



Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté au

Département : des Sciences Technologiques
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Géotechnique & Matériaux

Réalisé par

Yacine LABIAD & Nasreddine SBAI

**Pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE**

Intitulé

***L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie
solaire sur la résistance en compression des bétons
contenant des fillers calcaires***

Soutenu le : 01/06/2016
Devant le jury de soutenance composé de :

Mr. Taha-Hocine DOUARA	MAA	Univ. Djelfa	Président
Dr. Salim GUETTALA	MCA	Univ. Djelfa	Encadreur
Mr. Fodil DIF	MAA	Univ. Djelfa	Examineur

REMERCIEMENTS

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire. Tout d'abord, nous adressons nos profondes gratitudees à Monsieur **Dr. Salim GUETTALA**, nous le remercions pour sa constante disponibilité, pour son écoute, pour sa grande qualité pédagogique et humaine.

Nous tenons également à remercier Monsieur le Recteur de l'université ainsi que le Doyen de la faculté.

Nous exprimons nos profondes gratitudees au Chef de département pour ses encouragements et son assistance qu'il nous a cessé de nous prodiguer.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Monsieur le Président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, nous tenons à lui exprimer nos profondes reconnaissances.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux Membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être membre de jury et de bien vouloir juger ce travail.

Enfin, nous remercions très chaleureusement nos Parents, nos Sœurs, nos Frères, nos Collègues et tous ceux qui nous ont aidé à finaliser ce travail.

RÉSUMÉ

Un programme expérimental a été réalisé pour étudier l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires (FC). Nous avons fixé le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés afin de mener une étude rationnelle. En premier lieu nous avons commencé par évaluer l'influence de l'addition du FC au ciment, sur la résistance à la compression avec l'âge des bétons en fonction de la teneur du ciment en FC. Par la suite, nous avons étudié l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des FC.

L'introduction de l'addition du FC dans la production cimentaire permet, en plus du gain écologique et économique, une amélioration de la résistance à la compression des bétons. Cette amélioration résulte essentiellement de trois effets: un effet physique, un effet physico-chimique et un effet chimique. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire. Les résultats ont démontré que jusqu'à 20% FC pour remplacer le ciment peut être utilisé avec une finesse de 5000 cm²/g sans affecter négativement la résistance à la compression du béton, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire améliore la résistance à la compression des bétons par rapport au durcissement à l'eau, pendant les sept premiers jours de durcissement. Concernant l'influence du FC sous l'étuvage à 35°C, on peut observer qu'au bout de 7 jours, la résistance en compression des bétons (B10 et B20) est supérieure à celle du béton de référence (BO).

Un gain de temps pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'eau après étuvage d'un jour prolongé de 3 jours de durcissement à l'eau pour les bétons (B10 et B20); et prolongé de 7 jours de durcissement à l'eau pour le béton (BO). Pour les bétons (B10 et B20) : 1 jour d'étuvage à 35°C et 7 jours de durcissement à l'eau, la résistance acquise est plus élevée que celle obtenue à partir d'un durcissement dans l'eau à 28 jours. A partir des résultats obtenus on a confirmé la participation de l'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire à l'amélioration de la résistance à la compression des bétons contenant des FC.

Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la technique de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire pour permet un décoffrage rapide à court terme se traduisant par un gain accéléré de résistance en compression et une grande économie d'énergie électrique, accélère les réactions d'hydratation du ciment (une hydratation initiale rapide), l'accélération des cadences par réduction du temps de prise, donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée surtout dans les usines de préfabrication, ainsi que le bétonnage par temps froid.

Mots clés : Béton, Durcissement à la vapeur initiale, L'énergie solaire, Fillers calcaires, Résistance à la compression.

ABSTRACT

An experimental program was conducted to studying the effect hardening the initial steam by solar energy on the compressive strength of concrete containing the limestone fillers (LF). We set the same criterion of workability to all concretes made order to lead a rational study. In the first instance we started with evaluate the influence of the addition of LF at the cement on the compressive strength of concretes with age a function of the content of cement the LF. Thereafter, we studied the hardening effect the initial steam by solar energy on the compressive strength of concretes containing the LF.

The introduction of the addition of the LF in the cement production enables, in addition to the ecological and economic gain, an improvement in the compressive strength of concretes. This improvement results primarily from three effects: a physical effect, a physical-chemical effect and a chemical effect. These effects act simultaneously and in a complementary manner. The results proved that up to 20% LF to replace cement could be used with a fineness of 5000 cm²/g without affecting adversely the compressive strength, with an optimum effect for a percentage of the order of 10%.

The results obtained show that the use of hardening the initial steam by the solar energy improves the compressive strength of concretes compared with the curing with water, during the first seven days of hardening. Concerning the influence of the LF under steam curing at 35°C, it can be observed that after 7 days, the compressive strength of concretes (C10 and C20) is superior than the reference concrete (CO).

Saves time to reach the compressive strength at 28 days at water after steam curing for a day prolonged than 3 days of curing in water for concretes (C10 and C20); and prolonged by 7 days at the curing in water for concrete (CO). For concretes (C10 and C20): 1 day steam curing at 35°C and 7 days at the curing in water, the acquired resistance is higher than that obtained from curing in water at 28 days. Based on the results obtained it was confirmed the contribution of the steam curing at the initial steam by solar energy to improve the compressive strength of concretes containing the LF.

These results well justify interest that present the hardening technique to the initial steam by the solar energy for allows rapid formwork removal a short-term resulting in an accelerated gain of compression strength and a great economy of electrical energy, accelerating the cement hydration reactions (a rapid initial hydration), acceleration cadences by reducing the setting time, so a faster progress of chantiers and accelerated rotation especially in precast plants, as well as cold weather concreting.

Keywords: *Concrete ; Hardening the initial steam ; Solar energy ; Limestone fillers; Compressive strength.*

ملخص

م إجراء برنامج تجريبي لدراسة تأثير التصلب بالبخر الأولي باستخدام الطاقة الشمسية على قوة الانضغاط للخرسانة التي تحتوي على النواع الكلسية. وضعنا نفس معيار السيولة لكافة الخرسانة المنجزة وهذا من أجل دراسة عقلانية. أولاً علينا دراسة وتقييم تأثير إضافة النواع الكلسية إلى الأسمنت على قوة الانضغاط مع العمر للخرسانة بدلالة محتوى الأسمنت من النواع الكلسية. و بعد ذلك، قمنا بدراسة تأثير التصلب بالبخر الأولي باستخدام الطاقة الشمسية على قوة الانضغاط للخرسانة التي تحتوي على النواع الكلسية.

إدخال إضافة النواع الكلسية في إنتاج الأسمنت تمكن، بالإضافة إلى المكسب البيئي والاقتصادي، تحسين قوة الانضغاط للخرسانة. ويرجع هذا التحسن أساساً إلى ثلاثة آثار: تأثير فيزيائي، تأثير فيزيوكيميائي و تأثير كيميائي. هذه الآثار تؤثر في وقت واحد و بطريقة متكاملة. النتائج أثبتت أنه حتى نسبة 20٪ من النواع الكلسية ليحل محل الأسمنت يمكن استخدامها بنعومة 5000 سم²/غ دون أن يؤثر ذلك سلباً على مقاومة الانضغاط، مع وجود تأثير امثل من أجل النسبة المتوية 10 ٪.

تبين النتائج أن استخدام التصلب بالبخر الأولي باستخدام الطاقة الشمسية تحسن قوة الانضغاط للخرسانة مقارنة بالتصلب في الماء، خلال الأيام السبعة الأولى من التصلب. وفيما يتعلق بتأثير النواع الكلسية مع التصلب بالبخر الأولي عند 35 درجة مئوية، يمكن أن نلاحظ أنه بعد 7 أيام، قوة الانضغاط للخرسانة (B10 و B20) أكبر من الخرسانة المرجعية (BO).

ربح في الوقت للحصول على قوة الانضغاط عند 28 يوماً في الماء بعد التصلب بالبخر الأولي ليوم واحد ممدد ب 3 أيام تصلب في الماء للخرسانة (B10 و B20) ؛ ومدد ب 7 أيام تصلب في الماء للخرسانة (BO). الخرسانة (B10 و B20) : يوم واحد من التصلب بالبخر الأولي عند 35 درجة مئوية ومدد ب 7 أيام تصلب في الماء، قوة الانضغاط المكتسبة هي أعلى من تلك التي نحصل عليها باستخدام التصلب في الماء عند 28 يوماً. حسب النتائج المتحصل عليها تم التأكيد على مساهمة التصلب بالبخر الأولي باستخدام الطاقة الشمسية لتحسين قوة الانضغاط للخرسانة التي تحتوي على النواع الكلسية.

هذه النتائج تبرر الفائدة من استخدام تقنية التصلب بالبخر الأولي باستخدام الطاقة الشمسية التي تسمح بالتجريد السريع للخرسانة في مدة قصيرة مما يؤدي إلى زيادة سريع لقوة الانضغاط و اقتصاد كبير للطاقة الكهربائية، وتسريع تفاعلات الإماهة للأسمنت (إماهة أولية سريعة)، تسريع الإيقاعات عن طريق التقليل من زمن الشد، يعني تقدم أسرع للورشات و دوران متسارع خاصة في مصانع إنتاج الخرسانة مسبقة الصنع وكذلك استخدام الخرسانة في الطقس البارد.

كلمات المفاتيح: الخرسانة ، التصلب بالبخر الأولي ، الطاقة الشمسية ، النواع الكلسية ، قوة الانضغاط.

TABLE DES MATIERES

<i>Sommaire</i>	<i>N° de page</i>
TABLE DES MATIERES	1
LISTE DES FIGURES & TABLEAUX	4
INTRODUCTION GÉNÉRALE	6
1. Contexte	6
2. Objectifs visés	7
3. Méthodologie de travail	8
PREMIERE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I : LES BETONS ORDINAIRES & LEURS CONSTITUANTS	9
I.1. INTRODUCTION	9
I.2. HISTORIQUE	9
I.3. CONSTITUANTS DES BÉTONS ORDINAIRES	10
I.3.1. Ciment	10
I.3.1.1. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland	11
I.3.1.1.1. Finesse	11
I.3.1.1.2. Composition chimique et minéralogique	12
I.3.1.1.2.1. Clinker	12
I.3.1.1.2.2. Gypse	12
I.3.2. Squelette granulaire	12
I.3.3. Eau	13
I.4. HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE	13
I.4.1. Hydratation	13
I.4.1.1. Définition	13
I.4.1.2. Degré d'hydratation	14
I.4.1.3. Aspects cinétiques et prise	14
I.4.1.3.1. Hydratation des silicates C_3S et βC_2S	14
I.4.1.3.2. Hydratation des aluminates C_3A et C_4AF	15
I.4.2. Microstructure des matériaux cimentaires	15
I.4.2.1. Composition du ciment hydraté	15
I.4.2.2. Composition des hydrates	16
I.5. FABRICATION	16
I.5.1. Composition	16
I.5.2. Malaxage	16
I.5.3. Traitement de cure	16
I.6. ADDITIONS CIMENTAIRES	17
I.6.1. Définition	17
I.6.2. Classification des additions	17
I.6.3. Action des additions cimentaires	18
I.6.4. Comportement du ciment avec addition	19
I.6.5. Enjeux environnementaux	19
I.6.6. Bénéfices de l'utilisation des additions	20
I.6.6.1. Bénéfices techniques	20
I.6.6.2. Bénéfices économiques	20
I.6.6.3. Bénéfices écologiques et environnementaux	20
I.7. LES FILLERS	21
I.7.1. Définition	21
I.7.2. Effets	21

I.7.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes	22
I.7.4. Influence du filler sur l'état durci	22
CONCLUSION	25
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
CHAPITRE II : ÉTAT DE L'ART	29
II.1. INTRODUCTION	29
II.2. ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON FRAIS	29
II.2.1. Intérêt d'un traitement thermique par la vapeur d'eau	29
II.2.2. Influence des méthodes de durcissement sur les propriétés mécaniques du béton durci	30
II.2.2.1. Durcissement à l'air	30
II.2.2.2. Durcissement à l'eau	30
II.2.2.3. Durcissement à la vapeur	30
II.3. TRAITEMENT THERMIQUE	31
II.3.1. Les différents types du traitement thermique	31
II.3.1.1. Traitement thermique passif ou « auto étuvage »	31
II.3.1.2. Traitement thermique actif	33
II.3.1.2.1. Chauffage du béton avant sa mise en place ou « préchauffage »	33
II.3.1.2.2. Chauffage du béton après sa mise en place	34
II.3.2. Les techniques du traitement thermiques	34
II.3.2.1. Le traitement thermique par l'électricité	34
II.3.2.2. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale) :	35
II.3.2.3. Le traitement thermique par la vapeur d'eau «étuvage»:	36
II.4. L'ETUVAGE DES BETONS	37
II.4.1. Effet bénéfique de l'étuvage sur les résistances en compression au jeune âge	40
II.4.2. Effet néfaste de l'étuvage sur les résistances en compression à long terme	40
CONCLUSION	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	42
DEUXIEME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	
CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX	44
III.1. INTRODUCTION	44
III.2. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX	44
III.2.1. FINES CALCAIRES	44
III.2.2. CIMENT	45
III.2.3. EAU	46
III.2.4. SABLE	47
III.2.4.1. Propriétés physiques	47
III.2.5. PIERRE CONCASSÉE	47
III.2.5.1. Propriétés physiques	48
CONCLUSION	49
CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX & INTERPRETATION	50
IV.1. INTRODUCTION	50
IV.2. FORMULATION DE BÉTON	50
IV.2.1. Données de base	50
IV.2.2. Méthode de calcul	51

IV.2.3. Composition	51
IV.3. CONSISTANCE DU BETON A L'ETAT FRAIS	52
IV.4. RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DES BÉTONS	52
IV.4.1. Influence du filler calcaire en fonction du temps et de leurs teneurs	53
IV.4.2. L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire	55
CONCLUSION	61
CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES	63
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
ANNEXE	66

LISTE DES FIGURES

<i>N° et titre de la figure</i>	<i>N° de page</i>
Figure I.1. <i>Illustration de l'effet filler</i>	22
Figure I.2. <i>évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%) [47].</i>	24
Figure I.3. <i>Evolution de résistance en fonction de temps pour les deux squelettes granulaire [54].</i>	25
Figure II.1. <i>Le calorimètre de Langavant</i>	32
Figure II.2. <i>schéma du calorimètre de Langavant</i>	32
Figure II.3. <i>Une benne chauffant</i>	33
Figure II.4. <i>Préchauffage du béton par chauffage des granulats</i>	33
Figure II.5. <i>Préchauffage du béton par injection de vapeur dans le malaxeur</i>	33
Figure II.6. <i>Coffrage chauffant</i>	34
Figure II.7. <i>Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude</i>	35
Figure II.8. <i>Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur d'eau perdue</i>	36
Figure II.9. <i>Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique [20]</i>	37
Figure II.10. <i>Résistance d'un béton traité à la vapeur à différentes températures (E/C = 0.55) [23]</i>	39
Figure III.1. <i>Filler calcaire utilisé</i>	44
Figure III.2. <i>Diffractogramme X des fillers calcaires</i>	45
Figure III.3. <i>Ciment utilisé</i>	46
Figure III.4. <i>Courbe granulométrique du sable et gravier</i>	48
Figure IV.1. <i>Résistance à la compression des bétons en fonction du temps</i>	53
Figure IV.2. <i>Résistance à la compression des bétons en fonction de la teneur du ciment en FC</i>	53
Figure IV.3. <i>Enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires</i>	56
Figure IV.4. <i>Cycle d'étuvage (3×8×3)</i>	56
Figure IV.5. <i>L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur le développement de la résistance à la compression des bétons</i>	57
Figure IV.6. <i>Variation de la résistance à la compression des bétons en (%) par rapport au béton de référence en fonction de la teneur du ciment en FC</i>	57
Figure IV.7. <i>Résistance à la compression des bétons (durcissement à l'eau de 3 et 7 jours après étuvage d'un jour à 35°C)</i>	59
Figure IV.8. <i>Variation de la résistance à la compression des bétons en (%) par rapport au béton de référence (durcissement à l'eau de 3 et 7 jours après étuvage d'un jour à 35°C)</i>	59

LISTE DES TABLEAUX

<i>N° et titre de tableau</i>	<i>N° de page</i>
Tableau I.1 <i>Classification des additions selon leur réactivité</i>	17
Tableau III.1. <i>Composition chimique du filler calcaire utilisé en (%)</i>	44
Tableau III.2. <i>Propriétés physiques des fines calcaires</i>	44
Tableau III.3. <i>Caractéristiques du ciment CPA-CEM I 42,5</i>	47
Tableau III.4. <i>Analyse granulométrique du sable</i>	47
Tableau III.5. <i>Analyse granulométrique du gravier</i>	47
Tableau IV.1. <i>Compositions des bétons en (kg/m³)</i>	52

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction pour les avantages économiques et la facilité de mise en œuvre qu'il présente. Il répond parfaitement aux critères de résistances mécaniques et de durabilité, mais la lenteur avec laquelle il acquiert ses résistances mécaniques reste l'un des inconvénients principaux d'où il vient la nécessité d'avoir une technique qui assure le durcissement rapide du béton (mortier) et pièces confectionnées à leur base [1,2]. A cet effet plusieurs solutions sont aujourd'hui employées pour atteindre des résistances élevées au jeune âge [3].

Certains projets doivent être réalisés dans une courte durée de temps. Le taux de production d'éléments en béton joue un rôle important. Par conséquent, le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très nécessaire pour obtenir une résistance initiale considérable de sorte que les moules peuvent être utilisées pour une autre coulée. Au cours des dernières années, la sensibilité du public et la politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergie renouvelables (l'énergie solaire). L'énergie solaire peut être utilisée efficacement dans les régions où le rayonnement solaire est très important, soit en intensité ou sur une longue période annuelle. Parmi ces utilisations, le traitement thermique de produits tels que des éléments préfabriqués. L'Algérie est une région de forte radiation solaire avec plus de 220 jours équivalents de soleil qui brille dans l'année.

La fabrication du béton consomme une quantité considérable d'*énergie*, engendre l'émission d'une quantité importante de gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique de notre planète. Cependant pour parvenir et s'inscrire dans le contexte d'une politique de « *développement durable* », le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences, satisfaire des besoins socioéconomiques réels avec le moins d'impact possible sur l'environnement, afin de ne pas compromettre les générations futures, Protocole de Kyoto de 1997, qui préconise d'adopter des décisions prudentes pour réduire le risque de futurs changements climatiques.

D'autre part, la société et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation d'énergie lors de la fabrication du ciment Portland. Les ciments avec additifs permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton de meilleures propriétés, qui peut être réalisé en utilisant des

fillers calcaires. L'industrie des granulats issus de concassage génère des quantités importantes de déchets plus au moins fins, Ces fines constituent bien souvent un problème pour l'environnement. C'est pourquoi nous nous sommes penchées sur la valorisation de ces fines. Ceci intéresse non seulement l'économie mais aussi la préservation de l'environnement.

Les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploités. Le remplacement d'une partie du ciment par les fillers calcaires en provenance des sables de concassage peut améliorer de manière sensible les propriétés mécaniques des bétons en raison des effets physiques et activités chimiques des fillers en provenance de sables concassés. Cette amélioration mènera à la valorisation des sables concassés et la préservation de l'environnement par une optimisation de l'utilisation des carrières.

La présence des additions calcaires provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment et favorise les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, d'autant plus que les particules sont fines [4]. D'après *Cyr et al.*[5], Ont noté que l'addition calcaire n'est pas totalement inerte puisqu'elle réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former des carbo-aluminates.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, et permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment [CPJ].

Par la suite, nous avons déterminé l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires.

2. Objectifs visés

L'objectif de notre étude visait à évaluer à travers des expériences l'influence de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance à la compression des bétons contenant des fillers calcaires est de résoudre trois problématiques, la première est d'accélérer le durcissement du béton frais. La deuxième est d'utiliser l'énergie solaire, non polluante répondant aux exigences de la politique du développement durable. La troisième est de connaître l'action des fillers calcaires en fonction de leurs teneurs sur la résistance en compression des bétons.

3. Méthodologie de travail

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

- **Le premier chapitre** décrit les caractéristiques des composants du béton, et une bibliographie concernant les additions cimentaires, la classification et leur action, ainsi que l'hydratation, la microstructure et la fabrication des matériaux cimentaires.
- **Le deuxième chapitre** décrit un aperçu général sur les méthodes d'accélération du durcissement du béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique par la vapeur d'eau par l'énergie solaire, et l'influence cette méthode de durcissement sur la résistance en compression des bétons, ainsi que l'état de l'art de l'étuvage des béton sur les résistance en compression au jeune âge et à long terme.
- **Le troisième chapitre** fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et minéralogiques des matériaux utilisés.
- **Le quatrième chapitre** concerne l'interprétation des résultats expérimentaux.
- **Enfin**, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

CHAPITRE I

LES BETONS ORDINAIRES & LEURS CONSTITUANTS

I.1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre décrit les caractéristiques des composants du béton, et une bibliographie concernant les additions cimentaires, la classification et leur action, ainsi que l'hydratation, la microstructure et la fabrication des matériaux cimentaires.

I.2. HISTORIQUE

Il y a plus de 2000 ans, les Romains et les Grecs savaient déjà fabriquer du liant hydraulique en faisant réagir de la chaux éteinte Ca(OH)_2 et des cendres volcaniques, notamment celle de la région de Pouzzoles, cendres de composition riche en silice. L'association des caractéristiques de ce matériau avec une technologie très avancée semble être un facteur prépondérant dans le développement de l'empire romain. Elle a, entre autres, permis la construction de structures monumentales, inhabituelles pour cette période de l'histoire, et d'une durabilité exceptionnelle : le Panthéon avec sa coupole de 44 mètres de diamètre et le Colisée à Rome ainsi que le pont du Gard sont des monuments de plus de 1800 ans. L'utilisation de ce matériau et les secrets de sa fabrication se sont ensuite perdus à la chute de l'empire face au retour de la maçonnerie en pierre. John Smeaton redécouvre en 1756 les propriétés hydrauliques du mélange de calcaire avec de l'argile. En 1817, Louis Vicat donne les proportions en calcaire et en silice pour constituer le mélange qui après cuisson sera un véritable liant hydraulique. Joseph Apsdin donne le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait dans cette région et dépose un brevet en 1824. Obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon, mais ce brevet comportait encore des points obscurs. C'est uniquement en 1845 que l'Anglais Johnson indique de façon précise les règles de fabrication du ciment. La dénomination Portland, due à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [6]. Cependant la véritable industrialisation ne débute vraiment que dans les années 1850. Elle est motivée notamment par la possibilité d'avoir un matériau économique, mouillable avec une bonne résistance à la compression. En 1890, on comprend l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : par exemple le ciment alumineux fut découvert par Jules Bied, en 1908.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 Mpa, et même 140 Mpa dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 Mpa [7].

I.3. CONSTITUANTS DES BÉTONS ORDINAIRES

Les caractéristiques physico-mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication. Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation, ... etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, ... etc.). Les trois composants de base sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additions peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

I.3.1. Ciment

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment Portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse CaSO_4 finement broyé et d'additions éventuels. Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement dans des broyeurs à boulets. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique ou surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C suivi d'une trempe rapide d'un mélange d'environ 80% de calcaire CaCO_3 et 20% d'argile. L'argile est composée de silice, d'alumine et d'autres phases qui sont présentes à de faibles proportions telles que l'oxyde de fer, le magnésium, l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium.

Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S dénommé alite, de silicate bicalcique $\beta\text{C}_2\text{S}$ ou bélite, d'aluminate C_3A ou célite, d'aluminoferrite tétracalcique C_4AF ou felite, et d'autres phases mineures.

Le C_3S est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le βC_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30%, 5 à 10% et 5 à 15% du clinker classique. (Pour plus de détails voir [8]). Ces composées sont refroidies, broyées et mélangées au gypse pour former le ciment.

I.3.1.1. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland

Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de: la composition chimique, le traitement thermique (chauffage et refroidissement) et de la finesse du clinker [8 et 9].

I.3.1.1.1. Finesse

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée. Pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, il est nécessaire de moulinier finement le clinker, cela fait augmenter la proportion d'hydrates dans le béton durci par rapport aux anhydres [10].

Pour les bétons à faibles rapport E/C, cette augmentation de finesse conduit à l'augmentation de la compacité de la pâte. Par ailleurs, si la proportion de grain de ciment ultrafins devient importante, la prise risque d'être instantanée dès le gâchage et conduira à un ciment, à forte chaleur d'hydratation, générateur de contraintes d'origine thermique, et donc des fissurations dans la peau des pièces massives [10]. L'augmentation de la finesse conduit également à l'augmentation des coûts du ciment. Lors du broyage, il y a rupture de liaisons chimiques. Cela signifie que des charges électriques sont créées à la surface des grains. Certaines de ces charges pourront être neutralisées par des ions et des électrons présents dans l'atmosphère du broyeur.

La plupart resteront insaturées cependant et les grains de ciment porteront des charges à la sortie du broyeur. La surface présente des charges positives aussi bien que des charges négatives. Par contre, en raison de la taille importante des sites négatifs par rapport aux sites positifs, une grande part de la surface est chargée négativement, comme c'est le cas pour la plupart des minerais [11].

I.3.1.1.2. Composition chimique et minéralogique

I.3.1.1.2.1. Clinker

Le clinker est le produit sortant du four à ciment avant broyage. Les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement.

I.3.1.1.2.2. Gypse

Durant la fabrication du ciment Portland, on ajoute du sulfate de calcium (gypse) afin de réguler la prise. En particulier, le contrôle de l'hydratation est lié à la quantité d'ions SO_4^{2-} en solution, qui dépend elle-même de la solubilité du sulfate de calcium ajouté au clinker.

I.3.2. Squelette granulaire

C'est le mélange de sable et de graviers, il intervient dans la résistance finale du béton et occupe près de 3/4 du volume du béton et influe donc sur ses propriétés. Du point de vue économique, car il permette de diminuer la quantité de liant qui est plus cher. Du point de vue technique, car il augmente la stabilité dimensionnelle et plus résistants que la pâte de ciment. Sa utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [12]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais. La résistance du béton est fonction du rapport eau/liant, la maniabilité du béton frais est, quant à elle surtout, affectée par la granulométrie des granulats. La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation et réduisent le ressuage du béton frais. La majorité des granulats peut être considérée comme inerte et inactive. Les granulats réactifs peuvent, avec des parties de ciment, entraîner des dommages nuisibles pour le béton en raison de l'alcali-réaction. Plus les granulats sont arrondis, meilleure est l'ouvrabilité du béton frais. Plus les grains sont anguleux, meilleure sera la résistance à la traction et à la flexion du béton. Plus la résistance des granulats est importante, meilleure sera la résistance définitive du béton. Selon les résultats de *Rossi et Toutlemonde* [13], la granulométrie joue un rôle important sur la déformation au seuil de non-linéarité, plus le volume de granulats grossiers est élevé, plus faible est cette déformation. Un volume plus élevé de granulats grossiers a donc tendance à anticiper la propagation des microfissures ce qui s'explique par le fait que les interfaces des granulats les plus grossiers sont plus faibles que ceux des granulats plus fins.

I.3.3. Eau

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau est constituée de molécules polaires de H₂O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques. L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces intergranulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines). L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment & fines) avec elle. [7]. L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Rappelons qu'un ciment Portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement (sous réserve des problèmes de floculation et d'expansion). Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications et des performances mécaniques. Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au-delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont : [7].

- ✓ risque de ressuage et de ségrégation ;
- ✓ augmentation de la porosité et le retrait ;
- ✓ diminution de la compacité et corrélativement la résistance.

Le dosage en eau doit donc être limité au (juste nécessaire) à l'hydratation du liant et aux exigences d'ouvrabilité. L'eau est le mal nécessaire de réglage le plus simple de la consistance, mais son augmentation entraîne une diminution de la résistance à la compression de béton et affecte la durabilité.

I.4. HYDRATATION ET MICROSTRUCTURE

I.4.1. Hydratation

I.4.1.1. Définition

Après le malaxage de l'eau et du ciment la pâte de ciment fluide durcit parce que l'eau est absorbée dans les minéraux de clinker amorphes en formant la pâte de ciment. Les réactions chimiques qui se déroulent à cette occasion sont appelées hydratation [14].

I.4.1.2. Degré d'hydratation

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux cimentaires dépendent de l'état d'avancement des réactions d'hydratation.

Une manière de quantifier l'état d'avancement des réactions d'hydratation du ciment est de calculer son degré d'hydratation qui est défini comme étant égal au rapport de la quantité de ciment ayant réagi au temps (t) sur la quantité de ciment anhydre initiale [10].

I.4.1.3. Aspects cinétiques et prise

Les grains de ciment réagissent à leur surface avec l'eau de gâchage, la réaction chimique commence. De très petits produits d'hydratation en forme d'aiguille précipitent et enveloppent les différents grains de ciment (couche fine). Pour que l'hydratation se poursuive, l'eau doit diffuser à travers les pores de gel de la couche de gel de ciment devenant de plus en plus dense et de plus en plus épaisse, jusqu'à ce qu'elle atteigne le noyau non-hydraté. L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée. Une petite partie du ciment reste non-hydraté. Le grain de ciment hydraté grossit et double à peu près son volume initial. La modification de la résistance à la déformation ou l'augmentation de la résistance pendant l'hydratation se subdivise en plusieurs phases. Au fil du temps, le béton frais perd sa consistance initiale et fait prise, jusqu'à ce qu'il ne soit plus ouvrable. Puis le béton se solidifie. Enfin, lorsque la résistance devient mesurable (environ 0.1 N/mm^2) on parle du béton durci [10]. La vitesse d'hydratation dépend de la température du béton frais et de la température ambiante, de la nature et de la finesse du ciment, de la teneur en ciment et du rapport E/C du béton, de la nature et du dosage des adjuvants. L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment (C_3S , $\beta\text{C}_2\text{S}$, C_3A et C_4AF) et l'eau de gâchage [15]. Ces réactions sont exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires. La vitesse d'hydratation des diverses phases du ciment est différente. L'aluminate C_3A réagit très rapidement. En absence de sulfate, l'écran d'étringite ainsi formé bloque l'hydratation des autres constituants du ciment et plus particulièrement le C_3S . Par rapport au C_3S , le $\beta\text{C}_2\text{S}$ réagit beaucoup plus lentement (10 à 20 fois plus lent) et il n'a pas de rôle majeur sur la structuration de la pâte de ciment à l'état frais [15].

I.4.1.3.1. Hydratation des silicates (C_3S et $\beta\text{C}_2\text{S}$)

Par addition d'eau le C_3S est le composé qui durcit rapidement que le $\beta\text{C}_2\text{S}$. De par sa vitesse de réaction élevée on lui attribue le développement de résistance aux bas âges. Après le C_3A , il est le composé qui dégage le plus de chaleur d'hydratation [16]. Durant la réaction du C_3S et $\beta\text{C}_2\text{S}$, il se forme de l'hydroxyde de calcium et un gel de silicate de calcium hydraté.

Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de Ca(OH)_2 dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction.

En moyenne, une pâte de ciment ordinaire contient 50 à 70% de C-S-H et 25 à 30% de Ca(OH)_2 . L'hydratation du $\beta\text{C}_2\text{S}$ se déroule dans les mêmes conditions que le C_3S . Ce composé durcit lentement. Il est responsable des gains de résistance aux âges très avancés [16].

I.4.1.3.2. Hydratation des aluminates (C_3A et C_4AF)

Le C_3A est le premier des composants à s'hydrater, suivi de C_3S . C'est le composé qui s'hydrate rapidement (comparé aux C_3S , $\beta\text{C}_2\text{S}$), il est responsable en partie des résistances au jeune âge 1 jour. Ce composé libère beaucoup de chaleur d'hydratation lors de son interaction avec l'eau. Sa vitesse de réaction a un effet direct sur les temps de prise du ciment Portland. C'est le composé qui est principalement attaqué par les sulfates. Le C_4AF s'hydrate d'une façon analogue au C_3A mais à une vitesse de réaction faible, il contribue peu ou pas aux résistances de la pâte de ciment. Il est responsable de la couleur du ciment et permet de diminuer la température de clinker au four [16].

I.4.2. Microstructure des matériaux cimentaires

Le processus d'hydratation d'un ciment conduit à un matériau durci composé de plusieurs phases de l'agencement desquelles résulte la structure et la texture de la pâte. Ces différentes phases peuvent être : [17].

- ✓ Des particules de ciment non hydraté ou partiellement hydraté.
- ✓ La pâte de ciment, elle-même de microstructure complexe, contenant plusieurs types d'hydrates, de la portlandite et des pores.
- ✓ Des bulles d'air, qui constituent une sous-famille spécifique de pores.

Il existe une relation aujourd'hui bien comprise entre la microstructure des ciments et leurs propriétés mécaniques. Elle concerne l'influence néfaste des pores capillaires (porosité à l'échelle supérieure au micromètre) sur la résistance du matériau [18].

I.4.2.1. Composition du ciment hydraté

La pâte de ciment hydraté est formée :

- ✓ Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)_2 et Aluminates).
- ✓ Les grains de ciment non hydraté, des espaces capillaires et des bulles d'air.

I.4.2.2. Composition des hydrates

Les hydrates comprennent :

- ✓ Les silicates de calcium hydratés et la chaux hydratée.
- ✓ Les aluminates hydratés et l'eau adsorbée sur certains cristaux et des impuretés.

I.5. FABRICATION

I.5.1. Composition

Le mélange de ciment et d'eau (et éventuellement avec des additions) constitue ce qu'on appelle pâte de ciment. En y rajoutant du sable, on obtient un mortier. En y additionnant du sable et un granulats plus gros on obtient un béton. Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs : une facilité de mise en œuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visée à différents stades de maturation et une durabilité vis-à-vis des agressions physico-chimiques du milieu ambiant.

I.5.2. Malaxage

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes.

I.5.3. Traitement de cure

On entend par traitement ultérieur d'un béton toutes les mesures appropriées visant à protéger le béton mis en œuvre jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance suffisante. Les traitements de cure appropriés sont : laisser le béton dans le coffrage, recouvrir et détacher le béton à l'aide de films, mise en place d'un traitement de cure liquide externe, pulvérisation d'eau et ajout d'un produit de cure interne comme dans le béton frais. Une cure en température a une influence sur la cinétique d'hydratation aux jeunes âges : la formation des hydrates est accélérée avec l'augmentation de la température. Cette accélération influence la texturation et la vitesse de durcissement du matériau. Si la température de cure dépasse une température seuil (autour de 50°C), les propriétés mécaniques sont diminuées. Sans que cela puisse entièrement expliquer le comportement mécanique du matériau, la distribution de la nano-porosité est légèrement modifiée : la grosse porosité a tendance à augmenter [11].

I.6. ADDITIONS CIMENTAIRES

I.6.1. Définition

Les additions pour béton sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelque fois également au béton. Les additions permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques .

Contrairement aux adjuvants, les additions doivent être prises en compte dans le calcul de la composition du béton.

Des additions, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire.

Les pays industrialisés tels que les États-Unis, Russie, France, Allemagne, Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau [19].

I.6.2. Classification des additions

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des additions qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs.

Les additions peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau I.1 ci-dessous.

Tableau I.1 : Classification des additions selon leur réactivité

<i>TYPE</i>	<i>Réactivité</i>	<i>Matériaux</i>
<i>Hydraulique</i>	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Ciment spéciaux, Chaux hydraulique.</i>
<i>Hydraulique Latent</i>		<i>Laitier granulé, Cendres volantes riches en calcium (calciques)</i>
<i>Pouzzolanique</i>	<i>Fortement Réactif</i>	<i>Fumée de silice</i>
	<i>Moyennement Réactif</i>	<i>Cendres volantes pauvres en calcium, Pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, Tufs volcaniques, Trass,</i>
	<i>Faiblement Réactif</i>	<i>Scories cristallines.</i>
<i>Inerte</i>	<i>Non Réactif</i>	<i>Filler (farine calcaire,....), Fibres, Pigments colorants,</i>

I.6.3. Action des additions cimentaires

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [20].

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes [20-23,5, 27-28] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- *Un effet granulaire (filler)* résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.
- *Un effet physico-chimique* engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.
- *Un effet purement chimique* propre à certaines additions en milieu cimentaire, qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique.

Lorsque une addition minérale fine ou ultrafine est incorporée dans un mélange cimentaire, elle engendre des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires soit par un effet granulaire ou/et un effet physico-chimique et microstructural ou/et un effet chimique.

Les études récentes qui ont considéré l'influence des additions minérales sur les propriétés des mélanges cimentaires ont montré que celles-ci peuvent améliorer dans certains cas les performances des bétons (résistance mécanique & durabilité) [24, 27 et 25].

I.6.4. Comportement du ciment avec addition

Le comportement du ciment avec addition minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'addition : [19].

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons.

I.6.5. Enjeux environnementaux

Le développement durable apparaît comme une stratégie politique visant à être gagnant sur les trois terrains de l'économie, du social et de l'environnement. Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 a pris progressivement conscience de la nécessité à d'intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays [30].

Le ciment, le béton et d'autres matériaux de construction sont essentiels au développement de nos sociétés, mais leurs procédés de fabrication ont d'importants impacts environnementaux. Des émissions de CO₂ se produisent pendant la production du clinker qui est un composant intermédiaire dans la fabrication du ciment. La production de ciment engendre une forte consommation de matières premières et d'énergie.

La clinkérisation est la partie la plus importante du procédé de fabrication du ciment en ce qui concerne la consommation d'énergie et les rejets à l'atmosphère du fait de la nécessité d'atteindre une température d'environ 1450°C. Les principaux rejets en termes de volume sont le dioxyde de carbone CO₂, les oxydes d'azote NO_x, le dioxyde de soufre SO₂ et les poussières.

Dans le secteur cimentier, les émissions de CO₂ sont les plus importantes. En effet, pendant la cuisson des matières premières calcaires, le carbonate de calcium est transformé en oxyde de calcium, laissant s'échapper le dioxyde de carbone CO₂ contenu dans le calcaire.

Les sources d'émissions de CO₂ comprennent donc l'utilisation de combustibles pour la production d'énergie et la décarbonatation du calcaire [30]. On estime que la production de chaque tonne de ciment Portland libère environ une tonne de CO₂ [29].

Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine [26].

I.6.6. Bénéfices de l'utilisation des additions

I.6.6.1. Bénéfices techniques

- ✓ L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des additions d'une grande finesse).
- ✓ Ils peuvent modifier la nature et la texture des hydrates formés.
- ✓ Prise et durcissement pour les additions qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.
- ✓ Il y a une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- ✓ Il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.6.6.2. Bénéfices économiques

- ✓ La plupart des additions minérales sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.
- ✓ Réduit le prix du ciment et du béton.
- ✓ Permet un gain appréciable en clinker selon le pourcentage ajouté.
- ✓ Réduire la dépense d'énergie nécessaire pour le broyage.

I.6.6.3. Bénéfices écologiques et environnementaux

- ✓ Diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- ✓ Élimination des sous-produits de la nature.

I.7. LES FILLERS

I.7.1. Définition

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres volantes..) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bombléd: [31]. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

I.7.2. Effets

Les fines calcaires ont une double action dans le béton [32]. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur de l'hydratation. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates. *Farran et al.* [33], avait aussi signalé la formation d'une liaison intime entre les granulats calcaires et la pâte du ciment qui résulterait de plusieurs mécanismes dont un fort accrochage mécanique dû à une surface de contact rugueuse et à une liaison physico-chimique entre les granulats calcaires et la pâte de ciment. Les fillers de même nature que les granulats contribuent à l'amélioration de l'adhérence pâte-granulats, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. On observe alors une amélioration des caractéristiques générales des bétons ordinaires [35]. *Buil et Paillere* [36], ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment

Les fillers calcaires ont pour principales actions : voir la figure I.1

- **rôle de remplissage** : l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire. Sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides intergranulaires [36] ;
- **rôle rhéologique** : par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci [54] ;
- **rôle physico-chimique**: la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [4] ;
- **rôle chimique** : par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates [5].

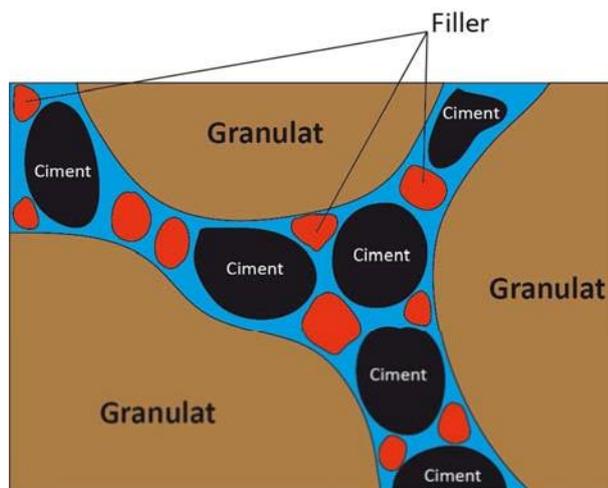


Figure I.1: Illustration de l'effet filler

I.7.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment :

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.

- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

I.7.4. Influence du filler sur l'état durci :

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% [37-39]. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier [40].

Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats [41].

D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation [42] mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [43-46].

En effet Bonavetti et al [47] montrent que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX mettent en évidence trois phases :

- de 1 à 7 jours, formation de carboaluminate hydraté, d'ettringite et diminution de la quantité de CaCO_3 .
- de 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminate hydraté; stabilisation de la formation de carboaluminate hydraté.
- après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable [48] ; l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate hydraté en ettringite.

La formation de carboaluminate est également détectée lors de la formulation de mortier contenant des granulats calcaires. En effet, on peut observer à la surface des granulats des figures d'attaque. L'intensité de l'attaque des granulats calcaires par le sulfoaluminate hydraté dépend de la nature du granulat, de l'orientation cristallographique des grains de calcite et de la quantité de sulfoaluminate hydraté présent (c'est-à-dire de la température de cure et du rapport Eau/Ciment) [49-50].

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (Figure I-2) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) [51] et a tendance à être négligeable au long terme [52-53].

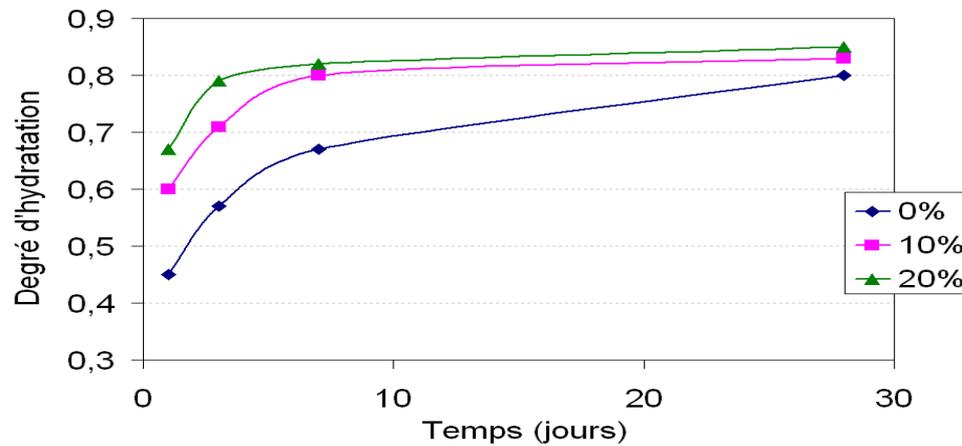


Figure I.2: évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%) [47].

D'après *GUERMADI et al* [54], l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps (Figure I.3) présente la même allure quel que soit la teneur en fillers. Globalement, à 28 jours la résistance en compression des bétons à 6, 12 et 18 % de fillers est supérieure à celle du béton sans fillers. Par contre, pour une teneur de 24%, la résistance obtenue est toujours plus faible pour les deux squelettes granulaires. Entre 7 et 28 jours, l'accroissement des résistances en fonction du temps est de façon sensiblement linéaire. Au-delà de 28 jours l'effet fillers tend à se stabiliser progressivement jusqu'à 90 jours. Ce qui nous pousse à dire, qu'à plus long terme, la contribution à la résistance devient minime.

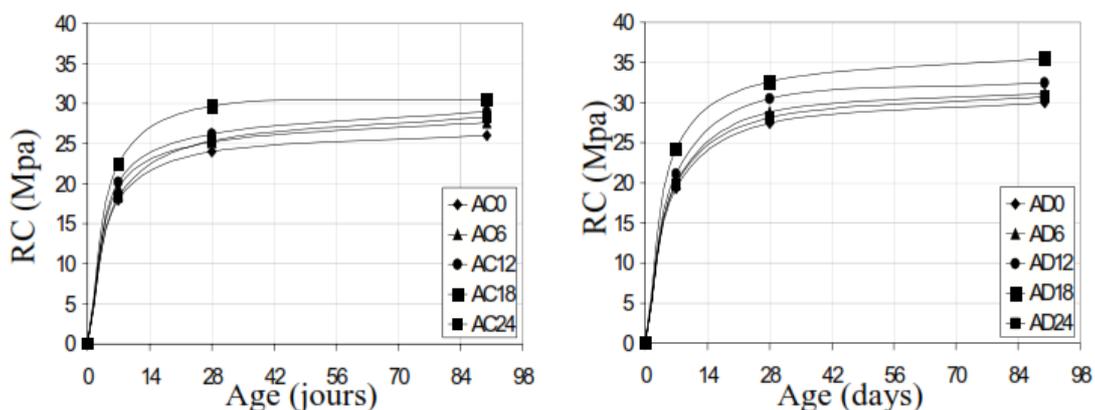


Figure I.3. Evolution de résistance en fonction de temps pour les deux squelettes granulaire[54].

CONCLUSION

Le matériau sur lequel se base ce travail est le béton. La qualité d'un béton dépend de son constituant qui a une influence sur son comportement à l'état frais et ses caractéristiques mécaniques à l'état durci.

A la lumière de l'examen de la documentation, le recours aux additions est formellement la voie la plus prometteuse à suivre afin d'assurer un développement durable à l'industrie du ciment et du béton. L'utilisation des additions minérales en substitution du clinker dans le ciment Portland est un excellent exemple de valorisation réussie de déchets industriels qui permet, de diminuer les émissions de CO₂.

En Algérie, les fines calcaires issues du concassage des granulats ont pour longtemps été considérées comme des résidus inutilisables et l'une des principales causes de rejet des sables de construction concassés alors qu'ils peuvent avoir un rôle bénéfique dans les matrices cimentaires.

La présence des additions calcaires provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment et favorise les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, d'autant plus que les particules sont fines [4]. D'après *Cyr et al.*[5], Ont noté que l'addition calcaire n'est pas totalement inerte puisqu'elle réagit avec le C₃A et le C₄AF pour former des carbo-aluminates.

Le présent travail traite l'influence de l'addition de filler calcaire au ciment, sur la résistance en compression des bétons.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Erdem T.K, Turanlı L, Erdogan T.Y. Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. *Cem Concr Res* 2003;33(5):74145.
- [2] DWS Ho,Chua C.W, Tam C.T. Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures. *Cem Concr Res* 2003;33(4):595-601.
- [3] NOUMOWE A. (1995), Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton - Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de Génie Civil : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon 1, 1995. 231p.
- [4] CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F., ET CHARONNAT Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33. Février 2002.
- [5] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cement and concrete research* Vol. 36(2), pp. 264-277, 2006.
- [6] SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES., «L'industrie cimentière», Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.
- [7] GABRYSIK F., Cours (chapitre 4). «Matériaux - Les bétons».
- [8] BAROGHEL-BOUNY V., «Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons ; méthodes, analyse, interprétations». Edition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1994, 468.
- [9] MOUDILOU E., «Cinétiques et mécaniques de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires». CTG, Italcementi. Université d'Orléans. Thèse d'état, Déc. 2000.
- [10] BARON J. et SAUTREY R., «Le béton Hydraulique: connaissance et pratique». Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1995.
- [11] LEGRAND C., «Le béton hydraulique». Édité par J. BARON et R. SAUTREY, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, chap. 6, Paris, 1982.
- [12] NEVILLE A.M., «Propriétés des bétons». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, 2000. Paris, 806.
- [13] ROSSI P. and TOUTLEMONDE F., «Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms». *Materials and Structures*, vol.29(2), pp. 116-118, March 1996.
- [14] PLASSAIS A., «Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments». Thèse de Doctorat. Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 6, 167, 2003.
- [15] DREUX G. et FESTA J., «Nouveau guide du béton et de ses constituants», 8^{ème} édition, Édition Eyrolles, 1998. p.409.
- [16] KHAYAT K., «Les ciments». Béton Canada. Technologie du béton, 1995.
- [17] TAYLOR H.F.W., «Cement chemistry», Academic Press, London, 1990.
- [18] VERNET C., «Introduction to Portland cement chemistry», In P. Colombet and A.R. Grimmer, editors, *Application of NMR spectroscopy to cement science*, pages 29-53. Gordon and Breach, London, 1994.
- [19] AREZKI TAGNIT- HAMOU., Cours 2003 (chapitre 7). «Ajout dans le ciment». Université de Sherbrooke. Québec. Canada.
- [20] BOUDCHICHA A., «Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [21] BESSA A., «Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers ». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [22] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E and CARLES-GIBERGUES., «Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales». *Materials and Structures*, vol.33 (7), p.466-472, 2000.
- [23] KARA Ali R., «Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires». Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2002.
- [24] HASSAN K.E., GABRERA J.G. and MALIEHE R.S., «The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete». *Cement and Concrete Research*, vol.22 (4), p.267-371, 2000.
- [25] PANDEY S. P. and SHARMA R.L., «The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortars». *Cement and Concrete Research*, vol.30 (1), p.19-23, 2000.
- [26] SITUATION ENVIRONNEMENTALE DES INDUSTRIES., «L'industrie cimentière», Janvier 2005, Institut de conseil et d'études en développement durable, ASBL.

- [27] LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E., «Minéral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration». *Cement and Concrete Research*, vol.33 (12), p.1939-1947, 2003.
- [28] LAWRENCE P., CYR M. and RINGOT E., «Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength». *Cement and Concrete Research*, vol.35 (6), p.1092-1105, 2005.
- [29] MEHTA P.K., «Concrete technology for sustainable development». *Concrete International*, vol.21, n°11, 1999
- [30] AKLI A., «Intégration des préoccupations environnementales dans de développement industriel ». *La revue de l'environnement symbiose*, n°8, pp.15-18, 2000.
- [31] BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment », *Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169*, 1973.
- [32] ANDERSON R, GRAM H.E, « Properties of alkali actived slag-concrete », 1987.
- [33] Farran, Javelas, Maso, Perrin, 1972, *Etude de l'auréole de transition existant entre les granulats d'un mortier et la masse de la pâte de ciment hydraté. Colloque RILEM INSA TOULOUSE.*
- [34] Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R., Joudi I., 2008, *Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granat. Exemples tunisiens, Materials and structures*, 41, 815- 830.
- [35] Buil M., Paillere A., 1984, *Utilisation des fillers fins dans les bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris*, pp 193-196.
- [36] De Larrard F., 2000, *Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.*
- [37] Michel F., Pierard J., Courard L., Pollet V., *Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, p205-210, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.*
- [38] Topçu IB., Uğurlu A., *Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete, Cement and Concrete Research* 33, p1071-1075, 2003.
- [39] Felekoglu B., *Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791*, 2007.
- [40] Lawrence P., *Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de l'Université Paul Sabatier*, 2000.
- [41] Bosiljkov VB., *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, Cement and Concrete Research* 33, p1279-1286, 2003.
- [42] Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe AM., Taerwe L., *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, Cement & Concrete Composites* 29, p94-102, 2007.
- [43] Kakali G., Tsvilis S., Aggeli E., Batis G., *Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃, Cement and concrete research* 30, p1073-1077, 2000, DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00292-1.
- [44] Xiong X., Van Breugel K., *Hydration processes of cements blended with limestone powder -Experimental study and numerical simulation, Proceedings of the 11th ICCI, Durban*, 2003.
- [45] Péra J., Husson S., Guilhot B., *Influence of finely ground limestone on cement hydration, Cement and concrete composites* 21, p99-105, 1999, DOI:10.1016/S0958-9465(98)00020-1.
- [46] Husson S., Gullhot B., Pera J., *Influence of different fillers on the hydration of C3S, Proceedings of the 9th ICCI, New Delhi, vol4*, 1992.
- [47] Bonavetti V., Rahhal V.F., Irassar E.F., *Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements, Cement and concrete research* 31, p853-859, 2001, DOI: 10.1016/S00088846(01)00491-4.
- [48] Zhang F., Zhou Z., Lou Z., *Solubility product and stability of ettringite, Proceedings of the 7th ICCI, Paris, vol2*, 1980.
- [49] Farran J., *Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et des matériaux enrobés, Thèse de l'Université de Toulouse*, 1956.
- [50] Ollivier JP., *Contribution à l'étude de l'hydratation de la pâte de ciment Portland au voisinage des granulats, Thèse de l'université Paul Sabatier*, 15 avril 1981.
- [51] Escadeillas G., *Les ciments aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse*, 1988.
- [52] Zhu W., Gibbs JC., *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and Concrete Research* 35, p1457-1462, 2005.
- [53] Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsvilis S., *Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements, Cement & Concrete Composites* 27, 191-196, 2005.

[54] Melle GUEMMADI Z., TOUMI B., Dr HOUARI H., Pr CLASTRE P. AMELIORATION DES PERFORMANCES DES BETONS PAR LES AJOUTS DE FINES CALCAIRES. Séminaire International de Géomatériaux GEOMAT'02. Université Mohamed Boudiaf de M'sila - Algérie, les 10-11 Mars 2003.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART

II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre décrit un aperçu général sur les méthodes d'accélération du durcissement du béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique par la vapeur d'eau par l'énergie solaire, et l'influence cette méthode de durcissement sur la résistance en compression des bétons, ainsi que l'état de l'art de l'étuvage des béton sur les résistance en compression au jeune âge et à long terme.

II.2. ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON FRAIS

Aujourd'hui, le béton occupe la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance mécanique, sa durabilité et son coût faible, mais la lenteur avec laquelle il acquiert ses résistances mécaniques reste l'un des inconvénients principaux.

A cet effet plusieurs solutions sont aujourd'hui employées pour atteindre des résistances élevées au jeune âge, à savoir l'utilisation de la technique de traitement thermique par la vapeur d'eau (durcissement à la vapeur par énergie électrique, par énergie solaire), l'utilisation des ciments dotés d'un durcissement rapide, l'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement.

Dans le cadre de ce travail, nous sommes intéressés à l'étuvage des bétons (*durcissement à la vapeur par énergie solaire*).

II.2.1. Intérêt d'un traitement thermique par la vapeur d'eau

Le traitement thermique par la vapeur d'eau (l'étuvage par l'énergie solaire) permet une accélération des réactions d'hydratation du béton par la chaleur, appelée aussi thermomaturation, qui constitue la plupart du temps, le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures.

Le traitement thermique d'un béton frais est une technique qui permet: l'accélération des cadences par réduction du temps de prise, donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée surtout dans les usines de préfabrication, et le bétonnage par temps froid [1].

II.2.2. Influence des méthodes de durcissement sur les propriétés mécaniques du béton durci

II.2.2.1. Durcissement à l'air

Le durcissement à l'air a potentiellement un effet négatif sur les propriétés mécaniques des bétons. Ce régime de durcissement est pour simuler la pratique courante actuelle dans l'industrie de la construction. Les bétons durcis à l'air présentent des résistances à la compression inférieures à ceux durcis dans l'eau. Ceci peut être attribué par un manque d'humidité pour l'hydratation du ciment, qui finalement provoque une structure poreuse introduit par le retrait de séchage [2-4].

II.2.2.2. Durcissement à l'eau

Le durcissement à l'eau qui favorise l'hydratation provoque le colmatage des pores capillaires et de renforcer les liens intergranulaire [2,3 et 5].

II.2.2.3. Durcissement à la vapeur

L'effet bénéfique de durcissement à la vapeur sur la résistance des bétons a été clairement observé à des stades antérieurs jusqu'à 7 jours. En revanche, avec durcissement à la vapeur en continu, le rapport de résistance à la compression a diminué progressivement. Par la suite, la résistance à la compression des bétons durcis en présence d'eau est supérieure à celle du durcissement à la vapeur à 28 jours [2,3]. Bien qu'une augmentation de la température augmente le développement de la résistance au jeune âge, mais un impact négatif sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation ont une structure physique moins compact, probablement plus poreux, de sorte qu'un pourcentage de pores restent non chargé, ce qui conduira à une résistance plus faible par rapport au béton moins poreux, hydratée lentement avec un durcissement à l'eau [2, 3,6 et 7]. Le fait que la porosité augmente avec la température est compatible avec un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment la C-S-H) étant plus denses et distribués de manière plus hétérogène (distribution non uniforme) dans la matrice de ciment, permettent ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, ce qui provoque la perte de la résistance mécanique [2,3 et 8]. A 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 capillaires plus larges.

Un gain de temps et plus courts délais de fabrication pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'air libre après un durcissement à la vapeur d'un jour et trois jours de durcissement à l'air libre [2,3]. Ces résultats nous permettent de décoffrer rapidement les éléments en béton en toute sécurité (surtout dans le domaine de la préfabrication), d'où un gain de temps et d'argent.

II.3. TRAITEMENT THERMIQUE

Le traitement thermique permet une accélération des réactions d'hydratation du béton par la chaleur, appelée aussi thermomaturation, qui constitue la plupart du temps, le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures.

Le chauffage a d'abord été employé dans les pays nordiques (Russie, Suède, Norvège) pour obtenir la mise hors gel du béton (permettre au mélange d'atteindre une certaine cohésion avant que l'eau ne se transforme en glace) [9]. En Russie en commença au début du 19^{ème} siècle, aux Etats-Unis et en Europe cette technique est employée depuis les années 1930, en France c'est Freyssinet qui entreprit les premiers essais en 1927 et développa cette méthode pour exécuter des tuyaux chauffés à la vapeur dans les moules hermétiquement fermés [10]. Cette technique réservée initialement aux usines de petits éléments en béton (blocs, bordures), s'est étendue, d'une part, aux usines de préfabrication de panneaux de grandes dimensions, de cellules tridimensionnelles correspondant à une pièce d'habitation et d'autres part au chantier de bâtiment et aux éléments d'ouvrages d'art pour accélérer la rotation des moules de poutres de pont et de voussoirs [9].

Sur des données de MALININA L.A. à une température de 80°C du traitement thermique d'un béton la croissance des résistances mécaniques est de 6 fois plus importante et à 100°C elle est de 10 fois plus importante en comparaison avec un traitement dans des conditions normales de durcissement [11].

II.3.1. Les différents types du traitement thermique

Le traitement thermique du béton peut être un traitement thermique passif ou actif.

II.3.1.1. Traitement thermique passif ou « auto étuvage »

Cette méthode est souvent la plus économique (il n'y a pas fourniture de chaleur), elle consiste à éviter toutes déperditions calorifiques dues à l'exothermie des réactions chimiques de prise et de durcissement du ciment lors de son hydratation. Afin de sauvegarder la chaleur dégagée en utilisant des coffrages isolants, ou encore en recouvrant l'ensemble de l'ouvrage avec une bâche isolante [12].

Les réactions d'hydratation des constituants du ciment portland sont fortement exothermiques, ce qui conduit dans l'heure qui suit la fabrication du béton, à des températures qui peuvent atteindre 80 degrés Celsius dans les pièces massives [13]. La quantité totale de chaleur dégagée par gramme de ciment varie entre 200 et 500 joules, cette chaleur dépend de la composition minéralogique du ciment et varie surtout avec la teneur en C₃A (formation exothermique de monosulfoaluminate à partir de l'étringite). Les quantités de chaleur dégagées par les principaux constituants du clinker, exprimé en joule par gramme de matière anhydre sont estimées,

systématiquement, au moyen d'un essai normalisé (l'essai à la bouteille de Langavant, figure II.1 et 2) [14].

- ✓ silicate tricalcique (C_3S) 500 à 525 J/g;
- ✓ silicate bicalcique (C_2S) 250 à 270 J/g;
- ✓ aluminat tricalcique (C_3A) 1000 à 1200 J/g;
- ✓ aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) 395 à 425 J/g.



Figure II.1: Le calorimètre de Langavant

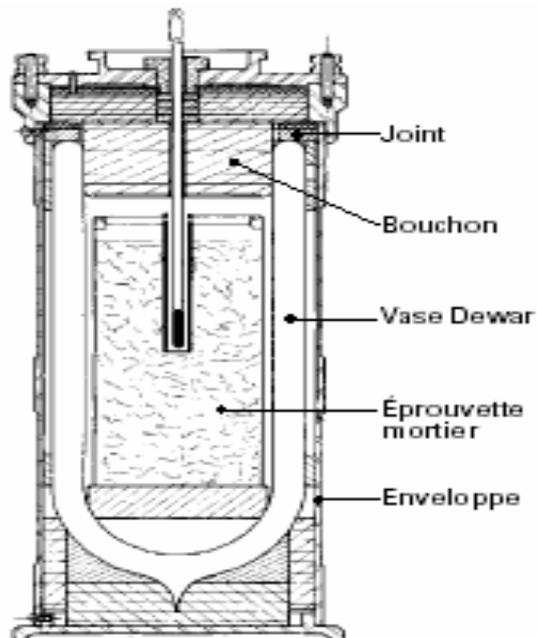


Figure II.2: schéma du calorimètre de Langavant

II.3.1.2. Traitement thermique actif

Dans lequel il y a apport de chaleur, soit avant ou après la mise en place du béton.

II.3.1.2.1. Chauffage du béton avant sa mise en place ou « préchauffage » :

Le préchauffage du béton s'effectue soit en chauffant individuellement les constituants du béton (granulats, eau de gâchage), figure II.4; ou en chauffant le mélange dans le malaxeur pendant la fabrication du béton frais), figure II.5, ou encore en chauffant le mélange après malaxage par conduction (benne chauffante figure II.3, tuyaux chauffants) [15].

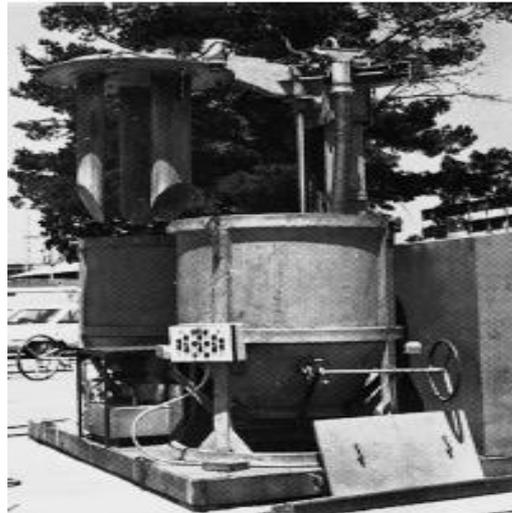


Figure II.3: Une benne chauffante

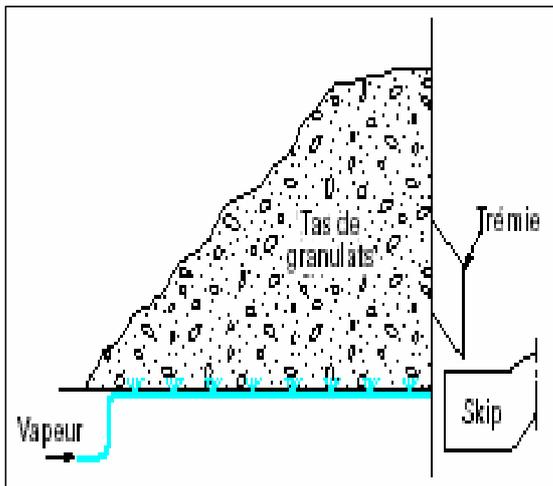


Figure II.4: Préchauffage du béton par chauffage des granulats

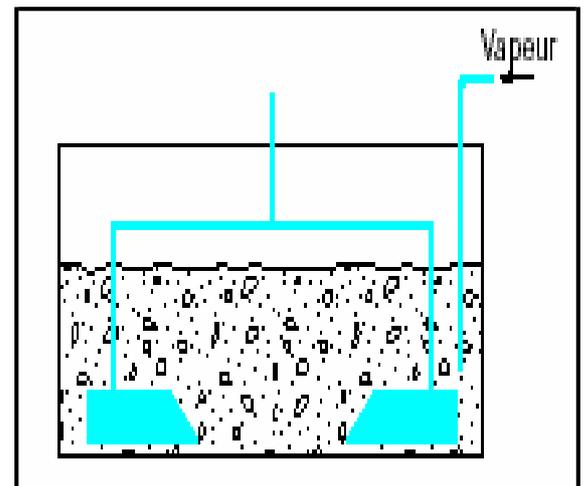


Figure II.5 : Préchauffage du béton par injection de vapeur dans le malaxeur

II.3.1.2.2. Chauffage du béton après sa mise en place :

C'est la technique la plus utilisée, dans ce cas le béton peut être chauffé soit :

- Par l'extérieur, en chauffant l'environnement autour du moule et du coffrage, en plaçant les pièces dans une enceinte et en envoyant de la vapeur ou de l'air chaud. Par contact le chauffage du béton s'effectue par l'application, contre le coffrage, des résistances électriques ou des canalisations transportant un fluide (eau ou vapeur) figure II.6 [15,16].
- par l'intérieur, le chauffage appliqué dans la masse, les principaux procédés sont le chauffage par les armatures, le chauffage par des résistances électriques isolées, noyées et abandonnées dans le béton, chauffage par effet joule au moyen d'électrodes [15,16].

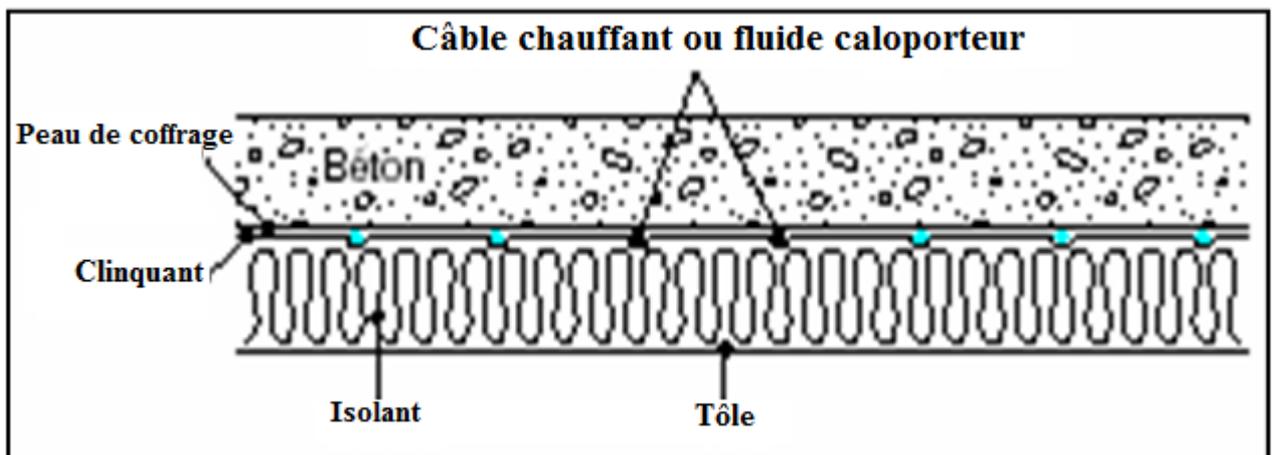


Figure II.6 : Coffrage chauffant

II.3.2. Les techniques du traitement thermique

Parmi les techniques de chauffage du béton après sa mise en place on peut citer :

II.3.2.1. Le traitement thermique par l'électricité :

C'est une technique qui utilise :

Soit la conductibilité électrique du béton lui-même, ce dernier est placé dans le circuit d'un courant alternatif. Le courant est transmis au béton par l'intermédiaire d'électrodes, qui peuvent se présenter sous forme de tiges, de câbles, de bandes ou de plaques métalliques. La résistance électrique du béton dépend de la qualité d'eau libre et de la présence de sels en solution. La répartition de la chaleur dans le béton dépend de l'homogénéité de ce dernier ;

Soit la conductibilité électrique des armatures, c'est-à-dire une fois le béton mis en place, les armatures sont mises sous tension électrique alternative. Le courant passant dans ces armatures produit par effet joule de l'énergie calorifique.

Soit des résistances noyées dans le béton, généralement attachées au ferrailage avant la coulée du béton. Ces résistances sont conçues pour obtenir rapidement une répartition régulière de la chaleur dans le béton et fonctionnent sous une tension de sécurité de 24 ou 42 volts, ces résistances sont perdues après chauffage, par économie sont employées des résistances a faible prix (fils de fer enrobés de matières plastique).

Soit des résistances placées sur les tables, moules, coffrages et dans les étuves, lesquels se chargent de transmettre les calories au béton en place par conduction thermique, ces résistances sont réutilisables [10,17].

II.3.2.2. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale) :

L'accélération du mûrissement du béton frais est réalisée en immergeant le béton dans un bain d'eau chaude. Il doit y avoir au moins 5 cm d'eau au-dessus des éléments de béton à traiter, ceux-ci doivent être espacés et déposés sur une plaque métallique perforée, pour obtenir une répartition homogène de la chaleur en différents points des éléments en béton afin d'éviter des macro et micro-fissures (figure II.7).

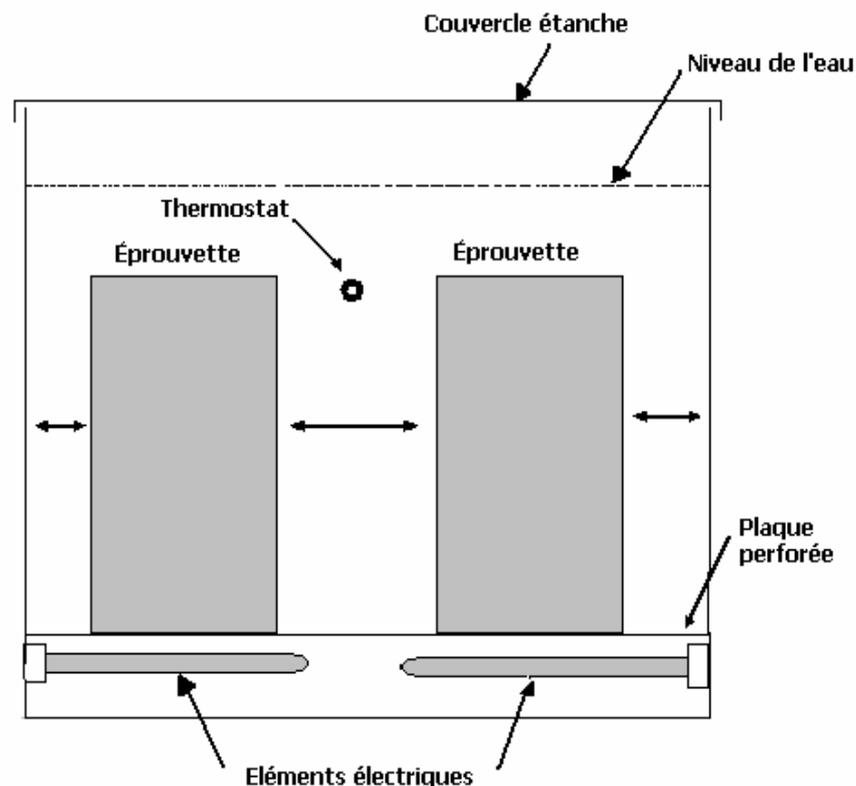


Figure II.7 : Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude.

II.3.2.3. Le traitement thermique par la vapeur d'eau «étuvage»:

Le mûrissement à la vapeur à basse pression est réalisé par différents procédés, parmi ces derniers on peut citer:

- Etuvage en chambre fixe : est un procédé très utilisé en préfabrication pour la fabrication des produits démoulés sur un support. La vapeur ne doit pas jaillir directement sur les produits, il faut une répartition assez régulière de la température ainsi qu'une étanchéité suffisante de l'enceinte.
- Etuvage en chambre mobile : les éléments sont démoulés à l'état frais et déposés sur une aire plane sans subir d'autres manipulations, ensuite l'enceinte est chauffée par injection de vapeur d'eau.
- Etuvage en tunnel : le produit après sa mise en place est introduit dans un tunnel, transporté sur un convoyeur le produit subit un cycle complet d'étuvage (de la mise en place à l'enlèvement pour la mise en place sur stock). Le fonctionnement d'un tunnel est assez délicat à contrôler et le procédé nécessite des investissements élevés.
- Procédé à vapeur perdue : le coffrage sur lequel est coulé le béton est placé sous une couverture en plastique, sous laquelle est injecté la vapeur. Les pertes d'énergie par cette méthode sont importantes (figure II.8) [10, 18, 19]

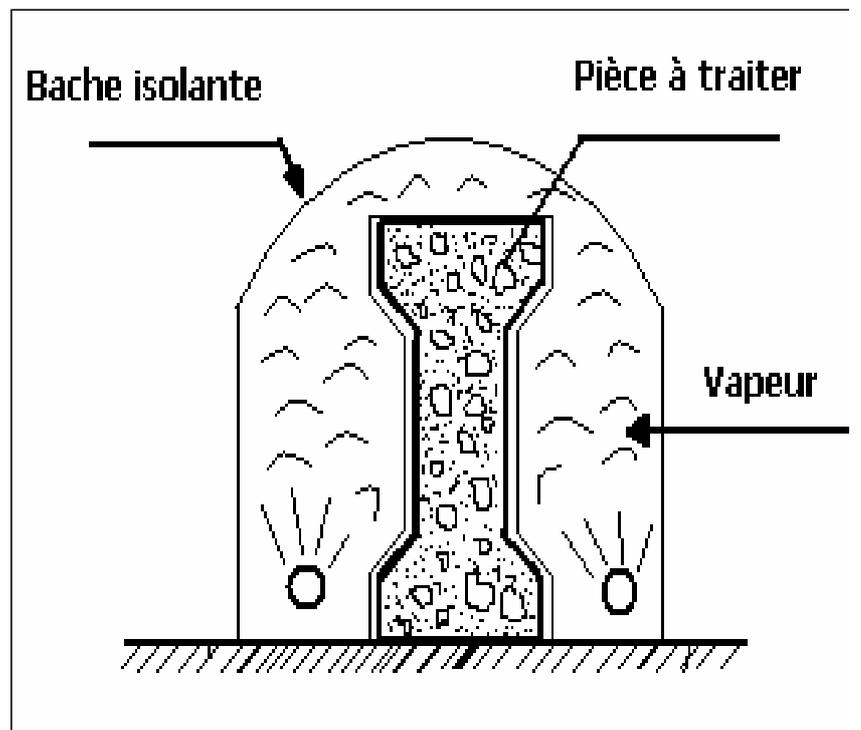


Figure II.8: Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur d'eau perdue

II.4.L'ETUVAGE DES BETONS

La cure à la vapeur est avantageuse lorsque l'on a besoin d'un béton ayant une forte résistance initiale ou lorsqu'il faut fournir une chaleur additionnelle pour favoriser la réaction d'hydratation comme par temps froid par exemple. La cure à la vapeur fait l'objet de la norme CSA A23.4, Béton préfabriqué: Constituants et exécution des travaux. Celles –ci énumèrent les exigences concernant les cures à des températures élevées, ainsi que l'application et le contrôle de la chaleur pour le mûrissement accéléré du béton. [20].

On peut utiliser l'une des deux méthodes suivantes : une cure à la vapeur à la pression atmosphérique (dans le cas de structures coulées en place dans une enceinte ou pour les grands éléments préfabriqués) ou une cure à haute pression dans des autoclaves (pour des pièces plus petites). Seule la méthode de cure à la vapeur à la pression atmosphérique sera présentée ici.

Un cycle de cure à la vapeur comprend :

- (1) un délai initial avant l'exposition à la vapeur (préprise),
- (2) une période de montée en température,
- (3) une période de maintien de la température maximale à un niveau constant,
- (4) une période de diminution de la température (refroidissement).

Un cycle optimal de cure à la vapeur à pression atmosphérique est représenté à la figure II.9

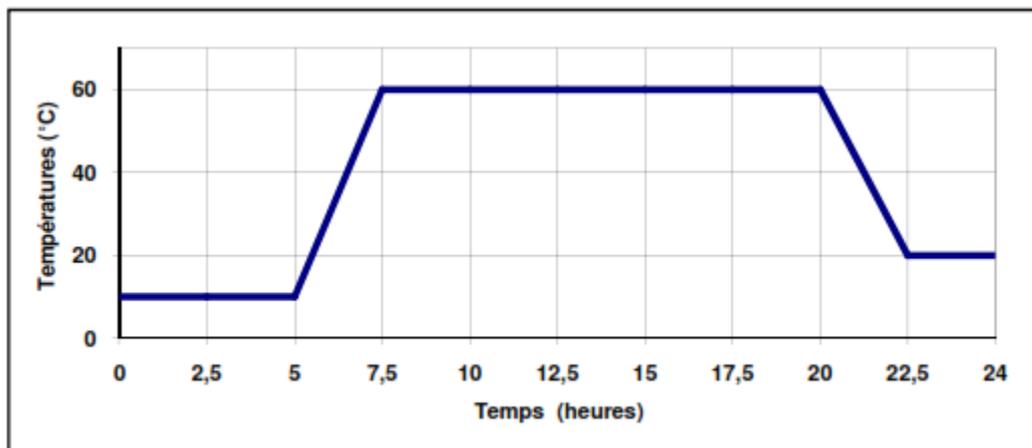


Figure II.9: Cycle type de la cure à la vapeur atmosphérique [20]

Avec :

- | | |
|---------------------------|---|
| 1 : Préprise | 3 à 5 heures (température de béton 21°C); |
| 2 : Montée de température | 2 ½ heures (10 à 20°C /h); |
| 3 : Palier | 6 à 12 heures (60°C). |

La cure à la vapeur à la pression atmosphérique se fait généralement dans des enceintes pour minimiser les pertes de chaleur et d'humidité. On utilise souvent des bâches où peinture noire qui absorbent les rayons solaires pour fabriquer ces enceintes. Il faut attendre la prise initiale du béton ou au moins trois heures après sa finition avant d'appliquer la vapeur pour permettre un certain durcissement du béton. Toutefois, un délai de trois à cinq heures avant l'injection de la vapeur permet d'obtenir une résistance initiale maximale, comme on le voit à la figure 1.13. La température de la vapeur dans l'enceinte doit être maintenue autour de 60°C jusqu'à l'obtention de la résistance souhaitée du béton. La résistance du béton n'augmente pas de façon significative lorsque la température maximale de la vapeur passe de 60°C à 70°C. Des températures de cure à la vapeur supérieures à 70°C doivent être évitées : elles ne sont pas économiques et peuvent causer des dommages.

Outre le gain précoce de résistance, la cure du béton à des températures voisines de 60°C réduit le risque de retrait au séchage et de fluage comparativement à un béton mûri à 23°C pendant 28 jours [21-22].

La norme CSA A23.4 classifie le type de mûrissement accéléré à appliquer aux éléments en béton selon les conditions ambiantes auxquelles ils seront exposés. Les catégories sont :

(a) « Catégorie sèche » ou (b) « catégorie humide ».

La « catégorie sèche » s'applique aux éléments de béton qui, après mûrissement ne seront pas soumis à un environnement humide en service. A moins que ces éléments ne contiennent de l'air entraîné, ils ne doivent non plus être exposés à un environnement humide pendant plus de trois mois avant leur mise en service.

La « catégorie humide » s'applique aux éléments de béton qui seront soumis à un environnement humide en service ou aux éléments sans air entraîné qui seront exposés à un environnement humide pendant plus de trois mois avant leur mise en service. Cette catégorie inclus par exemple: (a) les éléments externes d'édifices ou de structures qui sont exposés aux précipitations, à l'eau de surface ou à l'eau souterraine tels que les poutres de ponts, les dalles de toitures non protégées, les façades d'édifices, les murs de sous sols, les dormants de chemins de fer; (b) les éléments de construction internes soumis à des conditions humides tels que les piscines intérieurs et les parcs de stationnement; et (c) les éléments ou les parties d'éléments qui atteignent fréquemment le point de rosées tels que les cheminées ou les espaces internes dans les ponts .

Il faut éviter les réchauffements et refroidissements trop rapides pour prévenir les changements de volume dommageables. La norme CSA A23.4 exige que le taux de chauffage maximal à l'intérieur de l'enceinte de mûrissement des bétons de la « catégorie humide » et de la « catégorie

sèche » ne doit pas dépasser 20°C/heure. De la même manière, le taux de refroidissement maximal pour les deux catégories d'humidité est de 15°C/heure. Il doit être maintenu jusqu'à ce que la température du béton ne soit pas plus élevée que 20 °C au-dessus de la température ambiante à l'extérieur de l'enceinte. La température maximale du béton permise par la norme CSA A23.4 est de 70°C pour la « catégorie sèche » et de 60°C pour la « catégorie humide ». Il est recommandé que la température du béton n'excède pas 70°C, le maximum permis pour la « catégorie sèche », pour éviter une expansion tardive provoquée par la chaleur et une réduction excessive de la résistance ultime. La température du béton est normalement mesurée aux extrémités exposées de l'élément. La mesure de la température de l'air ne suffit pas puisque la chaleur d'hydratation peut aussi faire en sorte que la température du béton excède 70°C.

Lors du malaxage, la température du béton peut être augmentée par injection de vapeur dans le mélange, en même temps que l'eau de gâchage. Cette pratique visant à préchauffer les matériaux afin d'accélérer le mûrissement comporte des exigences différentes de celles émises pour la cure à la vapeur. Celle –ci est présentée dans la norme CSA A23.4 à la rubrique béton chauffé et à la figure II.10 du cycle du béton chauffé.

Il faut maintenir la température de la vapeur dans l'enceinte à sa valeur maximale jusqu'à ce que le béton ait atteint le niveau de résistance minimale à la compression désiré qui doit se situer aux environs de 100 bars (kg/cm^2). Le temps nécessaire pour atteindre cet objectif dépend du type de mélange et de la température de la vapeur dans l'enceinte. [20].

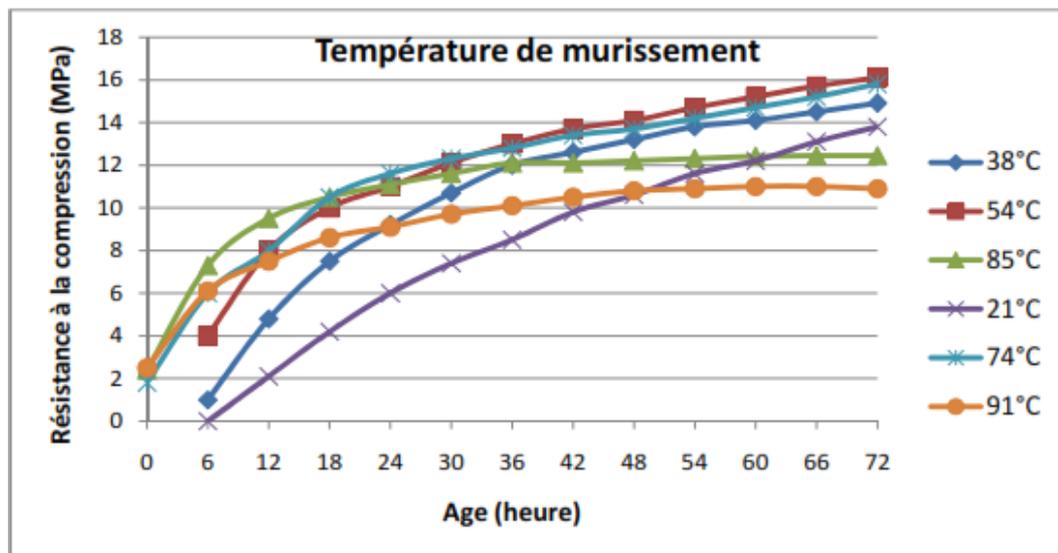


Figure II.10 : Résistance d'un béton traité à la vapeur à différentes températures ($E/C = 0.55$) [23]

II.4.1. Effet bénéfique de l'étuvage sur les résistances en compression au jeune âge

Pour assurer une résistance élevée au jeune âge, le choix du ciment se porte généralement sur un CEM I 42,5. Ce ciment doit avoir une finesse élevée ce qui assure une surface réactionnelle importante pour la réaction d'hydratation. Il faut aussi vérifier que le rapport molaire C_3S/C_2S soit le plus haut possible. Ces deux phases anhydres, majoritairement présentes dans le ciment Portland, sont les composés qui produisent le plus d'hydrates mécaniquement résistants. De plus, la cinétique d'hydratation du silicate tricalcique est plus rapide que celle de silicate bicalcique, donc un rapport élevé est un gage de réactivité importante [24].

D'autre part, le choix d'un étuvage optimisé est nécessaire. Généralement, il se décompose en une préprise, une montée constante en température et un palier de température maximale assez long. Il doit posséder une préprise pour assurer un développement de l'hydratation initiale en favorisant la dissolution des anhydres. Il ne faut pas que la montée en température soit trop forte pour ne pas bloquer trop précocement l'hydratation (limitée à 20°C/h).

Finalement, la température de palier ne doit pas être trop élevée afin de ne pas générer des effets secondaires néfastes comme la formation d'ettringite différée (limitée à 60°C en général).

II.4.2. Effet néfaste de l'étuvage sur les résistances en compression à long terme

Selon [25], la baisse de performances mécaniques à long terme imputable à l'étuvage peut s'expliquer par des causes chimiques, physiques et physico-chimiques.

Du point de vue chimique, l'accroissement de température entraîne une perturbation de la stabilité du système, ce qui engendre un déplacement de l'équilibre chimique entre la quantité d'anhydres et d'hydrates formés. Ce phénomène génère une limitation de la formation d'hydrates, ce qui peut expliquer une baisse des performances [26].

Ensuite, on peut citer les causes physiques au travers de la variation volumique différentielle des constituants. Lors de l'élévation de température, il existe une augmentation de la porosité qui s'accompagne d'une modification de la taille des pores. C'est en fait la conséquence de la répartition des hydrates dans l'espace qui est différente en comparaison à une maturation à température ambiante.

Finalement, il faut citer la théorie de [27] qui traite du développement de l'hydratation lors d'un étuvage en considérant des causes physico-chimiques. La baisse des performances mécaniques à 28 jours serait due à une répartition non uniforme des hydrates ce qui entraîne une hétérogénéité de la structure. Lors d'une accélération de la cinétique de l'hydratation par la température, la diffusion n'est pas possible à une certaine distance des anhydres à cause d'une faible diffusivité des espèces dissoutes et à la faible solubilité des hydrates formés. Il en résulte la création d'une « coquille d'hydrates » entourant un cœur anhydre.

CONCLUSION

La recherche bibliographique sur le comportement thermomécanique du béton nous a permis de mettre en évidence certains phénomènes physiques qui peuvent apparaître notamment lors de l'élévation de la température du matériau lors du chauffage. Si l'étuvage est bénéfique à la réactivité de l'hydratation et donc aux performances mécaniques précoces, les performances à long terme s'en trouvent affectées. Le cycle d'étuvage doit résulter d'un compromis entre l'effet bénéfique au jeune âge et la limitation des effets néfastes, non désirés, à long terme. Le traitement thermique doit être absolument optimisé [28].

Le traitement thermique d'un béton frais est une technique qui permet: l'accélération des cadences par réduction du temps de prise, donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée surtout dans les usines de préfabrication, et le bétonnage par temps froid [29].

La technique de durcissement à la vapeur par l'énergie solaire est une technique efficace pour accélérer le durcissement des bétons, pour une bonne résistance et une grande économie d'énergie électrique. On peut dire que la résistance à la compression accrue au cours de la progression de la réaction d'hydratation s'accompagne d'une augmentation de la résistance à la flexion. Grâce aux résultats obtenus un gain de temps et plus courts délais de fabrication pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'air libre [30].

Le présent travail traite l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Caumette J. *Traitement thermique du béton par l'électrique*. Ed, Masson, Paris, 1990, 180 p.
- [2] B. Benammar, B. Mezghiche, S. Guettala. December 2013. *Influence of Atmospheric Steam Curing by Solar Energy on the Compressive and Flexural Strength of Concretes*. *Construction and Building Materials - Elsevier* vol. 49(12), pp. 511-518.
- [3]. B. Benammar, B. Mezghiche, S. Guettala. October 2014. *The Effect of Steam Curing by Solar Energy on the Compressive Strength of Concrete*. *Precast Concrete Elements - Precast Production Technology*. CPI (Concrete Plant International) magazine vol. 17(5), pp. 178-183. Place of publication: Cologne, Germany (ISSN:1437-9023).
- [4] Ramezani pour AA, Malhotra VM. *Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume*. *Cem Concr Compos* 1995;17(2):125-33.
- [5] Rabehi M, Mezghiche B, Guettala S. *Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth*. *Constr Build Mater* 2013;45(8):123-129.
- [6] Neville A-M., *Propriétés des bétons*, 2000, Paris, Editions Eyrolles, p. 345-350.
- [7] Kim J-K, Han S.H, Song Y.C. *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results*. *Cem Concr Res* 2002;32(7):1087-94.
- [8] Gallucci E, Xinyu Zhang, Scrivener K. *Influence of temperature on the microstructural development of concretes*. *Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B*. Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
- [9] Venuat.M 1964, *Durcissement accéléré du béton manufacturé*, Symposium Rilem, Moscou.
- [10] Caumette.J, 1990 : *Traitement thermique du béton par l'électricité*, Ed, Masson, paris.
- [11] Stefanov. B, 1982 : *Technologie des éléments en béton et béton armé*, Edition Vichaya Chkola, 1982, Kiev.
- [12] Acker.P fév. 1986 : *Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et applications aux ouvrages d'art : de nouveaux outils, pour une optimisation simultanée du coût et de la qualité*. *Annales de l'ITBTP*, n° 442, Série Béton 235, p. 62-77.
- [13] Sous la direction de Larrard .F ,2002: *construire en béton*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [14] Acker.P, 1998 : *Prise et durcissement des bétons, Les effets thermomécaniques, Béton hydraulique, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 2 235*.
- [15] Mamillan.M oct.1980 : *Préchauffage du béton : utilisation de la chaleur d'hydratation*. *Annales de l'ITBTP*, n° 387.
- [16] Darcemont.M, mars 1977 : *L'accélération du durcissement de produits en béton par traitement thermique*. CE-RIB, Monographie n° 9.
- [17] Jay.R et Caumette.J oct. 1981 : *L'électricité dans le traitement thermique du béton*. *Revue technique du bâtiment*, n° 86.
- [18] Mamillan.M, 1970 : *Recherches expérimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage*, *Annales de l'ITBTP (F) n°267 ET 268*.
- [19] Neville.A.M, 1992 : *Propriétés des Bétons*, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris
- [20] ACI Committee 517, *Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure*, ACI 517.2R 87, revised 1992, American Concrete Institute, Farmington Hills Michigan, 1992, 17
- [21] KILIEGER, PAUL, *Some Aspects of Durability and Volume Change of Concrete for prestressing*, Research
- [22] Tepponen, Pirjo, and Eriksson, Bo-Erik, „Damages in Concrete Railway Sleepers in Finland, “Nordic Concrete Research, Publication No.6, the Nordic Concrete Federation, Oslo, 1987
- [23] F.M LEA, *the Chemistry of cement and Concrete* (Arnold, London 1970).
- [24] Regourd M. Gautier E. « *Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré* » dans *Durcissement accéléré des bétons*, *Annales de l'ITBTP*, pp83-96, 1979.
- [25] Alexanderson J. « *Strength losses in heat cured concrete* » *Swedish Cement and concrete Institute* (43), p135, 1972.
- [26] Jalali S. Abyaneh M.Y. « *Prediction of final concrete strength in hot climates* » *Magazine of Concrete Research*, (47-173), pp291-297, 1995.
- [27] Verbeck G.J. Helmuth R.H. « *Structures and physical properties of cement pastes* » dans *The Cement Association of Japan (editeur) Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo (Japon), pp1-32, 1968.

[28] Turkel S. Alabas V. « *The effect of excessive steam curing on Portland composite cement. concrete* » CCR (35), pp405-411, 2005.

[29] Caumette J. *Traitement thermique du béton par l'électrique*. Ed, Masson, Paris, 1990, 180 p.

[30] Ben Khadda BEN AMMAR. *Effet de l'étuvage par énergie solaire sur les propriétés mécaniques, la déformabilité et la durabilité des bétons*. Thèse Doctorat en Sciences Soutenue publiquement le : 14 / 12 / 2014. Université Mohamed Khider – Biskra.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. INTRODUCTION

L'emploi judicieux des matériaux utilisés exige la connaissance de leurs diverses propriétés: physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur objectif.

III.2. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

III.2.1. FINES CALCAIRES

Les fines calcaires utilisés sont de couleur blanche et de nature essentiellement calcaire (Tableau III.1). Elles proviennent de la région de Laghouat obtenues par tamisage au tamis de 80 μm des déchets de concassage d'agrégats calcaires (Figure III.1).

Tableau III.1. Composition chimique du filler calcaire utilisé en (%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl	PAF
0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3



Figure III.1. Filler calcaire utilisé

Ces propriétés physiques sont regroupées dans le tableau III.2

Tableau III.2. Propriétés physiques des fines calcaires

Propriétés physiques	Fine calcaire
La masse volumique apparente (g/cm^3)	1,14
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2,70
Surface spécifique BLAINE SSB (cm^2/g)	5000

L'analyse par diffraction aux rayons X utilisant la méthode des poudres, trouve son principal emploi dans la détermination des minéraux. Chaque corps cristallin produit en effet un spectre ou diffractogramme X qui rend compte de sa structure interne et de la nature des minéraux. On peut considérer que tout diffractogramme X est une sorte "*d'empreinte digitale*" spécifique, qui permet de distinguer un minéral d'un autre.

A cet effet, nous avons analysé par diffraction aux rayons X les fillers calcaires, pour mettre en évidence sa nature minéralogique. Les analyses ont été faites au laboratoire de physique - *Université Amar Telidji Laghouat*. La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fillers calcaires. Les résultats de l'essai sont représentés sur la figure III.2 schématisant les différents composants minéralogiques.

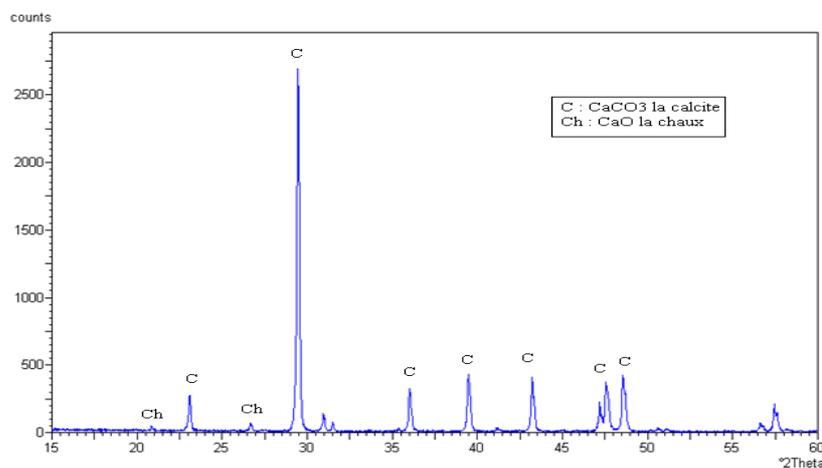


Figure III.2. *Diffractogramme X des fillers calcaires*

La figure III.2 montre que ces fines calcaires se composent en général de calcite (CaCO_3) et de chaux (CaO), ce qui montre que leur nature est essentiellement calcaire.

III.2.2. CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment Portland de classe 42,5 «CPA-CEM I 42,5» de la cimenterie de M'sila, il contient au moins (95%) de clinker (figure III.3). Le reste (5%) est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise. Ses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques sont données par le Tableau III.3.

Tableau III.3. Caractéristiques du ciment CPA-CEM I 42,5

Essais	Physiques		Composition chimique (%)	
	Consistance normale	%H ₂ O	25.0	SiO ₂
Temps de prise (mm)	Début	145	Al ₂ O ₃	5.10
	Fin	276	Fe ₂ O ₃	3.99
Expansion (mm)	Chaud	0.75	CaO	63.60
	Froid	-	MgO	1.44
Retrait (µm/m)	03 jours	210.28	K ₂ O	0.70
	07 jours	336.51	Na ₂ O	0.34
	28 jours	830.28	SO ₃	1.24
Gonflement (µm/m)	03 jours	0.0	CaO libre	0.57
	07 jours	0.0	Cl	-
	28 jours	0.0	Ins	-
Poids spécifique (g/cm ³)	3.10		P.F	1.18
Surface spécifique (cm ² /g)	3325		%Constituants	Minéraux du clinker
Résistance à la flexion (MPa)	02 jours	2.14	C ₃ S	52.13
	07 jours	7.22	C ₂ S	23.55
	28 jours	7.26	C ₃ A	6.76
Résistance à la compression (MPa)	02 jours	16.73	C ₄ AF	12.13
	07 jours	36.18	CaOI	-
	28 jours	47.93	Gypse	05
			Ajout	sans

La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de **Bogue** [1]. L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme [NFP 15-301] à savoir: % (MgO + CaO (libre)) < 5% et faible taux de SO₃.



Figure III.3. Ciment utilisé

III.2.3. EAU

L'eau utilisée est l'eau potable (*eau du robinet*).

III.2.4. SABLE

Le sable utilisé (0/5 mm) provient de la région de Djelfa. Il est à noter que la courbe granulométrique du sable s'inscrit dans le fuseau recommandé par le béton courant. L'analyse granulométrique est présentée sur la figure III.4. Est donnée dans le tableau III.4.

Tableau III.4: Analyse granulométrique du sable

<i>Ouvertures des mailles (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulé (g)</i>	<i>Refus cumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
5,000	0,00	0,00	0,00	100
2,500	190,00	190,00	9,50	90,50
1,250	210,00	400,00	20,00	80,00
0,630	480,00	880,00	44,00	56,00
0,315	610,00	1490,00	74,50	25,50
0,160	290,00	1780,00	89,00	11,00
0,080	120,00	1900,00	95,00	05,00
le fond	98,00	1998	99,90	00,10

III.2.4.1. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1440 kg/m³
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 2500 kg/m³
- ✓ Module de finesse = 2,37 (*sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités*).
- ✓ Equivalent de sable (ES à vue) = 73 (*sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante*).
- ✓ Equivalent de sable (ES piston) = 68

III.2.5. PIERRE CONCASSÉE

Nous avons utilisé des pierres concassées de fractions (7/15 mm) et (15/25 mm) de la région de Djelfa. La courbe granulométrique est présentée sur la figure III.4. Est donnée dans le tableau III.5.

Tableau III.5. Analyse granulométrique du gravier

<i>Ouvertures des mailles (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulé (g)</i>	<i>Refus cumulé (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
25,00	0,00	0,00	0,00	100
20,00	805,00	805,00	16,10	83,90
16,00	1915,00	2720,00	54,40	45,60
12,50	950,00	3670,00	73,40	26,60
10,00	753,00	4423,00	88,46	11,54
8,00	410,00	4833,00	96,66	03,34
6,30	160,00	4993,00	99,86	00,14
5,00	4,00	4997,00	99,94	00,06
le fond	3,00	5000,00	100,00	0

III.2.5.1. Propriétés physiques

- ✓ Masse volumique apparente = 1420 kg/m³
- ✓ Masse volumique des grains (absolue) = 2610 kg/m³
- ✓ Coefficient de Los Angeles = 21% (résistance à la fragmentation aux chocs acceptable).

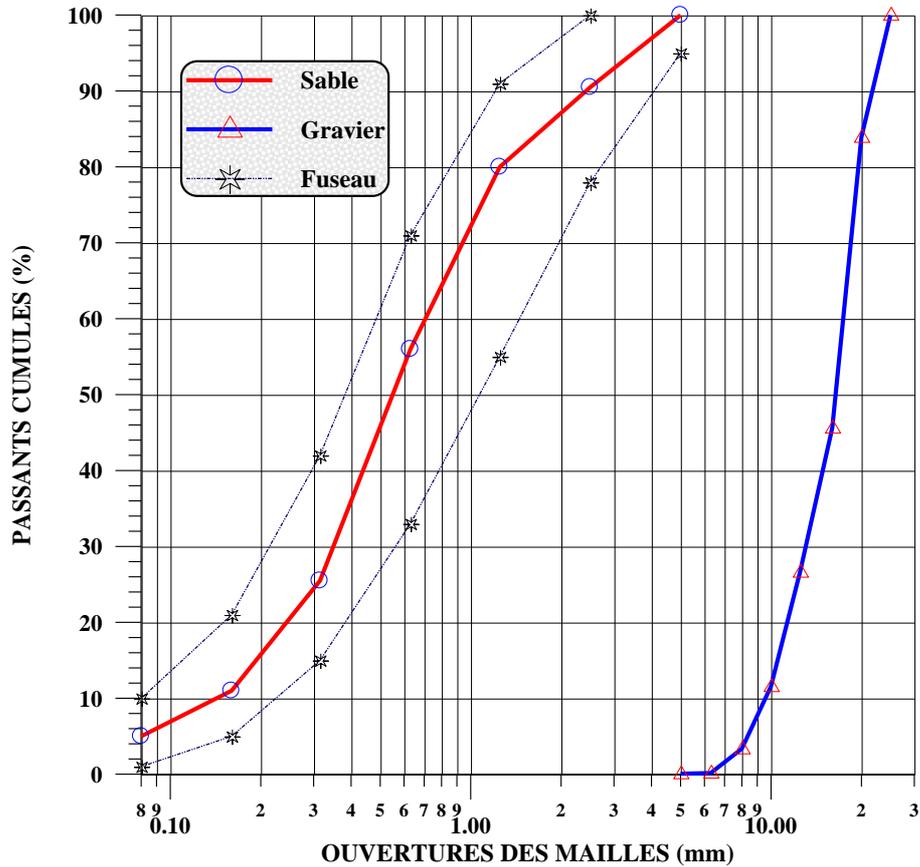


Figure III.4. Courbe granulométrique du sable et gravier

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de bases utilisés dans l'étude expérimentale. Vu les résultats obtenus, ces matériaux sont satisfaisant aux conditions requises pour être utilisés pour la recherche d'un béton de propriétés rhéologiques et mécaniques acceptables.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX & INTERPRETATION

IV.1. INTRODUCTION

Le béton à base du ciment prémélangé au filler calcaire est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte de ciment hydratée. Ce chapitre a porté sur l'étude de l'optimisation de la formulation de béton. En premier lieu nous avons commencé par déterminer l'affaissement du béton. En deuxième lieu, nous avons évalué l'influence de l'addition du filler calcaire au ciment, sur la résistance à la compression avec l'âge des bétons en fonction de la teneur du ciment en filler calcaire. Enfin, nous avons étudié l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires.

IV.2. FORMULATION DE BÉTON

L'optimisation de la formulation de béton s'appuie sur plusieurs critères qui doivent faire l'objet d'un compromis: la consistance, la résistance, la durabilité et l'économie [2].

La qualité du béton est étroitement liée à la qualité et le choix judicieux des proportions intime des constituants [3]. Une formulation de béton durable dans son environnement, c'est essentiellement un béton qui soit le plus possible compact et faiblement perméable.

Les méthodes de formulation des bétons courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une consistance fixée [3]. Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition du béton, on a utilisé celle qui semble être la moins connue. C'est la méthode de **B. Scramtaiv**. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé [4].

IV.2.1. Données de base

- ✧ D_{max} (diamètre des granulats).
- ✧ Résistance à la compression après 28 jours.
- ✧ Ouvrabilité (AC).
- ✧ Caractéristiques techniques des matières premières.

IV.2.2. Méthode de calcul

- * Détermination du dosage en eau

$$E = f(AC, D_{max}, \text{Nature des granulats})$$

- * Calcul du rapport C/E

Pour un béton courant: $C/E \leq 2.5$, pour béton plastique et fluide.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A \cdot R_c} + 0,5$$

Pour un béton de qualité: $C/E > 2.5$, pour béton fermé et très fermé.

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{A_1 \cdot R_c} - 0,5$$

R_b : la résistance à la compression à 28 jours de durcissement normal.

R_c : l'activité du ciment.

(A et A_1) : coefficients de qualité des matériaux utilisés (granulats et ciment)

- Bonne qualité: $A = 0,65$, $A_1 = 0,43$
- Qualité moyenne: $A = 0,60$, $A_1 = 0,40$
- Mauvaise qualité: $A = 0,55$, $A_1 = 0,37$

- * Calcul du dosage en ciment $C = C/E \times E$

- * Calcul du dosage en agrégats (pierres concassées) $G = 35G_1 + 65G_2$

G_1 : (7/15) et G_2 : (15/25)

$$G = \frac{1000}{V_v \cdot \frac{\alpha}{\rho_{app}^G} + \frac{1}{\rho_{abs}^G}}$$

V_v : porosité des pierres concassées. $V_v = 1 - \frac{\gamma_{app}}{\rho_{abs}}$

Coefficient d'écartement de grains $\alpha = 1.24$ (**d'après l'abaque**).

- * Calcul du dosage en sable

$$S = \left[1000 - \left(\frac{G}{\rho_{abs}^G} + \frac{C}{\rho_{abs}^C} + E \right) \right] \cdot \rho_{abs}^S$$

IV.2.3. Composition

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne $R_{b28j} = 36$ Mpa et dont la consistance est telle que son affaissement au cône soit de 7 cm. Dans tous les essais le rapport $E/L \geq 0.4$, $A = 0.6$, $D_{max} = 25$ mm et $S/G = 0.42$. Les compositions des trois mélanges de bétons sont reportées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Compositions des bétons en (kg/m³)

<i>Bétons</i>	<i>BO</i>	<i>B10</i>	<i>B20</i>
<i>Constituants</i>			
<i>Eau/liant</i>	0.52	0.49	0.46
<i>Ciment</i>	350	315	280
<i>Sable 0/5</i>	538	538	538
<i>Gravier 7/15</i>	446	446	446
<i>Gravier 15/25</i>	828	828	828
<i>10% FC</i>	-	35	-
<i>20% FC</i>	-	-	70

BO : béton ordinaire à base de CRS

B10 : béton à base de CRS + 10% FC

B20 : béton à base de CRS + 20% FC

IV.3. CONSISTANCE DU BETON A L'ETAT FRAIS

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance qui peut se définir comme la facilité de la mise en œuvre du béton. Le choix de l'essai de caractérisation de la consistance et de la classe de consistance visée est en fonction de sa facilité de mise en œuvre sur chantier et au laboratoire ainsi que sa fiabilité.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme [NF P 18-451] est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (*l'affaissement = 7 ± 0.5 cm*).

IV.4. RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DES BÉTONS

Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances en compression à 28 jours. La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé.

La résistance en compression à 28 jours est désignée par R_{c28j} . La résistance en compression est exprimée par le pouvoir de béton de résister à la destruction par l'action de contraintes dues à la charge de compression.

Le test de compression sur les échantillons cubes de béton (10×10×10 cm) a été effectuée conformément à la norme [NF P 18-406]. La résistance à la compression en (Mpa) est le rapport de la charge de rupture (Newton) par la section transversale de l'échantillon (mm²) [5].

IV.4.1. Influence du filler calcaire en fonction du temps et de leurs teneurs

On a confectionné trois sortes de bétons (béton ordinaire BO, B10 et B20), chaque série comprend trois échantillons. Nous avons fixé le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés afin de mener une étude rationnelle.

Les échantillons ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur (malaxage, mise en œuvre et serrage). Les moules ont été couverts du plastique pour éviter l'évaporation de l'eau puis démoulés après 24 heures. Les échantillons ont été conservés à l'eau (*cure humide*).

La résistance à la compression augmente dans le milieu humide, du fait que ce dernier empêche l'évaporation de l'eau du béton durant son durcissement, et permet la continuité des réactions d'hydratation (*favorise la formation d'une plus grande quantité d'hydrates*) qui viennent remplir et fractionner surtout la porosité capillaire et par la suite le développement de la résistance à la compression.

Les résultats obtenus des résistances à 7 et 28 jours, sont illustrés sur les figures ci-dessous:

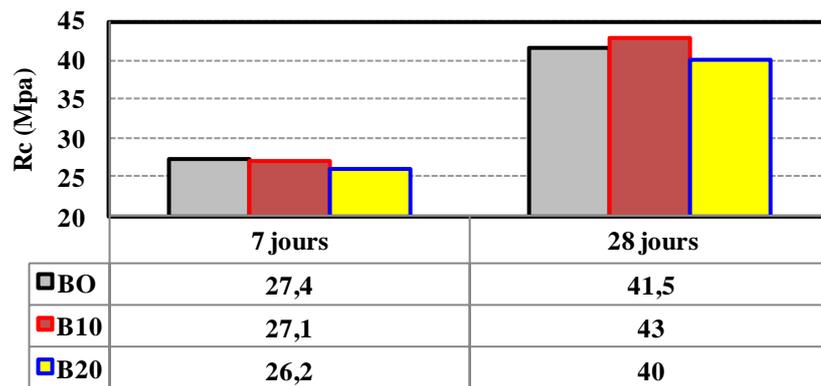


Figure IV.1 : Résistance à la compression des bétons en fonction du temps

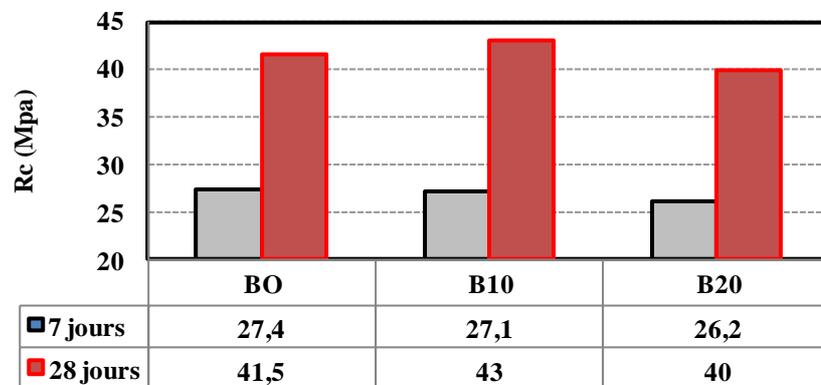


Figure IV.2 : Résistance à la compression des bétons en fonction de la teneur du ciment en FC

Interprétation et discussion

On remarque que, pour tous les bétons la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps en présence d'une humidité suffisante.

L'évolution des résistances en fonction de l'âge montre que pendant les sept premiers jours, les résistances sont faibles pour tous les échantillons, tandis que pour celles de 28 jours, les résistances augmentent remarquablement (figure IV.1). Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment ; l'effet physique des fillers calcaires, l'effet accélérateur de l'hydratation et l'effet chimique par réaction avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates.

Les résultats obtenus montrent que le remplacement d'une partie du ciment par les fillers calcaires peut améliorer de manière sensible la résistance à la compression des bétons, traduisant ainsi l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire:

Effet physique (granulaire): d'une part un rôle de remplissage en corrigeant la granulométrie des éléments fins du ciment pour combler les vides intergranulaires [6] et, d'autre part, un rôle rhéologique par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci. Ce qui est en accord avec *Guemmadi et al.* [7].

Effet physico-chimique (microstructural): engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement. C'est-à-dire un processus physique qui dépend de la quantité et de la finesse du FC, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment et agit sur l'évolution des résistances en compression aux jeunes âges. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par *Care et al.* [8].

Effet chimique: l'addition calcaire n'est pas totalement inerte puisqu'elle réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former des carboaluminates. Ce qui est en accord avec *Cyr et al.* [9].

D'autres auteurs ont aussi retenu que les fillers calcaires de même nature que les granulats modifient le comportement mécanique du composite, en améliorant notamment l'adhérence entre la pâte et les granulats, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système [10].

Certes que l'adhérence est une propriété qui n'est pas forcément évaluée par la résistance mécanique à la compression mais cette dernière permet d'avoir une idée d'après l'approche de **De Larrard** [6].

Nous constatons, d'après les résultats obtenus (figure IV.2), que la résistance à la compression, montre que le béton B10 est clairement supérieur aux bétons BO et B20.

$$R_{c28j} \{B10\} = 1,04 \times R_{c28j} \{BO\}$$

$$R_{c28j} \{B10\} = 1,08 \times R_{c28j} \{B20\}$$

En ajoutant 20% FC par rapport à la masse totale du ciment, on obtient une résistance en compression à 28 jours presque comparable à celle d'un béton ordinaire (BO). Ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton.

On peut observer qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 10% du FC est supérieure à celle du béton ordinaire. Le filler calcaire joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.

IV.4.2. L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire

Il s'agit dans cette partie, d'évaluer à travers des expériences l'influence de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires (FC) est de résoudre deux problématiques, la première est **d'accélérer le durcissement du béton frais**. La deuxième est **d'utiliser l'énergie solaire**, non polluante répondant aux exigences de la politique du développement durable.

Notre étude consiste à enregistrer d'abord les températures maximales à l'air libre à l'aide d'un thermomètre et dans l'enceinte d'étuvage exposée au rayonnement solaire (figure IV.3) pendant 2 mois (**du 01 Avril au 31 Mai 2016**), la moyenne de ces enregistrements est :

$$T^{\circ}_{Moy} (T_{max} \text{ à l'air libre}) = 28^{\circ}\text{C} ;$$

$$T^{\circ}_{Moy} (T_{max} \text{ dans l'enceinte d'étuvage}) = 35^{\circ}\text{C} ;$$

Donc le coefficient de température moyenne est $K = 1.25$.

$$T^{\circ} \text{ dans enceinte d'étuvage} = K \times T^{\circ} \text{ à l'air libre}$$

Sur la base des résultats déduits, on choisit le cycle d'étuvage : (3×8×3) avec un palier de température maximale (35°C) comme le montre la figure IV.4.



Figure IV.3. Enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires

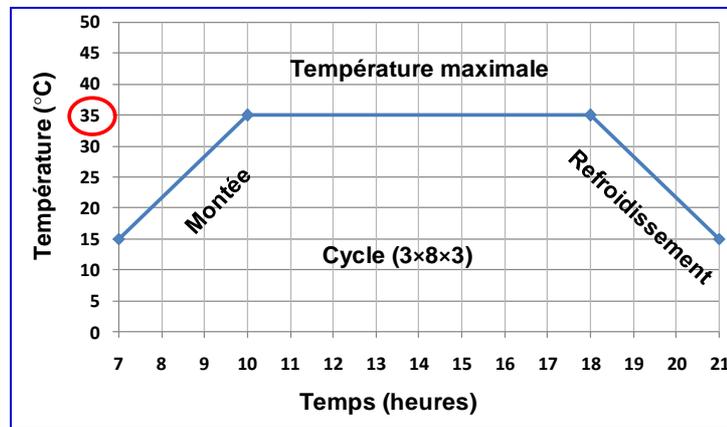


Figure IV.4. Cycle d'étuvage (3×8×3)

Les compositions du béton précédentes (BO, B10 et B20) ont subies une accélération de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire selon le cycle d'étuvage (3×8×3). Après malaxage et moulage du béton, les éprouvettes sont laissées dans le laboratoire à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ couverts du plastique pour éviter l'évaporation de l'eau pendant 20 heures. Après démoulage, les échantillons ont été introduits dans l'enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires à 7 h du matin, muni d'un thermomètre pour surveiller la température, dès que la température atteint 35°C à 10 h pendant 8 heures à une vitesse de montée de température de $6.67^\circ\text{C}/\text{heure}$, ce qui est souhaitable. À 18 h, nous laissons l'enceinte pour refroidir pendant 3 heures.

- ❖ En premier lieu, les essais de compression sont effectués après 1, 2, 3 et 7 jours d'étuvage à 35°C .

- ❖ Par la suite, après 1 jour d'étuvage à 35°C, les échantillons ont été conservés à l'eau jusqu'à le jour de l'essai. Les essais de compression sont effectués après 3 et 7 jours de durcissement dans l'eau des échantillons étuvés.

Les résultats obtenus des résistances à la compression à 1, 2, 3 et 7 jours d'étuvage à 35°C, sont illustrés sur les figures ci-dessous:

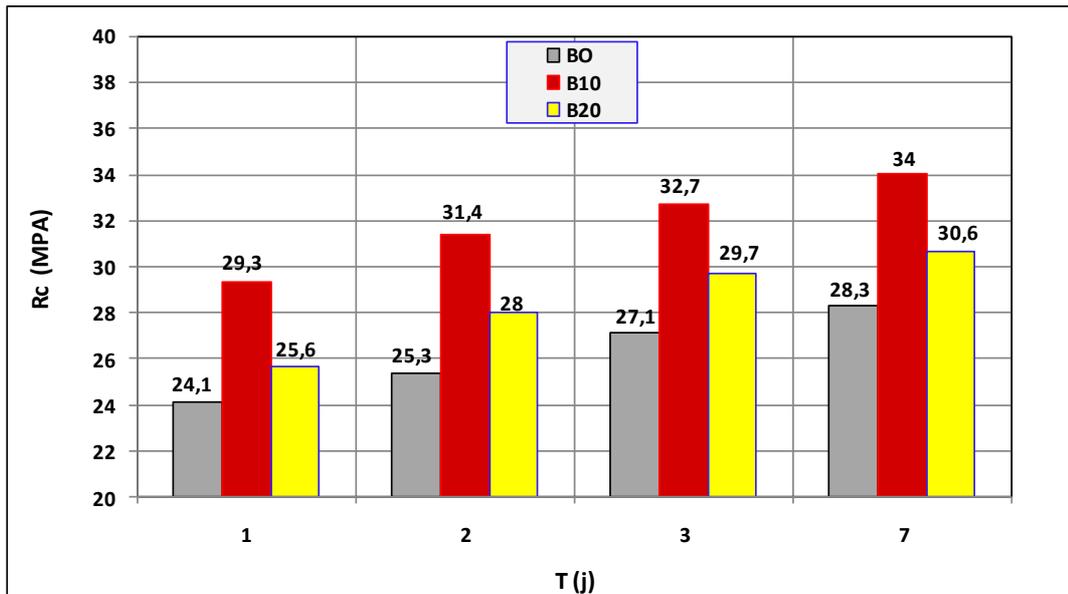


Figure IV.5. L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur le développement de la résistance à la compression des bétons

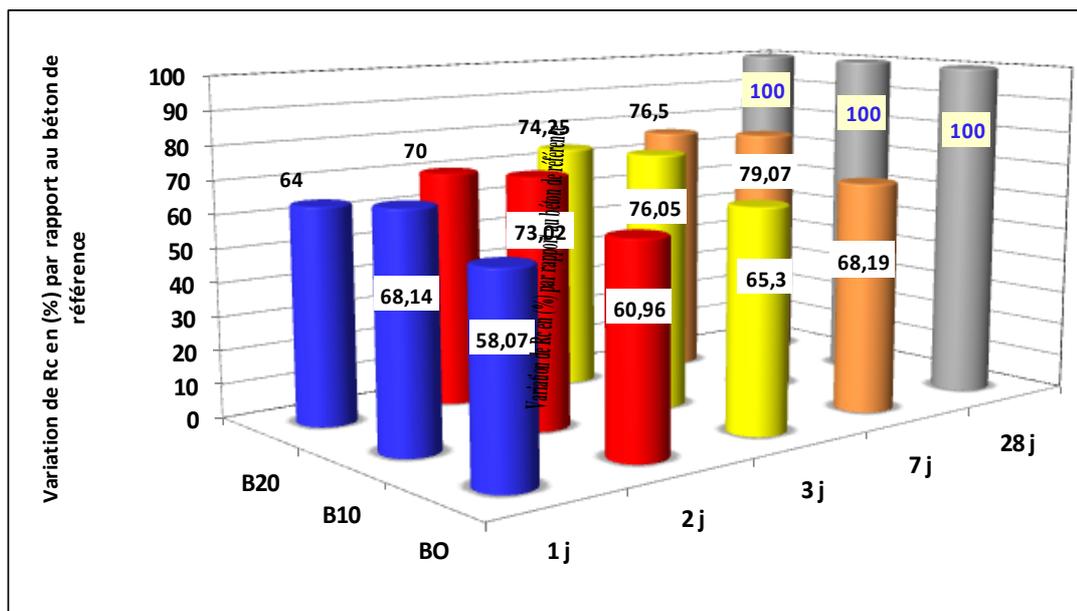


Figure IV.6. Variation de la résistance à la compression des bétons en (%) par rapport au béton de référence en fonction de la teneur du ciment en FC

Interprétation et discussion

A partir des résultats obtenus, on a pu construire des graphiques présentant l'évolution dans le temps (à jeune âge) de la résistance à la compression des bétons subits une accélération de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire.

On remarque que, pour tous les bétons la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge (figure IV.5). Les résultats présentés sur la figure IV.5, montre que l'utilisation de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire améliore la résistance à la compression des bétons par rapport au durcissement à l'eau, pendant les sept premiers jours de durcissement. Cela est dû à la condensation de la vapeur d'eau qui favorise l'humidification initiale et le développement plus rapide du phénomène d'hydratation du ciment, ce qui accélère d'une part la croissance des produits d'hydratations (notamment le C-S-H et la portlandite C-H) au sein du béton et, d'autre part, la prise et le durcissement du béton ce qui permet un décoffrage rapide à court terme, se traduisant par un gain accéléré de la résistance à la compression au jeune âge. Les résultats avancés rejoignent globalement les résultats obtenus par **Benammar et al.** [11].

$$R_{c7j} \{BO\} \text{ durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire} = \mathbf{1,03} \times R_{c7j} \{BO\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

$$R_{c7j} \{B10\} \text{ durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire} = \mathbf{1,25} \times R_{c7j} \{B10\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

$$R_{c7j} \{B20\} \text{ durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire} = \mathbf{1,17} \times R_{c7j} \{B20\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

Concernant l'influence du FC sous l'étuvage à 35°C, on peut observer qu'au bout de 7 jours, la résistance en compression des bétons (B10 et B20) est supérieure à celle du béton de référence (BO). Le filler calcaire joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.

D'après la figure IV.6, on analyse nettement que l'augmentation de la résistance du BO à 1, 2, 3 et 7 jours d'étuvage à 35°C, par rapport à celle à 28 jours de durcissement à l'eau, est de l'ordre de (**58%, 61%, 65% et 68%**) respectivement ; l'augmentation de résistance des bétons à 10 et 20% du FC et d'environ (**68%,73%, 76% et 79%**) et (**64%,70%,74% et 76.5%**) respectivement, ce qui traduit le rôle chimique joué par le filler calcaire.

Pour 01 jour d'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire à 35°C (08 h de chauffage), les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

$$R_{c1j} \{BO\} = \mathbf{0.58} \times R_{c28j} \{BO\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

$$R_{c1j} \{B10\} = \mathbf{0.68} \times R_{c28j} \{B10\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

$$R_{c1j} \{B20\} = \mathbf{0.64} \times R_{c28j} \{B20\} \text{ durcissement à l'eau.}$$

En second lieu, après 1 jour d'étuvage à 35°C, les échantillons ont été conservés à l'eau jusqu'au jour de l'essai. Les essais de compression sont effectués après 3 et 7 jours de durcissement dans l'eau des échantillons étuvés. *Les résultats obtenus, sont illustrés sur les figures ci-dessous:*

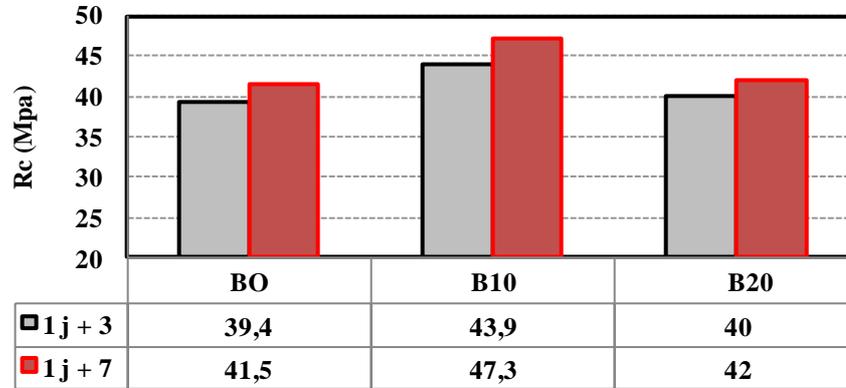


Figure IV.7 : Résistance à la compression des bétons (durcissement à l'eau de 3 et 7 jours après étuvage d'un jour à 35°C)

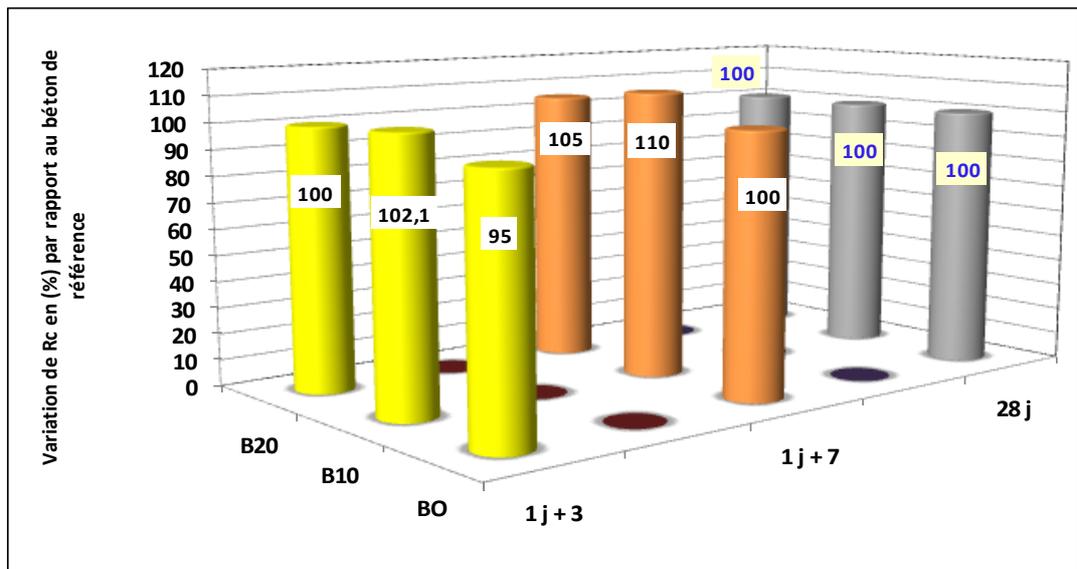


Figure IV.8. Variation de la résistance à la compression des bétons en (%) par rapport au béton de référence (durcissement à l'eau de 3 et 7 jours après étuvage d'un jour à 35°C)

Interprétation et discussion

L'étuvage à 35°C avec un cycle de (3 h + 8 h + 3 h) prolongé d'un durcissement de 3 jours à l'eau: les résistances des bétons (BO, B10 et B20) est de l'ordre de (39.4, 43.9 et 40 Mpa) respectivement, qui présente (95, 102 et 100%) de la résistance en compression du même béton durci dans l'eau à 28 jours. *Prolongé d'un durcissement de 7 jours à l'eau:* les résistances des bétons (BO, B10 et B20) est de l'ordre de (41.5, 47.3 et 42 Mpa) respectivement, qui présente (100, 110 et 105%) de la résistance en compression du même béton durci dans l'eau à 28 jours.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

Pour le béton (BO):

- ✓ 1 jour d'étuvage à 35°C et 7 jours de durcissement à l'eau on atteint la résistance en compression du même béton durci dans l'eau à 28 jours.

Pour les bétons (B10 et B20):

- ✓ 1 jour d'étuvage à 35°C et 3 jours de durcissement à l'eau on atteint la résistance en compression du même béton durci dans l'eau à 28 jours. Cela nous donne un gain de temps et plus courts délais de fabrication.
- ✓ 1 jour d'étuvage à 35°C et 7 jours de durcissement à l'eau, la résistance acquise est plus élevée que celle obtenue à partir d'un durcissement dans l'eau à 28 jours. A partir des résultats obtenus on a confirmé la participation de l'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire à l'amélioration de la résistance à la compression des bétons contenant des fillers calcaires.

Les résultats des essais indiquent l'effet bénéfique de cette procédure de durcissement pour obtenir une résistance à la compression élevée, dans les premiers jours de durcissement. Un gain de temps et plus courts délais de fabrication. Ainsi, il est possible de conclure que l'utilisation de l'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire est très bénéfique pour la production d'éléments préfabriqués en béton.

CONCLUSION

A la lumière des essais réalisés, cette étude nous a permis d'extraire certains nombres de points majeurs méritent d'être soulignés:

- La présence du FC accélère la réaction d'hydratation du ciment. Cet effet accélérateur sur l'hydratation, combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse, l'effet rhéologique et l'effet chimique, peut conduire à de meilleures résistances en compression des bétons.
- Les résultats ont démontré que jusqu'à 20% FC pour remplacer le ciment peut être utilisé avec une finesse de 5000 cm²/g sans affecter négativement la résistance à la compression du béton, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.
- En ajoutant 20% FC par rapport à la masse totale du ciment, on obtient une résistance en compression à 28 jours presque comparable à celle d'un béton ordinaire (BO). Ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton.
- L'utilisation de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire améliore la résistance à la compression des bétons par rapport au durcissement à l'eau, pendant les sept premiers jours de durcissement. Cela est dû à la condensation de la vapeur d'eau qui favorise l'humidification initiale et le développement plus rapide du phénomène d'hydratation du ciment, ce qui accélère d'une part la croissance des produits d'hydratations (notamment le C-S-H et la portlandite C-H) au sein du béton et, d'autre part, la prise et le durcissement du béton ce qui permet un décoffrage rapide à court terme, se traduisant par un gain accéléré de la résistance à la compression au jeune âge. Ce qui est en accord avec *Benammar et al.* [11].
- Concernant l'influence du FC sous l'étuvage à 35°C, on peut observer qu'au bout de 7 jours, la résistance en compression des bétons (B10 et B20) est supérieure à celle du béton de référence (BO). Le filler calcaire joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.
- Un gain de temps pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'eau après étuvage d'un jour prolongé de 3 jours de durcissement à l'eau pour les bétons (B10 et B20); et prolongé de 7 jours de durcissement à l'eau pour le béton (BO).

- Pour les bétons (B10 et B20) : 1 jour d'étuvage à 35°C et 7 jours de durcissement à l'eau, la résistance acquise est plus élevée que celle obtenue à partir d'un durcissement dans l'eau à 28 jours. A partir des résultats obtenus on a confirmé la participation de l'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire à l'amélioration de la résistance à la compression des bétons contenant des fillers calcaires.
- La technique d'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire est une technique efficace pour le durcissement accéléré des bétons, pour obtenir une résistance à la compression élevée et une grande économie d'énergie électrique pour produire les éléments de bétons préfabriqués.

CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- L'industrie des matériaux de constructions issus des carrières est toujours accompagnée par des produits secondaires (fillers calcaires) ou des déchets qui ont une incidence directe sur l'environnement et affecte la qualité des sables. La meilleure façon de minimiser leur impact sur l'environnement et de trouver un moyen de les réutiliser d'une manière bénéfique. La valorisation des sous produits de carrière permet non seulement de concourir à la préservation de l'environnement, mais elle constitue également un champ de recherche attrayant qui entre à la fois dans le cadre général des traitements de déchets solides et de l'élaboration des liants hydrauliques plus économiques.
- A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du ciment prémélangé au filler calcaire est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, améliorer les résistances en compression des bétons sans augmentation notable des coûts.
- Le filler calcaire joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.
- Les résistances à jeune âge se développent à cause de *l'accélération de l'hydratation* du ciment résulte essentiellement de deux effets: *un effet physico-chimique du FC* combinée à *l'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire*, et le troisième effet physique est *l'effet granulaire* ; tandis que celles à moyen terme se développent grâce à *l'effet chimique* par réaction avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates.
- Le durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire est un excellent moyen pour permet un décoffrage rapide à court terme se traduisant par un gain accéléré de résistance en compression, accélère les réactions d'hydratation du ciment (*une hydratation initiale rapide*), l'accélération des cadences par réduction du temps de prise, donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée surtout dans les usines de préfabrication, ainsi que le bétonnage par temps froid.

PERSPECTIVES

Pour compléter ce travail nous recommandons de:

- ✓ Faire des analyses au microscope électronique à balayage pour déterminer la morphologie des hydrates formés.
- ✓ Étudier l'interaction ciment prémélangé au filler calcaire / superplastifiant.
- ✓ Étudier l'influence de l'étuvage à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la durabilité des bétons.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. BOGUE R.H., «Chemistry of Portland cement». (New York, Reinhold), 1955, 790.
- [2]. DENIS TREMBLAY., «Béton de ciment, modulo éditeur», Mont Réal, Québec, Canada, 1983.
- [3]. BARON J. & OLLIVIER J.P., «Les bétons, bases et données pour leur formulation». Editions Eyrolles, 1997, 522.
- [4]. MEZGHICHE B., «Technologie des bétons aux laitiers basiques pour R.A.D.P». Résumé de thèse de PHD, Kiev, 169, 1989.
- [5]. MEZGHICHE B., «Les essais de laboratoire des matériaux de construction». Publication universitaire Biskra, 120, 2005.
- [6]. DE LARRARD F. «Structures granulaires et formulation des bétons». Traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34, Janvier 2000.
- [7] GUEMMADI Z., TOUMI B., HOUARI H., CLASTRES P. «Amélioration des performances des bétons par les ajouts de fines calcaires». Séminaire International de Géomatériaux GEOMAT'02. Université de M'sila - Algérie, les 10-11 Mars 2003.
- [8] CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F., CHARONNAT Y. «Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique». LCPC, Ouvrages d'art OA 33. Février 2002.
- [9] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E. «Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength». Cement and concrete research Vol. 36(2), pp. 264-277, 2006.
- [10]. ACHOUR T., LECOMTE A., BEN OUEZDOU M., MENSİ R., JOUDI I. «Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat ; Exemples Tunisiens». Materials and structures, 41, 815-830. 2008.
- [11]. BENAMMAR B., MEZGHICHE B., GUETTALA S. «Influence of Atmospheric Steam Curing by Solar Energy on the Compressive and Flexural Strength of Concretes». Construction and Building Materials - Elsevier vol. 49(12), pp. 511-518. 2013.

ANNEXE



Echantillons de béton



La presse hydraulique



Enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires



Bétonnière



Filler calcaire utilisé



Etuve