

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

BELABASSI Dalila & DJERAF Linda Youssra

Thème

ELABORATION ET CARACTERISATION D'UNE BRIQUE EMPILABLE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MAZA Mekki	MCA	Président
RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Encadreur
BELOUADAH Messaouda	MCA	Examineur
TEBBAL Nadia	MCA	Co Encadreur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GC/...../2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

قال الله تعالى "يرفع الله الذين آمنوا منكم والذين أوتوا العلم درجات"

الحمد لله بادئ ذي البدء أما بعد :

أهدي نجاحي إلى كل من أحمل اسمه بكل فخر إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهل لي طريق العلم إلى عمودي الفقري أبي حفظك الله ورعاك دمت لي سند لا يميل .

إلى من كان دعاؤها سر نجاحي إلى من حاكت سعادتي بخيوط منسوجة من قلبها ، إلى من أعطت دون مقابل واجزلت بعطائها إلى ملاكي في الحياة إلى من ضحت بنفسها ووقتها وجهودها وكل ما تملك من أجل وصولنا لدرجات أعلى إلى مليكتي أمي.

إلى توأمي كريم وجميع إخوتي ، ياسين، سعاد زهية، حمزة، حليلة، إلى زوجة أخي أميرة ماني . وإلى جميع من يحمل لقب بلعاسي .

إلى صديقاتي اللواتي امضيت معهن أحلى أيام العمر: بسمة محذب, أميمة بن جدو , وعبد الحفيظ إيمان مي

إلى كل الاساتذة والمعلمين الذين بفضلهم وصلت إلى ما أنا عليه الآن.

إلى جميع زملائي وزميلاتي طيلة مسيرتي الدراسية.

وإلى دفعة 2022 .

*They say a person needs just three things to be truly happy in this world:
someone to love, something to do, and something to hope for.*

إهداء

قال تعالى (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

الهي لا يطيب الليل إلا بشرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك

ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة إلى نبي الرحمة ونور العالمين

صلى الله على صاحب الشفاعة سيدنا محمد النبي الكريم وعلى اله وصحبه الميامين ومن تبعهم بالإحسان إلى يوم

الدين

الحمد لله الذي وفقني لتتأمين هذه الخطوة في مسيرتي الدراسية بمذكرتي هذه ثمرة الجهد والنجاح

أهدي نجاحي إلى من رزقه الله بالهبة والوقار إلى من علمني العطاء بدون انتظار إلى من أحمل اسمه بكل افتخار

أبي الغالي

إلى نبع الحنان التي وصفها يعجز اللسان بطيب الكلام إلى تاج الرأس والوسام إلى من يزورني طيفها في كل منام

إلى من صاحبنتني بالمعروف وتصاحبني منذ عقود الزمان

أمي العزيزة

إلى من حبهم يجري في العروق ويهيج بذكرهم الفؤاد وحنانهم بلسم الجراح

الزوج الكريم وإخوتي الأعزاء هشام مولود ومحمد

إلى صغيرة العائلة وملاكي الصغير في الحياة ملك

إلى معنى الحب وبسمة الحنان أختي الكبيرة أمال

إلى من سرنا سويًا ونحن نشق الطريق معًا نحو النجاح والإبداع إلى رفيقات المشوار

سامية مريم زهيرة مروى وجميع الصديقات بدون استثناء

لكل العائلة الكريمة وكل من شجعني في التميز والنجاح وكان سببًا في تحفيزي

إلى كل الاساتذة والمعلمين الذين بفضلهم وصلت إلى ما أنا عليه الآن خاصة الأستاذة سعودية فتيحة

وإلى دفعة 2022

أهدي هذا العمل المتواضع راجية من المولى عز وجل أن يجد القبول والنجاح

*They say a person needs just three things to be truly happy in this world:
someone to love, something to do, and something to hope for.*

REMERCIEMENTS

Loué soit Dieu, qui nous a accordé le succès et la constance, nous a accordé la persévérance et nous a aidés à terminer ce travail après avoir persévéré à mettre des points sur les lettres et à révéler ce qui se cache derrière le rideau de la science et de la connaissance. Ce sont nos mots épars, nous les chuchotons à l'oreille de chacun qui ouvre ces mots pour emporter avec lui ce qu'il veut et désire et critique ce qu'il refuse et veut. Ce sont aussi des mots de remerciement à tous ceux qui nous ont encouragés et insufflé en nous espoir et volonté.

*Nous adressons nos sincères remerciements au professeur superviseur, le Pr, **RAHMOUNI Zine El Abidine, Dr TEBBAL Nadia et Dr BELOUADAH Messaouda** qui nous a accompagnés tout au long de cette recherche et nous a fourni des informations et des conseils précieux.*

Nous espérons que Dieu Tout-Puissant corrigera son erreur et atteindra son objectif. Que Dieu le récompense pour nous comme bon.

A tous les professeurs tout au long du parcours universitaire et à tous les personnels de l'administration et des transports

*Remerciements particuliers à **OMRI Imane Yamina** pour son soutien, et que Dieu la protégé*

*Remerciements particuliers à **SAOUDI Fatiha** pour son soutien, et que Dieu la protégé*

Enfin, nous ne manquons pas d'exprimer nos plus sincères salutations à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

Table des Matières

RESUME

Introduction générale2

Chapitre I Généralités sur les bétons

I.1 Introduction5

I.2 Classification des bétons6

I.3 Différents type de béton8

I.3.1 Les bétons auto plaçant (BAP)8

I.3.1.1 Concept du béton auto plaçant :8

I.3.1.2 Les avantage des bétons auto plaçant :8

I.3.1.3 Aspect empirique de la formulation des BAP :9

I.4 Les bétons à hautes performances10

I .4.1 Propriétés 10

I .4.1 .1 Les propriétés physiques 10

I .4.1. 2 Déformation des BHP:..... 10

I .4.1.3 Propriétés mécaniques : 11

I .4.2 Avantages des BHP 11

I.5. BETON FIBRE.....12

I.5.1 Caractéristiques et propriétés des BETONS FIBRES12

a) Amélioration des caractéristiques mécaniques12

b) Contrôle de la fissuration de retrait13

I.5.2 Types de fibres et propriétés13

I .5.2.1 Fibres métalliques :14

I.5.3 Avantages du béton fibré15

I.5.4 Applications15

I.6. Béton cellulaire VS parpaing : quels sont leurs avantages ?15

I.6.1 Ce qu'il faut savoir sur le parpaing16

I.6.1. 1 Les avantages du parpaing17

I.6.1.2 Les inconvénients du parpaing17

I.6.2 Ce qu'il faut savoir sur le béton cellulaire17

I.6.2.1 Les avantages du béton cellulaire18

I.6.2.2 Les inconvénients du béton cellulaire19

I.7.1.Caractéristiques du BFUP	19
I.7.2Autres systèmes et applications possibles pour le BFUP Joints pour dalles d’approches	21
I.8 Conclusions	23

CHAPITRE II LES AJOUTS CIMENTAIRES

.....	24
II.1. Généralités.....	25
II.2. Classification des ajouts minéraux.....	26
II.3 Les différents types d’ajouts	26
II.3.1 Les ajouts minéraux inertes.....	26
II.3.2. Filler calcaire :.....	27
II.3.3 Les ajouts minéraux actifs.....	27
II.4.Laitier cristallines:.....	27
II.4.1. Description générale du laitier cristallin:	27
II.5. Laitiers de hauts fourneaux:.....	29
II.5.1 Propriétés du laitier cristallin:	30
II.6.Le laitier granule (NF P 18-306):.....	31
II.7. Les fumées de silice	32
II. 7.1. Définition	32
II.7.2. Effet de la fumée de silice	32
II.8.Le Méta kaolin:	33
II.8.1.Définition du méta kaolin.....	34
II.8.2.Définition de kaolin:.....	34
II.8.3 Méthodes d'obtention du méta kaolin :	35
II .8.4.Traitement thermique du kaolin :	35
II.11 Conclusion.	36

CHAPITRE III Caractéristiques des matériaux utilisés de composition du béton

III.1. Introduction :.....	38
III.2.Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton :.....	38
III.2.1. Analyse granulométrique: (NFP 94-056).....	39
III.2.2. Caractéristiques physiques :.....	42
III.2.2.1. Masse volumique apparente : (NFEN 1097-6(2001)).....	42
III.2.2.2. Masse volumique absolue	43
III.2.2.3. Porosité des granulats: (NFEN 1097-3 Août 1998).....	44

III.2.2.4. Equivalent de sable: (NF EN 933-8+A1J UI LLET 2015)	44
III.2.2.5. TENEUR EN EAU : NF EN 1097-5	45
III.2.2.6. Détermination de la résistance par les essais non	46
III.2.2.7. Détermination de la composition du béton :	48
II .3 Les résultats obtenus des déterminations de la résistance par les essais non destructifs :	50

CHAPITRE IV RESULTAT ET INTERPRETATION

Introduction	54
IV. 1 Résultat des essais à l'état frais	55
IV.1.1. La masse volumique à l'état frais	55
IV.2. Résultat des essais à l'état durcis	56
IV.2.1. Effet de fibres :	56
IV.2.2. L'effet de laitier	56
IV.2.3. Comportement mécaniques (l'effet de sup).....	58
IV.2.4. L'effet de laitier :	59
IV.2.5. L'effet de fibre métallique:	60
IV.2.6. L'effet de pourcentage de fibre : 1% et 2% de fibre.....	62
IV.2.7. L'effet de dimension des granulats sur les propriétés de béton :	63
IV.2.8. La porosité et l'absorption	65
Conclusion générale	68
Référence Bibliographique	70
ANNEXE	76

Liste des Tableaux

Tableaux I. 1 propriétés de béton haute-performance BFUP	20
Tableaux II. 1 Classification des ajouts selon leur réactivité. [31].	26
Tableaux II. 2 Composition chimique du laitier granulé en Pourcentage	31
Tableaux III. 1 Caractéristiques des fibres métalliques	38
Tableaux III. 2 L'analyse granulométrique du gravier (3/8) mm	40
Tableaux III. 3 L'analyse granulométrique du gravier (8/16) mm	40
Tableaux III. 4 L'analyse granulométrique du sable	41
Tableaux III. 5 La masse volumique de gravier (8/16)mm.....	43
Tableaux III. 6 la masse volumique de gravier 8/16.....	43
Tableaux III. 7 Equivalent de sable	45
Tableaux III. 8 Teneur en eau	46
Tableaux III. 9 Degré absorption gravier.....	46
Tableaux III. 10 Les résultats de scléromètre et d' ultrason à 7 jours	50
Tableaux III. 11 Les résultats de scléromètre et d' ultrason à 28 jours	51
Tableaux III. 12 Les résultats de scléromètre et d' ultrason à 45 jours	52
Tableaux IV. 1 Mélange des bétons	54

Liste des figures

Fig. I. 1 Texture d'un béton fibré	13
Fig. I. 2 Géométrie des fibres métalliques.....	14
Fig. I. 3 un parpaing après formage dans sa forme définitive	16
Fig. I. 4 Représente un modèle de béton cellulaire et la méthode de sa construction.	18
Fig. I. 5 Taux de pénétration prévu de $C_t = 0,05 \%$	21
Fig. II. 1 Laitier cristallin	28
Fig. II. 2: Processus d'élaboration des différents types de laitiers	28
Fig. II. 3 Schéma de principe d'un haut fourneau.	29
Fig. II. 4 Laitiers d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et rugueuse.....	30
Fig. II. 5 Visualisation au microscope électronique à balayage (MEB) de laitiers d'aciérie électrique (grossissement x15).	31
Fig. II. 6 Fumée de silice au microscope.....	32
Fig. II. 7 Poudre de méta kaolin.	34
Fig. II. 8 Roche de kaolin.	34
Fig. II. 9 Courbe de transformation du kaolin en méta kaolin..	35
Fig. III. 1 Géométrie des fibres utilisées.....	39
Fig. III. 2 Courbe d'analyse granulométrique des granulats.....	41
Fig. III. 3 Calcul de la porosité	44
Fig. III. 4 abaque s donnant la résistance de compression en fonction de l'indice sclérométrique I_s ...	47
Fig. III. 5 Appareil d'auscultation sonique.	48
Fig. IV. 1 La masse volumique des bétons à l'état frais.....	55
Fig. IV. 2 La masse volumique des bétons fibrés a l'état durcis en fonction de temps	56
Fig. IV. 3 La masse volumique des bétons avec et sans laitier granulé a l'état durcis en fonction de temps	56
Fig. IV. 4 La Résistance à la compression	58
Fig. IV. 5 La Résistance à la flexion par traction	58
Fig. IV. 6 La Résistance à la a compression (composition T0'et T4)	59
Fig. IV. 7 Résistance à la flexion par traction flexion (composition T0'et T4)	59
Fig. IV. 8 La Résistance à la compression	60
Fig. IV. 9 La Résistance à la flexion par traction	60
Fig. IV. 10 La Résistance à la compression	62
Fig. IV. 11 La Résistance à la flexion par traction	62
Fig. IV. 12 La Résistance à la compression	63
Fig. IV. 13 La Résistance à la flexion par traction	64
Fig. IV. 14 La porosité et l'absorption	65

RESUME

L'industrie des matériaux de construction est en plein essor en Algérie. Pour cette raison, la plupart des recherches portent sur le développement de nouveaux composés cimentaires dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques et la durabilité des matériaux cimentaires. Le présent travail porte sur l'effet de l'incorporation de 10% de laitier sur les résistances mécaniques des briques cimentaires à base de fibre métallique et son influence sur le comportement mécanique.

Les propriétés étudiées incluent la résistance à la compression (28jours), la résistance à la rupture-traction (28 jours), l'absorption d'eau (28jours), vitesse d'impulsion ultrasonore-UPV (28 jours). Les résultats montrent que l'ajout d'une quantité de 10 % de laitier avec 1% fibre métallique améliore considérablement les propriétés mécaniques.

Mots clés : Brique, mortier, fibre métallique, comportement mécanique.

ملخص

تزدهر صناعة مواد البناء في الجزائر. لهذا السبب ، تركز معظم الأبحاث على تطوير مركبات اسمنتية جديدة بهدف تحسين خواصها الميكانيكية والفيزيائية ومتانة المواد الإسمنتية. يركز هذا العمل على تأثير دمج 10% من الخبث على المقاومة الميكانيكية للطوب الإسمنتي القائم على الألياف المعدنية وتأثيرها على السلوك الميكانيكي. تشمل الخصائص المدروسة مقاومة الانضغاط (28 يوم) ، وأظهرت النتائج (28 UPV -مقاومة الانكسار (28 يوم) ، امتصاص الماء (28 يوم) ، سرعة النبض بالموجات فوق الصوتية أن إضافة كمية 10% من الخبث مع الألياف المعدنية بنسبة 1 تحسن بشكل كبير من الخواص الميكانيكية

Abstract

The building materials industry is booming in Algeria. For this reason, most research focuses on the development of new cementitious compounds with the aim of improving their mechanical and physical properties and the durability of cementitious materials. This work focuses on the effect of the incorporation of 10% slag on the mechanical resistance of cementitious bricks based on metal fiber and its influence on the mechanical behavior. The properties studied include compressive strength (28 days), breaking strength-tensile (28 days), water absorption (28 days), ultrasonic pulse velocity-UPV (28 days). The results show that the addition of an amount of 10% slag with 1% metallic fiber considerably improves the mechanical properties.

keywords: Brick, mortar, metallic fiber, mechanical behavior.

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton est un mélange hétérogène de débris, de ciment et d'eau avec quelques ébauches et d'autres additifs pouvant être ajoutés pour obtenir certaines propriétés. La proportion de ces matériaux dans le béton est choisie en fonction du type de travail requis et des matériaux disponibles, et en mélangeant ces matériaux les uns avec les autres, on obtient du béton qui commence à durcir progressivement au fil du temps jusqu'à ce qu'il devienne solide et solide et que sa résistance varie en fonction des composants de base ainsi que de la méthode d'agitation pendant la coulée et de la qualité du traitement [1].

Dans le domaine de la construction, le béton à plusieurs utilisations y compris son utilisation dans les briques de béton et la masse de béton, bien que plus économique que son rival, s'avère extrêmement solide et présente une grande résistance aux changements de température. Il résistera donc à la fois au gel hivernal et aux incendies potentiels [2].

La performance et la durabilité du béton sont particulièrement importantes lorsque le béton est exposé à des conditions environnementales difficiles. L'utilisation de matériaux tels que les scories de four dans le béton est donc devenue courante au cours de la dernière décennie. Au niveau local, leur utilisation dans le béton est encore limitée. Le laitier de four est le produit des industries sidérurgiques et la quantité de laitier produite au cours de l'industrie est estimée à la même quantité de fer produite et le laitier se compose de chaux, de silice et d'alumine, qui sont les mêmes composants du ciment mais différent d'eux par leurs rapports de composition [3].

A ce sujet, nous avons fait du béton avec 10% de laitier, Lorsqu'il est utilisé comme matériau de compensation de la proportion de ciment Former des moules à béton

L'objectif de ce projet est de fabriquer un mélange de béton léger à partir duquel nous pouvons fabriquer des briques de béton auto-armé pour faciliter la construction et réduire le temps de travail.

Dans cette recherche, nous avons discuté de quatre Chapitres qui sont :

Chapitre I : Généralités sur les bétons

Ce chapitre répond au premier objectif qui est de mener une étude bibliographique de quelques notions de base sur le béton, ses types et le domaine d'utilisation de chaque type.

Introduction Générale

Chapitre II : Les ajouts cimentaires

Le deuxième chapitre décrira les différents ajouts cimentaires au béton qui contribuent à augmenter la résistance.

Chapitre III : Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

Le troisième chapitre vise les propriétés des matériaux utilisés et le mode de fabrication du béton

Chapitre IV : Résultats et Discussions.

Dans le quatrième chapitre, tous les résultats obtenus sont présentés et expliqués.

Enfin, dans la conclusion générale, nous présentons les principaux résultats de l'étude.

Chapitre I

Généralités sur les bétons

I.1 Introduction

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière [4]. Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques [5].

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix [6,9] :

- ✓ Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre ;
- ✓ Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée ;
- ✓ Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes ;
- ✓ Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles ;
- ✓ Sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en œuvre ; il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer ; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies ;
- ✓ Son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence.

Le béton est un matériau de construction composite moderne, simple d'emploi et extrêmement répandu. Il se compose d'une matrice cimentaire (pâte de ciment hydraté) qui amalgame les inclusions rigides (gravier et sable). Un béton contient environ (en volume) : eau : entre 14 et 22 % ; ciment : entre 7 et 14 % ; granulats (dont sable) : entre 60 et 78 %.

Pour différents bétons ayant un même dosage en ciment mais avec un rapport eau/ciment différent, on remarque que ses propriétés s'en retrouvent affectées [7]. En effet, selon la combinaison des trois composants majeurs du béton, le matériau obtenu aura différentes propriétés (rhéologie, propriétés mécaniques, perméabilité...). L'ajout

d'additions et d'adjuvants (cendres volantes, fumées de silice, super plastifiants...) permet de modifier les propriétés souhaitées [8].

I.2 Classification des bétons

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place en raison de sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories [9].

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique [10] :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$
- Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment)
- Béton silicate (la chaux)
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume).

Le béton est un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Ceci s'explique par les faits suivants :

- Possibilité de varier les propriétés du béton.
- Facilite du traitement mécanique des mélanges de béton.
- Qualité économique du béton.

Les caractéristiques les plus importantes des bétons sont la résistance mécanique et la durabilité. Et selon ses caractéristiques et ses propriétés, les bétons se différencient entre eux. Il y'a les bétons ordinaires ou usuels et les bétons spéciaux qui chacun a une propriété spéciale. Les bétons spéciaux sont les suivants:

- Les bétons de granulats légers ;
- Les bétons cellulaires ;
- Les bétons lourds ;
- Les bétons à base de résine ;
- Les bétons moulés dans le sol ;
- Les bétons réfractaires ;

- Les bétons de latérite ;
- Les bétons caverneux ;
- Les bétons à hautes performances ;
- Les bétons auto-plaçant.

Le béton est composé de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Parmi les quatre constituants, les granulats jouent un rôle important, d'une part car ils forment le squelette et présentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton et d'autre part car au point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est le plus cher. En plus, du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment [11].

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier [12].

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression ;
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier ;
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important ;
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées [13] :

- Minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée ;
- Bonne étanchéité améliorant la durabilité ;
- Résistance chimique;
- Résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe : 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de

ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir [14].

I.3 Différents type de béton

I.3.1 Les bétons auto plaçant (BAP)

Par convention on appelle BHP, un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 60 MPa. Le BHP contient les constituants suivants : des granulats ordinaires, du ciment portland ordinaire de la fumée de silice, parfois d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes et des adjuvants (fluidifiant).

I.3.1.1 Concept du béton auto plaçant :

L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [15]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons auto-compactant ("self-compaction concrète", traduit par béton auto plaçant ou béton auto nivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur le chantier.

Les bétons auto plaçant (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais [16 17]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour acquérir ses propriétés, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [18].

I.3.1.2 Les avantages des bétons auto plaçant :

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité de la mise en œuvre du béton
- Réalisation d'éléments de forme complexe

- Bétonnage en milieux fortement ferraillés

b) Avantages économiques :

- Réduction du coût de main-d'œuvre et du temps de bétonnage
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [19], [20].

I.3.1.3 Aspect empirique de la formulation des BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

✓ La première concerne des formulations fortement dosées en ciment contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les super plastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants [21 22] ;

✓ Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [23]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établissons certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. Les gammes de valeurs généralement

employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous :

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) ;
- Utilisation d'un super plastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- Un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- Un diamètre maximal réduit ;
- Éventuellement utilisation d'un agent de viscosité. Les auteurs [21 23] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

I.4 Les bétons à hautes performances

Un **béton hautes performances (BHP)** (ou béton à hautes performances) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme. [24]

I .4.1 Propriétés

I .4.1 .1 Les propriétés physiques

La masse volumique : Généralement la masse volumique d'un BHP est légèrement supérieure à celle d'un béton ordinaire. Ceci est dû à la meilleure compacité des BHP.

- **Masse volumique apparente** = 2400 à 2500 kg/m³ pour les BHP ;
- **Masse volumique apparente** = 2350 à 2400 kg/m³ pour BO .

I .4.1. 2 Déformation des BHP :

- **Les déformations libres (retrait) :** Sont des propriétés de premières importances pour le constructeur. La construction d'un ouvrage durable passe donc par la maîtrise des déformations libre. La température et le teneur en eau sont deux paramètres qui contrôlent les déformations libres.
- **Fluage des bétons à hautes performances :** Le fluage d'un BHP est très inférieur à celui d'un béton usuel. Le coefficient de fluage, égal au rapport de la déformation différée sur la déformation instantanée est compris entre 1 et 1,5 pour les BHP alors qu'il est de 2 pour les bétons ordinaires.

I.4.1.3 Propriétés mécaniques :

- **Résistance à la compression et à la traction :** Une conséquence heureuse de la proximité initiale des gains de ciment est l'accroissement très rapide de la résistance en compression, une fois dépassé la période dormante. On atteint à 28 jours des valeurs comprises couramment entre 60 et 130 MPa, et souvent beaucoup plus élevées.

Résistance à la compression

Les bétons sont classés selon leur résistance à la compression à 28 jours. Les bétons hauts performances ont une résistance élevée.

- Béton ordinaire : 16 à 40 MPa
- Béton à hautes performances : 45 à 60 MPa
- Béton à très hautes performances : 65 à 100 Mpa
- Béton à ultras hautes performances : >150 MPa
- **Durabilité des bétons à hautes performances :**

La porosité et la perméabilité de ces bétons améliorer par ailleurs la durabilité. La résistance aux agressions chimiques comme peuvent l'être les bétons en milieu marin ou en milieu agressif. Il en est de même pour la résistance au gel. La résistance aux agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides ...), le faible risque de corrosion des armatures, la forte résistance au cycle gel-dégel ainsi que la faible perméabilité sont autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant durable. [27]

I.4.2 Avantages des BHP

Le béton à hautes performances apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire. Parmi les avantages du BHP:

- La maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre.
- La durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions, et une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion, une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.
- La conception des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité ...) tant au jeune âge qu'à terme, Cependant les propriétés améliorées des bétons à hautes performances ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées comme :
- Les granulats qui doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être Limitée par celle des granulats eux-mêmes,

- L'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des supers plastifiants réducteurs d'eau
Ainsi que des ajouts minéraux tels que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc.,
- L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.
L'utilisation du béton à hautes performances progresse constamment dans le domaine de construction et le nombre d'édifices en béton à hautes performances ne cesse d'augmenter car les concepteurs et les maîtres d'œuvre réalisent la valeur et la durabilité de ce béton. [30]

I.5. BETON FIBRE

Un béton fibré est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres). Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques. Le spectre des utilisations des bétons fibrés est devenu extrêmement large. Les bétons fibrés enrichissent l'éventail des solutions constructives en béton, grâce au développement continu d'une gamme de fibres aux propriétés multiples.

Les fibres de différentes compositions incorporées au béton ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques. Ce chapitre présente les types d'ouvrages en béton fibré, les propriétés physiques majeures reliées à l'utilisation de fibres et les avantages du béton fibré. [25]

I.5.1 Caractéristiques et propriétés des BETONS FIBRES

a) Amélioration des caractéristiques mécaniques

- L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post-fissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.
- L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler

que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré

b) Contrôle de la fissuration de retrait

Selon l'efficacité du type de fibres utilisé, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post-fissuration. Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat (figureI.1).

L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique. Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu.

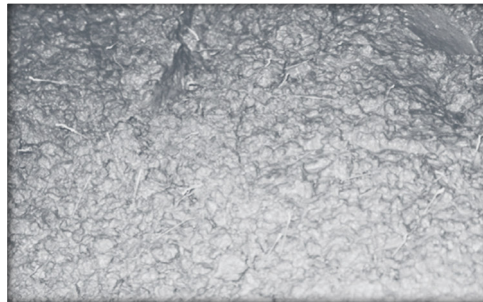


Fig. I. 1Texture d'un béton fibré

I.5.2 Types de fibres et propriétés

a) Les différents types de fibres

La gamme des fibres disponibles s'élargit régulièrement : fibres métalliques, fibres de verre, fibres polymères, fibres longues, courtes, flexibles, ondulées, inoxydables... et offre un vaste choix de caractéristiques, de performances et donc de domaines d'emploi.

- **Les fibres métalliques :**
 - Acier ;
 - Inox ;
 - Alliage amorphe.

- **Les fibres organiques :**
 - Polypropylène ;
 - Polyéthylène ;
 - Polyamide (nylon) ;
 - Acrylique ;
 - Polyester ;
 - Mélange polypropylène/polyéthylène ;
 - Aramide (kevlar) ;
 - Alcool polyvinylique.
- **Les fibres minérales :**
 - Verre
 - Carbone.

Les fibres sont conditionnées en sacs ou en big bags. Chaque famille de fibres présente des caractéristiques mécaniques et physiques et des propriétés spécifiques.

I .5.2.1 Fibres métalliques :

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La figure I-2 présente différentes géométries de fibres métalliques. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples (ASTM A 820)

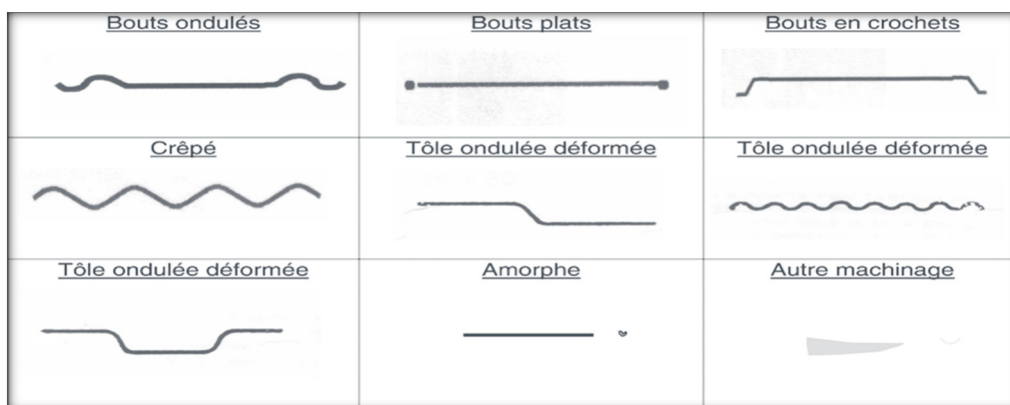


Fig. I. 2 Géométrie des fibres métalliques.

I.5.3 Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

- **Aspect technique.** L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (Résistance résiduelle);
- Une énergie d'absorption élevée;
- Une résistance aux impacts élevée ;
- Une résistance à la fatigue élevée ;
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

- **Aspect économique.**

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction ;
- Une optimisation du dimensionnement.

I.5.4 Applications

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles. Le chapitre 8 décrit plus en détail des utilisations spéciales de béton fibré. [26]

I.6. Béton cellulaire VS parpaing : quels sont leurs avantages ?

Aujourd'hui en France, presque 80 % des constructions de maisons neuves sont réalisés à l'aide de parpaing. Ce matériau est en effet très utile pour la création des fondations et des murs d'une maison.

Pourtant, la France est l'un des derniers pays utilisant encore en le parpaing plutôt que le béton cellulaire parfois également appelé siporex.

Chacun de ces deux matériaux possède des avantages et des inconvénients ce qui explique que certains constructeurs et artisans privilégient plutôt le parpaing ou plutôt le béton cellulaire.

Pour faire la lumière sur les propriétés de ces deux matériaux de construction et pour vous aider à choisir entre le parpaing et le béton cellulaire en fonction de vos attentes, nous vous proposons de découvrir leurs avantages et leurs inconvénients respectifs.

I.6.1 Ce qu'il faut savoir sur le parpaing

Le parpaing est un matériau poreux (pierre de taille) en forme de parallélépipède et occupant toute l'épaisseur d'un mur. Il est composé à 80 % de pierre (gravier et sable) ainsi que de ciment et d'eau ce qui en fait un matériau de construction naturel et recyclable.

Les dimensions d'un parpaing standard sont de 20 cm de longueur, 50 de largeur et 20 cm ou 25 cm de hauteur. L'épaisseur du parpaing varie en revanche en fonction de son utilisation. Pour créer un mur, les parpaings sont montés les uns sur les autres à l'aide de mortier (mélange de ciment, de sable et d'eau). . La Figure I.3. représente un parpaing après formage dans sa forme définitive



Fig. I. 3 Un parpaing après formage dans sa forme définitive

I.6.1. 1 Les avantages du parpaing

Le parpaing est majoritairement choisi en tant que matériau de construction pour les maisons neuves traditionnelles, car il est bon marché. En effet, l'avantage premier du parpaing est qu'il est très accessible et permet de construire à moindre coût tout en choisissant un matériau naturel.

Le deuxième avantage du parpaing est sa grande longévité. En effet, ce matériau est à la fois résistant à l'usure et aux intempéries ce qui permet de construire des maisons solides et résistantes dans le temps. Le parpaing est donc un bon choix dans les régions connaissant de fortes intempéries ou des tremblements de terre.

Le parpaing est également un matériau facile à poser ce qui facilite la tâche des artisans et des constructeurs de maisons.

Enfin, le parpaing est un matériau incombustible permettant de construire des maisons très résistantes au feu.

I.6.1.2 Les inconvénients du parpaing

En revanche, le parpaing possède quelques inconvénients expliquant pourquoi le béton cellulaire lui est préféré dans beaucoup de pays. Le principal de ces inconvénients est son manque de performance en termes d'isolation thermique et acoustique. Ainsi, il sera nécessaire de prévoir la pose d'un isolant dans une maison construite en parpaing.

I.6.2 Ce qu'il faut savoir sur le béton cellulaire

Venu de Suède, le béton cellulaire est aujourd'hui de plus en plus apprécié en tant que matériau de construction pour les maisons modernes. Ce matériau est un mélange de chaux, de sable, de ciment, d'eau et d'une poudre d'aluminium permettant au béton de capturer l'air sous forme de petites bulles. Le béton cellulaire a donc des propriétés aérées.

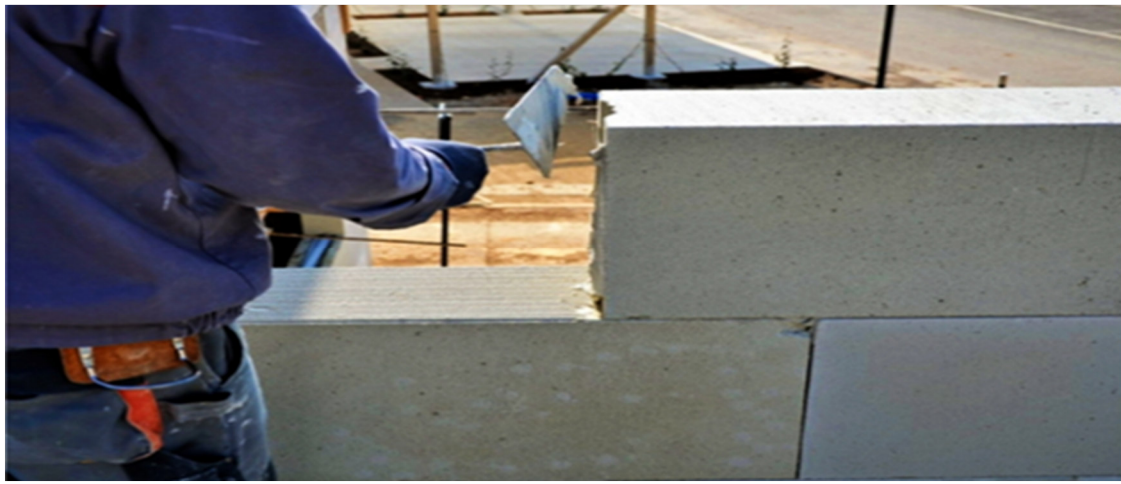


Fig. I. 4 - Représente un modèle de béton cellulaire et la méthode de sa construction. [27]

Le béton cellulaire peut se présenter sous forme de bloc, de carreaux ou de panneaux de 5 à 30 mm d'épaisseur et dans de nombreuses dimensions. Ainsi, il peut s'utiliser pour la construction de murs extérieurs, mais aussi pour la construction des cloisons et des plafonds. La (Figure I.4.) Représente un modèle de béton cellulaire et la méthode de sa construction

I.6.2.1 Les avantages du béton cellulaire

De par son aspect aéré, le béton cellulaire possède deux avantages très intéressants : le matériau est léger et il est un très bon isolant. En effet, les murs en béton cellulaire offrent une très bonne isolation thermique et phonique. Grâce aux microcellules d'air emprisonnées et disposées de façon homogène, le doublage isolant est inutile ce qui permet de faire des économies. Son très bon coefficient thermique permet aussi de minimiser l'impact des variations de température entre l'intérieur et l'extérieur.

La légèreté du béton cellulaire est également un avantage que ce soit pour la pose et la construction, mais aussi pour le transport des matériaux. De plus, le béton cellulaire peut se découper avec une simple scie ce qui facilite les découpes sur mesure et l'utilisation des chutes. Il nécessite également moins de mortier pour l'assemblage ce qui rend sa pose moins coûteuse que pour un mur en parpaing.

Enfin, tout comme le parpaing, le béton cellulaire est un matériau non inflammable limitant la propagation du feu et écologique, car sa production nécessite deux fois moins d'énergie que la production des briques en terre cuite par exemple.

I.6.2.2 Les inconvénients du béton cellulaire

Si le béton cellulaire semble avoir plus d'avantages que le parpaing, il possède tout de même un inconvénient majeur : son prix. En effet, le béton cellulaire est plus coûteux que le parpaing. Ce prix plus élevé est tout de même à mettre en comparaison avec les économies réalisées pour l'isolation de la maison mais aussi pour le temps gagné pendant le chantier car le matériau est beaucoup plus maniable.

Le béton cellulaire apparaît comme moins résistant que le parpaing, car au fil du temps, des fissures peuvent apparaître avec le béton cellulaire. Le béton cellulaire est également un matériau plus friable que le parpaing ce qui vous obligera à prévoir des chevilles spécifiques pour pouvoir sceller un élément aux murs. Enfin, le béton cellulaire est soumis à un débat sanitaire sur la dangerosité d'une exposition régulière à ce matériau sur le long terme. . [27]

I.7. Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord

Le BFUP est un béton avec une résistance en compression supérieure à 150 MPa. Le plus gros agrégat est de la grosseur d'un grain de sable (moins de 1 mm de diamètre) et de courtes fibres (0.2 mm de diamètre x 12 mm de longueur) fournissent une résistance en flexion. La résistance extrême en compression et la capacité de se déformer avec la formation de micro fissures sont deux caractéristiques importantes d'un BFUP.

Ce béton est en usage en Amérique du Nord depuis plus de 15 ans. Son utilisation dans les ouvrages d'art à commencer ici au Québec en 1997 avec la construction du premier pont en BFUP au monde à Sherbrooke. Ce pont de 60 m est composé de 6 segments de treillis post-tendus. Le tablier ne fait que 30 mm d'épaisseur. Si vous en avez l'occasion, je vous invite à le visiter.

I.7.1. Caractéristiques du BFUP

La résistance en compression, la durabilité et la faible porosité sont toutes des propriétés recherchées pour la construction d'ouvrages qui vont avoir une durée de vie bien au-delà des 40 à 50 ans de nos structures existantes. Couplés avec des tabliers en béton hautes performances avec armature composite, les ouvrages d'art peuvent facilement atteindre 75 ans. Si toutes les composantes sont en BFUP, la durée de vie sera de plusieurs centaines d'années. Le BFUP s'inscrit donc dans une démarche pour minimiser le temps de construction et réduire les coûts d'entretien à court et à long

terme. Évidemment une étude doit être faite pour déterminer le système optimum en tenant compte d'une foule de facteurs.

La clé du mélange pour un BFUP est l'eau ou plus précisément la très petite quantité d'eau qui est utilisée (ratio eau/ciment +/- 0.2). Pour que ce mélange puisse fonctionner avec si peu d'eau un adjuvant et une matrice avec de très fines particules sont utilisés. L'optimisation granulométrique du mélange doit être très précise. Les composantes sont sélectionnées avec des dimensions relatives qui permettent aux particules de rouler l'une sur l'autre et créer un produit extrêmement compact avec de minuscules porosités discontinues. Comparés à un béton normal, les constituants du BFUP font en sorte que le comportement du produit final est littéralement à une autre échelle.

Tableau I. 1 propriétés de béton haute-performance BFUP

Propriétés	béton	haute-performance	BFUP
Contenu eau/ciment	0.40 – 0.70	0.24 – 0.35	0.14 – 0.25
Dimension max. des agrégats (mm)	20 – 25	10 – 15	0.4 – 0.6
Résistance en compression (MPa)	20 – 40	40 – 100	150 - 225
Résistance en flexion (avant fissures) (MPa)	0	0	20 - 60
Résistance à l'abrasion kg/m ²	1	0.08	0.01
Penetration des chlorures	> 2000	500 – 2000	< 100

Une autre caractéristique du BFUP est sa fluidité. C'est un béton qui est pour ainsi dire auto-plaçant et qui enrobe bien les armatures. Il ne nécessite aucune vibration pour la mise en place. Cette fluidité joue un rôle important dans utilisation du BFUP pour les ouvrages d'art.

Divers tests de durabilité ont démontré que le BFUP a une porosité extrêmement faible. Donc, c'est le matériau idéal pour faire face aux cycles de gel et dégel et ralentir les effets des chlorures. Depuis 1996 des spécimens de BFUP font partis de l'étude menée par New Brunswick Université qui est en charge du projet à Treat Island Maine pour le US Army Corps of Engineers. [28]

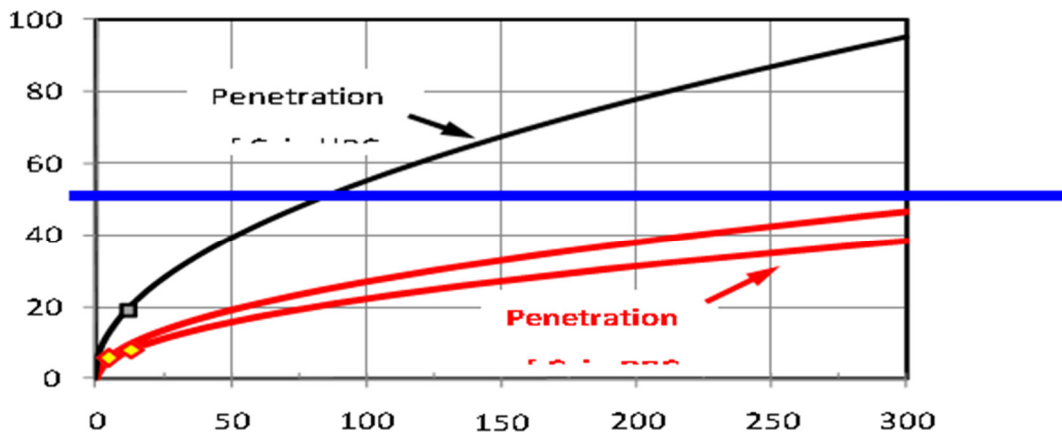


Fig. I. 5 Taux de pénétration prévu de $C_t = 0,05\%$. [28]

Le quai est à mi- marée, donc l'hiver il est constamment exposé au cycle de gel et dégel. Il est possible d'extrapoler les résultats des 16 dernières années pour prédire que le BFUP comparé au béton hautes performances offre une résistance à la pénétration des chlorures exceptionnelle d'au moins 10 fois supérieure. Pour ce qui est de la dureté, des tests d'abrasion. [29] permettent de démontrer que le BFUP a une dureté similaire à une pierre naturelle telle que le granite.

I.7.2 Autres systèmes et applications possibles pour le BFUP Joints pour dalles d'approches

Si le tablier d'un pont est préfabriqué, les dalles d'approches peuvent l'être également. Ceci fait normalement parti du principe de construction accélérée. Donc, une fois le tablier complété, le joint est coulé entre les dalles d'approches et le tablier.



Figure : tablier de pont préfabriqué

- **Joints au-dessus des piliers intermédiaires**

Pour les ponts avec plusieurs travées, le BFUP peut également être utilisé pour assurer une continuité dans le tablier. Dans ce cas-ci, le joint est plus large que ceux pour les joints transversaux et longitudinaux.

- **Courbes/Parapets**

Selon le design du pont, le garde-fou peut prendre diverses formes. Souvent c'est simplement une courbe en béton d'environ 300 mm de hauteur où l'on fixe un système de balustrades. Cette section en béton peut faire partie du panneau préfabriqué. Ce joint est coulé au même moment que les joints transversaux. Donc, du point de vue travail sur le chantier, ceci est plus rapide car on n'a pas besoin d'attendre la cure sur place de cette courbe.



Figure : des planchers en précontrainte

Dans certains cas, un garde-fou plus substantiel et un muret en béton est requis. Ce muret peut être préfabriqué en sections et installé sur le chantier en utilisant le BFUP comme illustré.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, un ensemble de concept sur le béton et son composant et caractéristique ont été conclus, car il varie en fonction du différent composant et du champ d'utilisation, il est donc très important de mener des recherches sur des études antérieures pour identifier les points les plus importants qui concernent notre annotation de recherche.

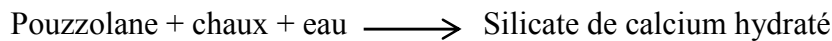
CHAPITRE II

**LES AJOUTS
CIMENTAIRES**

II.1. Généralités

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



Il faut noter qu'à la température ambiante cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_2S et du C_3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier. Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète.

Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland [30].

II.2. Classification des ajouts minéraux

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs Les ajouts 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 (II.1) ci-dessous [31].

Tableau II. 1 Classification des ajouts selon leur réactivité. [31].

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trass phonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II.3 Les différents types d'ajouts

II.3.1 Les ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μ m ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305). En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats [30]

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

II.3.2. Filler calcaire :

Les fillers calcaires comme étant des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, kieselguhr,...). Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium CaCO_3 qui existe sous plusieurs formes polymorphiques : calcite, aragonite et vanterie.

Les fillers calcaires cumulent trois propriétés intéressantes :

- Une certaine activité hydraulique
- Des éléments de faible dimension qui permettent un remplissage granulaire efficient
- Un Faible coût d'après Guemmadi et al.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles [32].

- ☞ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique.
- ☞ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ☞ Un rôle chimique et physique par augmentation des résistances et amélioration de la durabilité.

II.3.3 Les ajouts minéraux actifs

- La pouzzolane
- Le laitier à hauts fourneaux
- Les fumées de silice

II.4. Laitier cristallin :

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur [33].

II.4.1. Description générale du laitier cristallin :

Le laitier est un sous-produit des industries du fer et de l'acier et est bien souvent classé comme déchet industriel ou considéré comme tel par certaines entreprises de construction, à tort. En réalité, il peut être valorisé en divers matériaux de construction polyvalents suivant leur traitement après fabrication. Lorsque ces sous-produits sont collectés, deux perspectives de refroidissement s'offrent en effet à eux [34].



Fig. II. 1 Laitier cristallin

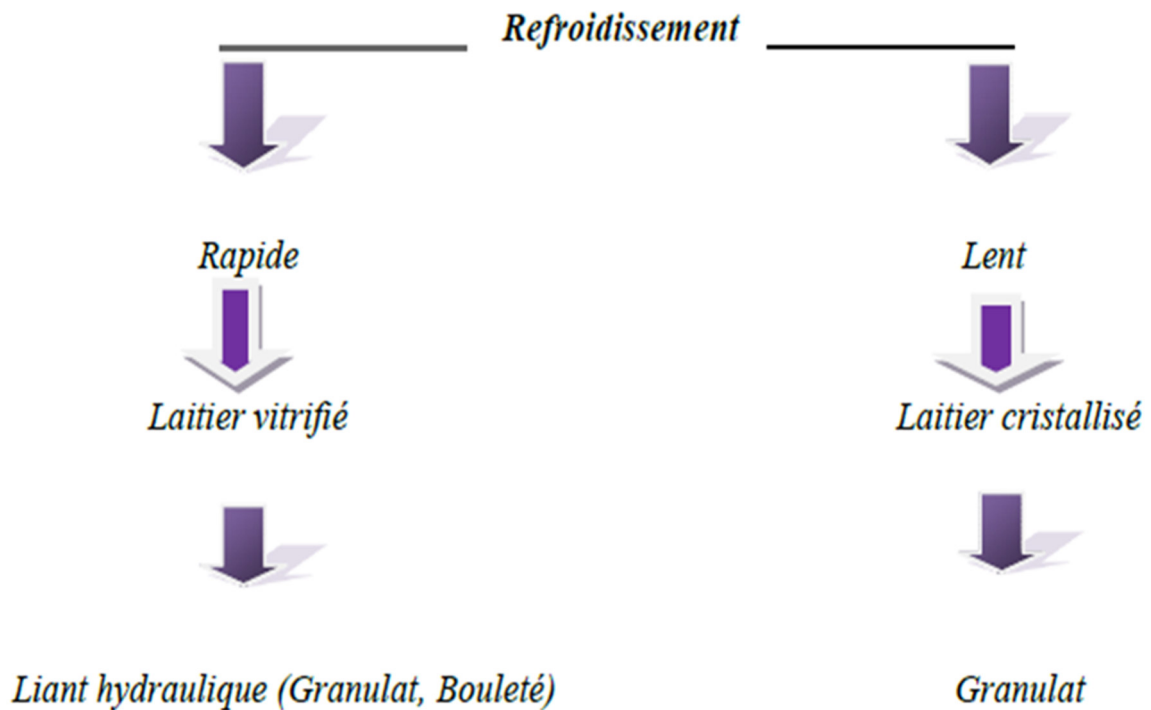


Fig. II. 2: Processus d’élaboration des différents types de laitiers [35].

Une trempe leur conférant des propriétés hydrauliques : le laitier qui surnage au-dessus de la fonte est refroidi immédiatement après la coulée et, par conséquent, rapidement vitrifié. La trempe fige ce sous-produit dans un état instable et lui confère des propriétés hydrauliques. La majorité des éléments, tels que Ca, Mg, Si et Al sont sous forme de phase non cristalline. Une fois broyé à une finesse de 400-500 m²/kg, ce produit développe de bonnes propriétés cimentaires sous l’effet d’un catalyseur (le gypse dans le ciment). Par ailleurs, la composition minéralogique d’un laitier dépend de son mode de refroidissement : plus le refroidissement est rapide, plus le laitier sera vitreux [34].

Un refroidissement lent leur permettant une cristallisation dans un état stable : ce procédé ne nécessite qu'une fosse de stockage du laitier en fusion et des rampes d'arrosage. Les laitiers coulés à terre sont refroidis doucement par aspersion d'une faible quantité d'eau. Un concassage secondaire est généralement nécessaire pour utiliser ce matériau. Ce procédé lui confère, cependant, une certaine hétérogénéité, qui amoindrit la stabilité des propriétés mécaniques du béton [34].

L'utilisation des laitiers sous forme cristalline est pour l'instant moins rentable que celle sous forme de liant hydraulique. Cependant, cette application a l'avantage d'être facilement adaptable pour tout type de laitier, contrairement à l'utilisation cimentaire. En plus d'une distinction microstructurale (laitier amorphe ou cristallin), les laitiers sont aussi classés selon leur origine :

II.5. Laitiers de hauts fourneaux :

La production d'une tonne de fonte génère 250 à 300 kg de laitier de haut fourneau. Pour l'élaboration de la fonte, le haut-fourneau (Figure II-3) est alimenté par un mélange de minerai de fer, de coke et de chaux. De l'air chaud (à 1200 °C) est ensuite insufflé dans la tuyère et provoque la combustion du coke. Des réactions d'oxydation et de réduction ont lieu et il se forme de la fonte et un liquide essentiellement chargé d'oxydes. Ce résidu est appelé le laitier de haut fourneau. [61]

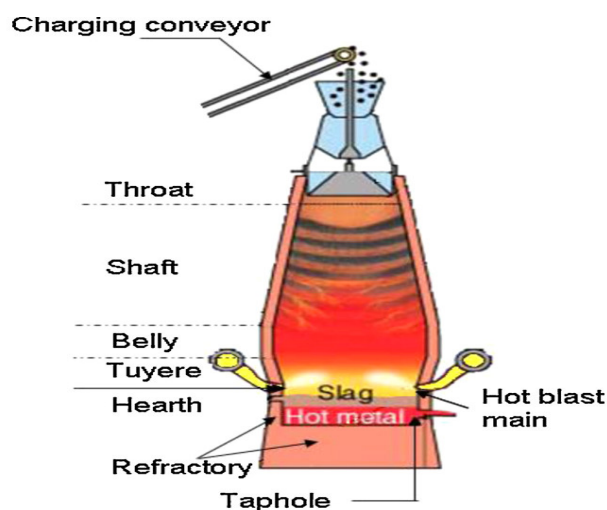


Fig. II. 3 Schéma de principe d'un haut fourneau [36].

II.5.1 Propriétés du laitier cristallin :

Il existe de nombreuses différences entre un laitier cristallin et un granulats naturels. Les propriétés détaillées dans cette section sont la densité, l'absorption d'eau, la résistance à l'abrasion, l'état de surface, la nature cristalline, la composition chimique et le risque d'expansion [37].

➤ **Densité :**

La densité relative du granulats de laitier est plus grande que celle du granulats naturels [38 39].

La littérature à ce sujet indique que la densité relative des laitiers cristallins se situe généralement entre 3 et 4 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75.

➤ **Absorption :**

Dans les études caractérisant les laitiers cristallins, l'absorption est bien souvent relevée afin d'appréhender la rhéologie du béton. Celle-ci est généralement supérieure à celle des granulats naturels de l'étude servant à faire un béton de référence [40 41 42].

Les valeurs d'absorption des laitiers cristallins se situent généralement entre 1 et 5 % alors que pour un granulats naturels celles-ci sont souvent en deçà de 1 % [43].

La mesure de l'absorption d'un granulats est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci.

➤ **État de surface :**

La plupart des laitiers cristallins possèdent une porosité élevée ainsi qu'un état de surface rugueux [44].

Le fait que les laitiers soient plus poreux que les granulats naturels influent sur son absorption. L'état de surface rugueux des laitiers va, quant à lui, influencer la zone de transition pâte- granulats au sein du béton. Cet état de surface poreux et rugueux est observable dans les Figures II.4 et II.5.

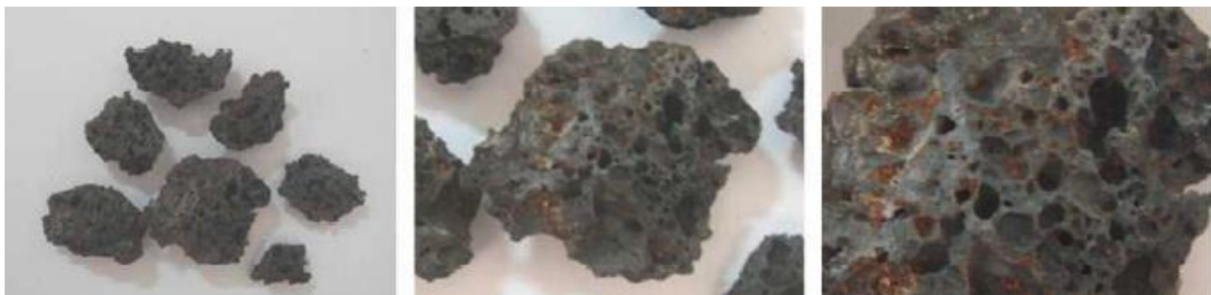


Fig. II. 4 - Laitiers d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et rugueuse [44].

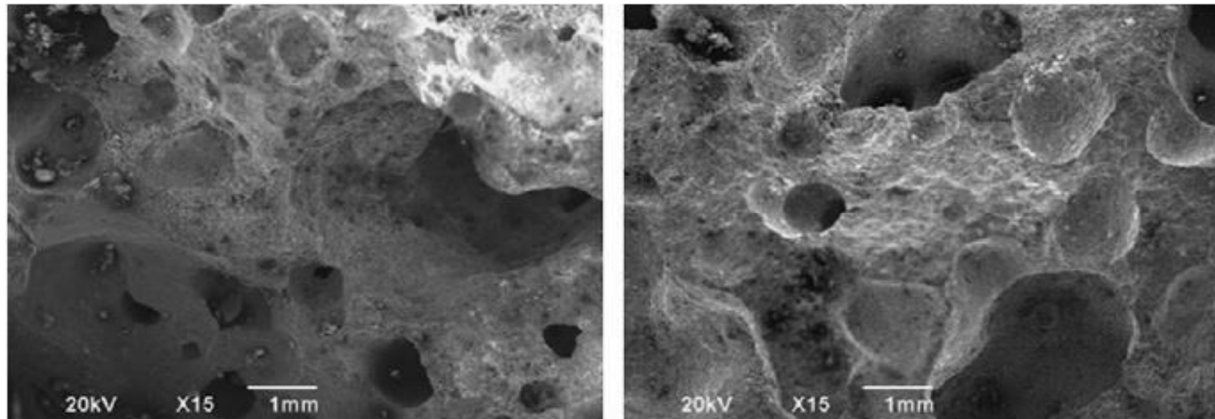


Fig. II. 5 - Visualisation au microscope électronique à balayage (MEB) de laitiers d'aciérie électrique (grossissement X15) [44].

II.6. Le laitier granulé (NF P 18-306) :

Le laitier granulé peut être employé dans les bétons classiques de granulats naturels comme sable actif (remplacement de tout ou partie du sable), soit sous sa forme brute, soit sous forme de laitier pré broyé. Cette incorporation se traduit par une augmentation des résistances mécaniques. (à dosage en ciment constant), le malaxage et la mise en œuvre provoquant l'attrition de fines hydrauliques dont l'action vient se cumuler avec celles de la liaison pâte de ciment-sable de laitier.

Par contre, le béton perd de sa maniabilité, d'autant plus que l'ajout de laitier est important. Cette maniabilité peut alors être améliorée par différents ajouts (cendres volantes, charge inerte). Ce laitier, de masse volumique supérieure à 0.80 kg/dm^3 , doit avoir la composition chimique suivante [45].

Tableaux II. 2 Composition chimique du laitier granulé en Pourcentage [45].

Constituents	Percentage
SiO ₂	29 à 38
Al ₂ O ₃	13 à 24
CaO	38 à 48
MgO	≤6
FeO	≤4
MnO	≤2
soufre des sulfates exprimé en S	≤2
soufre des sulfates exprimé en SO ₃	≤0.5

Les laitiers provenant de fontes spéciales (ferro-manganèse) et les laitiers extraits de crassiers sont exclus des bétons. De plus, ces derniers ne doivent pas être employés pour les bétons dans lesquels il entre du ciment alumineux [45].

II.7. Les fumées de silice

II. 7.1. Définition

Sous-produit de la fabrication du silicium, du ferro-silicium et des silico-alliages. Les particules, amorphes, ont des dimensions de 0,01 à 1 mm

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

Utilisée dans les bétons pour : augmenter la fluidité, la résistance en compression, et diminuer la porosité et la perméabilité ; car la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment et favorise la création des sites de germination des cristaux de portland $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dès les premières minutes qui suivent le début de la réaction

Elles ne sont pas généralement utilisées en tant qu'ajout, mais plutôt avec des dosages appropriés aux besoins. C'est un produit très efficace pour la fabrication des bétons à très haute performance [46] ,[58].

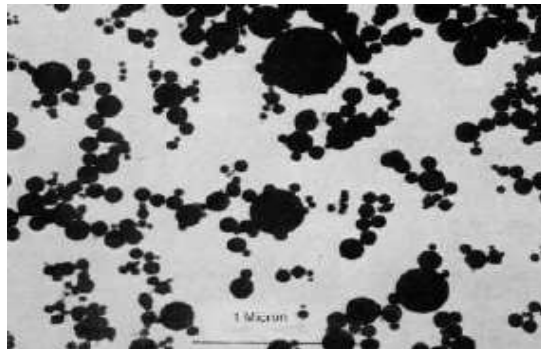


Fig. II. 6 Fumée de silice au microscope [46].

II.7.2. Effet de la fumée de silice

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, le SiO_2 amorphe commence à réagir après 2 à 3 jours environ. Elle se précipite sous forme de silicate de calcium hydraté (CSH-Gel) avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation du ciment. La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolane conduit à une diminution du PH par rapport à un béton exempt de silices. C'est la raison pour laquelle, il convient dans le cas du béton

armé de limiter la quantité maximale de poussières de silice admissibles, par exemple à 11% de la teneur en matières solides de silice, pris par rapport à la quantité de ciment, afin de garantir la protection anticorrosion de l'armature. Les propriétés rhéologiques exceptionnelles de la fumée de silice par la forme sphérique de ses grains, permettent de la substituer à l'eau et d'obtenir des matériaux à faible porosité et augmentent ainsi la compacité du béton. En comblant les interstices laissés entre les particules fines et les granulats, elle joue un rôle de lubrifiant. [31, 47].

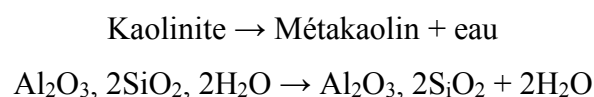
Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants.

- ✓ Faible tendance au ressuage, à la sédimentation.
- ✓ Meilleure cohésion interne, légèrement thixotrope.
- ✓ Bon pouvoir de rétention d'eau.
- ✓ Faibles pertes d'air pour le béton à air entraîné.
- ✓ Meilleure adhérence sur le support.
- ✓ Réduction du rebond et amélioration de la résistance du béton projeté.
- ✓ L'évolution de la résistance s'avère plus lente pour de bétons contenant de la fumée de silice que pour des bétons sans fumée. Pourtant la résistance de bétons avec la fumée de silice.
- ✓ Augmente même au-delà de 450 jours. [60]

II.8. Le Métakaolin :

Le Méta kaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe. le méta kaolin appartient à la famille des ultrafines, particules minérales de dimension inférieure 10µm, utilisé dans les bétons pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité. Le méta kaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500 °C et 800 °C. Industriellement il existe essentiellement deux modes de calcination, une calcination lente (cinq heures environ dans des unités de production) et une calcination flash (très rapide en comparaison avec la calcination lente) [48].

À une température élevée, la kaolinite perd son eau par des hydroxylation selon l'équation suivante [49], [50], [51].



(En notation cimentière) $AS_2, 2H \rightarrow AS_2 + 2H$

II.8.1. Définition du méta kaolin

Le méta kaolin est considéré comme un matériau pouzzolanique, c'est-à-dire qu'il réagit en présence de la chaux pour former des silicates de calcium hydratés et des silico- aluminates de calcium hydratés [51].



Fig. II. 7 - Poudre de Métakaolin [51].

II.8.2. Définition de kaolin :

Le terme kaolin a été utilisé, pour longtemps, pour désigner l'argile chinoise extraite du village « Kaoliang ». Actuellement, le terme kaolin désigne les minéraux ayant une composition en kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) supérieure à 50%. Ils peuvent être différents selon les conditions géologiques de leur formation, leurs compositions minéralogiques moyennes et leurs propriétés physiques et chimiques. [52]



Fig. II. 8 Roche de kaolin. [53]

II.8.3 Méthodes d'obtention du méta kaolin :

➤ **La méthode traditionnelle :**

Calcination en lit fixe ou le plus souvent en four rotatif. L'argile est introduite sous forme de boulets et calcinée pendant 5 heures à 750 °C.

Les boulets de kaolin vont se transformer en boulets de méta kaolin par perte de l'eau structurale. Ces boulets sont ensuite broyés. Cette méthode entraîne beaucoup d'usure et de consommation d'énergie. [54]

➤ **La méthode Flash :**

L'argile kaolin qu'est broyée et les fines particules sont calcinées en quelques secondes. Cette méthode, associée au recyclage de l'énergie de calcination, utilise environ 40% de l'énergie consommée dans la méthode traditionnelle. [54]

II .8.4.Traitement thermique du kaolin :

Les métras kaolins sont obtenus par calcination d'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures comprises entre 600 et 900°C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin (autrement dénommé kaolinite) de l'argile kaolinique utilisée. [55], [56].

La calcination entraîne la des hydroxylation et une destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite (kaolinite calcinée).La durée de traitement thermique utilisée est de cinq heures. Durant cette cuisson, il y a formation de méta kaolin (Figure II.9) et dégagement de molécules d'eau sous forme gazeuse selon la réaction suivante. [55], [56] , [57] .

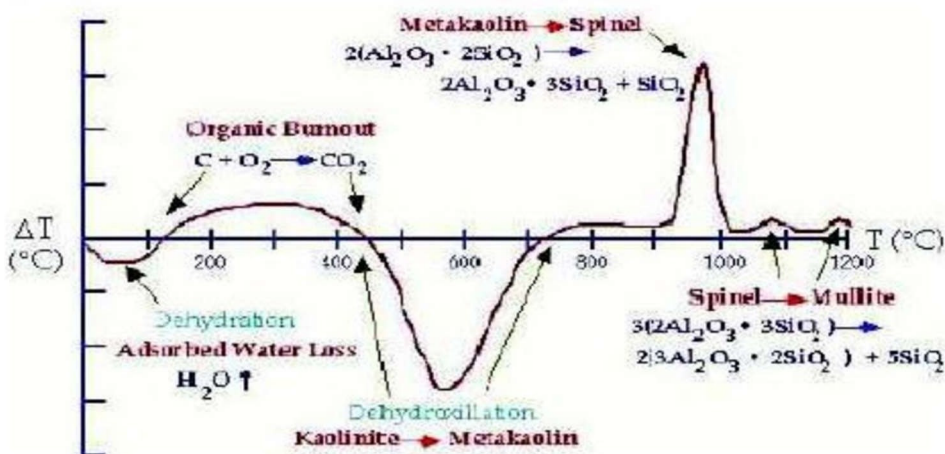


Fig. II. 9.: Courbe de transformation du kaolin en méta kaolin. [55], [56].

II.11 Conclusion.

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques

Un argument souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons de la résistance mécanique.

CHAPITRE III

Caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition du béton

III.1. Introduction :

Dans ces chapitres nous présentons les caractéristiques des matériaux et les méthodes adaptées pour réaliser les différents essais expérimentaux. Tous les essais sur les bétons, ainsi que les méthodes de contrôle ont été effectués suivant les normes Européennes et Algériennes en vigueur.

III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton :

Les essais sur les matériaux utilisés pour la confection des bétons ont été exécutés au laboratoire de génie civil de l'université de M'sila. Les matériaux utilisés sont :

- Le sable d'origine siliceux provenant d'OUED MAITER de Boussaâda « M'sila » ;
- Deux fractions sont utilisées : Gravier concassés (3/8 et 8/16) mm, d'origine calcaire.
- Ciment CPJ 42.5 N et provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa «M'sila »
- L'adjuvant : super plastifiant hautes réducteur d'eau (SIKAPLAST BV 40) provenant de la société Granitex – Oued Smar.
- Le laitier granulé provient de l'usine d'El-Hadjar Annaba.
- Les fibres métalliques : de la société algérienne « Granitex ». Ce sont des fibres minérales sous forme de tiges ondulées. Les fibres sont standardisées et commercialisées sous étiquette Medafac. Les caractéristiques et les propriétés physico-mécaniques des fibres utilisées indiquées dans le tableau (**Tableau III.1**) et montrées dans la figure (**Figure III.1**) [57].

Tableau III. 1 - Caractéristiques des fibres métalliques

Fusion (°C)	Longueur (mm)	Épaisseur (mm)	Élancement L/D	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)
>1000	50	0.6±0.09	83.33	> 1000	200	7.8



Fig. III. 1 Géométrie des fibres utilisées.

- L'eau de gâchage et de conservation : c'est l'eau potable du laboratoire.

III.2.1. Analyse granulométrique : (NFP 94-056)

L'analyse granulométrique c'est une opération consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids taille, etc.). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou caillou. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, on procède au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

Résultats obtenus :

Les résultats obtenus sont présentés sous forme des tableaux et des courbes courbe granulométrique.

- **Fraction 3/8 :**

$$D = 0,2 \times D_{max} = 0,2 \times 0,8 = 1600g = 1,6kg$$

Tableau III. 2 L'analyse granulométrique du Gravier (3/8) mm

Tamis (mm)	poids de tamis vide (kg)	poids des tamis+gravier (kg)	refus partiel (kg)	refus cumules (kg)	refus cumules %	tamisât cumules %
8	0,637	0,767	0,49	0,49	8,66	91,33
6,3	0,64	0,464	0,449	0,939	63,6	36,4
5	0,622	0,908	1,363	2,302	82,66	17,33
4	0,602	0,774	0,581	2,883	94,13	5,86
3,15	0,603	0,666	0,063	2,946	98,33	1,66
Fond	0,45	0,475	0,025	2,971	100	0

- Fraction 8/16 :

$$D=0,2 \times D_{max} = 0,2 \times 0,16 = 3200g = 3,2kg$$

Tableau III. 3 L'analyse granulométrique du gravier (8/16) mm

Tamis (mm)	poids de tamis vide (kg)	poids des tamis+gravier (kg)	refus du Gravier (kg)	refus cumules (kg)	refus cumules %	tamisât cumules %
16	0,927	1,02	0,093	0,2	6,25	93,75
12,5	0,892	1,461	0,569	1,221	38,15	61,84
10	0,956	1,734	0,778	2,536	79,25	20,75
8	0,827	1,271	0,44	3,064	95,75	4,25
Fond	0,56	0,673	0,113	3,2	100	0

- Sable (0/5) mm :

Tableau III. 4 L'analyse granulométrique du sable

tamis (mm)	Refus partiel (kg)	Refus cumulé (kg)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
12.5	0.144	0.144	7.2	92.8
0.63	0.111	0.255	12.75	87.25
0.315	1.075	1.33	66.5	33.5
0.15	0.595	1.925	96.25	3.75
0.008	0.065	1.99	99.5	0.5
Fond	0.004	1.994	99.7	0.3

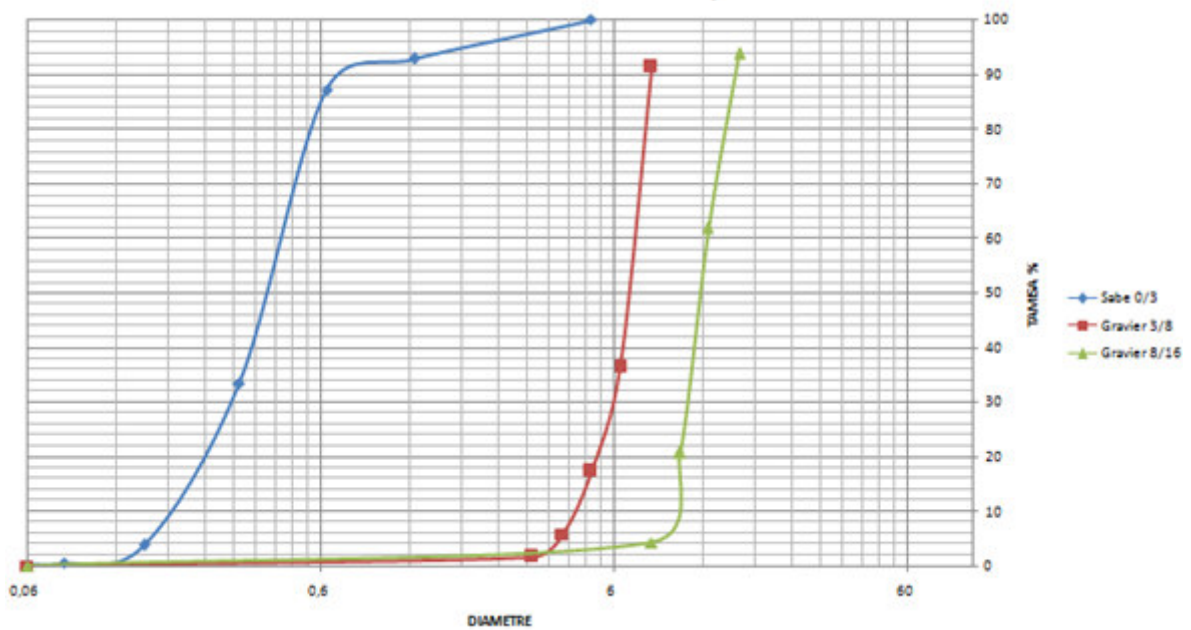


Fig. III. 2 Courbe d'analyse granulométrique des granulats

- **Le module de finesse du sable :**

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles :

(0,08,0,15 ,0,315,0,63,1,2,5,5) mm sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c \div 100$$

Ou: R_c : Refus cumulé

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus cumulés(\% de sable)}}{100} = \frac{182,7}{100} = 1,827$$

On se basant sur la classification des sables selon les normes, on trouve **que** :

$$1,5 < M_f < 2$$

Le sable utilisé est considéré comme un sable fin

- **Le module de finesse du gravier :**

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus cumulés(\% de gravier } 3/8)}{100} = \frac{240,39}{100} = 2,4039$$

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus cumulés(\% de gravier } 8/16)}{100} = \frac{117,4}{100} = 1,174$$

III.2.2. Caractéristiques physiques :

III.2.2.1. masse volumique apparente : (NFEN 1097-6(2001))

La masse volumique est nécessaire à connaître lorsque par exemple on élabore une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires mélangées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées. Parmi les propriétés principales des matériaux de construction on a la masse volumique.

Résultats obtenus : Graviers de fraction (3/8) et (8/16) mm

La masse volumique est donnée par: $\rho = \frac{M_2 - M_1}{V_0}$

Tableau III. 5 la masse volumique de gravier (8/16) mm

Fraction	Essai	M1	M2	ρ_{app} (kg/L)	ρ_{app} (moye kg/L)
3/8 V=7L	1	2.942	10.068	1.020	1.011
	2		9.978	1.007	
	3		9.980	1.008	
8/16 V=10L	1	3.496	14.596	1.110	1.104
	2		14.564	1.106	
	3		14.470	1.097	

III.2.2.2. Masse volumique absolue

Définition :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulats, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 .

But de l'essai :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées. Le tableau III. 6 présente la masse volumique de gravier 3/8 et 8/16 mm

Tableau III. 7 La masse volumique de gravier 8/16

Fraction	Essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/ml)	ρ_{abs} (moy $(\frac{g}{ml})$)
3/8	1	400	400	550	2.66	2.60
	2			560	2.50	
	3			550	2.66	
8.16	1	400	400	560	2.50	2.55
	2			550	2.66	
	3			560	2.50	

III.2.2.3. Porosité des granulats : (NFEN 1097-3 Août 1998)**Définition :**

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat. En général le calcul de la porosité est exprimé par le rapport du volume des vides au volume du matériau

$$P = \frac{\text{volume de vides}}{\text{volume totale}}$$

Calcul de la porosité : (norme ASTM, C642)

La porosité est calculée par la formule :

$$V_p = (C - A / C - D).100$$

Avec :

V_p : Volume des vides(%)

A : poids de l'échantillon après étuvage (g)

C : poids de l'air après immersion et ébullition(g)

D : poids à l'eau après immersion et ébullition(g)

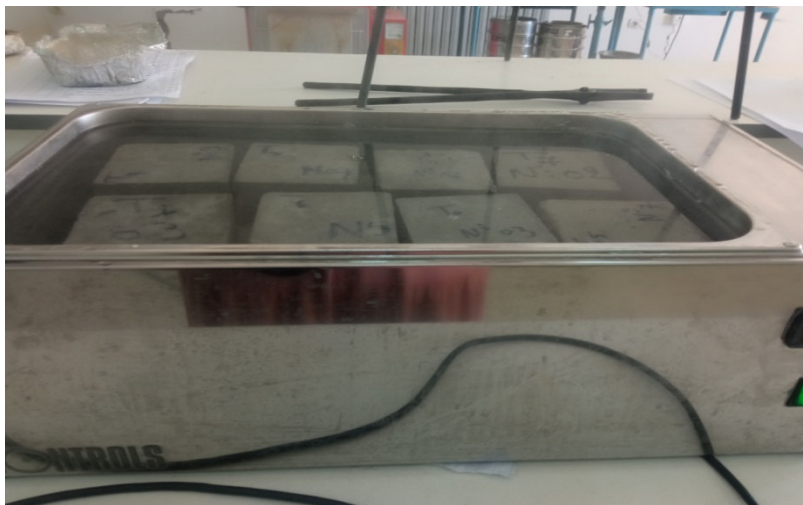


Fig. III. 3 Essais de la porosité

III.2.2.4. Equivalent de sable : (NF EN 933-8+A1J UI LLET 2015)**But de l'essai :**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

Résultats obtenus :

Les résultats des essais sont reportés dans le tableau ci - dessous

III.2.2.4.1. Équivalent de sable visuel E .S . V :

$$E. S.V = (H2 / H1) \times 100\%.$$

H2 : hauteur de sable propre déterminée visuellement.

III.2.2.4.2. Équivalent de sable au piston E .S . P:

$$E. S. P = (H'2 / H1) \times 100 \%$$

H'2 : hauteur de sable propre déterminée au miston.

H1 : hauteur de sable propre + hauteur des impures

Tableau III. 8 Equivalent de sable

Mesures	H2 (cm)	H1 (cm)	H'2 (cm)	Esv %	Esp %
Essai 1	9.3	12.5	8.6	74.40	68.80
Essai 2	8.7	11.3	7.3	76.99	64.60
Essai 3	8.7	12.9	8.7	67.44	67.44

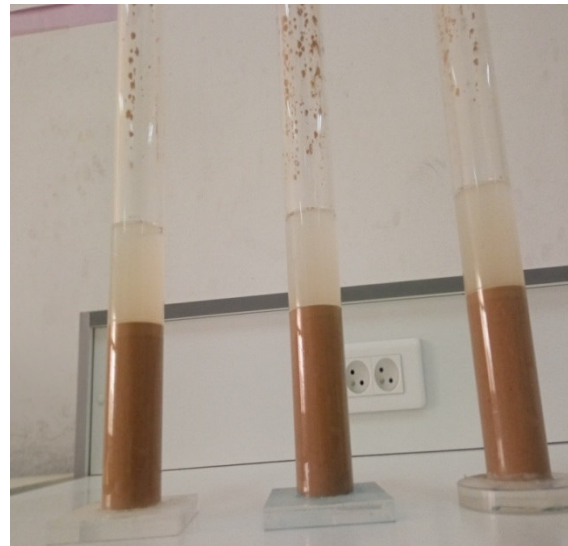
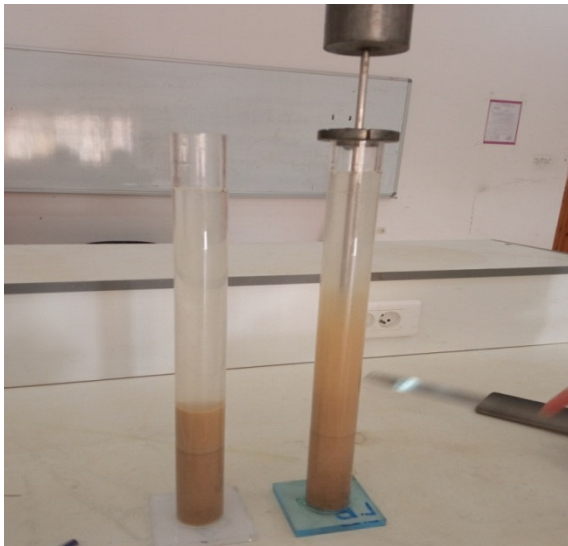


Figure. III.4. Essai d'équivalent de sable

III.2.2.5. teneur en eau : nf en 1097-5

Définition et But de l'essai :

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats.

Les résultats obtenus :

$$W = \frac{[(M_h - M_s) \cdot 100]}{M_s} (\%) \qquad W = \frac{400 - 399}{400} \times 100 = 0.25\%$$

D'où : M_s : poids du sable sec en (g);

M_h : Poids du sable humide en (g)

Tableau III. 9 Teneur en eau

Gravier	M ₁ (g)	M ₂ (g)	w (%)
3/8 mm	400	399	0.25
8 /16 mm	400	398	0.5

- **Degré d'absorption gravier : NF P 18-555**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau. Elle est défini par la formule suivante.

$$A = [(m_2 - m_1) / m_1] \times 100$$

$$A = \frac{403 - 400}{400} \times 100$$

Tableau III. 10 Degré absorption gravier

Gravier (mm)	M1 (g)	M2 (g)	A (%)
3/8	400	403	0.75
8/16	400	402	0.5

III.2.2.6. Détermination de la résistance par les essais non destructifs :

On a utilisé les essais non destructifs tels que :

- La méthode de la dureté superficielle ou essai au scléromètre ;
- La méthode d'auscultation dynamique ou ultrason

III.2.2.6. 1. Essai d'auscultation dynamique (Essai Sclérométrique) (NF EN 12504-2)

Objectif de l'essai :

- 1 - permettre l'obtention rapide de la résistance du béton d'un ouvrage, sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage.
- 2 - La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

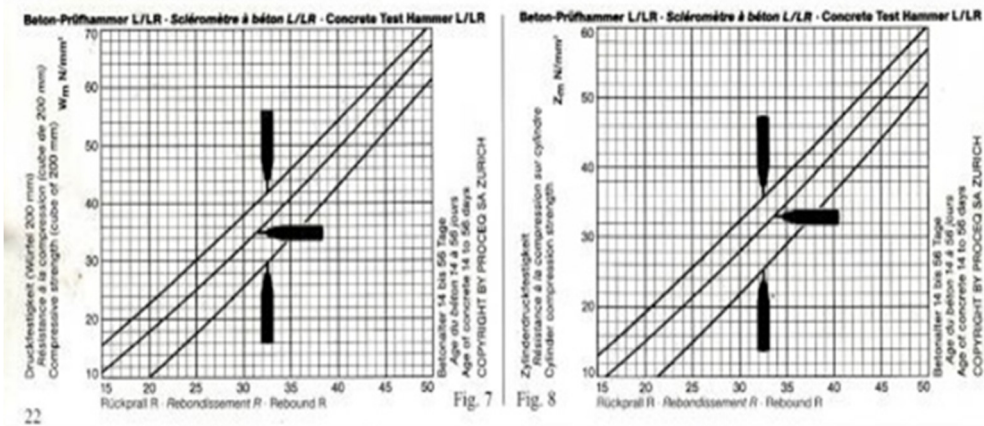
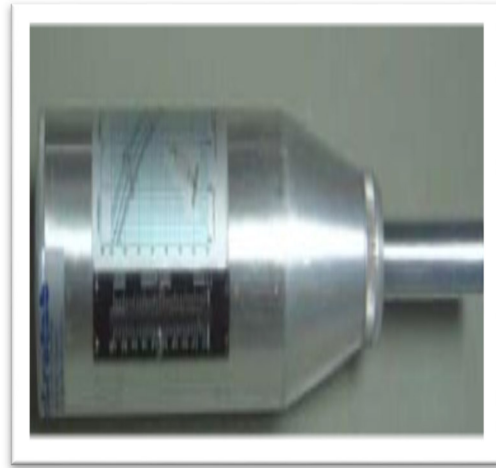


Fig. III. 4 Abaques donnant la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique I_s

III.2.2.6. 2. Essai d'auscultation sonore (Essai Ultrasonique) :

Objectif de l'essai :

Le but de l'essai est d'apprécier la qualité du béton d'un ouvrage, sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage.

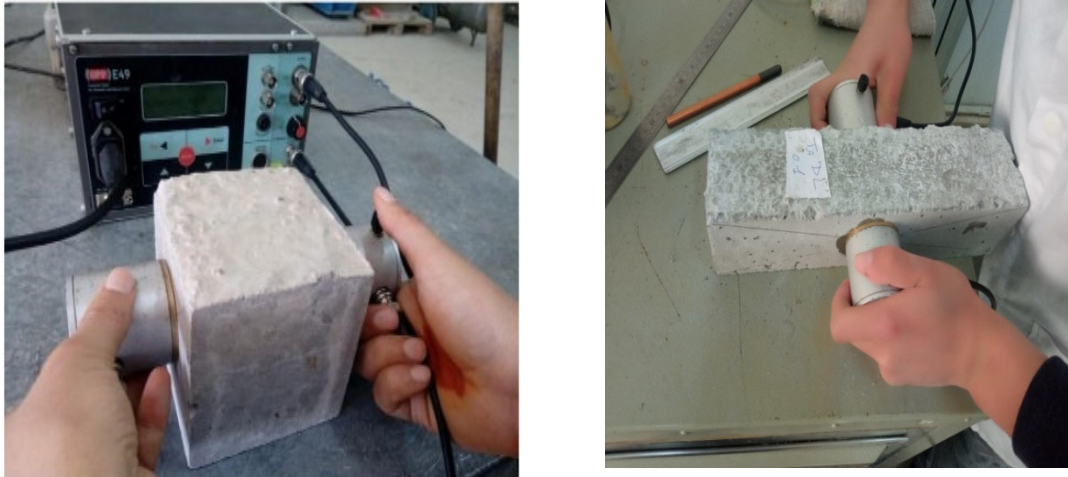


Fig. III. 5 Appareil d'auscultation sonore.

III.2.2.7. Détermination de la composition du béton :

La composition du béton est présentée ci-après, selon la méthode de Dreux Gorisse

Etapas de formulation

La composition d'un m^3 de béton est :

a) Choix du rapport E/C :

D'après l'abaque :

On : $f_{c28}=25$

- $f(C, A)$

$A=7\text{mm}$

$C=350 \text{ kg/m}^3$

$C/E= 1,2$

$\sigma'_{28} = G\sigma'c (C/E - 0.5)$

$28,75=0,45.45 (C/E - 0,5)$

$20,25 C/E = 38,875$

$C/E = 38,875/20,25 = 1,9$

$C/E = 1,9$

b) choix du dosage en eau :

$$C/E = 1,2 \rightarrow E = C/1,2$$

$$E = 233,33 \text{ kg/m}^3$$

c) choix du dosage en eau :

D'après l'analyse granulométrique en procède au traçage des courbe de chaque type d'agrégats sur le graphe.

$$\text{Pour notre cas : } D_{max} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Une abscisse : } X_a = D_{max}/2 = 8$$

$$\text{Une ordonnée : } Y_a = 50 - \sqrt{D_{max}} + K$$

K : valeur de terme correcteur en fonction du dosage en ciment de ma puissance de la vibration et de la régularité des granulats (du sable en particulier).

$$\text{Pour notre Cas : } K=0$$

$$Y_a = 50 - \sqrt{16} + 0 = 46 \rightarrow \begin{cases} Y_a = 46 \\ X_a = 8 \end{cases}$$

D'après la courbe granulométrique, on trouve les pourcentages des granulats suivants :

$$\text{Sable (0/5)} = 34\%$$

$$\text{Gravier (3/8)} = 12\%$$

$$\text{Gravier (8/16)} = 54\%$$

AVEC :

$$\text{Le coefficient de compacité : } \gamma = 0.815$$

$$\text{Le volume absolue des matériaux : } 1000 \times 0.815 = 815$$

$$\text{Le volume de ciment : } 400 / 3.1 = 129.03 \text{ L}$$

$$\text{Le volume des granulats : } 815 - 129.03 = 685.97 \text{ L}$$

DONC :

$$\text{Sable : } 685.97 \times 34\% = 233,22 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier 3/8 : } 685.97 \times 12\% = 82.32 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier 8/16 : } 685.97 \times 54\% = 370.42 \text{ Kg/m}^3$$

$$M_s = 233,22 \times 2,55 = 594,7 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier 3/8 : } 82,32 \times 2,60 = 214,03 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier 8/16 : } 685,97 \times 2,55 = 944,57 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_T = ((12 \times 10 \times 10 \times 10) + (6 \times 7 \times 7 \times 28))$$

$$V_T = 23\ 266,8$$

Ciment : $V_T \times 400 = 9,306 \text{ Kg}$

Sable : $594,7 \times V_T = 13,836 \text{ Kg}$

Gravier 3/8 : $214,03 \times V_T = 4,98 \text{ Kg}$

Gravier 8/16 : $944,57 \times V_T = 21,98 \text{ Kg}$

Eau : $1,9 = \frac{9,306}{E} = 4,89 \text{ Kg}$

Adj. : 0,7% Ciment

2^{eme} formulation :

Gravier 3/8 : 57%

Sable : 43%

Ciment : $400/3,1 = 129,03$

$V_T = 690,96$

$V_S = 690,967 \times 0,43 = 297,12 \text{ Kg}$

Gravier 3/8 : $690,967 \times 0,57 = 393,85 \text{ Kg}$

Dans un 1m^3 :

Sable : $297,12 \times 2,54 = 754,67 \text{ Kg/m}^3 = 17,5 \text{ Kg}$

Gravier 3/8 : $393,85 \times 2,56 = 1008,26 \text{ Kg/m}^3 = 23,45 \text{ Kg}$

Ciment : 8,375 kg

Laitier : 0,9306 kg

Eau : 4,89 Kg

Fibre : 1% et 2%

II.3 Les résultats obtenus des déterminations de la résistance par les essais non destructifs :

Tableau III. 11 Les résultats de scléromètre et d'ultrason à 7 jours

moyenne cubiques T0, T1, T0', T3, T4, T5, T6, T7 (7J)		
Les éprouvettes cubiques	Moyenne sclr	Moyenne ultr V(m/s), T(μs)
T1	26,33	T=13,56V=7357,33
T0	20,25	T=13,62V=7311,11
T0'	38,41	T=13,86V=7261
T3	39,58	T=13,86V=7261

T4	34,91	T=15,13V=6730,66
T5	37,25	T=17,53V=5460,33
T6	27,59	T=13,6V=7852,66
T7	32,83	T=23,33V=4192
T8	34,83	T=17 V=5985,33

moyenne prismatiques T0, T1, T0', T3, T4, T5, T6, T7 (7J)		
Les éprouvettes prismatiques	Moyenne sclr (Mpa)	Moyenne ultr V(m/s),T(μ s)
T1	23,5	T=7,43 V=9022
T0	25,66	T=7,66 V=9009,66
T0'	29,5	T=10,16 V=7056,66
T3	29,5	T=11,83 V=5960,33
T4	25,5	T=9,76 V=7419,33
T5	26,3	T=8,33 V=8200,66
T6	29,83	T=7,66 V=9401
T7	25	T=18,1 V=3138,66
T8	29	T=9,3V=7138,33

Tableau III. 12 Les résultats de scléromètre et d'ultrason à 28 jours

moyenne cubiques T0, T1, T0', T3, T4, T5, T6, T7 (28J)		
Les éprouvettes cubiques	Moyenne sclr (Mpa)	Moyenne ultr V(m/s),T(μ s)
T1	400	T=21,9V=4609
T0	30,25	T=22,53V=4481,66
T0'	30,41	T=18,16V=3962
T3	28,08	T=24,33V=4041
T4	32,25	T=7,56V=13319
T5	30,5	T=7,26V=13762,33
T6	35	T=10,36V=8529,66
T7	29,91	T=23,93V=4023,66

Moyenne prismatiques T0, T1, T0', T3, T4, T5, T6, T7 (28J)		
Les éprouvettes prismatiques	Moyenne sclr (Mpa)	Moyenne ultr V(m/s), T(μ s)
T1	36,87	t=16,93V=4107,66
T0	31,83	T=16,39V=4164,66
T0'	27,33	T=17,43V=5426,66
T3	26,66	T=18,53V=5130,33
T4	33,16	T=4,23V=27217,33
T5	33,25	T=4,25V=14932,5
T6	38,66	T=3,33V=16335
T7	28,41	T=17,26V=4083

Tableau III. 13 Les résultats de scléromètre et d'ultrason à 45 jours

Moyenne cubiques T0, T1, T0', T3, T4, T5, T6, T7 (45J)		
Les éprouvettes cubiques	Moyenne sclr (Mpa)	Moyenne ultr V(m/s), T(μ s)
T1	30,66	T=9,6V=10436,33
T0	33,75	T=10,76V=9272
T0'	31,66	T=11,2V=8623,33
T3	35,83	T=10,63V=9325,66
T4	32,25	T=25,45V=3412,5
T5	49,75	T=33V=3118,5
T6	43,25	T=21,75V=4864
T7	41,5	T=67,75V=1120,5

CHAPITRE IV

RESULTAT ET INTERPRETATION

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents essais effectués sur les matériaux utilisés pour la formulation des bétons avec laitier granulé et fibre métallique ainsi que les essais réalisés sur le béton confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état durci et l'état frais.

Nomenclatures des bétons :

Composition T0 : Ciment+Sable+ Gravier (3/8) +Gravier (8/16) +Adj+Eau.

Composition T1 : Ciment+Sable +Gravier 3/8+Gravier 8/16+Laitier Eau.

Composition T0' : Ciment+Sable+Gravier(3/8)+Laitier+Eau.

Composition T3 : Ciment+Sable +Gravier 3/8 + Laitier +2% Fibre+Eau.

Composition T4 : Ciment+Sable+Gravier(3/8)+Adj+Eau.

Composition T5 : Ciment+Sable +Gravier 3/8 + Laitier +Adj+Eau.

Composition T6 : Ciment+Sable +Gravier 3/8 + Laitier +Adj+1% Fibre +Eau.

Composition T7: Ciment+Sable +Gravier 3/8 + Laitier+2% Fibre +Adj+Eau.

Composition T8 : Ciment+Sable +Gravier 3/8 + Laitier +2% Fibre+Eau.

Les mélanges obtenus sont regroupées dans le tableau (Tableau V.1.) :

Tableau IV. 1 Mélange des bétons

	Ciment (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravier (3/8) (kg/m ³)	Gravier (8/16) (kg/m ³)	Fibre (g/m ³)	Laitier (kg/m ³)	Adj (g/m ³)	Eau (kg/m ³)
T0	9,306	13,83	4,98	21,9	/	/	65,1	4,89
T1	8,975	13,83	4,98	21,9	/	0,93	/	4,45
T0'	8,375	13,83	26,88	/	/	0,93	/	5,19
T3	8,375	17,5	23,45	/	186,2	0,93	/	4,12
T4	9,306	17,5	23,45	/	/	/	65,14	4,767
T5	8,375	17,5	23,45	/	/	0,93	4,89	4,75
T6	6,375	17,5	23,45	/	1% =93,06	0,93	65,1	4,73

T7	8,575	17,5	23,45	/	2% =167,5	0,93	65,1	4,89
T8	8,375	17,5	23,45	/	1%	0,93	/	4,89

IV. 1 Résultat des essais à l'état frais

IV.1.1. La masse volumique à l'état frais

Les figures ci-dessous montrent les résultats des bétons à l'état frais. On a gardé le même affaissement pour tous les mélanges de béton à 7cm (à l'état plastique).

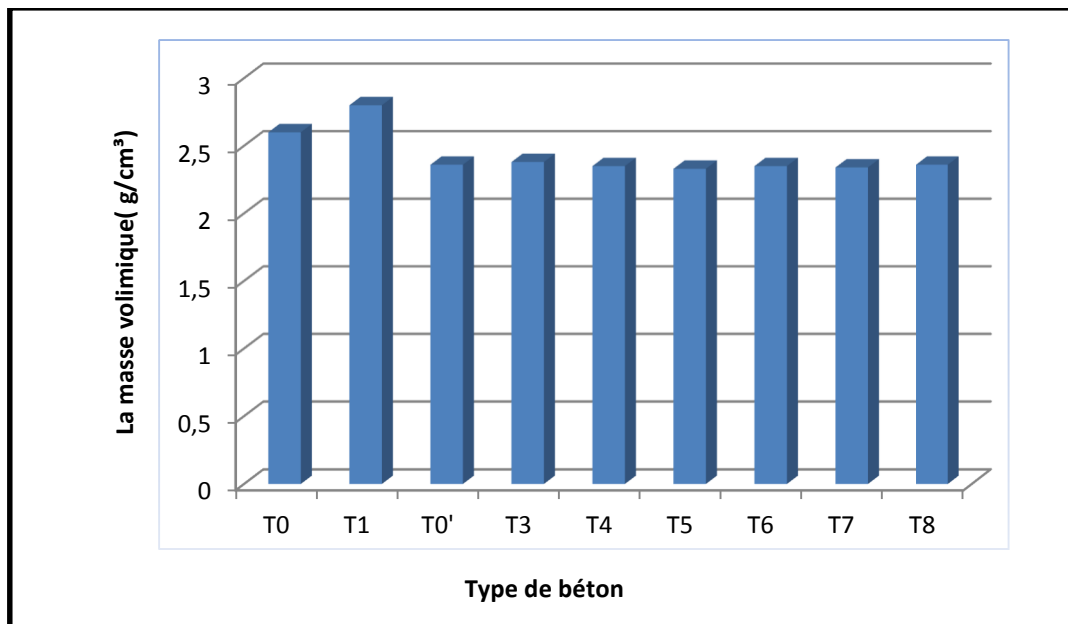


Fig. IV. 1 La masse volumique des bétons à l'état frais

La figure IV.1 montre que l'introduction de fibres métallique modifie de façon significative les masses volumiques des bétons qui au contraire sont très influencées par l'ajout de fillers de laitier granulé. La masse volumique des T0 et T1 est voisine de celle d'un béton armé qui est de l'ordre de 2500 kg/m^3 .

IV.2. Résultat des essais à l'état durcis

IV.2.1. Effet de fibres :

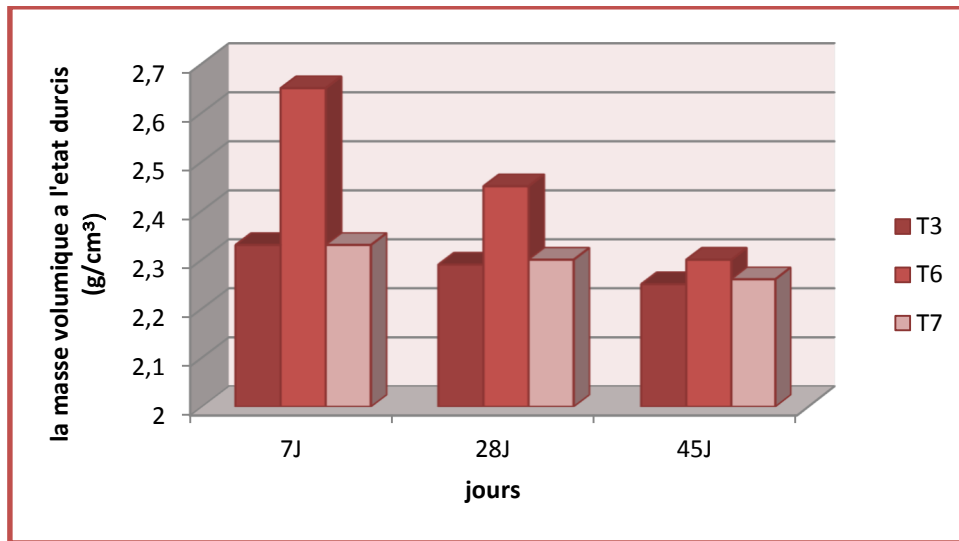


Fig. IV. 2 La masse volumique des bétons fibrés a l'état durcis en fonction de temps

IV.2.2. L'effet de laitier

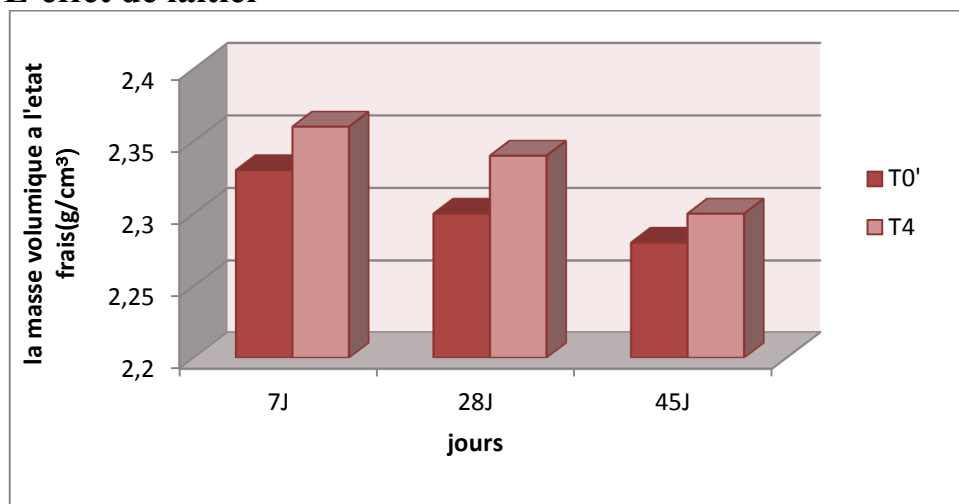


Fig. IV. 3 La masse volumique des bétons avec et sans laitier granulé a l'état durcis en fonction de temps

Les figures **IV.2** et **IV.3** présentent les résultats de la masse volumique des bétons durcis. L'incorporation de laitier par 10% diminue la masse volumique du béton fibrés de l'ordre de 16,78%.

Le renforcement du béton fibrés par (1 et 2%) de FM diminue légèrement la masse volumique de T3, T6 et T7 respectivement, l'augmentation du teneur en fibre présente un gain de diminution de l'ordre de 2% à 6%.

On peut conclure que :

Le poids du laitier substitué par le ciment est très petit par rapport au poids des granulats vu que la finesse de laitier est plus élevée par rapport au ciment. Le poids des FM incorporé dans le béton est n'négligeable par rapport au poids des granulats donc leurs effet présentent des changements légères dans le béton en plus une vibration insuffisante.

IV.2.3. Comportement mécaniques (l'effet de sup)

- Résistance à la compression :

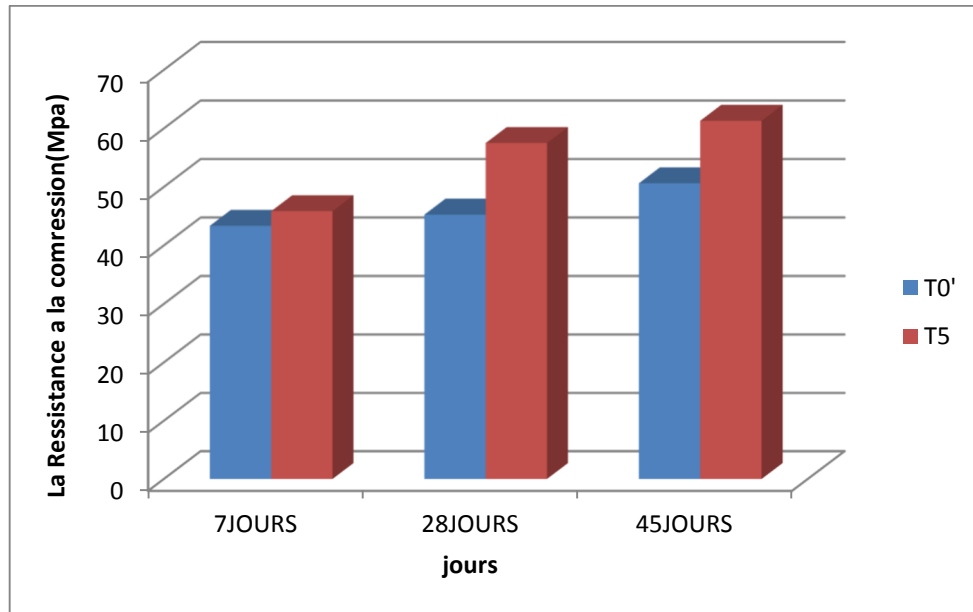


Fig. IV. 4 La Résistance à la compression

- Résistance à flexion par traction :

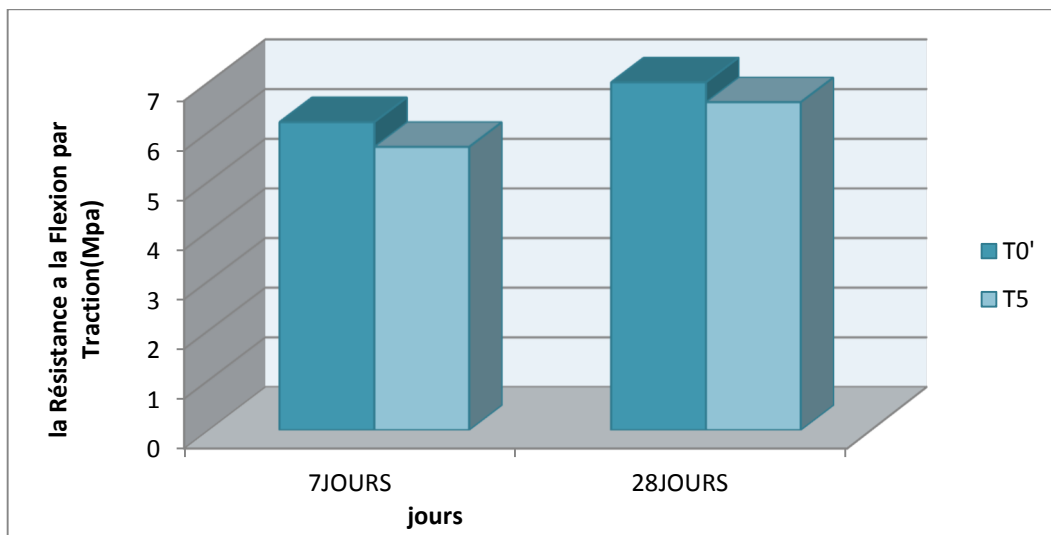


Fig. IV. 5 La Résistance à la flexion par traction

D'après les résultats obtenus on peut constater que :

- La résistance des bétons sans adjuvant (T0') est totalement inférieure aux bétons adjoints à cause de l'effet de l'adjuvant et l'absence de fibres qui influent sur les caractéristiques physiques (maniabilité et ouvrabilité) du béton.

• Les bétons fibrés : le béton avec les fibres, présentent une résistance mécaniques supérieures à celui sans fibres à cause de la présence de fibres qui influent considérablement sur la fluidité du béton, d'autre part cela est due à la très grande finesse de la laitier. [59]

IV.2.4. L'effet de laitier :

- Résistance a compression :

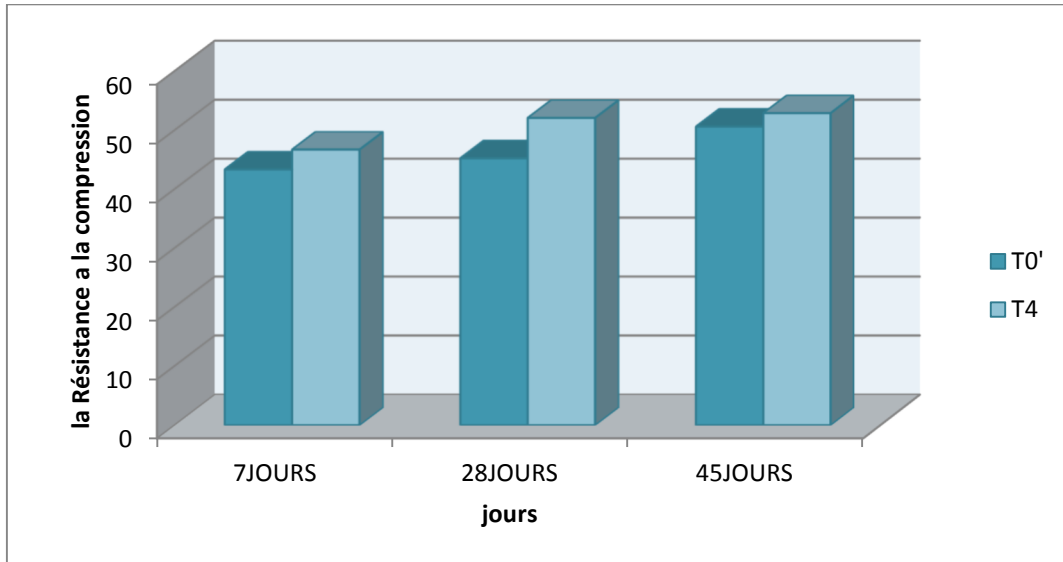


Fig. IV. 6 La Résistance à la a compression (composition T0'et T4)

- Résistance à flexion par traction :

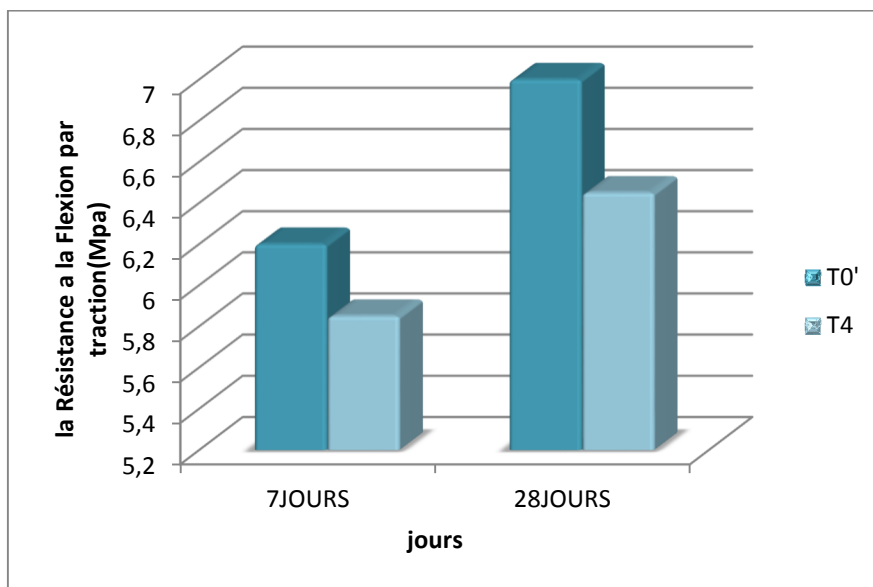


Fig. IV. 7 Résistance à la flexion par traction flexion (composition T0'et T4)

IV.2.5. L'effet de fibre métallique :

- Résistance a compression :

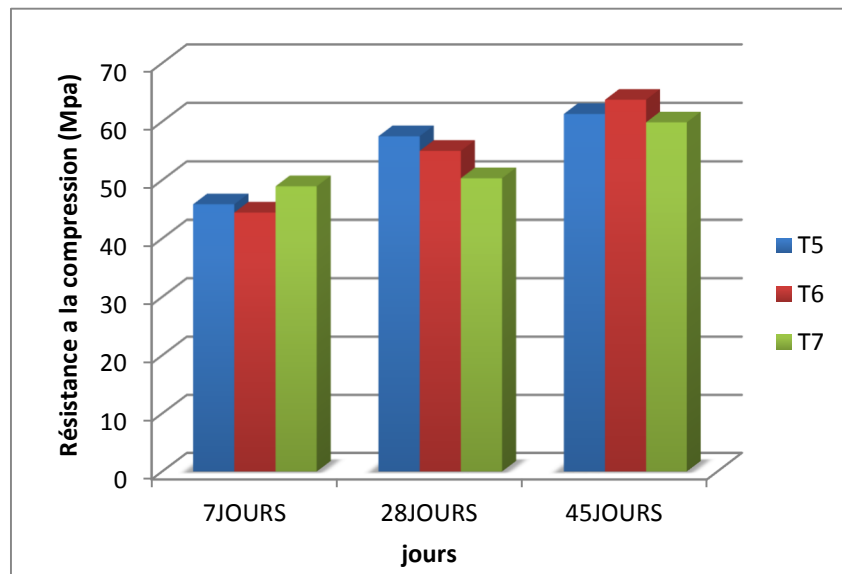


Fig. IV. 8 La Résistance à la compression

- Résistance à flexion par traction :

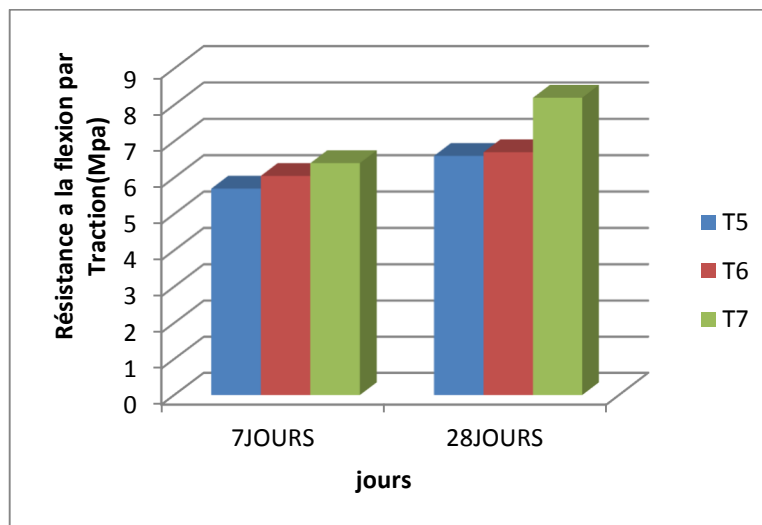


Fig. IV. 9 La Résistance à la flexion par traction

On Remarque:

- De très bonnes performances à jeune âge.
- Une augmentation des résistances entre 7 et 28 jours, pour tous les bétons. Cela est dû à l'hydratation de la pâte liante et la formation de cristaux qui se densifient au cours du temps et ainsi participent à l'augmentation des résistances.

- Les résistances apportées par l'addition de laitier se révèlent être meilleures que celles apportées sans addition à différentes échéances.
- L'ajout de fibres métalliques augmente légèrement la résistance à 7 et 28 jours (T6 et T7), mais à 45 jours on note une évolution de 10 % de la résistance des bétons fibrés avec ajout de laitier par rapport au même béton sans fibres, et une évolution entre 25 - 30% de la résistance des bétons fibrés avec ajout de laitier par rapport au même béton sans fibres.

À 28 jours le béton T7 dépasse le T6 même si l'ajout de laitier a donné de meilleurs résultats sans fibres, cela s'explique par une moins bonne adhérence entre la pâte et les fibres par rapport à celle avec ajout de laitier

IV.2.6. L'effet de pourcentage de fibre : 1% et 2% de fibre

- Résistance a compression

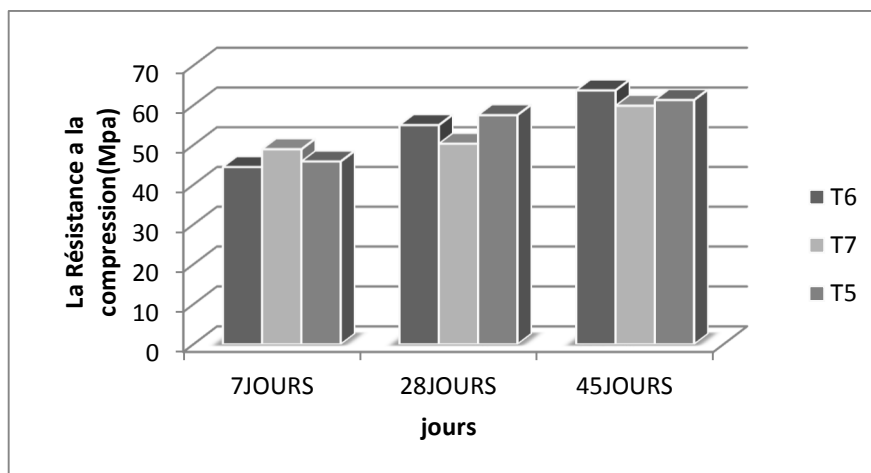


Fig. IV. 10 La résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression du béton fibres avec les deux pourcentages de fibres métalliques obtenues à 7 et 28 et 45 jours sont représentés dans la figure (V.7). L'incorporation des fibres a pu améliorer la résistance des bétons fibrés (1 et 2%) de 9,25% à l'âge de 7 jours et de 12 et 12,50% à l'âge de 28 jours et 6,05% à l'âge de 45 jours respectivement par rapport au béton fibres. Alors que pour l'effet du dosage de FM, La figure (V.7.) montre que l'augmentation du taux des fibres (de 1 à 2%) a augmenté la résistance à la compression à l'âge de 7 jours de 9,25 %. Par contre à l'âge de 45 jours, la résistance à la compression a diminué de 6,05% (figure V.7).

- Résistance à flexion par traction :

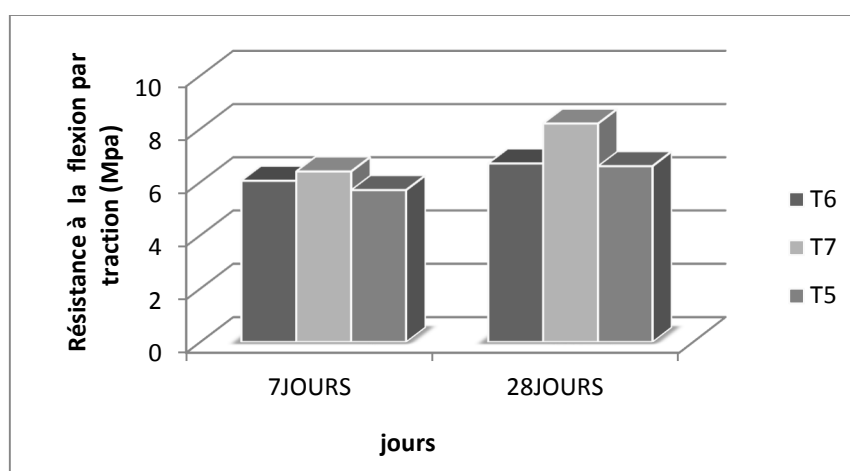


Fig. IV. 11 La résistance à la flexion par traction

Les résultats de la résistance à la traction du béton fibres avec deux pourcentages de fibres métalliques obtenues à l'âge de 7 et 28 jours sont représentés dans la figure (IV.8). Le renforcement du béton fibres par les FM (1 et 2%) fait augmenter la résistance à la traction de 10,93% à l'âge de 7 jours et de 19,51% à l'âge de 28 jours respectivement.

Le béton sans fibres à un comportement fragile, on distingue bien la rupture franche caractéristique des bétons.

L'ajout de fibres métalliques augmente la résistance à la traction par flexion et la transmission des sollicitations via matrice vers les fibres métalliques confère au béton un comportement ductile.

IV.2.7. L'effet de dimension des granulats sur les propriétés de béton :

- **Résistance a compression :**

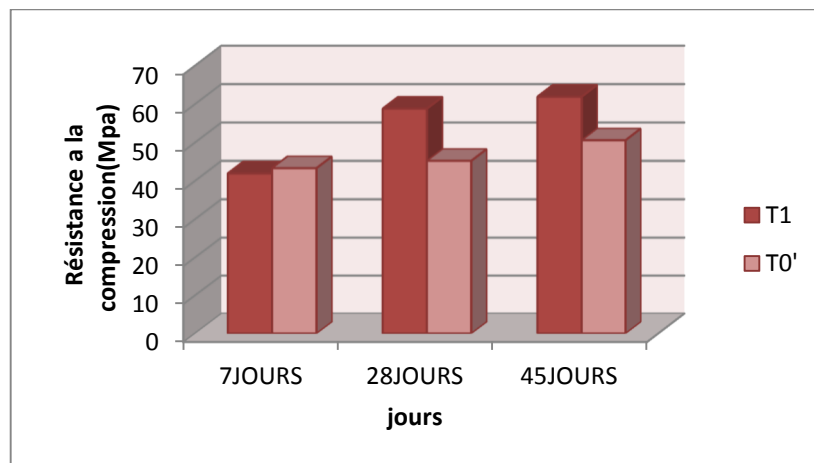


Fig. IV. 12 La résistance à la compression

- **Résistance à flexion par traction :**

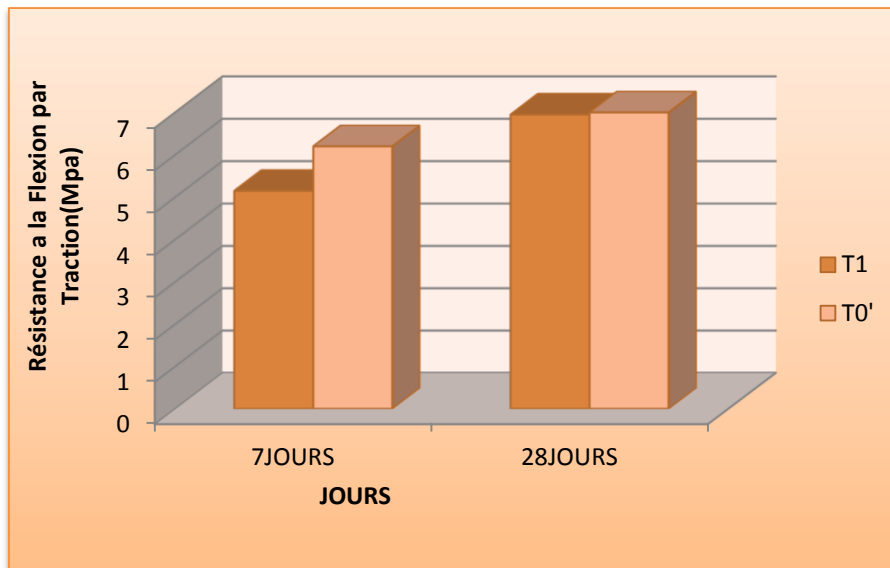


Fig. IV. 13 La résistance à la flexion par traction

À travers les résultats présentés au-dessus, nous notons que l'augmentation de la taille du granulat par la fraction (8/15) mm dans le béton a un effet positif sur le squelette granulaire qui s'est traduit par une augmentation de la résistance mécanique à 20%.

IV.2.8. La porosité et l'absorption

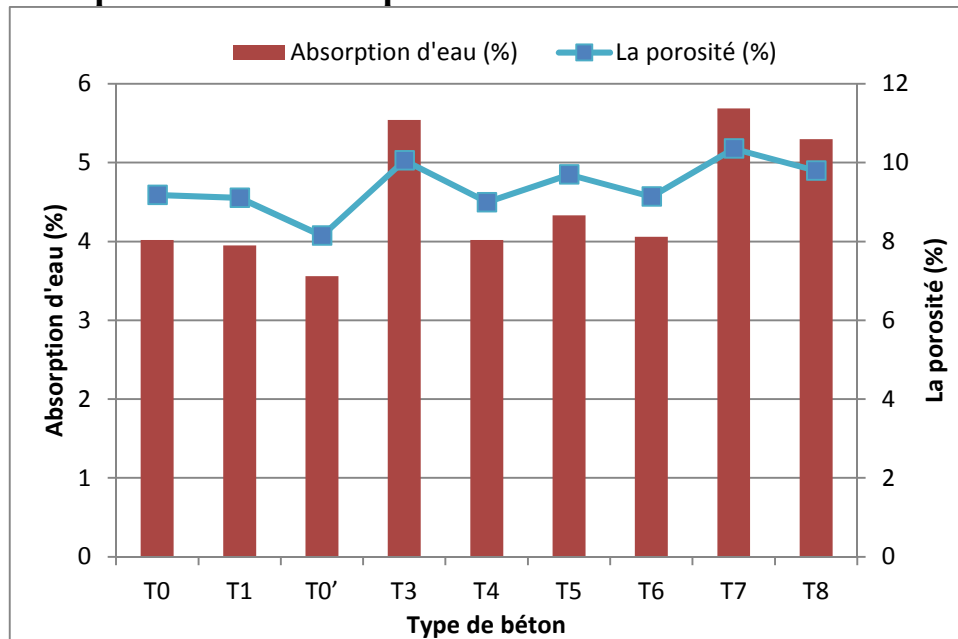


Fig. IV. 14 La porosité et l'absorption

La figure I.4 indique que l'augmentation de la porosité du T3, T7 et T8 influence de manière significative sur les compressions des bétons testés, mais une telle diminution s'est avérée limitée, principalement pour les restes des bétons. En général, la réduction de la porosité du béton T0', T1, T0 T4 et T6 se traduit par une augmentation de la compression du béton. On constate que la texture des granulats

Ainsi que sa porosité ont un effet sur la résistance du mortier durci. À partir de l'incorporation de l'échantillon avec différents % d'addition cimentaires, le remplacement a un pourcentage mineur de porosité des mélanges par rapport au béton de référence. Cela est dû au plus faible volume de vides à l'intérieur du squelette granulaire.

Nous avons réalisé plusieurs bloc de béton qui ont donné une résistance élevée avec fibres fibre comme ils montrées dans la figure ci-dessous.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les scories additionnées de minéraux sont de plus en plus utilisées dans la fabrication des mélanges de béton pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou dur.

L'utilisation d'additifs dans la production de béton a largement résolu le problème de l'autosuffisance nationale, ainsi que le problème des faibles coûts énergétiques. En modifiant les pourcentages d'additifs, on peut obtenir, selon les domaines d'utilisation, différentes proportions de laitier aux propriétés physico-mécaniques recherchées.

Ces travaux contribuent à améliorer les propriétés du béton en incorporant différents types d'additifs minéraux : calcaire, laitier, pouzzolane et fibres métallique.

Les différents résultats présentés dans cette étude définissent clairement l'effet principal du rapport d'addition et du type d'addition.

Parmi ces ajouts, l'ajout de 10 % de laitier et l'ajout de 1 à 2 pourcentages de fibres métallique.

En tant que matériau de compensation de la masse totale de ciment.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes : les masses volumiques des bétons qui au contraire sont très influencées par l'ajout de fillers de laitier granulé. La masse volumique des T0 et T1 est voisine de celle d'un béton armé qui est de l'ordre de 2500 kg/m³.

- ☞ Le poids du laitier substitué par le ciment est très petit par rapport au poids des granulats vu que la finesse de laitier est plus élevée par rapport au ciment. Le poids des FM incorporé dans le béton est négligeable par rapport au poids des granulats donc leurs effets présentent des changements légers dans le béton en plus d'une vibration insuffisante.
- ☞ le béton avec les fibres, présente une résistance mécanique supérieure à celui sans fibres à cause de la présence de fibres qui influent considérablement sur la fluidité du béton, d'autre part cela est dû à la très grande finesse de la laitier.
- ☞ Une augmentation des résistances entre 7 et 28 jours, pour tous les bétons. Cela est dû à l'hydratation de la pâte liante et la formation de cristaux qui se densifient au cours du temps et ainsi participent à l'augmentation des résistances.

Référence Bibliographique

- ☞ Les résistances apportées par l'addition de laitier se révèlent être meilleures que celles apportées sans addition à différentes échéances.
- ☞). L'incorporation des fibres a pu améliorer la résistance des bétons fibrés (1 et 2%) de 9,25% à l'âge de 7 jours et de 12 et 12,50% à l'âge de 28 jours et 6,05% à l'âge de 45 jours respectivement par rapport au béton fibres. Alors que pour l'effet du dosage de FM, La figure (V.7.) montre que l'augmentation du taux des fibres (de 1 à 2%) a augmenté la résistance à la compression à l'âge de 7 jours de 9,25 %. Par contre à l'âge de 45 jours, la résistance à la compression a diminué de 6,05% (figure V.7).
- ☞ L'ajout de fibres métalliques augmente la résistance à la traction par flexion et la transmission des sollicitations via matrice vers les fibres métalliques confère au béton un comportement ductile.
- ☞ À travers les résultats présentés au-dessus, nous notons que l'augmentation de la taille du granulats par la fraction (8/15) mm dans le béton a un effet positif sur le squelette granulaire qui s'est traduit par une augmentation de la résistance mécanique à 20%.
- ☞ En général, la réduction de la porosité du béton T0', T1, T0 T4 et T6 se traduit par une augmentation de la compression du béton. On constate que la texture des granulats
- ☞ Ainsi que sa porosité ont un effet sur la résistance du mortier durci. À partir de l'incorporation de l'échantillon avec différents % d'addition cimentaires, le remplacement a un pourcentage mineur de porosité des mélanges par rapport au béton de référence. Cela est dû au plus faible volume de vides à l'intérieur du squelette granulaire.

D'après cette étude on peut conclure que les additifs naturels ou synthétiques peuvent contribuer à la production de béton économique de haute qualité.

Référence Bibliographique

Recommandations et perspectives

Sur la base des résultats obtenus et conclusions tirées de cette étude ; nous recommandons pour des travaux de recherche futurs :

- Etude sur l'effet des dimensions d'éprouvettes par des essais descriptifs et non-destructifs lors d'évaluation de la réponse mécanique ;
- Etude l'effet de variation de type de fibre avec la longueur des fibres sur la réponse mécanique par des essais direct et indirects.

Référence Bibliographique

Référence Bibliographique

Référence Bibliographique

[1]. <http://cmguide.org/arabic/?p=31>

[2]. [présenté par l'élève].

[3]. <http://www.alnodom.com/index>

[4] A. Kerbouche. Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons. mémoire de magister .UST Oran .2009.

[5] G. Chanvillard. Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas, 1999.

[6] A. Kerbouche. Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons. Mémoire de magister .UST Oran .2009.

[7] Georges DREUX, Jean FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8^{ème} édition Eyrolles Paris 1998.

[8] O. Haddad, S. Aggoun, R. Carbollic. Influence de l'addition minérale sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants, Université de Cergy-Pontoise, France, 2003.

[9] Rachida IDIR Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, doctorat de l'université de toulouse, 2009, 304 Page

[10] N. Petrov. Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'étringite, Thèse de doctorat à l'Université Sherbrooke Canada, avril 2003.

[11] A. Meyer. Experiences in the use of super plasticizers in Germany, in Super plasticizers in concrete, ACI SP-62, P. 21-36, Detroit, Michigan, (1979).

[12] Norme Française XP P 18-540. Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : p 15-540", 1997.

[13] A. M. Neville. Propriétés des bétons, traduit par le Crib, Edition Eyrolles, 806p, 2000

[14] Norme Française EN 12-620. Granulats pour béton hydraulique, 2004.

[15] Okamura h, Ouchi m., "Self-compacting concrete. Development present use and future", First International RILEM symposium on self-compacting concrete.

RilemPublication S.A.R.L., 3 14, 1999.

Référence Bibliographique

- [16] Bensebti S.E, “Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2008
- [17] Association française de génie civil, “Recommandations pour l’emploi des Bétons autoplaçants”, 2008.
- [18] Association Française De Génie Civil, "Bétons autoplaçants – recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, afgc, juillet 2000
- [19] Haddadou Naima, «Elaboration et caractérisation de béton auto plaçant fibré avec ajout de poudre de marbre», Thèse de doctorat de l’Université M’Hamed Bougara, Boumer des, 2015.
- [20] Okamura.H, Ozawa.K and ouchi.M, “self-compacting concrete”, Structural Concrete, Marsh – 2000.
- [21] Nagataki S, Fujiwara H, “Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete”, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, LasVegas, ACI SP 154-16, pp. 301-314, June 1995.
- [22] Hayakawa M, Matsuoka Y, Yokota K, “Application of super workable concrete in the construction of 70-story building in Japan”, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.
- [23] Petersson Ö., Bellberg P. and Van B.K., “A model for Self-Compacting concrete” International Rilem conference on ‘Production methods and workability of concrete’ Rilem proceeding 32, 1996
- [24] [https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_hautes_performances]
- [25] https://www.academia.edu/43333218/B%C3%A9ton_%C3%A0_Haute_Performance_HP
- [26] H. GAHER. «Analyse de la résistance à la traction indirect et du retrait des bétons à Haute performance». Thèse de magister, USTHB, 2004.
- [27] <https://www.cmesmat.fr/actualites-conseils/beton-cellulaire-vs-parpaing-quels-sont-leurs-avantages>
- [28] Thomas, M., Green, B., O’Neal, E., Perry, V., Hayman, S., Hossack, A., Marine Performance of UHPC at Treat Island, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, p. 365-370, 2012.
- [29] Graybeal, B., Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, Report No. FHWA-HRT-06-103, Federal Highway Administration, McLean, VA., 2006.
- [30] Le ciment et les ajouts cimentaire, Mr : GUETTAF YOUCEF, Promotion 2011

Référence Bibliographique

- [31] Mr : BOUGLADA Mohamed Salah < Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier>, Mémoire de magister université Mohamed Boudiaf de m'sila.
- [32] Mr : Guettaf Youcef< Valorisation du déchet de la pierre de hammam bouhadjar dans la formulation d'un béton auto-plaçant>, Mémoire de magister ENSET D'Oran 2010
- [33] NOUI Safwan, " L'influence des granulats artificiels « laitier » sur la résistance mécanique du béton ". Mémoire de master. Département de Génie Civil, université de M'Sila 2017, dirigé par Dr. MENASRI. A.
- [34] Fronek, B., Bosela, P. ET Delatte, N. (2012). Steel slag aggregate used in Portland ciment concrète.
- [35] Cherfa H., Ait Mokhtar K. « Valorisation des déchets industriels pour la Stabilisation des couches de chaussées : cas des laitiers des hauts fourneaux » Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 – 7février 2009 à Hammamet, Tunisie. Communication pages79 -89.
- [36] Bhattacharya A.K., Aditya D., Sambasiva M., « Estimation of Operating blast furnace reactor invisible interior surface using Differential Evolution », Applied Soft Computing, vol. 13, 2013, p. 2767-2789.
- [37] Kubat C., Taskin H., Artir R., Yilmaz A., « Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF) », Robotics and Autonomous Systems, vol. 49, 2004, p. 193-205.
- [38] Khanzadi, M. et Behnood, A. (2009). Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. Construction and Building Materials, volume 23, numéro 6, p. 2183-2188.
- [39] Chunlin, L., Kunpeng, Z. ET Depeng, C. (2011). Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study. 2011 International Conference on Advances in Engineering.
- [40] Papayianni, I. et Anastasiou, E. (2011). Concrete incorporating high calcium flyash and slag aggregates. Magazine of Concrete Research, volume 63, numéro 8, p.597-604.
- [41] Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. et Shalabi, F. I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. Canadian Journal of Civil Engineering, volume 34, numéro 8, p.902- 911.
- [42] Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F. et Brunelli, K. (2012). Properties of Concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. Cement and Concrete Composites.

Référence Bibliographique

- [43] Tarn, VW Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- [44] Abu-Eishah, S. I., El-Dieb, A. S. ET Bedir, M. S. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, volume 34, p. 249- 256.
- [45] Predis - Groupe de travail n°5 : « Améliorer la valorisation des déchets Industriels en BTP », Guide technique régional relatif à la valorisation des laitiers de Hauts fourneaux, Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille. p 18-20
- [46] Chikouche Mohamed Aziz ,Effet des ajouts à base d'argiles et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaire, Mémoire de magister université Mohamed Boudiaf de m'silla.
- [47] Ashby M.F, Jones D.R.H, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991
- [48] A.Kerbouche. « Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des
- [49] T.W.Davies, (Equipment for the study of flash heating of particules suspension). *High Temperature Technology*. Vol. 3, 1984, p141-147.
- [50] J.P.Henin, A. Pinoncely, (FCB et la calcination flash). *Mines et Carriers Technologies*, Vol.6, 1986, p249-252.
- [51] S.Salvador, (Production de pouzzolanes de synthese par calcination flash de sols argileux : étude des produits et conception d'une installation). These INSA de Toulouse,
- [52] H. H Murray, (Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite : a general overview), *Applied Clay Science*, Vol. 17, 2000, p207-221.
- [53] https://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_des_d%C3%A9chets
- [54] http://www.argeco.fr/le_metakaolin.php, consulté le 24.04.2018
- [55] Université de Bechar, FIMAS (Laboratoire Fiabilité des Matériaux et Structures), BP.417, 08000, BECHAR, Algérie 04.05.2018.
- [56] Université USTHB, SGM (Laboratoire des sciences et Génie des Matériaux), BP.32, El Alia Bab Ezouar, 16000, ALGER, Algérie 04.05.2018.
- [57] Tebbal, N., & Rahmouni, Z. E. A. (2019). Rheological and Mechanical Behavior of Mortars with Metakaolin Formulation. *Procedia Computer Science*, 158, 45-50.
- [58] Tebbal Nadia, Z. Rahmouni, and Mekki Maza. "Combined effect of silica fume and additive on the behavior of high performance concretes subjected to high temperatures." *Mining Science* 24 (2017).

Référence Bibliographique

[59] Belouadah, Messaouda. (2018). Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durci et soumis aux hautes températures (Doctoral dissertation, Université de M'sila).

[60] Maza, M., Tebbal, N., Zitouni, S., & Rahmouni, Z. E. A. (2021, December). Combined Effect of Marble Waste as Powder and Aggregate Form on the Proprieties of the Mortar. In *Annales de Chimie-Science des Matériaux* (Vol. 45, No. 6, pp. 467-476).

[61] Tebbal, N., Maza, M., Zitouni, S., & Abidine Rahmouni, Z. E. (2022). Combined Impact of Replacing Dune Sand with Glass Sand and Metal Fibers on Mortar Properties. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 32(2).

[62] Zitouni, S., Maza, M., Tebbal, N., & Rahmouni, Z. E. A. (2022, February). Impact of Rolled and Crushed Aggregate with Natural Pozzolan on the Behavior of HPC. In *Annales de Chimie-Science des Matériaux* (Vol. 46, No. 1, pp. 45-52).

[63] Chadli, M., Tebbal, N., & Mellas, M. (2019, November). Study of the Mechanical Behavior of a Reactive Powder Concrete Containing Fibers. In *International Symposium on Materials and Sustainable Development* (pp. 71-82). Springer, Cham.

[64] Tebbal, N., Maza, M., Zitouni, S., & Abidine Rahmouni, Z. E. (2022). Combined Impact of Replacing Dune Sand with Glass Sand and Metal Fibers on Mortar Properties. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 32(2).

[65] Tebbal, N., Z. Rahmouni, and L. Belagraa. "Combined effect of granulated slag and silica fume on the caractéristiques of high performance concrete." *International Review of Civil Engineering (IRECE)* 7.2 (2016): 41-49

.....

ANNEXES

Fiche technique de ciment utilisé.

FICHE TECHNIQUE CIMENT CEM II /A-M(P-L) 42.5 N

Analyse chimique CIMENT:			CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES			
ANALYSE CHIMIQUE	MIN	MAX	ESSAIS PHYSICO-MECANIQUE	MIN	MAX	NORME
SiO ₂	22,80	32,00	SS Blaine cm ² /g	2960	4200	-
Al ₂ O ₃	5,20	6,20	Consistance %	25,5	26,8	-
Fe ₂ O ₃	3,20	3,60	Début de prise	80	160	≥ 60 mn
CaO	52,00	62,00	Compression 02	12,5	23	> 10,0
MgO	1,02	1,20	Compression 07	25	36	-
K ₂ O	0,35	0,45	Compression 28	43	52	≥ 42,5
Na ₂ O	0,40	0,50	Expansion à	0	8,5	< 10 mn
SO ₃	1,80	2,20	Les constituants de ciment en % *			
PF	2,00	2,80	CLINKER	80-88		
CL	0,03	0,45	POZZOLANE + CALCAIRE	12-20		
RI	6,00	12,00	GYPSE (Régulateur de prise)	00-05		
CaOL	0,40	1,54	* Ces valeurs font référence au noyau du ciment à l'exclusion du sulfate de calcium (gypse) et de tout autre aditif.			

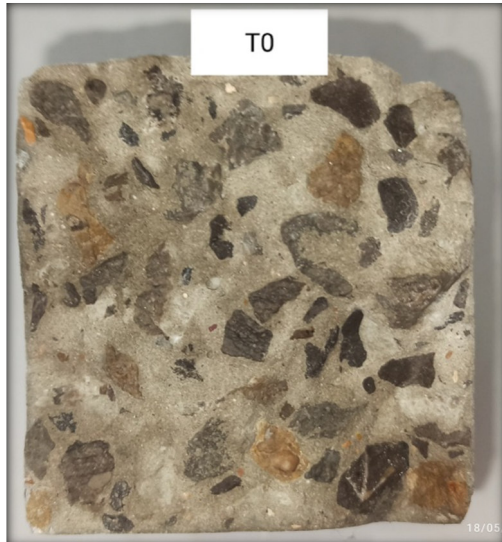
Laitier.



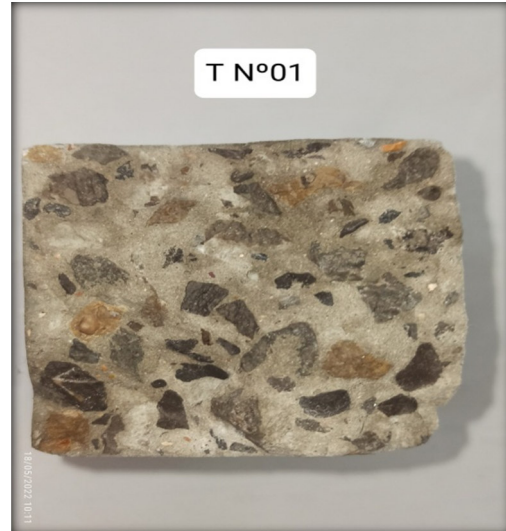
ANNEXES

Section transversale pour répartir les granulats à l'intérieur du béton.

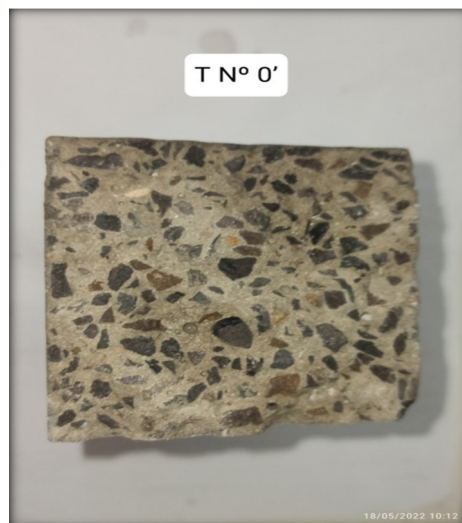
(Composition T0)



(Composition T1)

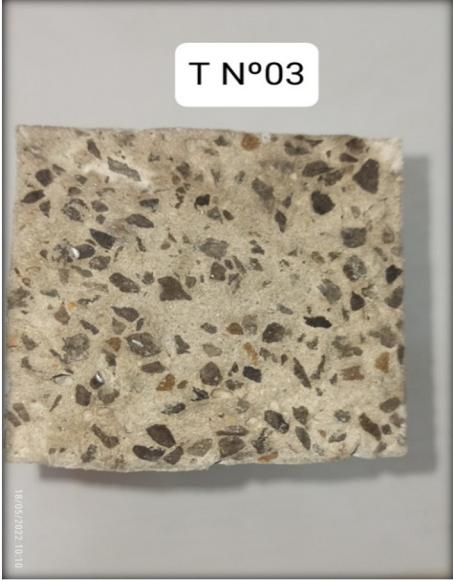


(Composition T0')

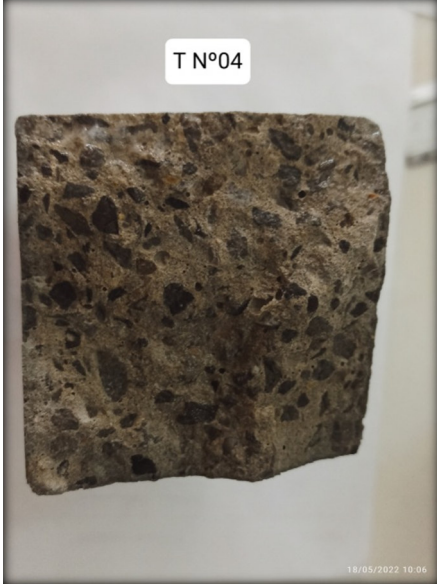


ANNEXES

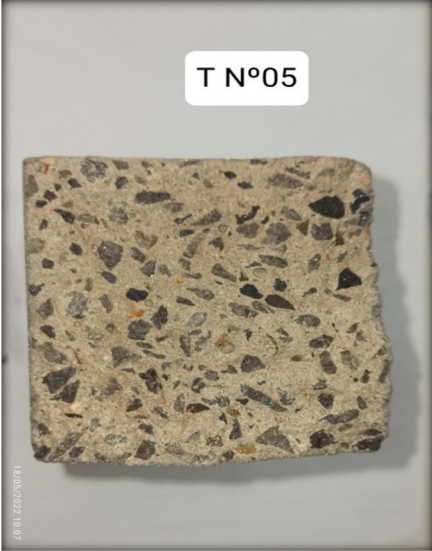
(Composition T3)



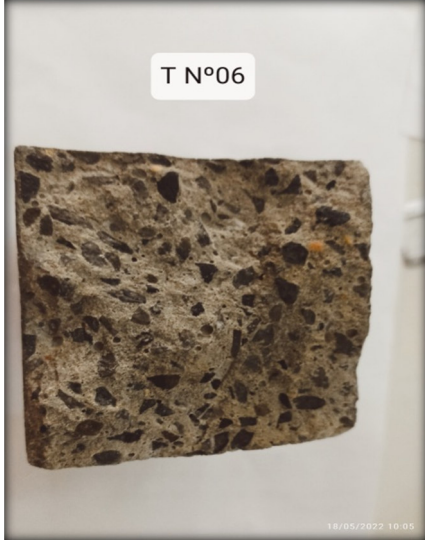
(Composition T4)



(Composition T5)



(Composition T6)





(Composition T7)



(Composition T8)

Résumé

L'industrie des matériaux de construction est en plein essor en Algérie. Pour cette raison, la plupart des recherches portent sur le développement de nouveaux composés cimentaires dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques et la durabilité des matériaux cimentaires. Le présent travail porte sur l'effet de l'incorporation de 10% de laitier sur les résistances mécaniques des briques cimentaires à base de fibre métallique et son influence sur le comportement mécanique. Les propriétés étudiées incluent la résistance à la compression (28jours), la résistance à la rupture-traction (28 jours), l'absorption d'eau (28jours), vitesse d'impulsion ultrasonore-UPV (28 jours). Les résultats montrent que l'ajout d'une quantité de 10 % de laitier avec 1% fibre métallique améliore considérablement les propriétés mécaniques. Mots clés : Brique, mortier, fibre métallique, comportement mécanique.

ملخص

تزدهر صناعة مواد البناء في الجزائر. لهذا السبب، تركز معظم الأبحاث على تطوير مركبات اسمنتية جديدة بهدف تحسين خواصها الميكانيكية والفيزيائية ومتانة المواد الإسمنتية. يركز هذا العمل على تأثير دمج 10% من الخبث على المقاومة الميكانيكية للطوب الإسمنتي القائم على الألياف المعدنية وتأثيرها على السلوك الميكانيكي. تشمل الخصائص المدروسة مقاومة الانضغاط (28 يوم)، مقاومة الانكسار (28 يوم)، امتصاص الماء (28 يوم)، سرعة النبض (يوم)، وأظهرت النتائج أن إضافة كمية 10% من الخبث مع الألياف المعدنية بنسبة 28 UPV -بالموجات فوق الصوتية 1. تحسن بشكل كبير من الخواص الميكانيكية الكلمات الرئيسية: اجر، ملاط، ألياف معدنية، ال سلوك الميكانيكي

Abstract

The building materials industry is booming in Algeria. For this reason, most research focuses on the development of new cementitious compounds with the aim of improving their mechanical and physical properties and the durability of cementitious materials. This work focuses on the effect of the incorporation of 10% slag on the mechanical resistance of cementitious bricks based on metal fiber and its influence on the mechanical behavior. The properties studied include compressive strength (28 days), breaking strength-tensile (28 days), water absorption (28 days), ultrasonic pulse velocity-UPV (28 days). The results show that the addition of an amount of 10% slag with 1% metallic fiber considerably improves the mechanical properties.

Keywords: Brick, mortar, metallic fiber, mechanical behavior.