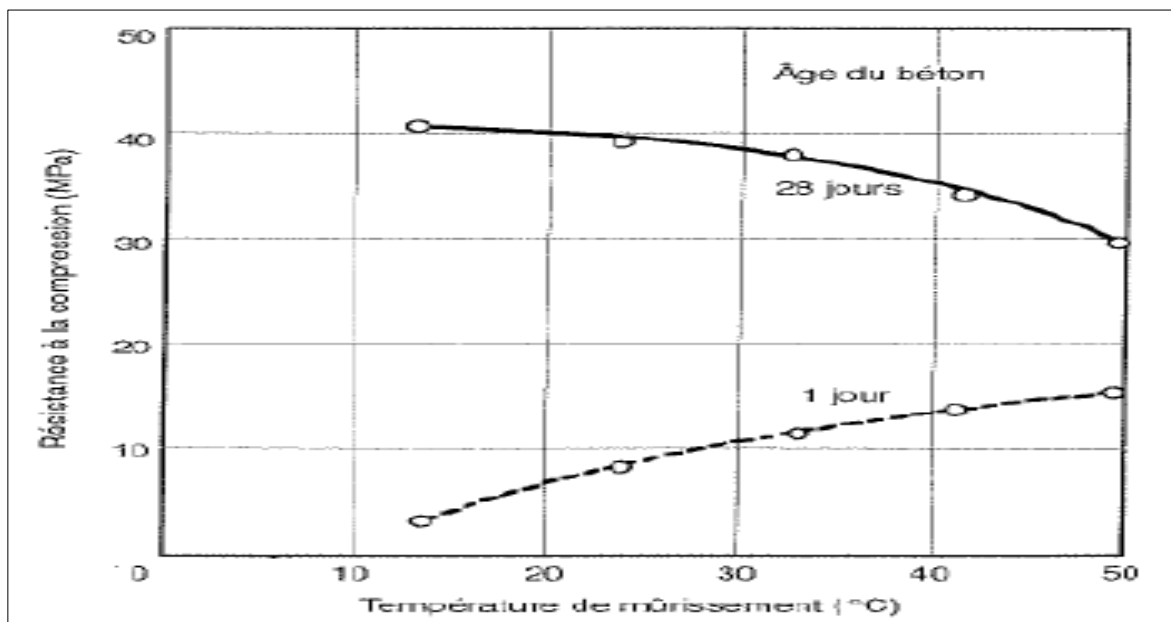
**Figure II.13** : Développement de résistance des bétons en fonction de la température  
[E.Gallucci et al, 2006]

Ainsi, une augmentation de température de mûrissement accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecter ainsi des avantageusement la résistance à jeune âge du béton.

Une température plus élevée pendant et après le contact initial entre le ciment et l'eau réduit la durée de la période dormante, de sorte que la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt [Neville 2000].

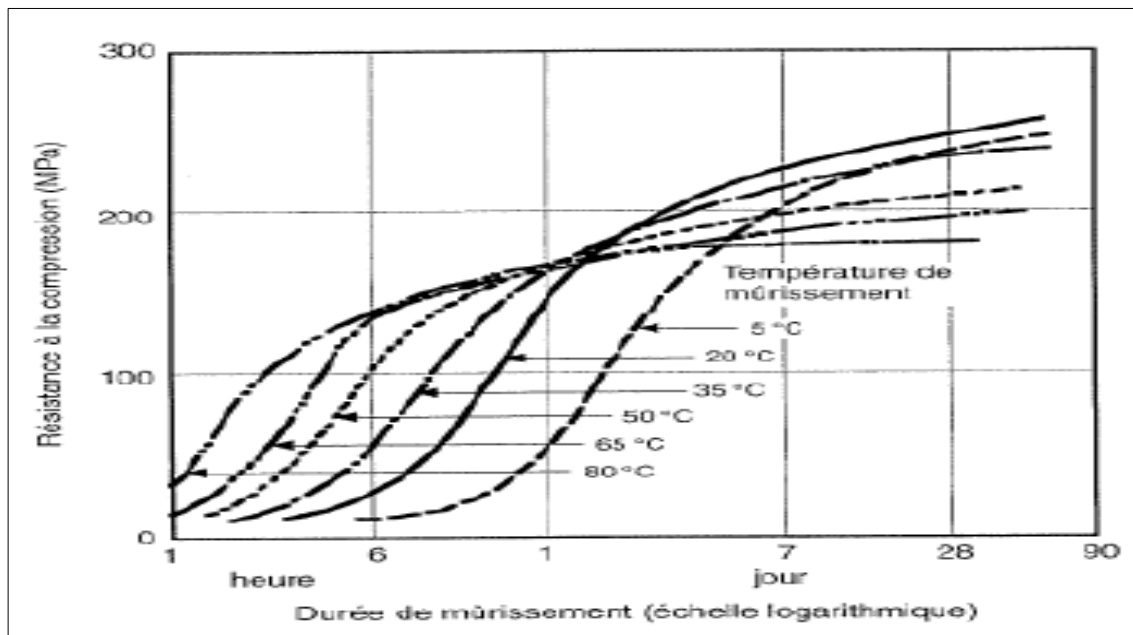
Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produit d'hydratation présentant une structure physique moins compacte. Probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli.

Les résultats de [verbeck et al, 1968] illustrés sur la figure II.14 qui représente l'influence de la température de mûrissement sur la résistance du béton à 1 jour et à 28 jours. Sur les éprouvettes ont été mises à l'essai après avoir été ramenées à 23°C pendant 2 heures. Montre bien l'effet positif de la température sur la résistance mécanique à l'âge d'un jour. Par contre un effet totalement à l'inverse est remarqué sur les éprouvettes testées à l'âge de 28 jours.



**Figure II.14** : l'influence de la température de mûrissement sur la résistance à la compression à 1 jour et à 28 jours [TAKLA, 2010]

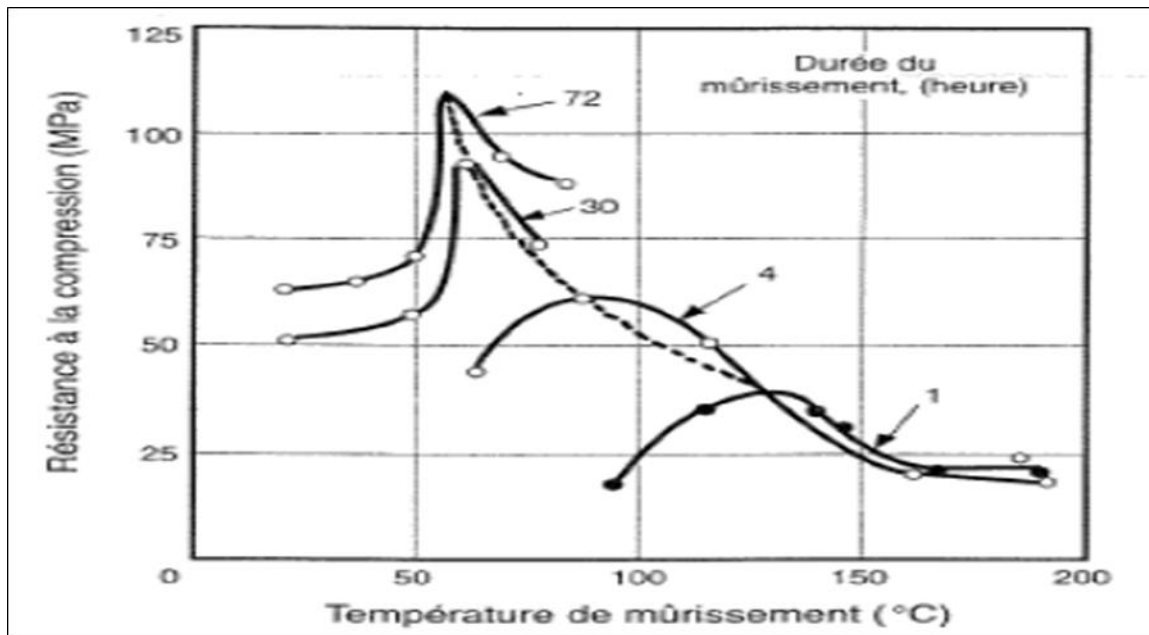
Dans une autre recherche, [taylor, 1976] a montré que la température ambiante permet d'obtenir les meilleures résistances à long terme.



**Figure II. 15 :** Relation entre la résistance à la compression et la durée de mûrissement [taylor, 1976]

Il est aussi important de souligner la relation entre la résistance à la compression et la durée de mûrissement puisque chaque température correspond à une période optimale de mûrissement [verbeck et al, 1972], pour un ensemble donné de matériaux, il est possible de tracer une courbe reliant les points de résistance optimale pour diverses périodes et températures de mûrissement «figure II. 16».





**Figure II.16 :** Développement de la résistance d'un béton à différentes températures de mûrissement [verbeck et al, 1972]

De plus l'augmentation de la température de cure affecte le taux d'hydratation et également le taux de la polymérisation de C-S-H. En plus, cette augmentation change la distribution de taille de pore, à laquelle peut être corrélé le changement du taux de fluage et du retrait [Young, 2004].

## II.5 Conclusion

Ce chapitre regroupe les différents résultats des travaux de recherche sur les modes de cure et l'influence de la température de mûrissement sur le développement de la résistance à la compression. L'étude menée par plusieurs chercheurs nous a permis de mettre en évidence certains phénomènes physiques qui peuvent apparaître notamment lors de l'élévation de la température de cure.

## *PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE*

*CHAPITRE III :*  
*CARACTÉRISATION DE MATÉRIAUX*

**CHAPITRE III :****CARACTERISATION DE MATERIAUX****III.1 Introduction**

Dans cette partie, nous présenterons la première partie de notre travail expérimental effectué au niveau du laboratoire qui consiste à la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation d'un béton semi auto-plaçant. Ces matériaux sont :

- Le ciment CPJ-CEM II/A-42.5 (Béni-saf).
- Le sable (de classe 0/3 et 0/5) (Carrière de Mazari à Tagma – Tlemcen).
- Les graviers (de classe 3/8 ; 8/16 ; 16/25) (Carrière de Mazari à Tagma – Tlemcen).
- Eau de gâchage (du service public de la Daïra de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen).
- Fillers de calcaire (de l'Entreprise Nationale Algérienne des Granulats (E.N.G)).
- L'adjuvant (SARL Orachem Concrete (S.O.C), domiciliée à Boutelilis, dans la wilaya d'Oran).

**III.2 Caractéristiques du ciment****III.2.1 Composition chimique et minéralogique**

Le ciment utilisé dans notre travail de recherche est le CPJ-CEM II/A-42.5 correspondant à la norme (NA 442/2000) provenant de la cimenterie de Béni-saf de la wilaya d'Ain-Temouchent.

Ce choix est aussi motivé par des raisons écologiques qui incitent à favoriser l'utilisation des ciments composés. Ce ciment est principalement constitué de clinker et de pouzzolane comme l'indique la figure III.1.

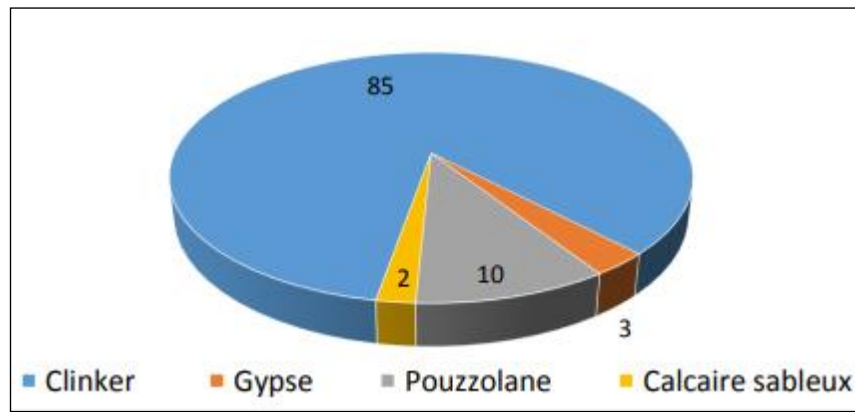


Figure III.1 : Composition du ciment

Les détails des propriétés chimiques, les composants minéralogiques de ce ciment sont regroupés dans les tableaux ci-dessous

**Tableau III.1** Composition chimique minéralogiques du ciment utilisé (Rapport du laboratoire LTPO)

Composition chimique	Éléments %	Clinker	Chaux vive, Oxyde de calcium (CaO) (%)	50,62
			Oxyde de fer (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	4,15
			Bauxite, Oxyde d'aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	4,67
Composition minéralogique	<b>Minéraux du clinker</b>	<b>Teneur en % rapportée au clinker</b>	Célite, Aluminate tricalcique (C <sub>3</sub> A) (%)	5,35
			Féelite, Alumino -ferrite- (C <sub>4</sub> AF) (%)	12,62

### III.2.2. Caractéristiques physiques

#### III.2.2.1 Masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Pour déterminer la masse volumique absolue du ciment, nous avons utilisé la méthode du pycnomètre à liquide.

Les résultats de la masse volumique, apparente et absolue sont récapitulés dans le tableau III.2



Figure III.2 : Caractérisation de la masse volumique apparente du ciment.

### III.2.2.2. Essai de consistance

L'objectif de cet essai consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire au ciment CPJ-CEM II/A 42.5 utilisé pour obtenir une consistance désirée. Cette dernière a été mesurée à l'aide de l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3.

Les résultats concernant la consistance sont résumés dans le tableau III.2.

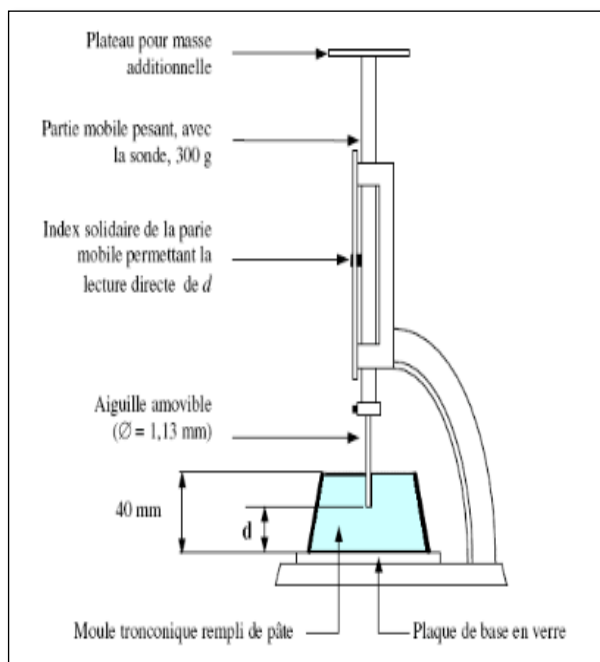


Figure III.3 : Essai de consistance (l'appareil Vicat)

III.2.2.3. Essai de prise

Nous avons réalisé l’essai de prise en utilisant l’aiguille Vicat (NF EN 196-3) qui permet de suivre l’évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise, comprise entre deux échéances : le temps de début et de fin de prise Vicat, définis par des hauteurs normalisées d’enfoncement de l’aiguille. Trois essais simultanés à l’aiguille Vicat ont été réalisés sur la pâte de ciment étudiée.

Les temps de début de prise et de fin de prise Vicat sont indiqués sur le tableau III.2.



Figure III.4 : Essai de prise (l’appareil Vicat)

Tableau III.2 Caractéristiques physiques du ciment de Béni-saf

Caractéristiques	CPJ-CEM II/A-42.5 (Béni-saf)
Mv apparente (kg/m <sup>3</sup> )	0,984
Mv absolue (pycnomètre) (kg/m <sup>3</sup> )	3101
Consistance (%)	W= 27%      soit 135g
Début de prise (min)	180
Fin de prise (min)	300
Surface spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	3099,6

### III.2.3 Caractéristiques mécaniques du ciment

#### III.2.3.1 Essais mécaniques sur les mortiers normalisés

Pour chaque échéance 2, 7 et 28 jours, nous avons effectué des essais mécaniques sur trois éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm de mortier ayant une formulation normalisée (EN 196-1).

Les essais de flexion et de compression ont été réalisés sur le portique universel didactique. Il comporte un cadre métallique avec différents percages et un vérin hydraulique d'une capacité de 160 KN qui peut être à la fois utilisé en compression avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s  $\pm$  200 N/s, en flexion et en traction à une échelle de 10 KN à une vitesse de mise en charge de 50 N/s  $\pm$  10N/s.

Les valeurs obtenues sont compatibles avec les exigences de normes correspondantes, Les résultats concernant les essais mécaniques sont récapitulés dans le tableau III.3.

**Tableau III.3** Résistance à la compression et à la flexion du ciment.

Essais	âge [J]		
	2 jours	7jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	35,81	40,4	48,87
Résistance à la flexion (MPa)	4,41	6,37	8,35

### III.3 Caractéristiques du sable et gravier

#### III.3.1 Carrière de Mazari à Tagma – Tlemcen

##### III.3.1.1 Situation géographique

La carrière de Mazari à Tagma appartient à l'Entreprise de FAYMED MAZARI - CARRIERE Entreprise artisanale d'exploitation de carrières et se situe à 8 km au Nord-est de la ville de Tlemcen sur 1 RTE DE TAGMA DJEBEL SIDI YUCEF Ain Fezza (figure III.4).



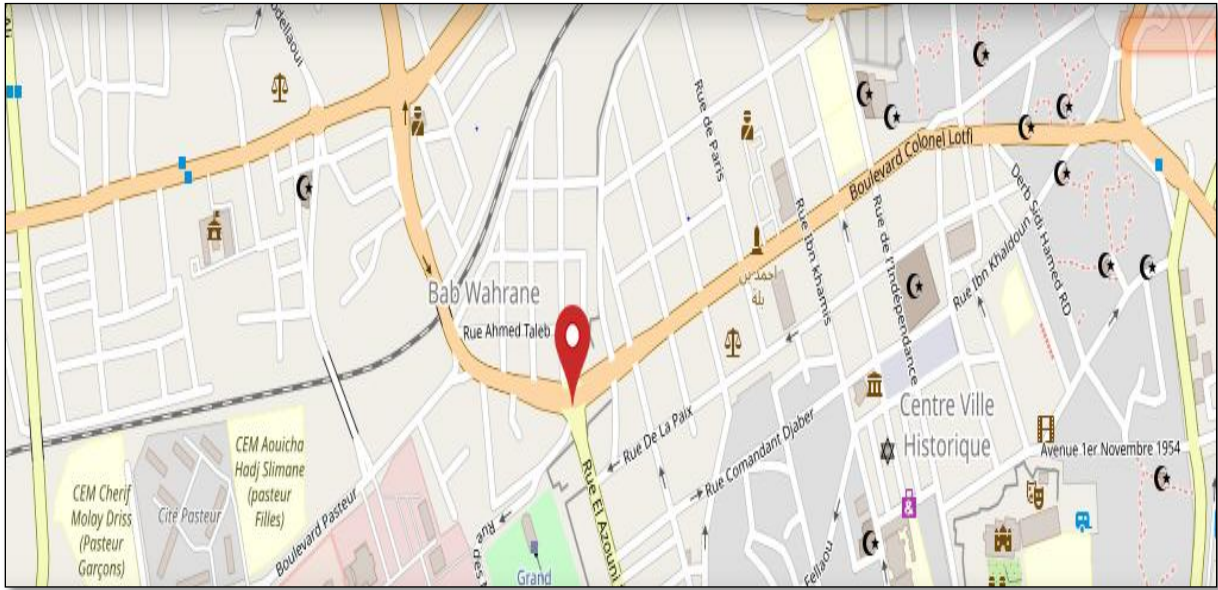


Figure III.5 : Plan de situation du gisement de carrière de Mazari à Tagma-Tlemcen



Figure III.6 : Gisement de carrière de Mazari à Tagma-Tlemcen

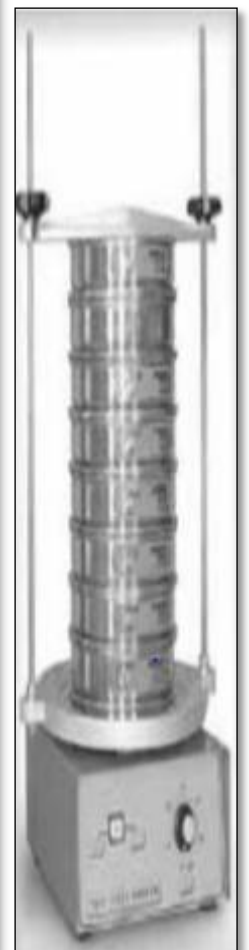
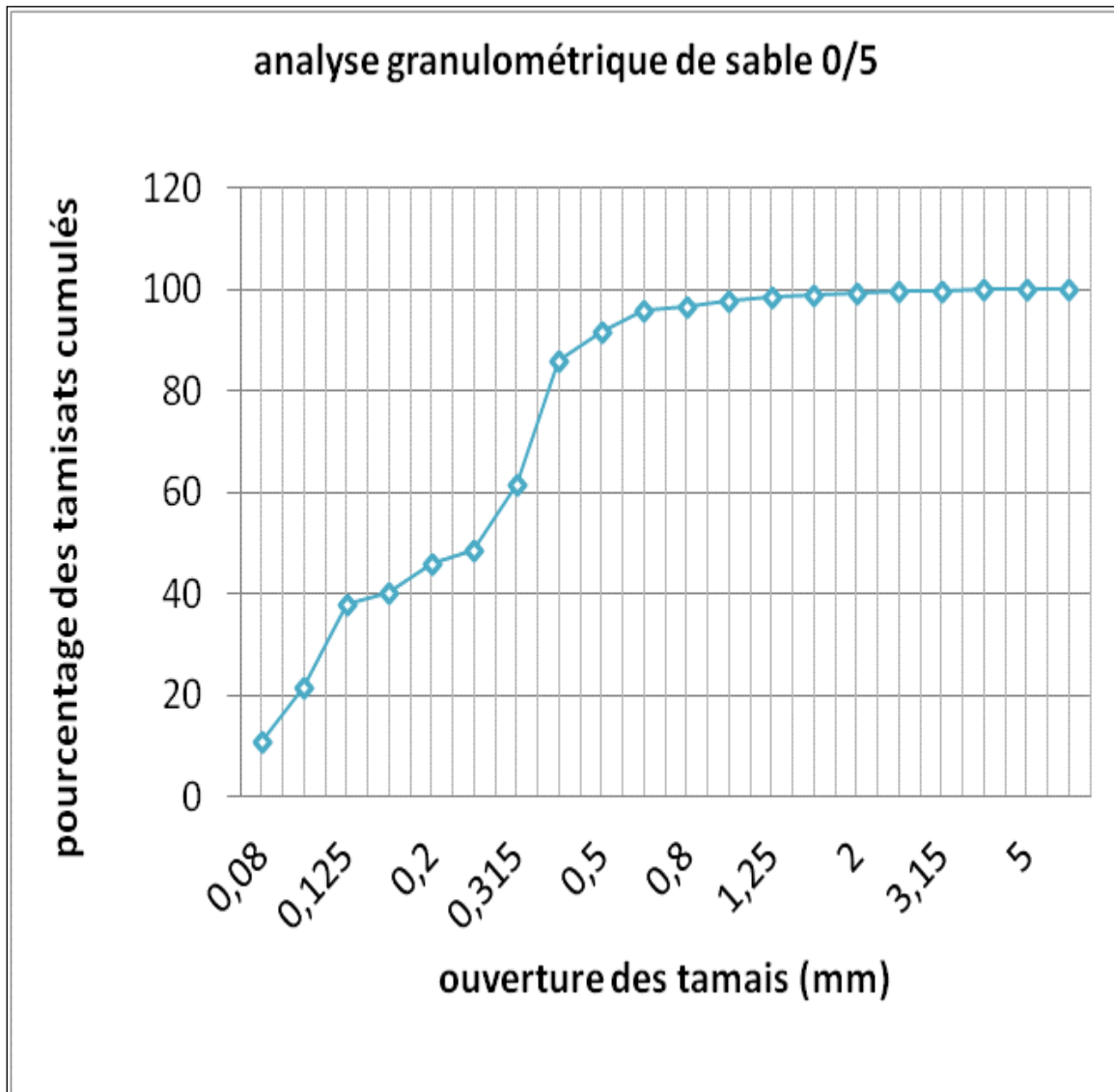
**III.3.1.2 Mode d'extraction**

Le gisement s'exploite en gradins par des processus technologiques d'extraction de la roche. L'abattage du massif rocheux se fait à l'aide d'explosifs ; jusqu'à l'obtention des morceaux de dimensions nécessaires et admissibles.

III.3.2 Analyses granulométriques

Il s'agit de déterminer par l'analyse granulométrique les pourcentages pondéraux respectifs des différents diamètres de grains constituant chaque échantillon de granulat étudié. (Norme EN933-1)

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sur les figures III.5 et III.6.



Les tamis

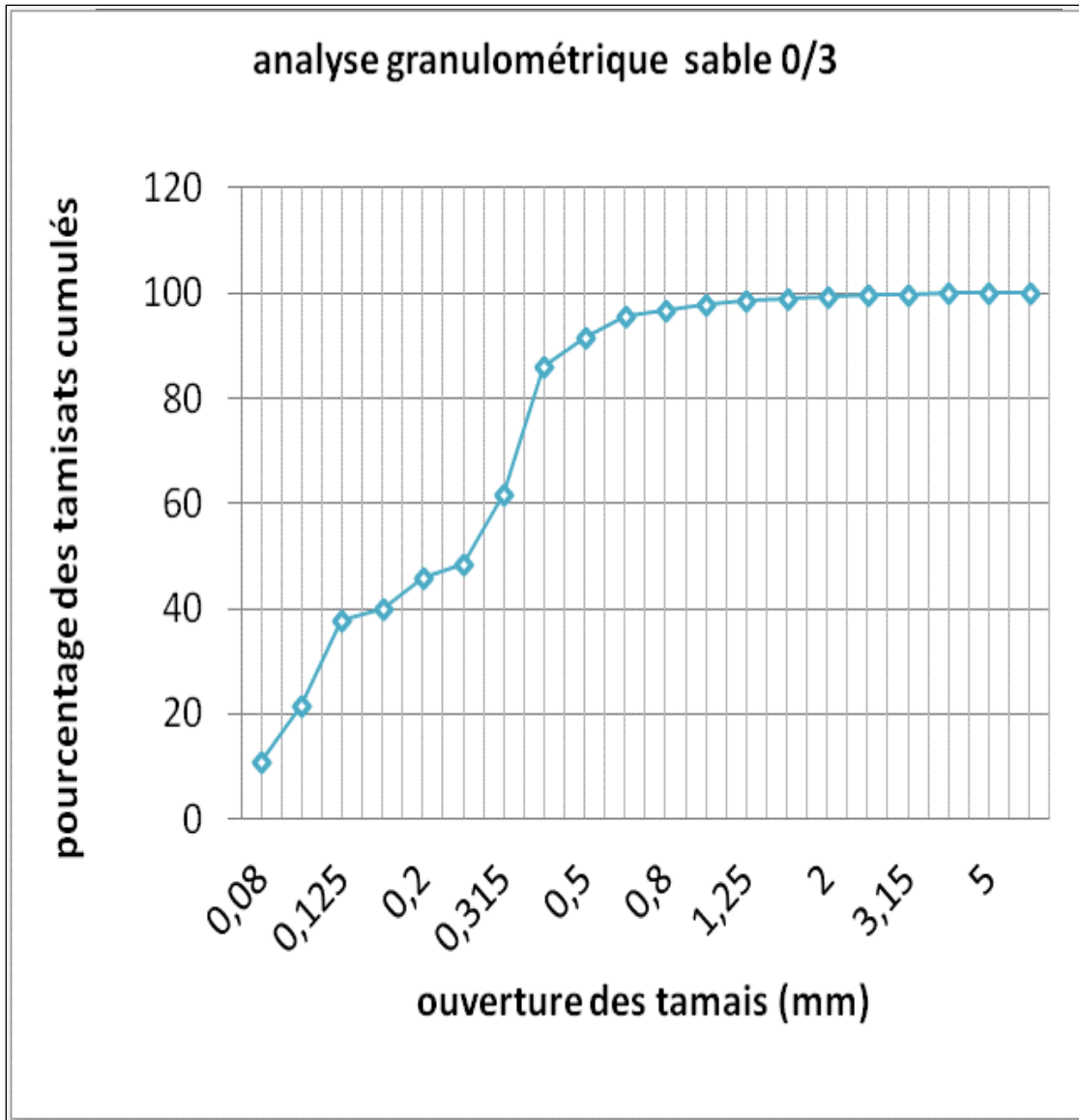


Figure III.7 : Courbes granulométriques de sable (classe 0/3,0/5)

- *Le module de finesse*

$$M_f = \frac{\sum \text{Pourcentage refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 4}{100}$$

- *Pourcentage des fines*

$$\% \text{ des fines} = \frac{\text{Masse des refus } M_i \text{ de tami } 0.063}{M_2 \text{ (la masse après le lavage et l'étuvage du sable)}} * 100$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau III.5

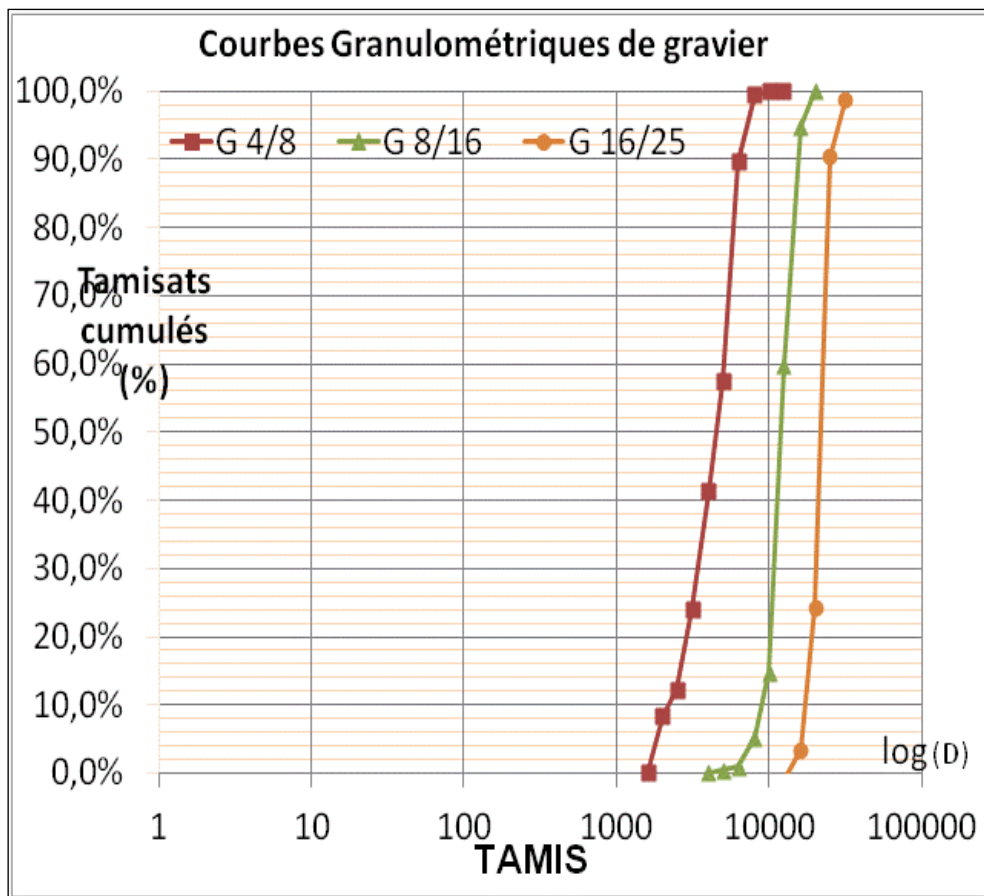


Figure III.8 : Courbes granulométriques des graviers (classe 3/8,8/16,16/25)

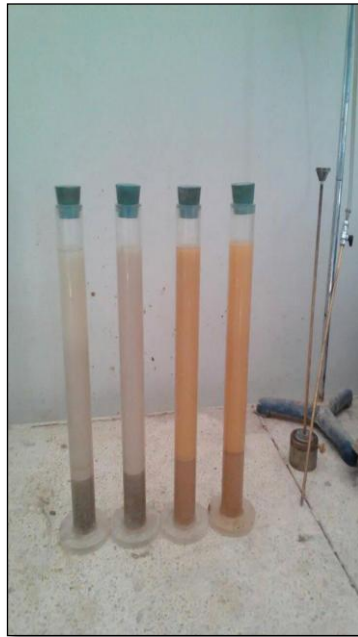
### III.3.3 Propreté des granulates

#### ➤ Equivalent de sable

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats.

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons pourra être complété par l'essai du bleu.

Pour chaque sable, nous avons réalisé trois essais d'équivalent de sable, Les résultats concernant ces essais sont récapitulés dans le tableau III.4.



**Figure III.9 :** Essai d'équivalent de sable

**Tableau III.4** Equivalent de sable

Echantillon	ESP
Sable fin 0/3	67,69
Sable 0/5	63,29

➤ **Essai de propreté des graviers**

Les graviers présentent une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés. Les résultats des essais sont résumés dans le tableau III.5.



**Figure III.10** : Essai propreté des graviers

### III.3.2 Masse volumiques des granulats

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains de ce corps.

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulats, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Les masses volumiques apparente et absolue du sable et des graviers (3/8, 8/16, 16/25) sont déterminées conformément aux normes en vigueur. Pour la détermination de la masse volumique absolue des granulates, nous avons utilisé deux méthodes sont :

#### ✓ Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible.



**Figure III.11** : Détermination de la masse volumique absolue (Méthode du l'éprouvette graduée)

**✓ Méthode du ballon**

Cette méthode de détermination des masses volumiques est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précaution.

Les granulats ont donnés des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m<sup>3</sup> et 1600 kg/m<sup>3</sup> et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m<sup>3</sup> et 2700 kg/m<sup>3</sup>. Pour chacune d'entre-elles nous avons réalisé trois essais, Les résultats concernant les essais de masse volumiques des granulats sont récapitulés dans le tableau III.5.



**Figure III.12 :** Détermination de la masse volumique absolue (Méthode du ballon)

**III.3.4 Essai Micro-Deval**

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval ( $M_{DE}$ ) qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient  $M_{DE}$  est faible, plus la résistance à l'usure des graviers sont élevée. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Micro-Deval ont été effectués conformément à la norme NA 457.



**Figure III.13** : L'essai de Micro-Deval

### III.3.5 Coefficient d'absorption des granulats

#### III.3.5.1 Graviers

L'absorption de l'eau par les granulats a été déterminée conformément à la norme NA 255.

Les graviers ont donnés des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme P18-541 ( $\leq 5\%$ ). Les coefficients d'absorption des différents graviers sont récapitulés dans le tableau III.5.



**Figure III.14** : La méthode utilisée pour déterminer le coefficient d'absorption de Gravier



### III.3.5.2 Sable

L'absorption de l'eau par le sable a été déterminée selon la norme NF P18-555, tout en humidifiant le sable par une petite quantité d'eau par la suite on la sèche à l'aide d'un séchoir et après avoir terminé on met le sable dans un cône afin de déterminer son affaissement. Les coefficients d'absorption des différents sables sont récapitulés dans le tableau III.5.



**Figure III.15 :** La détermination du coefficient d'absorption du sable

### III.3.6. La compacité des granulats

L'essai a pour but de mesurer la compacité d'une fraction granulaire de masse déterminée lorsqu'elle est soumise, dans un cylindre, à une sollicitation mécanique définie conventionnellement. Cette caractéristique est notamment utilisée comme paramètre d'entrée de formulation des mélanges granulaire.

Pour chacune d'entre-elles nous avons réalisé trois essais, Les résultats concernant les essais de compacité des granulats sont récapitulés dans le tableau III.5.



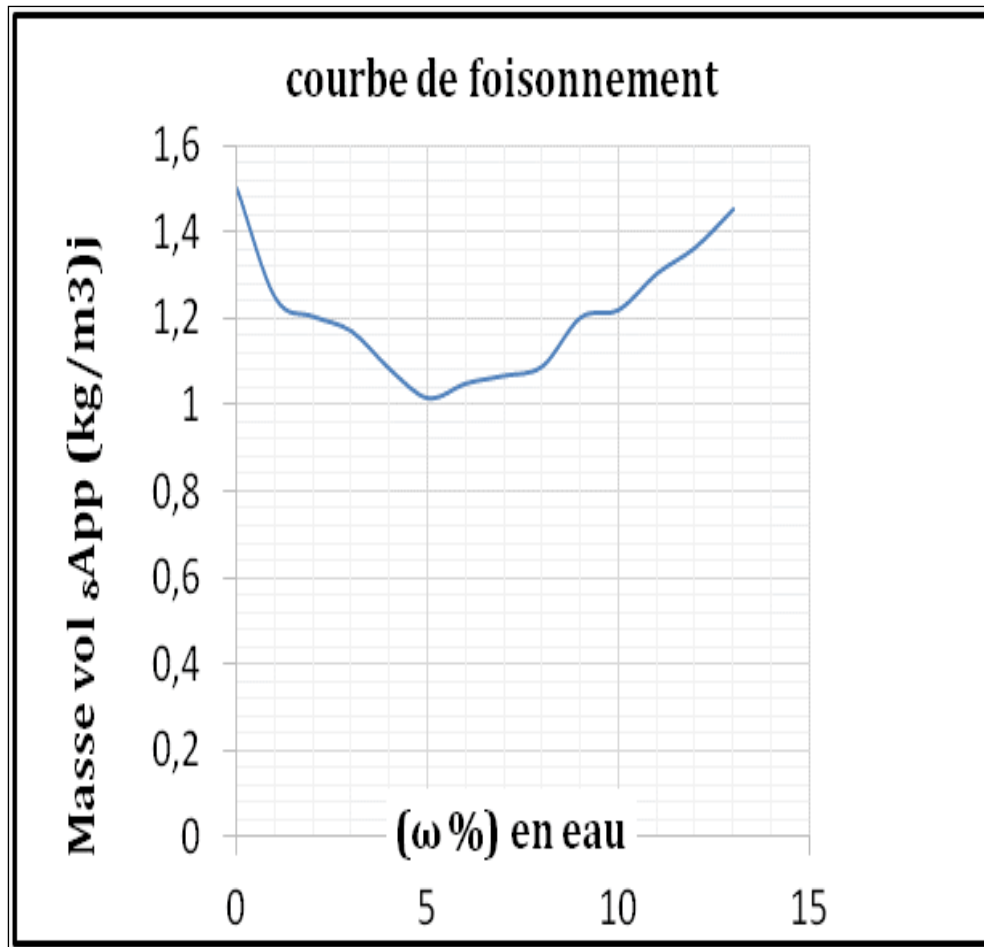
**Figure III.16 :** L'essai de compacité des granulats

### III.3.7 Foisonnement des sables

L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présent dans le sable et de la finesse de celui-ci. L'augmentation de volume d'un sable humide, par rapport au volume occupé par un sable saturé et sec en surface, croît en fonction de l'humidité du sable jusqu'à un taux de 5 à 8 % [Neville, 2000]. Sous l'effet d'une addition d'eau, les films fusionnent et l'eau se déplace vers les vides entre les grains entraînant une diminution du volume total du sable jusqu'à ce qu'il soit complètement saturé. Son volume devient approximativement le même que celui du sable sec (figure III.15).



**Figure III.17:** Essai de foisonnement.



**Figure III.17 :** L'essai de foisonnement de sable

Les résultats de tous les essais réalisés, sur les granulats concernant les caractéristiques géométriques, les caractéristiques physico-chimiques et les caractéristiques physiques et mécaniques sont récapitulés sur tableau III.5.

Tableau III.5 Caractéristiques du sable et gravier

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires				
	Sable 0/3	Sable 0/5	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Gravier 16/25
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1357	1456	1368	1344	1300
l'éprouvette graduée (kg/m <sup>3</sup> )	2751	2500	2647	2550	2666
$\rho_{abs}$ ballon (kg/m <sup>3</sup> )	2595	2609	2624	2500	2500
Equivalent de sable (%)	67,96	63,29	-	-	-
Foisonnement de sable (%)	Sable0/5: W= 5 lui correspond $\rho_{app} = 1015\text{Kg/m}^3$ Sable0/3: W= 6 lui correspond $\rho_{app} = 960\text{Kg/m}^3$				
Coefficient d'absorption (%)	1,2	1,3	0,4	1,2	1,2
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	-	1,2	0,6	0,2
Module de finesse	1,34	2,61	-	-	-
Teneur en fines(%)	10,3	13,3	-	-	-
compacité(%)	49,32	58,24	51,68	56,47	44,33

### III.4 Eau de gâchage

Pour la confection des différents bétons, nous avons utilisé l'eau distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen (Algérie). Les résultats de l'analyse chimique de cette eau ont été réalisés au laboratoire de l'Algérienne des eaux et sont présentés dans le tableau III.5. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211), (2003).

**Tableau III.6** Composition de l'eau de gâchage (mg/l).[Taleb2010]

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	PH	T(°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42,3	7,5	17,1

### III.5 Caractéristiques de fillers de calcaire

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>.

Une valeur minimale de l'indice d'activité. Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques µm à quelques dizaines de µm, déterminées en utilisant la granulométrie laser. [SAFI Brahim,2009]

Les fillers calcaires proviennent de la carrière de l'Entreprise Nationale Algérienne des Granulats (E.N.G). La roche est de nature calcaire dolomitique. Les compositions chimiques et les composants physiques des fillers calcaire sont regroupées dans les tableaux ci-dessous (III.7 et III.8).

**Tableau III.7** Propretés chimiques des fillers calcaires (Taleb2009)

Eléments	SiO <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	Anhydrite carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4.73	33.81	18.59	0.49	93.64	41.2	0.49	41.69
Max %	5.64	34.09	20.06	0.54	96.97	42.67	0.59	43.23
Moye %	5.18	33.95	19.32	0.51	95.30	41.93	0.59	42.46

**Tableau III.8** Caractéristiques physiques du fillers calcaires

Caractéristiques	Fillers calcaires
Mv apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1074
Mv absolue (pycnomètre) (kg/m <sup>3</sup> )	2500
Surface spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	4043,47
densité	2.72

### III.6 Caractéristiques de l'adjuvant

Le super plastifiant utilisé sont désigné sous l'appellation (**ORAFLOW THM 17200**), c'est un super plastifiant, haut réducteur d'eau destiné pour la confection des bétons de très haute qualité. Il est conçu à base de des poly carboxylates dit 3ème génération et il est compatible avec le ciment utilisé. Il est proviennent de la SARL Orachem Concrete (S.O.C), domiciliée à Boutelilis, dans la wilaya d'Oran.



**Figure III.18** : Super plastifiant utilisé pour le béton semi autoplaçant

Ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau III.9.

**Tableau III.9** Caractéristique de l'ORAFLOW THM 17200

Etat	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité à 20° C	1,06 ± 0,01 g/cm <sup>3</sup>
pH à 20°C	4,5 ± 6,5
Teneur en Na <sub>2</sub> O	< 1 %
Extrait sec	32 % ± 1%

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les différents matériaux utilisés dans cette étude. On peut conclure que nos matériaux répondent aux normes en vigueur.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la formulation des BSAP ainsi que les résultats de l'influence de la température de maturation sur le comportement mécanique de nos bétons.

*CHAPITRE IV :*  
*RÉSULTATS ET DISCUSSION*

## CHAPITRE IV :

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la formulation des bétons semi autoplaçants étudiés, ainsi que leurs caractérisations rhéologiques à l'état frais (Affaissement, l'essai de stabilité au tamis), et physico-mécanique à l'état durci (résistances mécaniques à la compression à 28 jours).

Dans le but d'étudier l'effet de la température de mûrissement sur la résistance des bétons à court terme et à long terme, trois températures ont été choisies : une température de  $35 \pm 2$  °C, une température de  $50 \pm 2$  °C, ainsi que la température ambiante.

#### IV.2 Formulation du béton semi-autoplaçant

Nous avons utilisé des constituants disponibles dans notre région. Nous avons entamés un travail de formulation en s'inspirant de la méthode Japonaise utilisé pour les bétons auto-plaçant, tout en apportant quelques modifications pour rendre le mélange moins couteux.

#### IV.3 Dosages massiques des constituants du BSAP

##### IV.3.1 Dosage des gravillons

Concernant la compacité totale  $\gamma$  nous avons considéré un mélange constitué de 1/3 de la classe granulaire 4/8 et 2/3 de la classe granulaire 8/16. Nous avons trouvé que la compacité de ce mélange est égale à 0,6.

Le dosage de gravier 4/8 plus 8/16 égal :  $V_T=300$  L

La masse du gravier est égale :  $M_g= 775,8$  Kg/m<sup>3</sup>

- Classe 4/8 = 258 kg/m<sup>3</sup>
- Classe 8/15 = 516,66 kg/m<sup>3</sup>



**IV.3.2 Dosage du sable**

Nous avons aussi préconisé un dosage volumique en sable de 40% par rapport au volume total du mortier donc :

$$V_{\text{sable}} = 280 \text{ L}$$

$$M_{\text{sable}} = 700 \text{ Kg/m}^3$$

**IV.3.3 Dosage du ciment**

Nous avons choisi de travailler avec un dosage de ciment égal  $350 \text{ kg/m}^3$ , ce qui représente un volume de 113 L.

**IV.3.4 Dosage en eau**

On a considéré un rapport :  $E/C = 0,55$

Nous avons aussi pris en considération l'absorption des différents granulats :

- Absorption du gravier = 3,87 litres.
- Absorption du sable = 9,81 litres.

**IV.3.5 Dosage des additions minérales (filler calcaire)**

Du mètre cube de béton, nous avons déduit le volume des additions qui doit être intégré dans le mélange, ce mélange est égale à 84,14 L qui équivaut à une masse de  $210 \text{ kg/m}^3$ .

Pour avoir les caractéristiques recherchées, il était nécessaire de réaliser plusieurs gâchés d'ajustement ont été réalisé, surtout avec la quantité importante des fines apportée par les additions.

La composition finale du béton de référence de cette étude est présentée dans le « **tableau IV.1** » :

Tableau IV.1 La composition finale du béton

Désignation	Dosage en Kg /m3 du béton						
	Sable	Gravier4/8	Gravier8/16	Ciment	Filler	Eau	Sp
BSAP	700	258	516,66	350	84,14	220	4,34

#### IV.4 Préparation des échantillons du béton semi-autoplaçant

Les bétons ont été confectionnés à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de 50 litres. Le cycle de malaxage que nous avons adopté est défini comme suit :

- Introduire simultanément les fractions du sable et de graviers en procédant à leur malaxage à sec pendant 1 minute.
- Ajouter le ciment (éventuellement l'addition minérale) en poursuivant le malaxage à sec durant 1 minute.
- introduire ensuite la première moitié de l'eau de gâchage mélangé avec de la moitié de la quantité du super plastifiant en continuant à malaxer pendant une minute.
- verser la deuxième moitié d'eau avec le reste du super plastifiant et continuer le malaxage pendant deux minutes supplémentaires. «Figure IV.1 »



**Figure IV.1 : Méthodologie de malaxage des bétons semi auto-plaçant**

La caractérisation rhéologique des BSAP et l'évaluation de la stabilité sont effectuées tout de suite après l'arrêt du malaxage.

### **IV.5 Caractéristiques des bétons semi auto-plaçant a l'état frais**

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais. C'est des propriétés qui permettent d'assurer une bonne mise en place du béton dans le coffrage. Les bétons étudiés ont été caractérisé par l'essai d'étalement tout en prenant le soin de mesurer le temps de passage de la galette à un diamètre de 400 mm pour avoir une idée sur la viscosité du mélange.

La résistance à la ségrégation d'un mélange est aussi un paramètre essentiel pour garantir son homogénéité. Ce paramètre est d'autant plus important dans le cadre de mélanges fluides qui pourraient avoir tendance à ségréger. Ce paramètre est lié à la granulométrie des particules et à la viscosité de la pâte.

#### **IV.5.1 Essai étalement**

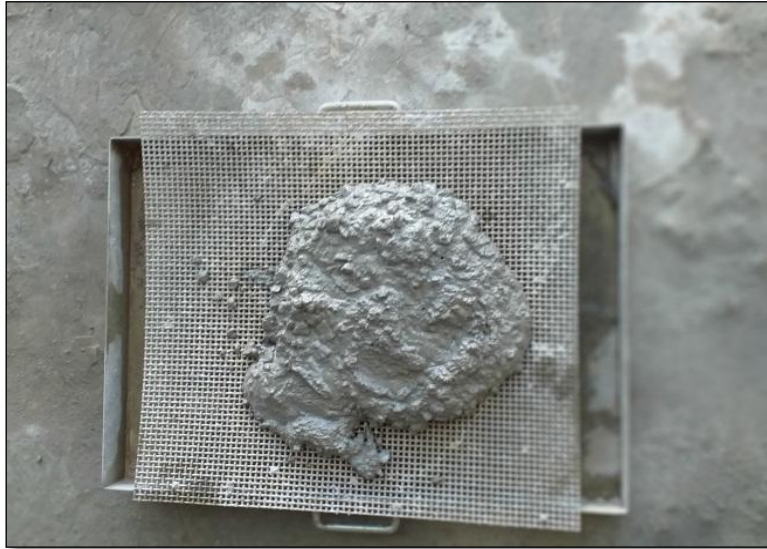
Pour l'essai d'étalement au cône d'Abrams, nous avons trouvé une valeur égale 530 mm «Figure IV.2». Le temps d'écoulement T400 du béton lors de cet essai qui est égale 8,3 s «Figure IV.2». Ces résultats répondent aux critères souhaitables selon la littérature.



**Figure IV.2 : Essai d'étalement**

#### IV.5.2 Essai de la stabilité au tamis

Pour l'essai de stabilité au tamis, le taux de ségrégation est de 2.4% largement inférieur au seuil de 5% fixé pour un béton semi auto-plaçant « Figure IV.3 ».



**Figure IV.3** : Essai de stabilité au tamis

**Tableau IV.2** : Caractéristiques du BSAP de référence

Essais de caractérisation	Unité	Résultats
Etallement au cône d'Abram	mm	530
T 400 mm	Sec	8,3
Stabilité au tamis	%	2,4

#### IV.6 Mode de cure

27 échantillons cylindriques de dimension 110 x 220 mm ont été confectionnés, et préparés pour être testés sous l'influence de la température.

- 12 éprouvettes mûrissent à une température de  $35 \pm 2$  °C. « Figure IV.4 »
- 12 éprouvettes mûrissent à une température de  $50 \pm 2$  °C. « Figure IV.4 »
- 3 éprouvettes mûrissent à une température de  $20 \pm 2$  °C à l'air.



**Figure IV.4 : Cure à l'étuve**

Ces éprouvettes ont été placées dans leurs conditions de maturation respectives, 24 heures après leurs confections.

En plus pour chaque température (35°C et 50°C) plusieurs modes de cure ont été préconisés. Ces modes sont représentés sur la figure IV.5

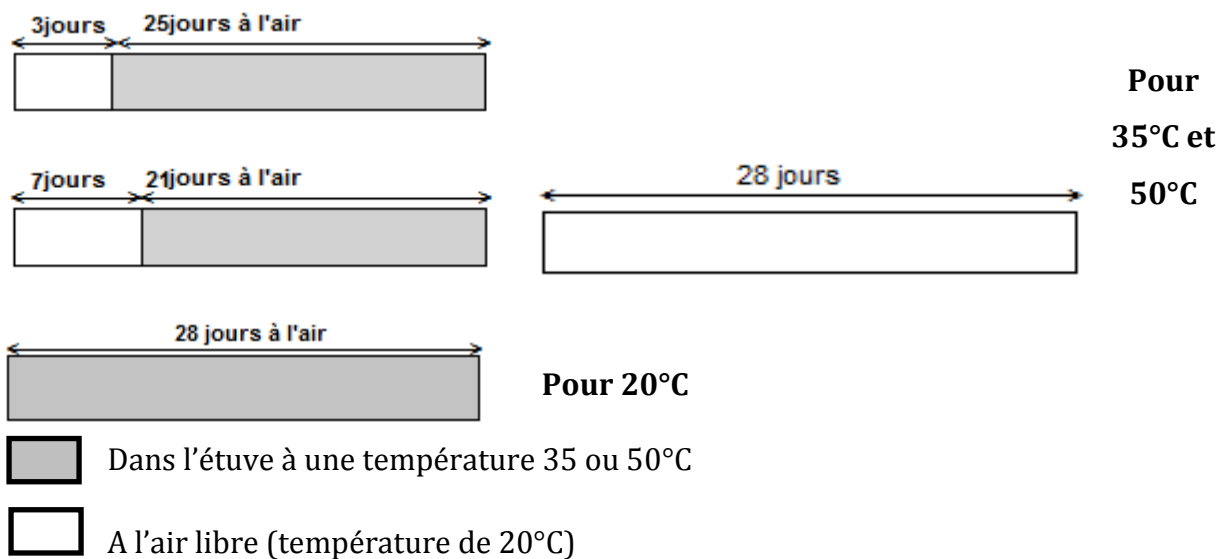


Figure IV.5 : Différents modes de cure

## IV.7 Caractéristiques des bétons semi auto-plaçant a l'état durci

### IV.7.1 Résistance à la compression des bétons

La résistance à la compression est la propriété la plus recherchée par l'ingénieur pour le dimensionnement et la conception des ouvrages.

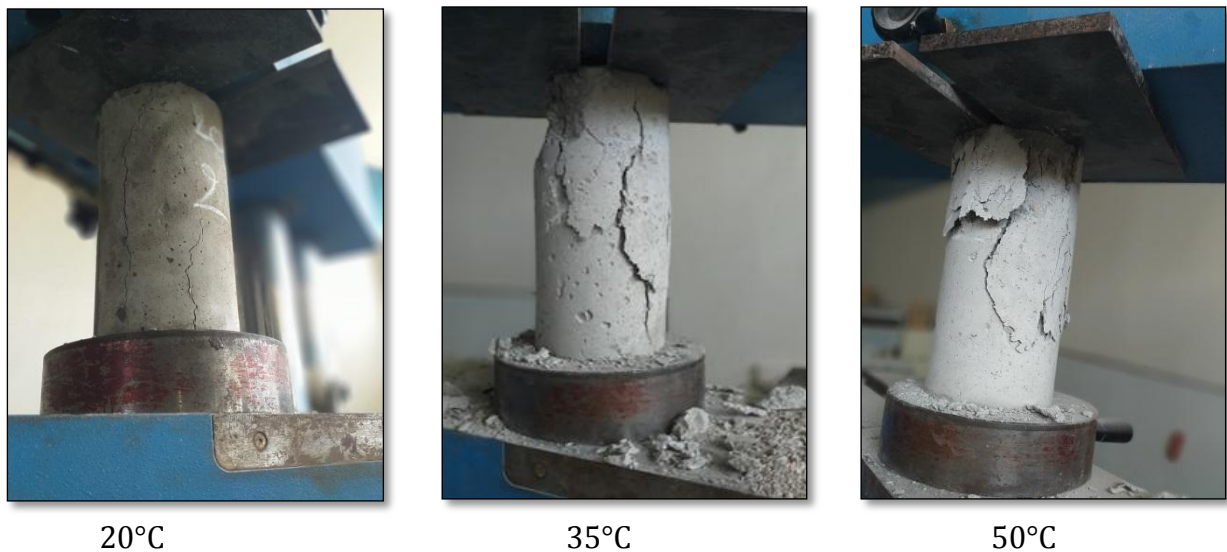


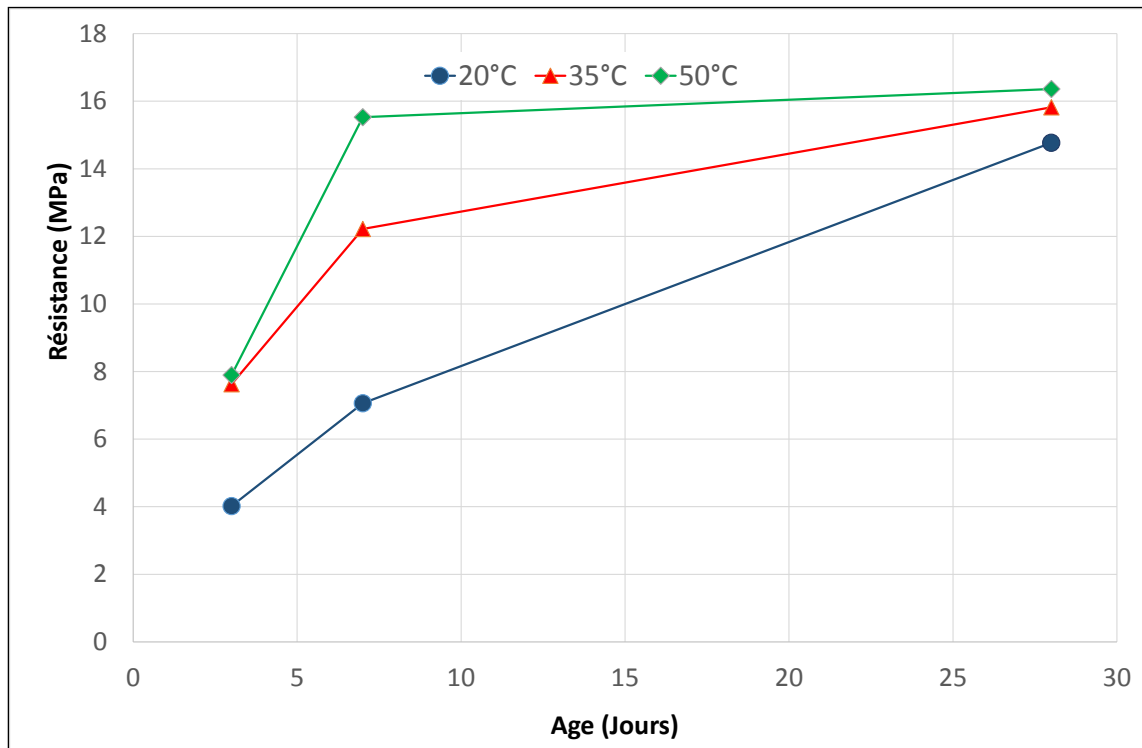
Figure IV.6 : Essai de compression

### IV.7.2 Effet de la température de mûrissement sur la résistance du BSAP

La résistance du béton de référence augmente timidement à 3 et 7 jours où elle n'atteint que 5,22 MPa. Nous avons remarqué qu'elle passe à 14,77 MPa à 28 jours «figure IV.7».

Toutefois, nous avons remarqué que la température joue un grand rôle dans l'accroissement de la résistance au cours des premiers jours de mûrissement.

A titre d'exemple, une augmentation de la température de 20°C à 35°C amène à une augmentation de 89% à 3 jours et de 73% à 7 jours, alors que l'augmentation de la température de 20°C à 50°C conduit à une élévation de la résistance de 96% à 3 jours et de 119% à 7 jours.



**Figure IV.7 :** Evolution de la résistance en fonction de l'âge du béton et de la température de murissement

Cependant, l'effet bénéfique de la température diminue au-delà de 7 jours, où nous avons constaté que la résistance mécanique du béton mûri à température ambiante semble rattraper celles des bétons mûris dans des températures plus élevées.

D'une manière générale, l'hydratation semble suivre deux phases qui deviennent distinctes en augmentant la température. Ces deux phases sont représentées par des droites à différentes pentes séparées par des points de brisures comme indiquées sur la figure IV.7.

Nous pouvons aussi constater que la résistance dans une température ambiante suit une progression presque linéaire qui peut être représenté par la relation suivant :

$$R = 0,4092(\text{Age}) + 3,433$$

R : résistance en MPa, Âge en jours

$R^2 = 0,98$  (Coefficient de détermination).

L'étude de la perte de masse dont les résultats sont donnés dans les tableaux (IV.3, IV.4 et IV.5) montre que la température a effet non négligeable sur la perte de masse

**Tableau IV.3** Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 3 jours

Jours	3 jours		
Température	20°C	35°C	50°C
Masse initiale 24H	4,796	4,770	4,804
La masse (Kg)	4,754	4,682	4,644
$\Delta M$	0,042	0,088	0,160
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2275,5	2241,2	2223,1

**Tableau IV.4** Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 7 jours

Jours	7 jours		
Température	20°C	35°C	50°C
Masse initiale 24H	4,742	4,782	4,728
La masse (Kg)	4,614	4,624	4,492
$\Delta M$	0,128	0,158	0,236
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2208,7	2213,4	2150,3



**Tableau IV.5** Influence de la température de mûrissement sur la masse des bétons à 28 jours

Jours	28 jours		
Température	20°C	35°C	50°C
Masse initiale 24H	4,690	4,714	4,712
La masse (Kg)	4,513	4,446	4,423
$\Delta M$	0,177	0,268	0,289
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2160,3	2128,2	2117,2

A lecture des résultats, nous pouvons constater que l'augmentation de la température de 20°C à 35°C double la perte de masse de l'éprouvette à 3 jours. Cette perte masse est quadruplé à la même échéance pour une température de 50°C.

D'une manière générale, nous constatons que la cadence de la perte de masse est presque stable durant la première semaine de maturation, ceci évidemment en fonction de la température.

Toutefois, la perte de masse a tendance à diminuer au-delà de 7 jours.

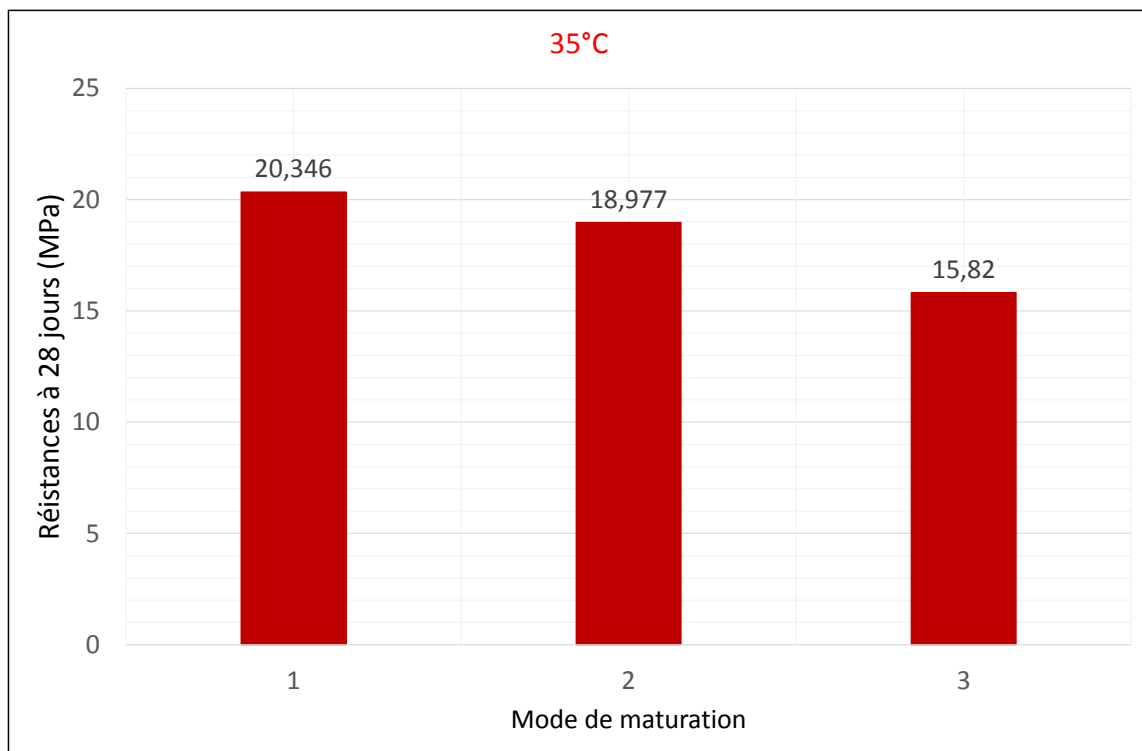
L'effet de la température sur la perte de masse peut être expliqué par deux phénomènes. Tout d'abord, l'hydratation qui est accélérée par les températures élevées et qui a tendance à consommer l'eau nécessaire pour cette réaction.

Le deuxième phénomène réside dans le départ d'eau par évaporation accélérée pour les températures de 35 et 50°C. D'ailleurs, il semble que c'est ce phénomène qui amène à une diminution de la vitesse croissance de la résistance pour les températures de 35°C et 50°C qui est illustrée par le changement de la pente des courbes de la figure IV.7 pour ces températures. Apparemment lorsque la

température s'élève, l'eau nécessaire pour la continuité de l'hydratation diminue au-delà de 7 jours, ce qui amène à freiner le processus d'hydratation en lui-même.

#### IV.7.3 Influence d'une maturation combinée sur l'évolution de la résistance :

Les résultats illustrés sur la figure IV.8 montre qu'une durée prolongée de maturation du béton à 35°C a tendance à faire chuter la résistance à 28 jours à cause des raisons citées précédemment.



**Figure IV.8 :** Evolution de la résistance en fonction du mode de maturation de murissement (T35-T20)

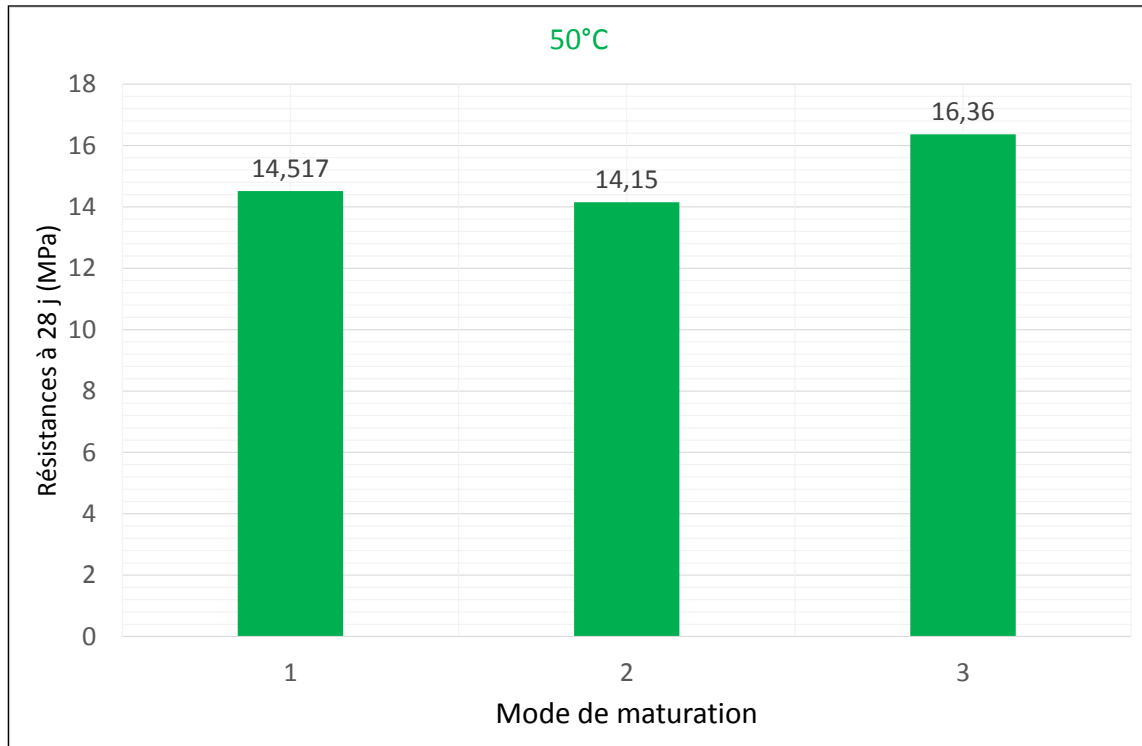
#### Modes de maturation :

(1) : 3 jours à 35°C + 25 jours à 20°C

(2) : 7 jours à 35°C + 21 jours à 20°C

(3) : 28 jours à 35°C

Les résultats des résistances des bétons maturés dans des combinaisons de température de 20°C et 50°C sont illustrés sur la figure IV.9. Ces résultats ressemblent presque à ceux retrouvés lors des maturations combinées entre 35° et 20°C. Toutefois, nous avons trouvé dans ce cas, que les éprouvettes maturées pendant 28 jours à 50°C ont les résistances les plus élevées même si les différences ne sont pas trop significatives.



**Figure IV.9 :** Evolution de la résistance en fonction du mode de maturation de murissement (T50-T20)

**Modes de maturation :**

**(1) : 3 jours à 50°C + 25 jours à 20°C**

**(2) : 7 jours à 50°C + 21 jours à 20°C**

**(3) : 28 jours à 50°C**

Pour confirmer nos conclusions de la partie précédente, nous avons aussi suivi la perte de masse pour les bétons soumis à ces modes de maturation. Les résultats sont regroupés dans le tableau IV.6.

Jours	28 jours			
Température	3j à 35°C + 25 j à 20°C	3j à 50°C + 25 j à 20°C	7j à 35°C + 21 j à 20°C	7j à 50°C + 21 j à 20°C
Masse initiale 24H	4,728	4,772	4,788	4,766
La masse (Kg)	4,610	4,612	4,546	4,542
$\Delta M$	0,118	0,160	0,242	0,224
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2206,7	2207,7	2176,1	2174,2

#### IV.8 Conclusion :

A l'issu des résultats trouvés, nous pouvons présenter quelques conclusions :

- La méthode japonaise peut être utilisée aussi pour la formulation des BSAP. Toutefois, des gâchés d'essai sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques recherchées des BSAP.
- La température à une influence significative sur l'augmentation des résistances à 3 et 7 jours. Cependant, cet effet a tendance à être réduit à 28 jours.
- Nos résultats ont clairement montré qu'une durée prolongée de maturation du béton à des températures de 35°C ou 50°C a tendance à faire diminuer la résistance à 28 jours à cause d'un départ anticipée de l'eau d'hydratation qui freine les réactions d'hydratation.

## *CONCLUSION GENERALE*

### CONCLUSION GENERALE

Le premier objectif de cette étude visait la formulation d'une nouvelle famille des bétons dits semi-autoplaçants (BSAP) qui ne nécessite qu'une légère vibration, et ceci dans le but de diminuer la quantité du liant dans le mélange et surtout de réduire les contraintes de formulation et de caractérisation souvent rencontrés dans les bétons autoplaçants.

Notre recherche s'est aussi axée autour de l'effet de la température de mûrissement sur le développement de la résistance mécanique entre 3 et 28 jours. Plusieurs modes de mûrissement à des températures qui peuvent atteindre 50°C ont été étudiés ; c'est-à-dire à des températures qui peuvent être atteintes que ce soit dans le nord ou le sud de notre pays.

Les principaux résultats tirés de ce travail à caractère expérimental montrent que :

- La méthode Japonaise peut être utilisée pour la formulation des BSAP. Toutefois cette méthode doit être modifiée car son utilisation peut induire à une quantité élevée d'additions minérales, ce qui induit à élever la quantité d'eau qui peut induire une diminution de la résistance mécanique.
- La caractérisation des BSAP est plus simple et ne se base que sur deux essais : de fluidité et de stabilité.
- La température joue un grand rôle dans l'accroissement de la résistance au cours des premiers jours de murissement, cet effet est diminué au-delà de la première semaine.
- L'hydratation semble suivre deux phases qui deviennent distinctes en augmentant la température. La première phase représente une croissance accélérée de la résistance alors que cette cadence est diminuée dans la deuxième phase.
- L'augmentation de la température de 20°C à 35°C double la perte de masse de l'éprouvette à 3 jours. Cette perte masse est quadruplé à la même échéance pour une température de 50°C.
- Une durée prolongée de maturation du béton à des températures élevées a tendance à faire diminuer la résistance à 28 jours à cause d'une réaction d'hydratation non équilibrée au cours de cette période.

### **PERSPECTIVES**

Il est intéressant de continuer les recherches sur cet axe notamment sur le développement de nouvelles approches pour la formulation des BSAP.

Il serait aussi intéressant de faire une comparaison sur l'influence de la température de mûrissement sur les différentes familles des bétons : BAP, BSAP, BHP, BO vu que leurs compositions sont complètement différentes.

Enfin, nous pensons qu'il serait aussi important d'étudier l'influence des basses températures sur le comportement mécaniques des bétons.

*REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*



### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ACC ,2004 :** Dosage et contrôle des mélanges de béton, Association canadienne du ciment, canada,.355p. EB101-07T.

**AFGC. 2002. AFGC.** Bétons fibrés à ultra – hautes performances – Recommandations provisoires. Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil. 2002 :152 .

**AFGC. 2003. AFGC.** Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. Documents Scintifiques et Techniques. 2003 :107 .

**ALEXANDRE LECLERC, (Octobre 2011)** «Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment», Sherbrooke (Quebec), Canada.

**ALONSO., ANDRADE C., CASTELLOTE M., KHOURY G.A. (2003):** Microstructure-solid phases, course on effect of heat on concrete, International centre for mechanical sciences (CISM), Udine,Italy, 9-13 june.

**AMRANI & KORTI, (2018)** «Amélioration de la qualité des BPE à jeune âge», Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.

**ANTOINE CHARBEL, (Juillet 2008)** «effet couple de la formulation et du murissement sur les caractéristiques du béton autoplaçant a haute performance dans les conditions estivales», Sherbrooke (Quebec), Canada.

**A. NOUMOWE (1995) :** Effet des hautes performances sur le béton - cas particulier des BHP. In Thèse de doctorat, INSA Lyon.

**BERRABAH, ABDELBAKI (2016) :** l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant le sable de dune broyé : Effet de la température à l'état mécanique chapitre 2 pg3.

**BENKHADDA.B (2006) :** traitement naturel des mortiers et bétons destines aux structures en béton préfabriqué : la cure p. 24-27.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

---

**BOUKLI HACENE S.M.A., (2010)** «Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2010.

**BYFORS J (1980)** : plain concrete at early ages,swedish cement and concrete research institute, CBI research 3:80 Stockholm.

**CELBI HAMIDAT, BENMANSOUR NACEREDDINE. (2000)**« Recyclage des Coquilles de mer dans les bétons autoplaçants en tant qu'ajout cimentaire et granulats fin

**CHANVILLARD G., d'ALOIA L. (1994)** ; Préviation de la résistance en compression au jeune â béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51.ge du

**CHANVILLAR G. (1999)**; Connaissances générales sur le matériau béton, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Lyon, 169 p.

**CRISTIAN DANIEL SOTOMAYOR CRUZ, (Mai 2012)** «Développement des bétons semi autoplaçants à rhéologie adaptée pour des infrastructures», Sherbrooke (Quebec), Canada.

**DE LARRARD ET AL, (1994)**, " Mix design of self compacting concrete ", RILEM International Conference on production methods and workability of concrete, pp.439-451, Glasgow, 3-5 juin (1996)

**E. GALLUCCI, XINYU ZHANG., K.SCRIVENER (2006)** : influence de la température sur le développement microstructural des bétons.

**G. PLATRET (2002)** : Suivi de l'hydratation du ciment et de l'évolution des phases solides dans les b\_etons par analyse thermique, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire. In Méthode d'essai N\_58, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

**HANAA. F (2009)** : Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons auto-plaçants exposés à une température élevée : Analyse thermique, p.30.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

---

**HAYAKAWA, NAGATAKI (1995)** "Application of Superworkable Concrete in the Construction of 70-Story Building in Japan ", ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995.

**H. SAMYA (2015)** : Etude du comportement du béton soumis à haute température influence du type de béton et de la nature des constituants : Evolution de quantités de phase d'une pâte de ciment durcie au cours de l'échauffement, p.18.

**I. GAWESKA HAGER (2004)** : Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris/Marne la Vallée et Ecole polytechnique de Cracovie.

**J. FRANCIS YOUNG (2004)**: effect of temperature on the hydration of cement paste: composition, microstructure and properties.

**K. TAN ET O.E. GJORV (1996)**: Performance of concrete under different curing conditions. Cement and Concrete Research, 26(3): p.355-361.

**L. ALARCON-RUIZ, G. PLATRET, E. MASSIEU, AND A. EHRLACHER (2005)** : The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete Research, Vol. 35 :609-613 .

**LECLERC, 2010** Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment. Mémoire de maîtrise, Faculté de Génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 155p.

**L. MISSEMER (2012)** : Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances : application au BCV

**MIURA ET COLL., (1994)** Application of Super Workable Concrete to Reinforced Concrete Structures with Difficult Construction Conditions, ACI. SP 140, p. 163-186.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

---

**M. CASTELLOTE, C. ALONSO, C. ANDRADE, X. TURILLAS, AND J. CAMPO (2004):** Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34(9):1633-1644.

**NEVILLE A-M (2000) :** «Propriétés des bétons», Paris, Editions Eyrolles, p. 345-350.

**NF EN 206-1 (avril 2004) Béton - Partie 1 :** spécification, performances, production et conformité + Amendement A1 (avril 2005) + Amendement A2 (octobre 2005) (Indice de classement : P18-325-1).

**NF EN 1008 IDC P 18-211.,(2003) «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 le béton»,** 2003.

**NORMES ALGERIENNES (1992);** édition et diffusion Abou Hamou Moussa, Alger.

**OH ET AL, (1999) “Self-compacting high performance concrete”,** Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, pp.2381-2388, (1995)

**PETERSON (1996).** Mix design of self-compacting concrete, Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley (1996)

**SAFI BRAHIM, (2009) «Formulation et Caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaire et mortiers autoplaçants»**

**S.L. MAK ET K. TORI I (1995):** Strength development of high strength concretes with and without silica fume under the influence of high hydration temperatures. *Cement and Concrete Research*, 25(8): p.1791-1802.

**TAKLA.I (2010) :** comportement thermo-hydro-mécanique d'un ciment pétrolier sous l'effet de CO<sub>2</sub> : effet de la température d'hydratation sur la pâte de ciment p 27.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

---

**TALEB Omar, (2009)** « Optimisation De La Formation Des Bétons Auto-Plaçants à Base De Matériaux Locaux » Mémoire de Magister, Université de Tlemcen Algérie.

**TANGTERMSIRIKUL ET AL, (1995)** « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril (1995)

**TAYLOR (1976)** : « hydraulic ciment pastes : their structure and properties » ciment and concrete association slough, england 1976 p.p.14-19.

**U. SCHNEIDER, U. DIEDERICHS, AND C. EHM (1987)**: Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS. Nuclear Engineering and Design, 67 :245-258.

**VERBECK G.J., HELMUTH R.A. (1968)** ; Structures and physical properties of cement paste, Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of cement, Tokyo, Vol. 3, pp. 1-32.

**Z.P. BAŽANT AND M.F. KAPLAN (1996)**: Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models. Longman, longman groupe limited edition.