

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des sciences de l'ingénieur
Département génie des matériaux

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme master

Spécialité : génie des matériaux

Option : matériaux en génie civil

Thème

« Valorisation du laitier dans le béton ordinaire destiné pour la précontrainte »

Réaliser par :

BELHOCINE Samir

SEFROUNE Hocine

Encadré par : Mr TAZROUT

Promotion 2017/2018



REMERCIEMENTS



*Le travail présenté dans ce mémoire à été réalisé au sein du laboratoire de
E.N.G.O.A. et l'unité de recherche UR-MOE.*

*Nos remerciements s'adressent tout d'abord à la direction de ces
établissements, et notamment monsieur **Charef Adal**, le chef de laboratoire,
pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires au bon déroulement
de cette étude.*

*Nous remercions le professeur **Tazrout.M** notre promoteur d'avoir accepté,
au milieu de ses multiples tâches, d'être rapporteur de ce mémoire et auquel
nous rendons un remerciement particulier pour ses conseils efficaces qui nous
ont été très fructueux.*

*Nous remercions tout particulièrement monsieur **Hichour Adbelhak**, qui
nous ont aidé dans la réalisation de la partie expérimentale avec une parfaite
maîtrise et une bienveillante attention.*

*Nous remercions toutes les personnes avec lesquelles avons
Etroitement collaboré et qui nous ont fait part de leurs
connaissances et de leur savoir-faire de laboratoire .*

DEDICACE



Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à son élaboration par leurs encouragements et leur aide.

Sans oublier

Mes parents , mes cheres freres et sœurs : mouhamed, rachid, idir, nadia, liala

Et je tiens à dédier ce modeste travail à :

Mes copins surtout : nabil, redoine, karime, sofiane, aziz, said,

et sans oublier toutes les personnes Que J'ai connu à la fac.

Ali, mustapha, simo, hamza, walid, Amine, et tout les étudiants de département génie des procédés et plus particulièrement ceux de goupe MMGC16

*A mon consort **Mr Tazrout Mansour***

et sa famille

En fin pour les personnes qui m'estiment esperant bien que

Je n'ai oublier personne dans cette courte page.

Signé :

Belhocine samir

DEDICACE



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Et ne voilà-t-il pas une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui, sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons l'a, à toi maman Merci pour avoir veillé sur moi.

Sans oublier

Mes cheres freres et soeurs, Walid, Abd elmalek, Abd elnoure, Sabrina ainsi que les cousins que je considere comme mes frères : Mustapha Bouamer, Simo, Amine, samir, Hamza, Adlén.

Et je tiens à dédier ce modeste travail à :

Mes copins surtout : Omar, Fouzi, Abdelhak, Lotfi, Abdelghani Bilel, Mohamed, Khaled, Ayoub.

supérette et sans oublier toutes les personnes Que j'ai connu à la fac. Ali, wahab, Amine, et tout les étudiants de département génie des procédés et plus particulièrement ceux de goupe MMGC16

*A mon consort **Mr Tazrout Mansour***

et sa famille

En fin pour les personnes qui m'estiment esperant bien que Je n'ai oublier personne dans cette courte page.

Signé :

Sefroune Hocine

sommaire

sommaire

Chapitre I-Généralités sur les bétons et ses constituants

1-Introduction	3
2-Rôle des différents éléments constituant le béton	4
3-Classification du béton	4
4-Les constituants du béton	5
4-1- Le ciment.....	5
Composition de ciment portland	5
Constituants du ciment.....	6
4- 2- L'eau de gâchage	7
4-3-Les adjuvants	7
4-3-1-Généralités	7
4-3-2- Classification	8
4-3-3 Les super plastifiants	9
Définition	9
Intérêt de leur utilisation	9
4-4-Les granulats béton :	9
Introduction :	9
4-4-1- Définition d'un granulats et son rôle dans le béton.....	10
4-4-2-Différents type de granulats.....	10
Granulats naturels	10
Granulats artificiels.	10
Granulats lourds et légers	10
A-Granulats lourds	10
B-Granulats lourds :.....	11
4- 4-3Caractéristiques des granulats	11
Classe granulaire	11
4-5-Granulométrie.....	11

sommaire

4-5-1-Module de finesse.....	12
4-5-2 Le choix des granulats selon le type de béton	12
4-6CONCLUSION	12
5-béton précontraint	13
5-1-Histoire	13
5-2-Introduction	13
3-3 Mode de précontrainte	14
A- Précontrainte par pré-tension	14
B-Précontrainte par post-tension	14
6-Les propriétés des bétons	15
6-1-Les propriétés des bétons à l'état frais	15
6-1-1- Ouvrabilité	15
Définition de l'ouvrabilité	15
Mesure de la maniabilité du béton	16
6-1-2-Masse volumique	17
6-2- Les propriétés des bétons à l'état durci	18
6-2-1-Introduction	18
6-2-2-La résistances mécaniques	18
6-2-2-A-Essais destructifs	18
A-1-Résistance en compression (NF P 18-406)	18
A-2-Résistance en traction	18
a) Résistance en traction directe	19
b) Résistance en traction par fendage	19
c) Résistance en traction par flexion	19

sommaire

6-2-B-Essais non destructifs	20
Les ultrasons	20
Paramètre influant sur la résistance.....	21
II - LES AJOUTS CIMENTAIRES	
1-Généralités.....	22
2-Définition	23
3-Origine et classification	23
3-1 - Les ajouts inertes	23
3-2 - Les ajouts minéraux actifs.....	23
3-2-1-Ajouts minéraux actifs naturels	23
3-2-2-Ajouts minéraux actifs artificiels	24
4 - Rôle des ajouts minéraux actifs	24
5- Les ajouts	25
5-1-le Cendres volantes	25
5-2- la Fumée de silice	26
5-3-Le marbre	28
5-4- Le Laitier	29
III LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU	
1-Introduction	30
2- Définition	30
Origine	30
3-Formation	31
3-Méthode de refroidissement	31
a) Laitier cristallisé	31

sommaire

b) Laitier vitrifié	32
b-1-Le laitier granulé	32
b-2-Le laitier bouleté	32
4-Elaboration	33
4-1-Le laitier tout-venant.....	34
4-2-le laitier concassé	34
4-3-Le laitier vitrifié granulé	34
4-4-Le laitier bouleté	34
5- Caractéristiques physico-chimiques	35
a) Analyse chimique élémentaire	35
b) Diagramme de Keil	36

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

1-Méthodologie et objectif de travail	37
2-Etude et contrôle des constituants	38
2-1- le ciment	38
2-2-Le laitier	42
2-2-1 Analyse chimique du laitier.....	42
2-2-2 Propriété physique de laitier	42
2-3-SABLE ET GRAVIER	43
A-Sable 0/3 de KADDARA	43
B-Gravier 3/8 de KADDARA	45
C-GRAVIER 8/15 (KADDARA)	46
D-GRAVIER 15/25 (KADDARA)	47

sommaire

2-5- L'adjuvant	48
2-5-1-Dosage	48
2-5-2-Mode d'emploi	48
2-5-3-Conclusion	48
3-formulation.....	49
3-1-La Méthode pratiquée	49
Le ciment 42.5	49
3-2-COMPOSITION DES BETONS	53
3-3-Les étapes d'élaboration du mélange	54
3-4-Préparation des éprouvettes pour les essais mécanique	54
4-Propriétés des bétons.....	55
4-1-L'affaissement	55
4-2- La masse volumique	56
4-3-La résistance à la compression	58
4-4- La résistance à la flexion	60
5-Aspect macroscopique.....	62
6-Discussion et interprétation.....	63
Conclusion générale	64

LISTE DES FIGURES

Partie théorique :

Chapitre I

Figure I.1: Adjuvants liquide de gauche à droite : agent anti-lessivage , réducteur de retrait, réducteur d'eau ,agent moussant ,inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air.....	8
Figure I.2 : Contraintes de flexion.....	14
Figure I.3: Les étapes de réalisation de la précontrainte par pré-tension.....	14
Figure I.4 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS	16
Figure I.5 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	20

Chapitre II

Figure II.1 : Ajouts cimentaires de gauche à droite : cendres volantes, méta kaolin, fumée de silice, laitier et schiste calciné.....	22
Figure II.2 :Micrographie des cendres volantes au microscope électronique à balayage Grossissement $\times 1000$	26
Figure II. 3 : Poudre de fumée de silice.....	27
Figure II. 4 : poudre de marbre	28
Figure II. 5 : Le laitier de haut-fourneau granulé	29

Chapitre III

Figure III-1 : Représentation schématique d'un haut fourneau.....	31
Figure III-2 : Le laitier cristallisé.....	32
Figure III-3 : Laitier vitrifié.....	32
Figure III-4 : Principaux traitements de laitier	33
Figure III-5 : Laitier cristallisé compact.....	33
Figure III-6 : Laitier cristallisé poreux.....	33
Figure III-7 : laitier cristallisé tout-venant.....	34
Figure III-8 : laitier bouleté.....	35
Figure III-9 : Diagramme de Kiel.....	36

LISTE DES FIGURES

Partie pratique :

Figure IV. 1:Composition chimique du ciment 42.5.....	39
Figure IV. 2 :Composition minéralogique du ciment 42.5.....	40
Figure IV.3 : Echantillon de laitier utilisé comme ajout cimentaire (a) laitier non broyé, (b) laitier broyé.....	43
Figure IV.4 : Courbe granulométrique.....	51
Figure IV.5 : Remplissage des éprouvettes.....	55
Figure IV.6 : L'essai d'affaissement (cône d'ABRAMS)	55
Figure IV.7 : L'affaissement en fonction du pourcentage de poudre de laitier au cône d'ABRAMS.....	56
Figure IV.8 : Masse volumique aux états frais et durci des bétons	57
Figure IV.9: Conservation des éprouvettes dans l'eau potable et la presse de compression ...	58
Figure IV.10: L'évolution de la résistance à la compression avec l'age du béton	59
Figure IV.11 : Mode de fissuration des éprouvettes.....	60
Figure IV.12 : L'évolution de la résistance à la flexion avec l'age du béton.....	61
Figure IV.13 : Mode de fissuration des éprouvettes.....	62
Figure IV.14 : vue macroscopique sur la surface de fissure du traction.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Partie théorique :

Tableau I. 1 : La teneur des constituants des bétons en poids et en volume.....	3
Tableau I. 1 : La composition de ciment Portland.....	5
Tableau I. 2 : Teneurs massiques des principaux composés.....	6
Tableau I. 4 : Avantages et inconvénients des bétons précontraints	15
Tableau I.5 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	17
Tableau I.6 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.....	20
Tableau III.1 : Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau	35

Partie pratique

Tableau IV 1:Composition chimique du ciment 42.5.....	38
Tableau IV. 2:Composition minéralogique du ciment 42.5.....	39
Tableau IV. 3:Consistance normale du ciment 42.5.....	40
Tableau IV. 4:Les caractéristiques physiques du ciment 42.5.....	41
Tableau IV. 5:Les caractéristiques mécaniques du ciment 42.5.....	41
Tableau IV .6 : Composition chimique du laitier.....	42
Tableau IV .7 : Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma).....	42
Tableau IV.8: Caractéristiques physiques de Sable 0/3	43
Tableau IV.9: Analyse granulométrique de Sable 0/3	44
Tableau IV.10: Caractéristiques physiques de G 3/8.....	45
TableauIV.11 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 de KADDARA.....	45
Tableau IV.12: Caractéristiques physiques G 8/15.....	46
TableauIV.13 : Analyse granulométrique G8/15.....	46
TableauIV.14 : Caractéristiques physiques de GRAVIER 15/25 (KADDARA).....	47
Tableau IV .15 : Analyse granulométrique de GRAVIER 15/25 (KADDARA).....	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.16: Dosage en masses des constituants pour 1m ³ de béton.....	53
TableauIV.17 : Composition des bétons.....	53
Tableau IV.18: Masse volumique aux états frais et durci.....	57
Tableau IV.19: La résistance à la compression des différents bétons.....	59
Tableau IV.20: La résistance à la flexion	61

Présentation de l'entreprise

L'historique de l'Entreprise Nationale des Grands Ouvrage d'Art, est caractérisé par les dates clés rappelées ci après.

1968 : Création de la Société Nationale des Travaux Routiers, **SONATRO**.

1983 : Restructuration de la SONATRO et création de l'ENGOA le 12 Mars 1983.

1991 : ENGOA change de statuts pour devenir EPE/SPA .Son capital social initial de 10 000 000 DA a été augmenté pour être porté à 3.640.000.000 DA en 2007

1998 : ENGOA absorbe SNOA (Société Nationale d'Ouvrages d'Art) le 31-12-1997

L' E . P . E - S . P . A / ENGOA est organisée selon un schéma d'organisation classique de type fonctionnel, «mono-unité».

L'E.P.E-SPA / ENGOA a pour domaines d'activités, les opérations d'études et de réalisation des ouvrages d'art de toute nature ainsi que les travaux de génie civil s'y rapportant : Viaducs, Tunnels, Passages, Souterrains, Passerelles, Barrages, Structures à étage et toutes autres constructions de nature socioculturelle et toute opération pouvant se rattacher directement ou indirectement à son objet, ou susceptible d'en faciliter l'extension ou le développement.

Procédés techniques de réalisation maîtrisés :

- Pont à poutre en béton armé
- Pont à poutre en béton précontraint
- Pont à dalle en béton précontraint
- Pont à culées en terre armés
- Pont mixte à poutres PRS
- En béton précontraint construit en encorbellement successif.
- Ouvrages préfabriqués(Trémie)
- Viaducs en caisson préfabriqué

Présentation de l'entreprise

DEVELOPPEMENT

Depuis sa création, l'ENGOA ne cesse d'innover et d'investir aussi bien dans l'acquisition des biens d'équipements que dans les technologies de réalisation.

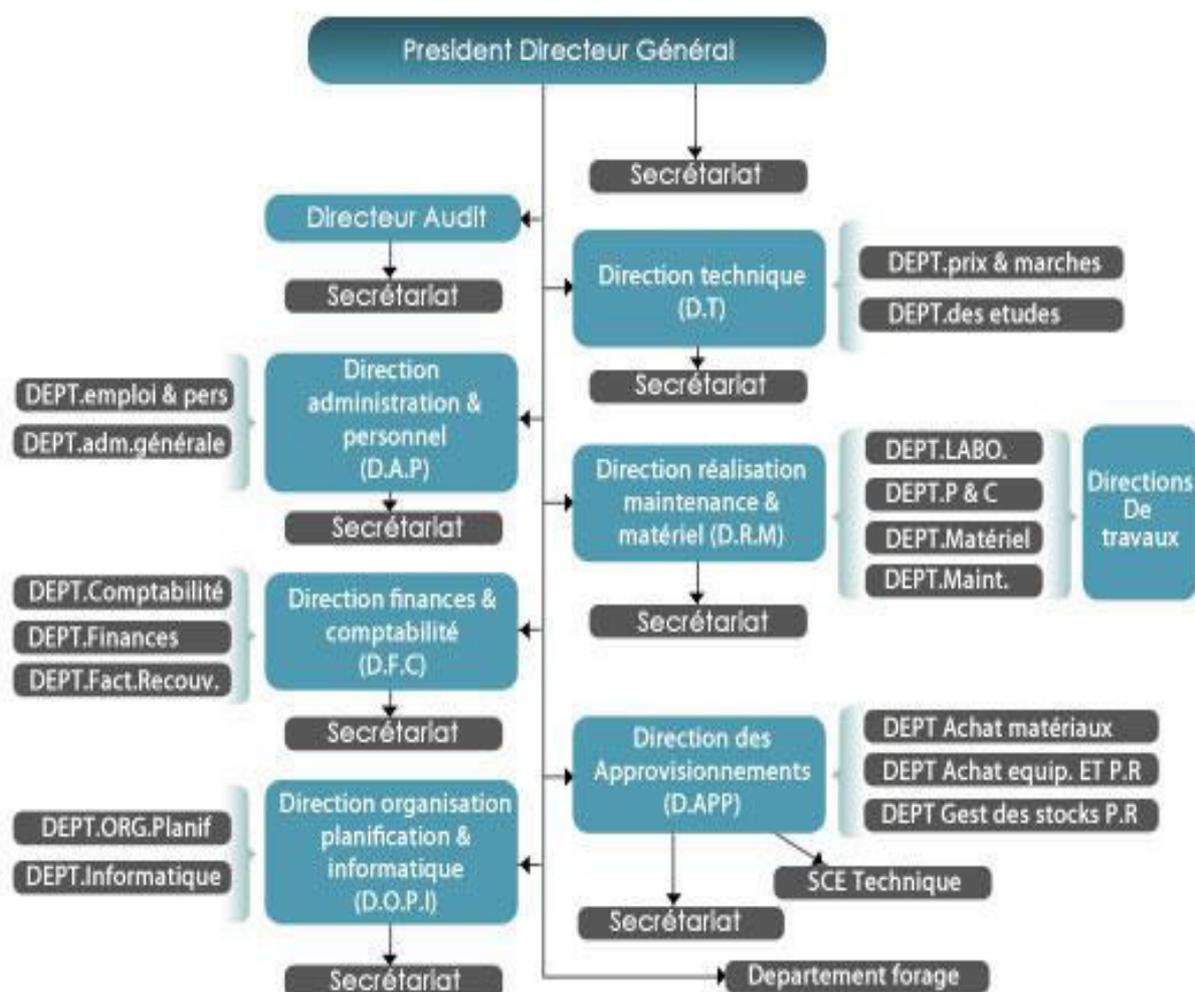
Aujourd'hui, l'ENGOA est associée à tous les projets –phares, et ils sont nombreux, dans le domaine des travaux publics.

Avec son expérience, elle est non seulement un des éléments clés de la réalisation du méga chantier de l'Autoroute Est-Ouest, mais est un acteur majeur de la mutation que connaît le transport urbain, pour absorber la croissance continue du flux automobile dans les grandes villes et réduire les contraintes et engorgement, tout en préservant l'environnement urbain, l'ENGOA a étendu sa maîtrise aux ouvrages en milieu fermé.

Raison sociale :	L'Entreprise Nationale des Grands Ouvrage d'Art, ENGOA
Siège social :	Zone industrielle Réghaia , Wilaya d'Alger
Téléphone :	021.81.65.50 - 021.81.27.90
Fax :	021.81.31.52
E. mail :	engoa2005@yahoo.fr
Statut :	Société par action, SPA/ Secteur Travaux Publics
Capital social :	3 640 000 000 DA
Actionnaires :	SGP Travaux Publics - SINTRA
Objet social :	Etudes et réalisation d'ouvrages d'art.
PDG :	Monsieur BIREM Tarik

Présentation de l'entreprise

ORGANIGRAMME :



■ LEGENDE :

- > D.A Direction audit
- > D.T Direction technique
- > D.O.P.J Direction organisation planification & informatique
- > D.A.P Direction du personnel et de l'administration
- > D.R.M Direction de réalisation et de la maintenance
- > D.F.C Direction des finances et de la comptabilité
- > D.A Direction des approvisionnements

Introduction

générale

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation du béton à base de matériau recyclé tel que le béton recyclé, et le laitier concassé cristallisé du déchet du haut fourneau, comme matériaux de bourrage, a attiré l'attention intéressée des chercheurs.

Le laitier est connu pour ses bonnes performances, lorsqu'il est utilisé dans le domaine de matériaux de construction et permet aux entreprises métallurgiques de valoriser un de leur coproduits majeurs.

L'utilisation d'un tel déchet industriel comme matériau de substitution contribuera à sauvegarder une part importante des ressources naturelles et protéger l'environnement

En Algérie la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes, ne trouvant que quelques rares applications. En cimenterie, seul le laitier granulé est utilisé comme ajout au ciment Portland.

les bénéfices qui pouvaient être tirés en utilisant le laitier sont multiples :

- Ecologiques et environnementaux (utilisation d'un sous produit et la diminution de l'émission de CO₂).

- Economiques (le coût du laitier est le coût de son transport ; l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment).

- Techniques (amélioration des propriétés mécaniques des bétons, durabilité largement améliorée).

Ces bénéfices s'orientent vers l'utilisation de laitier comme un matériau de substitution (ajout cimentaire).

La précontrainte a pour objectif, en imposant aux éléments un effort de compression axial judicieusement appliqué, de supprimer (ou fortement limiter) les sollicitations de traction dans le béton.

Grâce à ces avantages le béton précontraint est utilisé dans les ouvrages d'art et les bâtiments de dimensions importantes : il est d'utilisation courante pour les ponts et d'un emploi très répandu pour les poutrelles préfabriquées des planchers de bâtiments.

On le retrouve dans de nombreux autres types d'ouvrages, parmi lesquels nous citerons les réservoirs, les pieux de fondation et tirants d'ancrage, certains ouvrages maritimes, les barrages, les enceintes de réacteurs nucléaires...

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Introduction générale

Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales et adjuvants) et leurs actions sur les propriétés des bétons.

Par conséquent, plusieurs questions se posent :

L'ajout d'un tel constituant à-t-il une influence sur les rôles de base des autres et comment peut-il modifier le comportement d'une matrice cimentaire ? Pour y répondre, il faut avoir une bonne compréhension des effets propres de chaque composant et des interactivités.

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement la compatibilité (l'adéquation) entre les constituants de base des bétons avec ajout de poudre laitier .

Influence de la poudre de laitier sur les performances des bétons : d'abord on a étudié l'impact de la poudre de laitier pour différents taux d'addition (influence du type et du taux des additions sur l'écoulement), masse volumique, les résistances mécaniques (compression, traction et flexion) pour différentes échéances. (7, 28 Jours).

Ce mémoire s'articule sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre renferme des généralités sur les bétons ordinaires ainsi que les constituants adoptés pour leurs formulations et les propriétés des bétons à l'état frais et durci et le béton précontraint.
- Le deuxième chapitre traite les rôles des ajouts cimentaires .
- Le troisième chapitre sur la poudre de laitier (formation et l'origine) et son influence dans les bétons qui est le sujet de notre travail.
- Le quatrième chapitre c'est la partie pratique résume les essais est les résultats des

expériences réalisées durant notre étude.

CHAPITRE

I

Généralités sur les bétons et ses constituants

I-Généralités sur les bétons et ses constituants

1-Introduction :

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment Portland.

Les composants des bétons courants sont très différents (ciment, granulats, eau, sable, adjuvant...) Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile, etc.

Dans le béton où une très grande compacité est recherchée (béton HP par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 mm (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 1000 kg/m³.

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le Tableau I. 1

Tableau I. 2 : La teneur des constituants des bétons en poids et en volume

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22	1 – 6	7 – 14	60 – 78
Poids (%)	5 – 9	-	9 – 18	63 – 85

Toutes les opérations de mise en œuvre (formulation, préparation du béton frais, transport et la mise en place) sont importantes si l'on veut obtenir un béton dense de qualité homogène. [1]

Pour être durable, un béton doit :

- Être bien composé.
- Correctement mis en œuvre.
- Protégé des causes possibles d'altération par des dispositions constructives adéquates.

2-Rôle des différents éléments constituant le béton :

Ciment : c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant et lier tous les ingrédients.

L'eau : c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.

Les granulats : ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.

Le sable : il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats. (Porosité)

Les plastifiants : ils augmentent « ouvrabilité » du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

3-Classification du béton :

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par 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.

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

- 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 peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

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.

4-Les constituants du béton :

4-1-Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau, il se présente sous forme d'une poudre très fine qui mélangée avec l'eau forme une pâte faisant prise et durcissent dans le temps.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive doit être au moins 50% de la masse du ciment. [2]

Composition de ciment Portland :

Tableau I. 1 : La composition de ciment Portland

Les constituants principaux (plus de 90% du ciment)	Silicate tricalcique (alite)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	5 - 10%
	silicate bicalcique (bélite)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 - 30%
	aluminat tricalcique (célite)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	50 - 70%
	alumino-ferrite tétracalcique (célite II)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 - 15%
Les autres constituants mineurs (moins de 5% du clinker)	$\text{SO}_3, \text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}, \text{MnO}, \text{TiO}_2, \text{CaCO}_3 \dots$			
Les impuretés	CaO libre, CO_2 , H_2O			

Constituants du ciment :

Les ciments silico-calciques normalisés sont constitués de clinker, de gypse et éventuellement d'ajouts minéraux (laitiers, cendres volantes, fumées de silice ou fillers). Chacun de ces constituants est détaillé dans la suite.

Tableau I. 2 : Teneurs massiques des principaux composés.

Composés	Teneurs massiques
SiO ₂	19 – 25%
Al ₂ O ₃	2 – 9%
CaO	62 – 67%
Fe ₂ O ₃	1 – 5%
MgO	0 – 3%
SO ₃	1 – 3%
K ₂ O	0,6%
Na ₂ O	0,2%

C₃A et C₄AF sont liquides à la température de formation du clinker. Lors du refroidissement, ce liquide cristallise en phase interstitielle autour du solide (cristaux de C₃S et C₂S).

Les silicates (C₂S et C₃S) représentent 75 à 80% du ciment. C₃S est toujours le plus abondant, c'est le constituant le plus hydraulique.

Les constituants mineurs peuvent avoir une influence importante sur les propriétés des ciments. Les ions sulfates SO₄²⁻ et les alcalis Na₂O et K₂O (provenant des argiles) jouent un rôle important dans les réactions de dégradation des bétons (réactions sulfuriques et alcali-granulat, respectivement).

4-2- L'eau de gâchage :

Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

Une eau de qualité douteuse peut être utilisée à condition que des cubes de mortier préparés avec cette eau donnent des résistances à 28 jours au moins égales à 90 % de celles obtenues sur des échantillons témoins préparés avec de l'eau que l'on sait potable.

Un excès d'impuretés peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des taches, attaquer les armatures et réduire la durabilité.

Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalis et solides présents dans l'eau de gâchage ou l'on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés.

4-3- Les adjuvants :**4-3-1- Généralités :**

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage.

D'après la norme NF P18 103, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieur à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de tel ou tel de leurs propriétés à l'état frais ou durci. [3]

Les adjuvants fournissent au formateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voir même lui conférer des propriétés nouvelles.



Figure I.1: Adjuvants liquids de gauche à droite : agent anti-lessivage , réducteur de retrait , réducteur d'eau ,agent moussant ,inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air

On utilise les adjuvants surtout pour :

- Diminuer le coût des constructions en béton
- Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens
- Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables
- Obvier à certaines urgences durant le bétonnage

Il ne faut cependant pas oublier qu'aucun adjuvant, en quelque quantité que ce soit, ne saurait remplacer une bonne technique de bétonnage.

4-3-2- Classification :

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

1. Les entraîneurs d'air
2. Les réducteurs d'eau
3. Les super plastifiants
4. Les accélérateurs
5. Les retardateurs
6. Les contrôleurs d'hydratation
7. Les adjuvants pour colorer le béton
8. Les adjuvants divers, tels que ceux qui améliorent la plasticité, l'adhérence, l'imperméabilisation, l'étanchéité, l'injection, la formation de bulles de gaz, le pompage et les adjuvants moussants et anti lessivage. [4]

4-3-3 Les super plastifiants :**Définition :**

Selon la norme NA774, un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

La plupart des bétons modernes incorpore des super plastifiants dans leur formulation. Ces produits flocculant améliorent l'ouvrabilité sans excès d'eau. Ils permettent d'atteindre des rapports eau/liant inférieurs à 0,50, en conformité avec les spécifications de la norme NF EN 206 pour certaines classes d'exposition, et de fabriquer des bétons compacts de résistance élevée. Les super plastifiants actuels sont principalement des poly carboxylates. [5]

Intérêt de leur utilisation :

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

Ces suggestions nécessitent l'utilisation des super plastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloquer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment

4-4-Les granulats :**- Introduction :**

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton dont ils constituent les deux tiers du volume. Ils sont constitués de différents grains minéraux, naturels ou artificiels, dont les caractéristiques influentes sur la qualité des bétons.

les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton.

4-4-1- Définition d'un granulats et son rôle dans le béton :

On appelle « granulats » les matériaux inertes qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Ces matériaux sont quelque fois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis fort temps. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances

4-4-2-Différents type de granulats :**- Granulats naturels :**

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leurs sites géologiques d'origine en ayant subi que des traitements mécaniques. Ils sont provenus de différentes roches qui varient selon la région d'origine.

- Granulats artificiels :

Les granulats artificiels sont obtenus de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. Il existe différentes sortes de granulats artificiels. Les sous-produits industriels, parmi lesquels les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut-fourneau, sont obtenus par refroidissement à l'eau. D'autres sous-produits qui sont utilisés pour un usage précis.

-Granulats lourds et légers :**A -Granulats lourds :**

Les granulats lourds sont des masses volumiques supérieures à $3t/m^3$. Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits, par exemple, dans les accélérateurs et piles atomiques ; la protection est d'autant plus efficace que l'épaisseur est plus grande et la densité du béton plus élevée.

B- Granulats légers :

Les granulats légers sont utilisés pour la confection de bétons légers. Leurs masses volumiques sont inférieures à $2 t/m^3$. Ils présentent une forte absorption d'eau et cette dernière a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. Parmi les granulats légers, on trouve l'argile expansée, schistes expansés, laitier expansé, pierre ponce, pouzzolane, vermiculite, perlite, etc.

4-4-3-Caractéristiques des granulats :**-Classe granulaire :**

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D, d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains. La norme française

XP P18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Tableau I. 4 : différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles

Type d'agrégats	Dimensions
fillers 0/D	$D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm
sable 0/D	$1 < D \leq 6.3$ mm
grave 0/D	$D > 6.3$ mm
gravillon d/D	$d \geq 1$ met $D \leq 125$ mm
ballast d/D	$d \geq 20$ met $D \leq 50$

4-5-Granulométrie

La granulométrie permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Cette analyse est effectuée conformément à une norme. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La dimension nominale de tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée

Les pourcentages des refus cumulés ou ceux des tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. [6]

4-5-1- Module de finesse :

Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Il est égal au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les tamis suivants : 0.16–0.315–0.63–1.25–2.5 et 5mm. Un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module faible caractérise un sable fin. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 1.8 et 3.2

4-5-2- Le choix des granulats selon le type de béton :

Le choix des granulats doit se faire en fonction de plusieurs critères est technico-économiques qui vont de la destination du béton et de l'ouvrage à la simple question des disponibilités locales. La variété des fonctions remplies par le béton conduit à adopter des granulats qui, selon le cas, présenteront des caractéristiques d'aspect, de densité, de résistances mécaniques différentes

4-6-CONCLUSION :

Les granulats constituent la phase dominante du béton, dont ils occupent environ 70 % du volume. Ils forment l'ossature du matériau. La sélection et le dosage des différentes fractions granulaires sont un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton satisfaisant.

Les granulats présentent des caractéristiques très différentes selon leurs origines, influant sur celles du béton. La plupart des granulats conviennent pour le béton, mais il faut éviter ceux comportant une proportion non négligeable d'argiles ou calcaires marneux, qui peuvent avoir une influence défavorable sur la prise et le durcissement, provoquer des baisses de résistance et induire à terme des gonflements et des altérations à cause des réactions avec le ciment (fissuration, corrosion des armatures etc.). [6]

5-béton précontraint :

5-1-Histoire :

L'idée de soumettre le béton à un effort de compression permanent lui permettant de travailler en flexion sans qu'il n'en résulte de traction avait été émise dès la fin du XIX^{ème} siècle. Sa réalisation s'était cependant heurtée aux propriétés mécaniques insuffisantes des aciers de l'époque, ainsi qu'aux conséquences mal maîtrisées des déformations différées du béton soumis à des efforts permanents importants.

C'est seulement à la fin des années 1920 que les progrès dans la fabrication des aciers durs et une meilleure connaissance du comportement différé du béton ont permis à **Eugène Freyssinet** de mettre au point le béton précontraint, dans lequel les efforts de compression permanents sont obtenus à l'aide d'armatures en acier fortement tendues.

Dans un élément en béton armé, l'armature en acier est destinée à se substituer entièrement au béton dans les zones tendues, lorsque celui-ci se fissure par suite d'allongement. Sous charge, les allongements communs des armatures du béton deviennent trop grands, le béton se fissure (micro fissures), l'acier supporte alors seul tout l'effort de traction.

Dans un élément poutre en béton précontraint, l'acier précontraint équilibre les efforts des charges extérieures et évite ainsi au béton de se fissurer sous les charges d'exploitation. La compression initiale introduite grâce à la précontrainte des poutres s'opposent aux tractions engendrées par les charges et surcharges appliquées. [7]

Par rapport au béton armé classique, le béton précontraint comporte un ajout de câble permettant de réaliser des structures beaucoup plus légères, donc de très grande portée, là où le béton armé se serait écroulé sous son propre poids.

5-2-Introduction :

Le béton est un matériau hétérogène qui présente une très bonne résistance à la compression, par contre, il a une très mauvaise résistance à la traction.

C'est ainsi qu'une poutre reposant sur deux appuis, soumise à l'effet de son poids propre (G) et d'une charge d'exploitation (Q), subit des contraintes de flexion qui se traduisent par une zone comprimée en partie supérieure et par une zone tendue en partie inférieure (figure I.2)

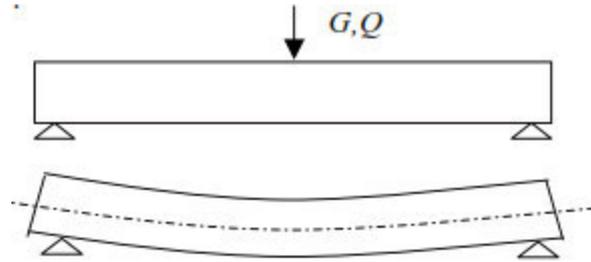


Figure I.2 : Contraintes de flexion

3-3 Mode de précontrainte :

Pour réaliser l'opération de précontrainte, il existe deux possibilités.

A- Précontrainte par pré-tension :

Dans ce procédé, les câbles de précontrainte sont tendus entre deux massifs solidement ancrés avant le coulage du béton. Cette technique est surtout employée sur les bancs de préfabrication, pour réaliser des éléments répétitifs.

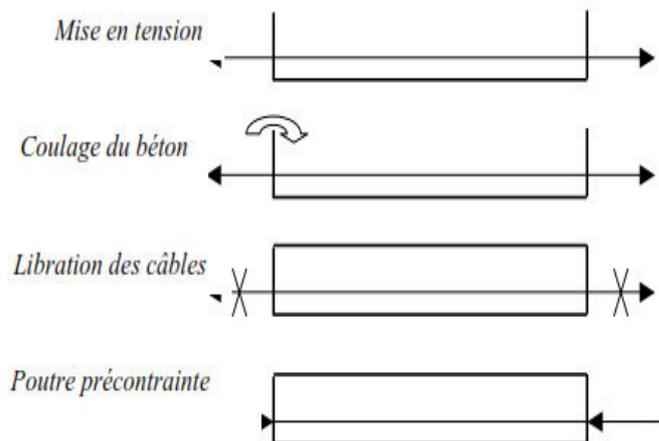


Figure I.3: Les étapes de réalisation de la précontrainte par pré-tension

B-Précontrainte par post-tension :

Ce procédé consiste à tendre les câbles de précontrainte, après coulage et durcissement du béton, en prenant appui sur la pièce à comprimer. Cette technique est utilisée pour les ouvrages importants est, généralement, mise en œuvre sur chantier.

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

La précontrainte par post tension se présente sous deux formes :

- Une précontrainte par post-tension interne
- Une précontrainte par post-tension externe

Tableau I. 5 : Avantages et inconvénients des bétons précontraints :

Avantages	Inconvénients
1) Une compensation partielle ou complète des actions des charges. 2) Une économie appréciable des matériaux. 3) Augmentation des portés économiques. 4) Une réduction des risques de corrosion.	1) La nécessité de matériaux spécifiques. 2) La nécessité de main d'œuvre qualifié. 3) La nécessité d'équipements particuliers. 4) Risque de rupture à vide par excès de compression. 5) Un calcul relativement complexe

6-Les propriétés des bétons :

6-1-Les propriétés des bétons à l'état frais :

La période durant laquelle le béton demeure plastique n'est que temporaire. La résistance du béton, pour une composition donnée, est très affectée par le degré de compacité. Il est alors important que la consistance du béton soit ajustée de façon que le béton puisse être facilement transporté, mise en place, vibré et fini sans qu'il y ait de ségrégation.

6-1-1-Ouvrabilité :

Définition de l'ouvrabilité :

Un béton qui peut être mise en place et serré correctement est considéré comme ayant une bonne maniabilité. On peut alors définir l'ouvrabilité ou la maniabilité par la propriété déterminant l'effort nécessaire pour manipuler une quantité de béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité. [8]

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

Mesure de la maniabilité du béton :

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS :

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour le béton sur chantier. Cet essai est cependant très pratique pour détecter des variations de l'homogénéité d'un béton donné. On utilise un moule normalisé de 300 mm de hauteur, placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches. Chacune des couches est compactée par 25 coups d'une tige métallique normalisée.

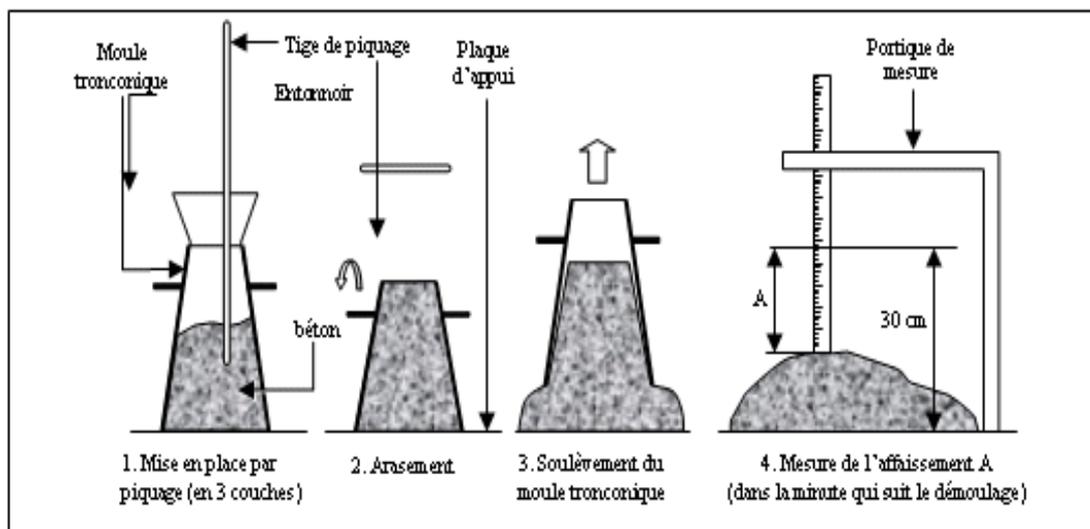


Figure I.4 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse. La différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est l'affaissement ; il est mesuré à 5 mm près (voir Figure I.4).

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

Les valeurs approximatives d'affaissement en fonction de la maniabilité sont données dans le Tableau I.6

Tableau I.6 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône

Affaissement en cm	Plasticité	Destination	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 a 4	Ferme	F	Puissante	Béton extrudes
5 a 9	Plastique	P	Normale	Génie civil ouvrages d'arts béton de masse
10 a 15	Très	TP	Faible	Ouvrages courants
16 ≤	Fluide	FI	Léger	Fondations profondes ,dalles et voiles minces

6-1-2-Masse volumique :

Le béton ordinaire généralement employé pour les chaussées, les bâtiments et les autres ouvrages à une masse volumique de l'ordre de 2 200 à 2 400 kg/m³.

La masse volumique du béton varie en fonction de la quantité et de la densité des granulats, des quantités d'air emprisonné ou entraîné, du dosage en eau et en liants (qui dépend lui-même, de la taille maximale de gros granulats).

Le fait de réduire la teneur en pâte de ciment (d'accroître le volume de granulats) augmente la masse volumique. La valeur de cette dernière est importante dans le calcul des ouvrages en béton armé.

La mesure de la masse volumique est très simple. Il suffit de mesurer la masse de béton versé dans un contenant de volume bien déterminé. La masse volumique est donnée par le rapport de la masse de béton sur le volume du contenant. Il est clair que pour les bétons à air entraîné, la masse volumique diminue en fonction du pourcentage d'air.

La masse volumique se déduira alors de :

$$MV = \frac{M}{V} (kg / m^3)$$

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

6-2- Les propriétés des bétons à l'état durci :

6-2-1-Introduction :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme propriété la plus importante bien que, dans nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité puissent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité. [8]

6-2-2-La résistances mécaniques :

6-2-2-A-Essais destructifs :

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques, les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques.

A-1-Résistance en compression (NF P 18-406) :

On peut définir la résistance en compression comme la mesure de la résistance maximale d'une éprouvette cylindrique ou cubique de béton ou de mortier sous une charge axiale. Elle est généralement exprimée en méga pascals (MPa).

Principe de l'essai :

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. [9]

A-2-Résistance en traction :

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

Plusieurs essais peuvent être réalisés :

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

a) Résistance en traction directe :

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

b) Résistance en traction par fendage :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien".

Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera (voir Figure I.5) .

$$F = \frac{2P}{\pi LD}$$

P= la charge (MPa)

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

c) Résistance en traction par flexion :

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté **a** et de longueur **4a**, reposant sur deux appuis :

Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).

Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) (Figure I.5) .

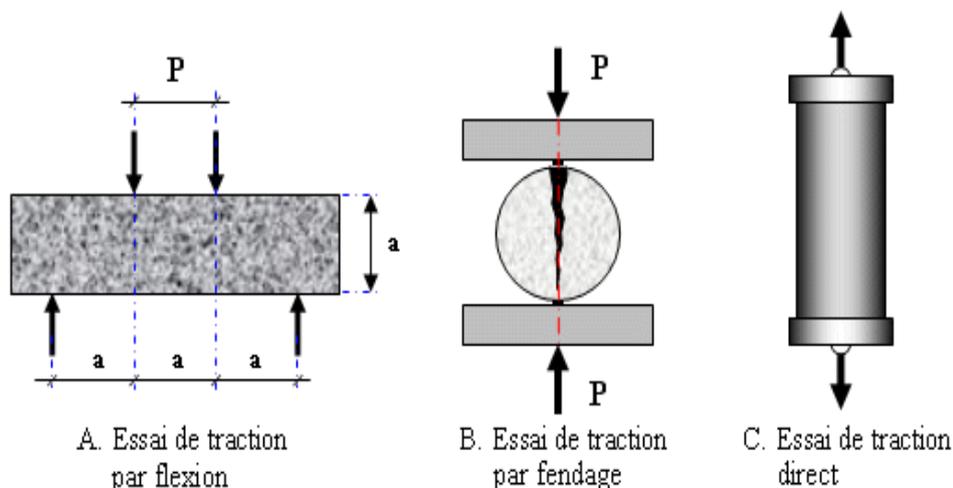


Figure I.5 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction

6-2-2-B-Essais non destructifs :

Les essais non destructifs sont des essais qui permettent d'évaluer la résistance d'un béton sans que l'on soit obligé d'aller jusqu'à la rupture des éprouvettes. C'est un avantage indéniable lorsque l'on est appelé à établir un diagnostic des ouvrages où les éprouvettes font défaut.

Les ultrasons :

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoire, comme sur des ouvrages en béton terminés.

Tableau I.7 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3000
Très mauvaise	Inférieure à 2135

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons et ses constituants

Paramètre influant sur la résistance :

Parmi les paramètres influant sur la résistance du béton, on peut citer :

- Rapport eau/ciment
- L'âge du béton
- La nature et le dosage en ciment
- La nature minéralogique des granulats
- L'humidité
- Le dosage en eau
- La température du béton et du milieu de travail
- Les conditions de mise en œuvre et la qualité du contrôle sur chantier
- L'adhérence de la pâte aux granulats (ciment/granat)

Le diamètre maximal des granulats **[10]**

CHAPITRE

II

LES AJOUTS

CIMENTAIRES

II - LES AJOUTS CIMENTAIRES

1-Généralités :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique ou pouzzolanique. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la Composition du béton. Des ajouts, tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumée de silice, les fillers etc. Entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les pays industrialisés tels que les États-Unis, la Russie, la France, l'Allemagne, le Japon et l'Angleterre, sont les plus grands producteurs de cendres volantes, de fumée de silice et de laitier de haut fourneau. La Chine et l'Inde produisent également des quantités importantes de cendres de balles de riz. [11]



Figure II.1 : Ajouts cimentaires de gauche à droite : méta kaolin, fumée de silice, cendres volantes, laitier et schiste calciné

2-Définition :

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous-produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs.

3-Origine et classification :

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels)

3-1 - Les ajouts inertes :

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

3-2 - Les ajouts minéraux actifs :

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs :

3-2-1 Ajouts minéraux actifs naturels :

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

3-2-2 Ajouts minéraux actifs artificiels :

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs.
 - Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles).
 - Les cendres des combustibles.
 - Les laitiers métallurgiques.
 - Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique a quantité élevée.
 - Les argiles cuites se présentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile a teneur élevé en KAOLINITE ($Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.
 - Les laitiers métallurgiques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs.
- L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.
- L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages par rapport aux ajouts inertes.

4 - Rôle des ajouts minéraux actifs :

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $Ca(OH)_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.

5- Les ajouts :

5-1-Cendres volantes :

Les cendres volantes, les ajouts cimentaires les plus fréquemment utilisés dans le béton, sont des résidus finement divisés (Poudre ressemblant au ciment) résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. La plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous-produit des centrales thermiques. Durant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés.

Les impuretés du charbon (telle l'argile, le feldspath, le quartz et le schiste) entrent en fusion et sont évacuées de la chambre à combustion par les gaz d'échappement. Durant cette étape, le matériau fusionné refroidit et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes. Les cendres volantes sont ensuite extraites des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants.

La cendre volante est constituée surtout de silicate de verre contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone. Des composants cristallins sont présents en petites quantités. [11]

Les cendres volantes de type F et de type C, sont généralement utilisées comme ajouts pouzzolaniques dans les bétons d'usage courant. La cendre volante de type F a une faible teneur en calcium (moins de 8 % de CaO) et une teneur en carbone de moins de 5 %, quoique certaines puissent avoir des teneurs en carbone de près de 10 %. La cendre volante de type C a une teneur plus élevée en calcium que celle de type F.

Elle comprend deux catégories : type CI (teneur en calcium intermédiaire) avec une teneur en CaO entre 8 % et 20 % ; Type CH (haute teneur en calcium) avec une teneur en CaO de plus de 20 %. Les cendres volantes de type C ont des teneurs en carbone de moins de 2 %. Plusieurs cendres volantes de type C s'hydratent lorsqu'elles sont exposées à l'eau et durcissent en moins de 45 minutes. Certaines cendres volantes satisfont à la fois les exigences des types F et C.

Les cendres volantes de type F sont souvent utilisées à un dosage de 15 % à 25 % par masse de matériaux cimentaires et la cendre volante de type C est utilisée à un dosage de 15 % à 40 % par masse de matériaux cimentaires. Toutefois, lorsque le béton doit résister aux sels de déglçage, la quantité de cendre volante ne doit pas dépasser 25 % de la masse des matériaux cimentaires, sauf si des essais de durabilité confirment la bonne durabilité du béton avec cendre volante. Le dosage varie selon la réactivité de la cendre et l'effet souhaité dans le béton.

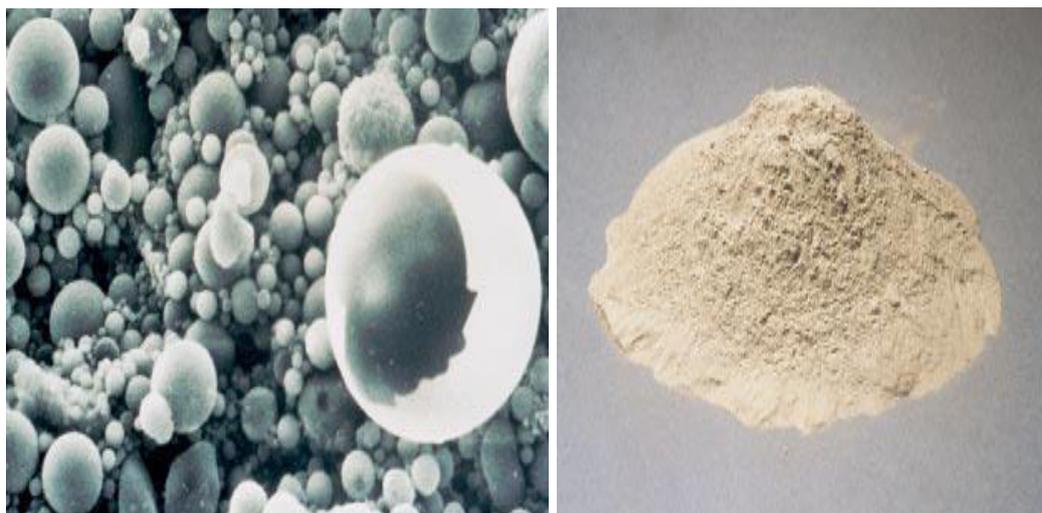


Figure II.2 :Micrographie des cendres volantes au microscope électronique à balayage
Grossissement $\times 1000$

5-2-Fumée de silice :

La fumée de silice, aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, est un coproduit qui est utilisé comme pouzzolane. Ce coproduit est le résultat de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique durant la fabrication du silicium ou d'alliages de Ferro silicium. La fumée de silice s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2 000 °C. Lorsqu'elle se refroidit, elle condense pour ensuite être captée dans d'énormes poches de tissu. La fumée de silice est ensuite traitée pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.

La fumée de silice condensée est composée essentiellement de bioxyde de silicium (normalement plus de 85 %) sous forme non cristalline (amorphe). Puisqu'elle est aérogène comme la cendre volante, elle a une forme sphérique Elle est extrêmement fine, avec des particules de moins de 1 μm de diamètre, qui est en moyen est d'environ 0,1 μm , soit environ 100 fois plus petit que la dimension moyenne d'un grain de ciment.

La fumée de silice condensée à une surface d'environ 20 000 m²/kg (selon la méthode d'adsorption d'azote). Pour fins de comparaison, la surface de la fumée de tabac est d'environ 10 000 m²/kg. Les ciments de type 10 et de type 30 ont des surfaces de 300 à 400 m²/kg et de 500 à 600 m²/kg (Blaine), respectivement. La densité de la fumée de silice est généralement d'environ 2,20 à 2,25, mais peut être aussi élevée que 2,5. Le ciment portland a une densité d'environ 3,15. La masse volumique de la fumée de silice varie entre 130 et 430 kg/m³. La fumée de silice est vendue sous forme de poudre mais est plus souvent disponible sous forme de liquide. La fumée de silice est utilisée selon un dosage correspondant entre 5 % et 10 % de la masse totale des matériaux cimentaires. Elle est utilisée dans des applications où un niveau élevé d'imperméabilité est requis, et dans le béton à haute résistance.

Lorsque le béton doit résister aux sels de déglacage, la quantité maximum de fumée de silice devrait être de 10 % de la masse de matériaux cimentaires.



Figure II.3 : Poudre de fumée de silice

5-3-Le marbre :

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur), souvent veinée de couleurs variées. Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée.

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches préexistantes par une chaleur intense ou/et de très fortes pressions.

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite.

Cette pierre est souvent parcourue de veines et veinules teintées très variées : de la grise pale au rouge vif qui donne l'aspect marbré. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le marbre blanc, il Existe des variétés beiges, bleues, roses, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires. Selon l'aspect des rayures, on a des produits veinés, zonés, bigarrés, ramagés, etc. [12]



Figure II. 4 : poudre de marbre

5-4- Le laitier :

Le laitier de haut-fourneau granulé ...aussi appelé ciment de laitier, est fabriqué à partir du laitier de fonte, c'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion de l'acier dans un haut-fourneau.

Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux.

Le matériau granulé, broyé à une taille de moins de 45 microns, possède une finesse Blaine d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2,85 à 2,95. La masse volumique des laitiers varie de 1050 à 1375 kg/m³.

Le laitier broyé, de forme angulaire et rugueuse s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou le Ca(OH)₂, tous deux présents dans le ciment portland, et durcit de la même manière que le ciment portland.

Toutefois, le laitier refroidi par air ne possède pas les propriétés hydrauliques du laitier refroidi par eau. Le laitier broyé de haut-fourneau, lorsqu'il est utilisé dans le béton à usage général, constitue normalement entre 30 % et 45 % des matières cimentaires du mélange.

Certains bétons au laitier sont fabriqués à l'aide de matières cimentaires contenant plus de 70 % de laitier. Si le béton doit résister aux sels de déglçage, la teneur maximum en laitier ne doit pas dépasser 50 % de la masse des matériaux cimentaires. Dans tous les cas, des essais avec les matériaux qui seront utilisés sont essentiels pour confirmer la bonne durabilité du béton. [13]



Figure II. 5 : Le laitier de haut-fourneau granulé

CHAPITRE

III

LE LAITIER DU

HAUT

FOURNEAU

III LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU

1-Introduction

Pour fabriquer de l'acier industriel, le minerai de fer aggloméré est chargé dans la partie supérieure du haut fourneau en couches alternées avec du coke, un combustible puissant proche du carbone pur fabriqué à partir de charbon. On insuffle de l'air chaud et du charbon pulvérisé dans le bas du haut fourneau à une température proche de 1200°C. Ceci provoque la combustion du coke qui entraîne la fusion du minerai, ainsi que la formation d'un gaz réducteur qui transforme les oxydes de fer du minerai en métal, formant ainsi du CO et du CO₂. On recueille alors la fonte liquide à 1500°C (environ 96% Fe et 4% C) et le laitier dans le bas du haut fourneau

2- Définition :

Les laitiers de haut fourneau sont des coproduits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer, Ce laitier présente une granulométrie grossière
Le laitier est un sous-produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO₂) et alumine (Al₂O₃). L'élaboration du laitier peut conduire, selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques

Origine :

Le haut-fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant. Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte. [14]

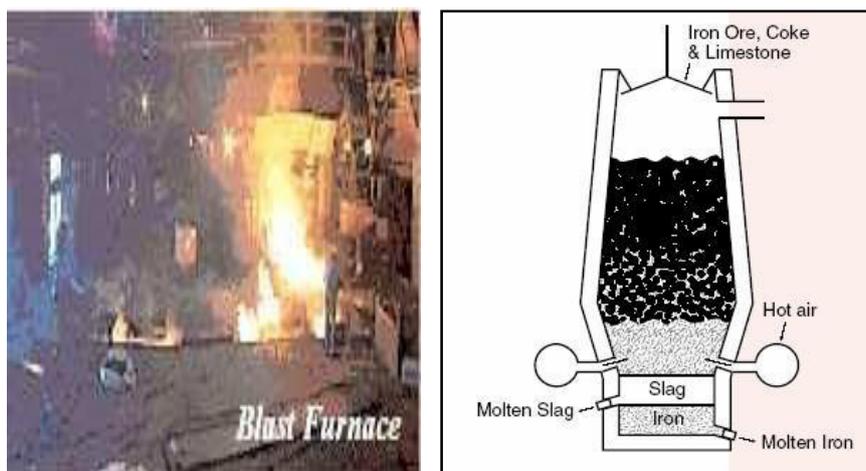


Figure III-1 : Représentation schématique d'un haut fourneau

On peut signaler que la fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...et que le laitier en fusion en bas du haut-fourneau contient les éléments SiO_2 , P_2O_5 , MnO , CaO , Al_2O_3 ... [14]

3-Formation :

Aux températures atteintes, tous les constituants non métalliques et non gazeux de la charge se liquéfient : la densité du liquide ainsi obtenu (le laitier) est d'environ 3 alors que celle de la fonte est de 7. Il y a donc séparation par gravité du laitier et de la fonte : le laitier surnage à la surface du bain de fonte dans le creuset du haut-fourneau et rassemble les éléments provenant de la *gangue*, du fondant et des cendres de combustion.

3-Méthode de refroidissement :

Le type de refroidissement du laitier peut conduire à deux formes de laitier décrites ci-après.

a) Laitier cristallisé :

Le laitier liquide à 1300°C / 1500°C est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle.

Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium. Les laitiers de haut-fourneau cristallisés permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme XP P18540.



Figure III-2 : Le laitier cristallisé

b) Laitier vitrifié :

Brutalement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit dans les cimenteries ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Il existe deux types de laitier vitrifié :



Figure III-3 : Laitier vitrifié

b-1-Le laitier granulé : pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression.

b-2-Le laitier bouleté : qui est soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique.

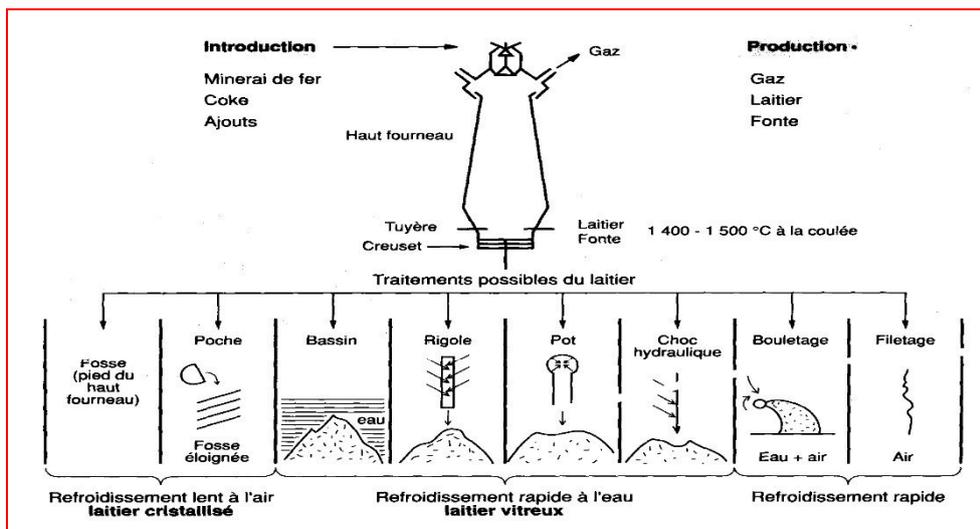


Figure III-4 : Principaux traitements de Laitier

4-Elaboration :

L'élaboration des laitiers de haut-fourneau produit toute une gamme de granulats (laitiers cristallisés, (figures 2.7 et 2.8) et de liants hydrauliques (laitiers vitrifiés), dont on rappelle ci-dessous les caractéristiques élémentaires telles que décrites en particulier

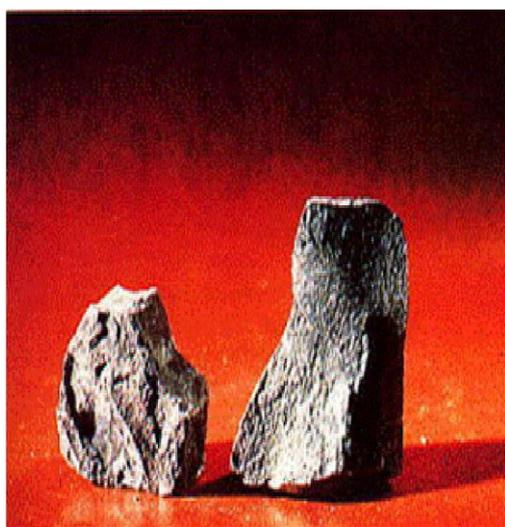


Figure III-5 : Laitier cristallisé compact Figure III-6 : Laitier cristallisé poreux

Le laitier cristallisé de haut-fourneau est élaboré selon différentes classes granulaires tout-venant, concassés O/D et d/D selon la demande on distingue :

4-1-Le laitier tout-venant : C'est un laitier cristallisé, de fraîche production ou non, tel que repris à l'engin les granulométries sont de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau

Il s'agit plutôt d'un matériau de remblais ou de couche de forme.

4-2-le laitier concassé : C'est un laitier cristallisé concassé, livré en toutes granulométries

Le laitier O/Dest dit «de compactage », lorsqu'il est criblé et calibré, mélangé où

non en proportions variables, avec du laitier granulé ou tout autre liant hydraulique. La

granulométrie maximale du O/D est de 0/50 mm ; il s'agit plutôt d'un matériau d'assises a

prise lent. [15]



Figure III-7 : laitier cristallisé tout-venant

4-3-Le laitier vitrifié granulé : correspond à un sable à prise hydraulique (0/5 à 0/6 mm), il peut-être pré broyé, ce qui augmente sa teneur fine autour de 10 à 12 % et ainsi sa réactivité. Il peut être activé pour développer son hydraulité, l'activation de type calcique ou sulfato-calcique étant effectuée selon la norme NF P 98-107.

4-4-Le laitier bouleté : matériau à prise hydraulique, s'apparente en termes d'utilisation au laitier granulé ; la fraction granulométrique la plus grosse peut être utilisée comme granulat léger de laitier expansé à faible densité, notamment en construction d'ouvrages d'art.



Figure III-8 : laitier bouleté

5- Caractéristiques physico-chimiques

a) Analyse chimique élémentaire :

Le laitier contient essentiellement quatre éléments dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. [16]

Eléments	(%)
CaO	40 à 48
SiO ₂	32 à 41
Al ₂ O ₃	9 à 18
MgO	1 à 9
MnO	0,4 à 0,7
FeO	0,2 à 1
S	0,6 à 1,5

Tableau III-1: Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau

b) Diagramme de Keil :

diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice- alumine permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulicité, alors que le laitier doit être activé. [17]

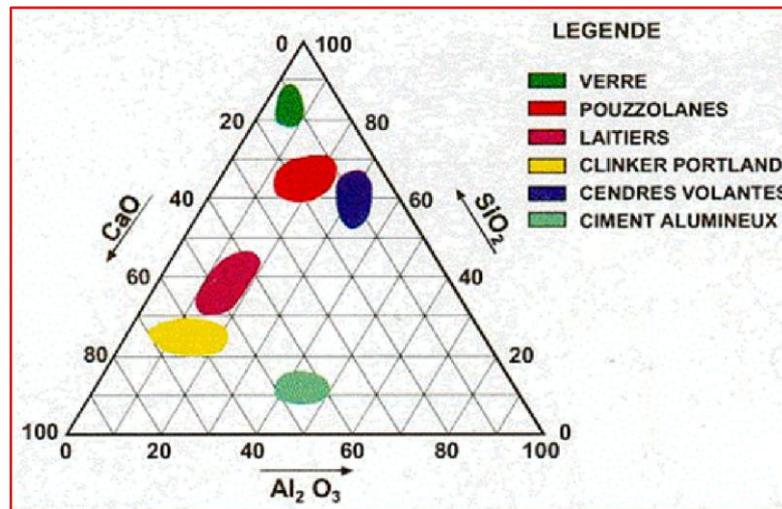


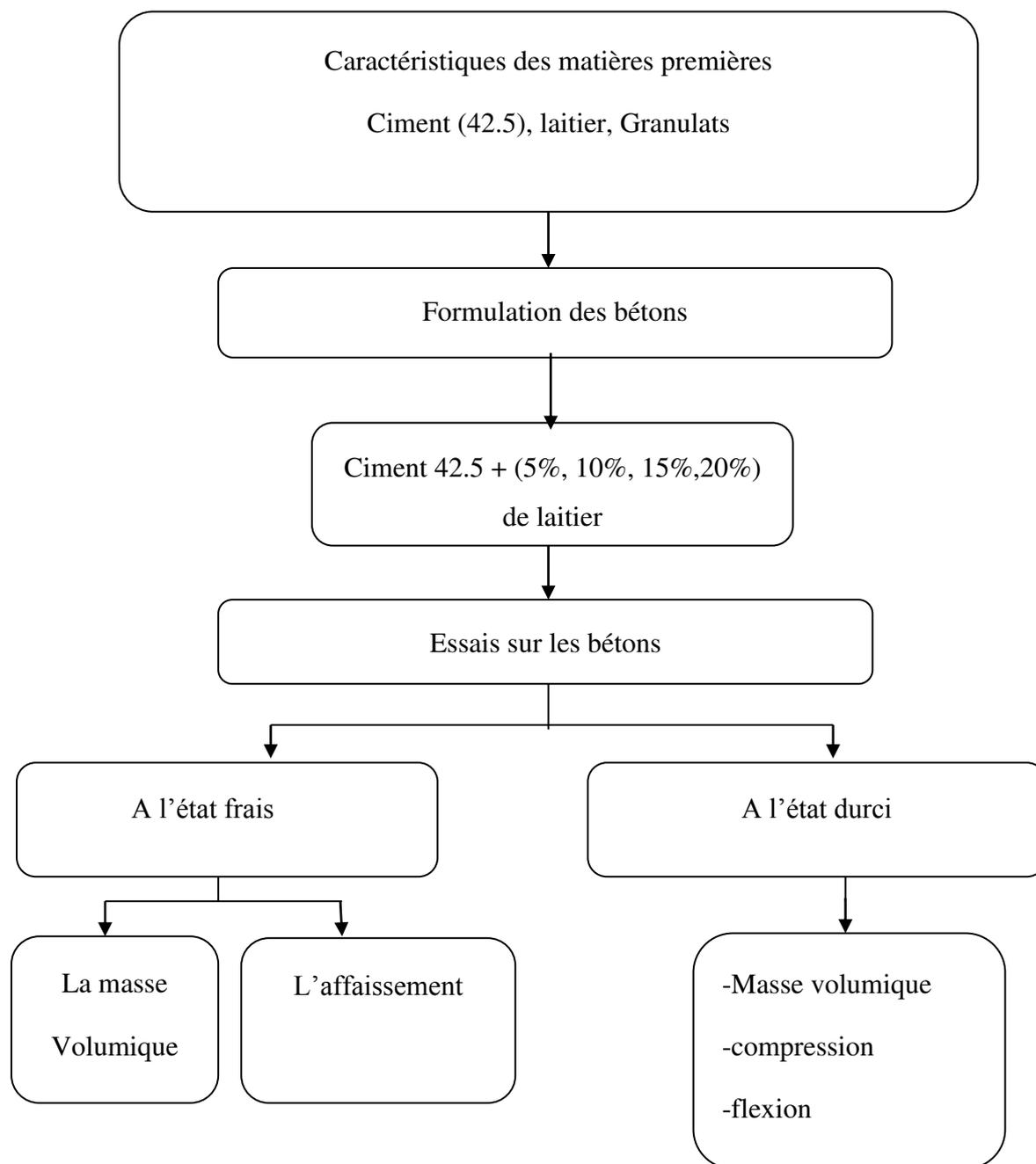
Figure III-9 : Diagramme de Keil.

CHAPITRE

IV

PARTIE

PRATIQUE

1-Méthodologie et objectif de travail :

L'objectif de cette étude expérimentale est de contrôler et analyser les caractéristiques à l'état frais et l'état durci des bétons ordinaires destinés au précontraint avec un ajout de poudre de laitier (utilisant de ciment CEM II (42.5)).

En premier étape : nous avons choisi de faire varier le pourcentage de poudre de laitier par rapport au poids de ciment (5% ,10%,15%,20%).

En deuxième étape : comparaison des résultats obtenus.

Les essais ont été réalisés au laboratoire d'Entreprise Nationale des Grands Ouvrages d'Art E.N.G.O.A REGHAIA, ALGER.

2-Etude et contrôle des constituants :

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

2-1- le ciment :

On a utilisé un ciment portland CEM II/A 42.5R, avec ajout de 17% de calcaire et dont les compositions chimiques et minéralogiques ainsi que les caractéristiques physico-mécaniques sont respectivement présentées dans les tableaux :

- Le ciment 42.5 : Provenant de la cimenterie de GICA ALGERIE

Tableau IV1:Composition chimique du ciment 42.5

Composition chimique	Teneur %	Composition chimique	Teneur %
SiO ₂	17.50	SO ₃	2.59
Al ₂ O ₃	5.17	CaO libre	1.43
Fe ₂ O ₃	2.92	Cl ⁻	0.02
CaO	60.21	Résidus insolubles	0.70
MgO	1.87	Perte au feu	8.63
K ₂ O	0.57	Na ₂ O	0.18

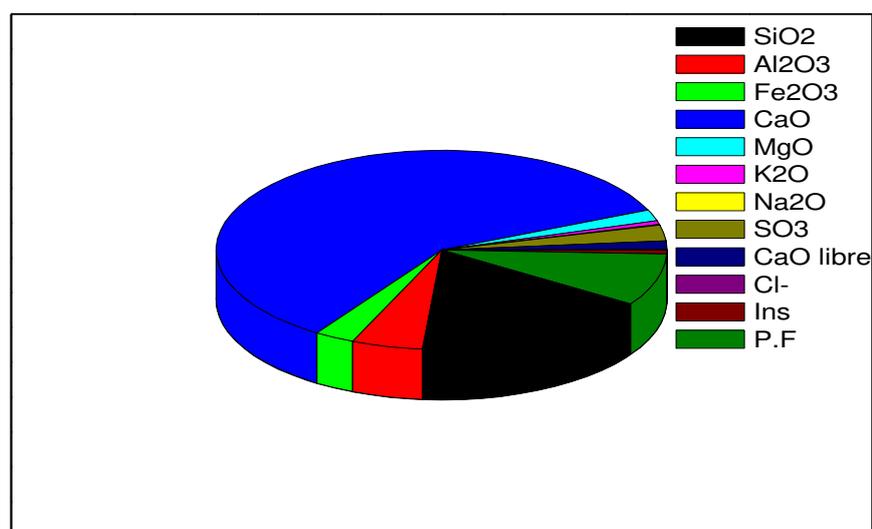


Figure IV. 1:Composition chimique du ciment 42.5

Tableau IV. 2:Composition minéralogique du ciment 42.5

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker%
Clinker	C ₂ S	20
	C ₃ S	56
	C ₃ A	06
	C ₄ AF	12
	CaO libre	01
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	Calcaire(L)	17

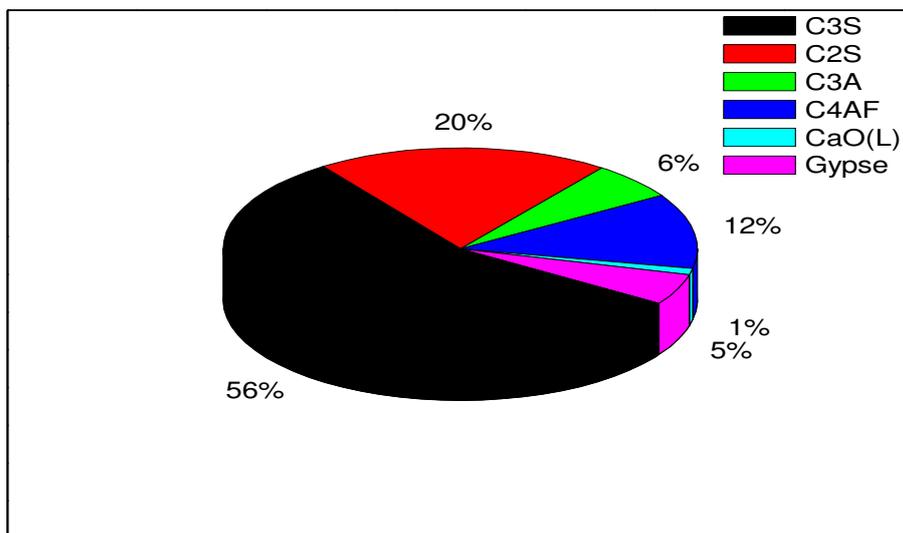


Figure IV. 2 :Composition minéralogique du ciment 42.5

Détermination de la consistance normale :

La consistance normale sert à déterminer la quantité d'eau optimale, nécessaire pour former une pâte dite normale. [18]

On a réalisé ce travail selon la norme « NF196-3 » les résultats sont obtenus

Tableau IV. 3:Consistance normale du ciment 42.5

Echantillons	Consistance normale (%)
Valeur (témoin)	27.3

Caractéristiques physico-mécaniques du ciment :

Les caractéristiques sont représentées dans les tableaux :

Tableau IV. 4: Les caractéristiques physiques du ciment 42.5[18]

Essai	Unité	Résultats
Consistance normalisée(%)	H ₂ O	27.3
Temps de prise (mn)	Début	165
	Fin	230
Essai de retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)	03 jours	344
	07jours	478
	28jours	784
Masse volumique absolue du ciment (g/cm^3)		3.03
Finesse suivant la méthode de Blaine cm^2/g)		4242

Tableau IV. 5: Les caractéristiques mécaniques du ciment 42.5

Masse totale au démoulage des 06 éprouvettes(g)		3395.4
Echéances en jours	Flexion (N/mm^2)	Compression (N/mm^2)
02jours	4.0	20.9
07jours	6.2	38.3
28jours	7.0	47.8

Commentaire :

Le ciment portant 42.5 R, est analysé par nos soins est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/A 42.5 R selon la norme « NF196-3 »

2-2-Le laitier :

Le laitier granulé utilisé dans notre étude comme ajout au ciment après leur broyage a la finesse désirée provienne de complexe sidérurgique d'El-Hadjar wilaya d'Annaba, les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie d'AIN-TOUTA, la composition chimique du laitier est présentée dans le Tableau IV .6

2-2-1 Analyse chimique du laitier :**Tableau IV .6 :** Composition chimique du laitier

Les composantes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃
Teneur (%)	40,80	5,2	0,53	43,01	6,4	3,02	0,8

Tableau IV .7 : Module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma) [19]

Module	Formule	Valeur	Remarque
Mb	$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	1,074	Mb > 1 donc le laitier est basique
Ma	Al ₂ O ₃ SiO ₂	0,127	Acceptable

2-2-2 Propriétés physiques de laitier :

Masse volumique apparente = 1080 kg/m³

Masse volumique absolue = 2733 kg/m³

Surface spécifique = 3200 cm²/g

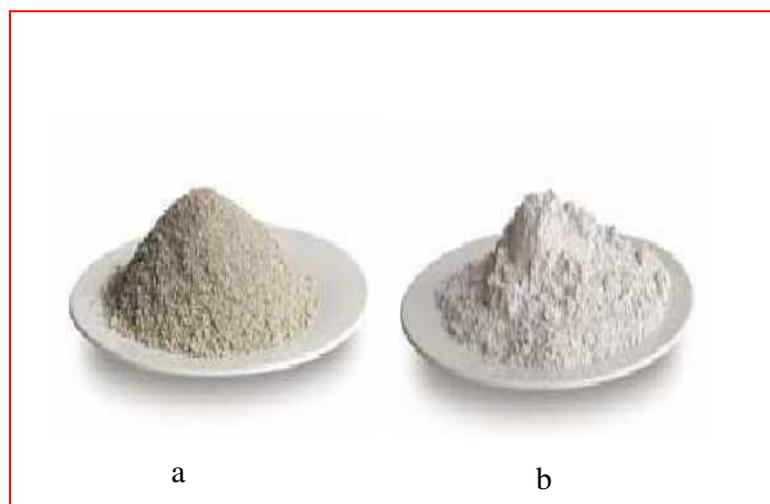


Figure IV.3 : Echantillon de laitier utilisé comme ajout cimentaire (a) laitier non broyé, (b) laitier broyé.

Les éléments les plus fins du laitier (poudre) entrent en réaction avec le produit d'hydratation du clinker $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former des CSH plus denses. -

2-3-SABLE ET GRAVIER :

A-Sable 0/3 de KEDDARA :

Tableau IV.8: Caractéristiques physiques de Sable 0/3

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
MASSE VOLUMIQUE	2,62	g/cm^3
ESV	83,34	%

Tableau IV.9: Analyse granulométrique de Sable 0/3.

OUVERTURE DES TAMIS	POIDS (G)		TENEURS (%)		Mf=2.6
	Refus partiel	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamises cumulés	
5	2.5	2.5	0.25	99.75	
2.5	187.5	190	15.03	84.97	
1.25	275.4	465.4	40.54	59.46	
0.63	184.1	649.5	56.95	43.05	
0.315	212.1	861.6	70.16	29.84	
0.16	4.3	865.9	80.59	19.41	
0.08	2.2	968.1	96.81	3.19	

D'après ces résultats, on calcule le module de finesse du sable: $MF = \sum \text{refus}(\%) / 100\%$
(dans l'intervalle de tamis entre [5mm – 0.16mm])

calcul :

$$MF = (0.25 + 15.03 + 40.54 + 56.95 + 70.16 + 80.95) / 100 \%$$

$$MF = 2.6$$

on remarque que MF est comprise dans l'intervalle [2.2 – 2.8] ,

Commentaire : Notre sable a un bon module de finesse.

B-Gravier 3/8 de KEDDARA :**Tableau IV.10:** Caractéristiques physiques G 3/8

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
Masse volumique	2.63	g/cm ³
Propreté superficielle	1.7	-
ABS	0.35	-
Coefficient d'aplatissement	/	-

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du G 3/8 de KEDDARA

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (G)		TENEURS (%)	
	Refus partiel	Refus cumulé	Refus cumulés	Tamisas Cumulés
8	21.4	21.4	2.14	97,86
6.30	262.5	283.9	28.39	71.61
5	410.2	694.1	69.41	30.59
2.5	301	995.1	99.51	0.49
1.25	2.9	998	99.8	0.2

C-GRAVIER 8/15 (KEDDARA) :**Tableau IV.12:** Caractéristiques physiques G 8/15

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
Masse volumique	2.64	g/cm ³
Los Angeles	22.75	%
Absorption	0.35	%
Propreté superficielle	1.55	-
Coefficient d'aplatissement	11.2	-

Tableau IV.13 : Analyse granulométrique G8/15

OUVERTURE DES TAMIS	POIDS (G)		TENEURS (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats Cumulés
16	0	0	0	100
12,5	90.4	90.4	9.04	90.96
10	356.8	447.2	44.72	55.28
8	364.9	812.1	81.21	18.79
6,3	176.6	988.7	98,87	1.13
5	7.7	996.4	99.64	0.36

D-GRAVIER 15/25 (KEDDARA) :**Tableau IV.14 :** Caractéristiques physiques de G 15/25 (KEDDARA)

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
Masse volumique	2.66	g/cm ³
Los Angeles	22.75	%
Absorption	0.4	%
Propreté superficielle	0.62	-
Coefficient d'aplatissement	8.86	-

Tableau IV .15 : Analyse granulométrique de G 15/25 (KEDDARA)

OUVERTURE DES TAMIS	POIDS (G)		TENEURS (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	Refus cumulés	tamisats Cumulés
25	13.8	13.8	1.38	98.62
20	387.9	401.7	40.17	59.83
16	346.9	748.6	74.86	25.14
12.5	236.1	984.7	98,47	1.53
10	12.37.7	997	99.7	0.3

2-4- Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour gâcher notre béton est l'eau potable de la ville d'Alger, on a pris la précaution de constater sa propreté et son odeur, visuellement, elle apparaissait bonne pour être utilisé.

2-5- L'adjuvant :

On a utilisé comme adjuvant le super plastifiant ADVA Flow 390 – Haut réducteur d'eau à long maintien de rhéologie / Conforme à la norme EN 934-2(T3.1-3.2) ASTM C494 type A et type F (d'après CNERIB, c'est un adjuvant à base de poly carboxylate) pour la description et les propriétés del'ADVAFlow390 voire l'annexe

.2-5-1-Dosage :

Plage de dosage recommandée : de 500 à1500ml pour 100kg de ciment (0,5 à 1.5 % du poids de ciment).

Les effets du produit dépendent de la quantité introduite. Des essais préalables utilisant les matériaux du site sont donc nécessaire pour optimiser les dosages et atteindre les propriétés recherchées (cohésion, ouvrabilité, début de prise, résistance initiale et finale, retrait...).

2-5-2-Mode d'emploi :

L'ADVAFlow390 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Compatibilité et addition des ingrédients :

ADVAFlow390 ne doit pas être mélangé avec d'autres adjuvants. Ces performances en seraient affectées.

2-5-3-Conclusion :

Suivant les résultats obtenus, après caractérisation des différents constituants à savoir (sable, graviers, ciment, l'eau, poudre de laitier), on peut conclure que ces derniers sont conformes pour leur emploi dans les bétons en général.

3-formulation :**3-1-La Méthode pratique**

On a utilisé la méthode de « DREUX-GORISSE » pour la composition du notre béton

Le ciment 42.5 :

Sur la base des données ci-dessous, on calcule la composition du béton par la méthode de DREUX-GORISSE :

- Résistance nominale du béton : $R_N=42\text{MPa}$
- Ouvrabilité désirée du béton : Béton plastique.
- Résistance vraie du ciment à 28jours : $R_c=42.5$.
- Vibration normale.
- Granulats concassés.
- Qualité des granulats : Bonne, Courante.

Résistance visée

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée.

Ainsi la résistance visée, $R_N=42\text{MPa}$

$$R_{b28}=R_N+15\%R_N$$

$$R_{b28}=1.15R_N \quad R_{b28}=48.3\text{MPa}$$

Dosage en ciment et en eau

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, et de la qualité du ciment et des granulats.

Ainsi expérimentalement, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$R_{b28}=G.R_c(C/E-0.5)$$

Avec :

R_{b28} : résistance visée à 28 jours

C : dosage du ciment en kg/m^3 de béton

E : dosage de l'eau en l/m^3 de béton

R_c : Classe vraie du ciment en MPa ($R_c=42.5\text{MPa}$)

G : coefficient granulaire. Ce coefficient représente la qualité des granulats ($G=0.5$)

$$R_{b28}=1.15R_N$$

$$\text{Donc : } C/E = \frac{R_{b28}}{G.R_c} + 0.5$$

$C/E=2.63$

➤ Pour notre béton que on a choisi :

Dosage du ciment : 450kg/m³.

L'ouvrabilité : Ac=21cm. Le rapport C/E=2.63

On déduit le dosage d'eau : C/E=2.63 avec C=450kg, E=C/2.63 E=450/2.63=171 L/m³, soit 171L/m³. D'eau.

Veau=171

On trace la courbe granulaire de référence sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), la courbe peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement, O, origine, A, point de brisure, et B, extrémité. [20]

Le point d'origine, O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis, 0.080mm. Ce point est

repéré par ses coordonnées : $O = \begin{cases} X = 0mm \\ Y = 0\% \end{cases}$

- Le point(B) à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D max=31.5mm.

$B = \begin{cases} X = 31.5mm \\ Y = 100\% \end{cases}$

- Le point de brisure (A) a pour coordonnées :

- Abscisse : On a Dmax > 20 mm, donc X = milieu de l'intervalle [5 ; D]

$X = (31.5 - 5) / 2 = 13.25mm$

- Ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D_{max} + K + K_p + K_s}$

$K = -2 / K_s = 3.18 / K_p = 6 \implies Y = 51.5$

A (x = 13.5, y= 51.5%)

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1
ENR. N° 0160/13

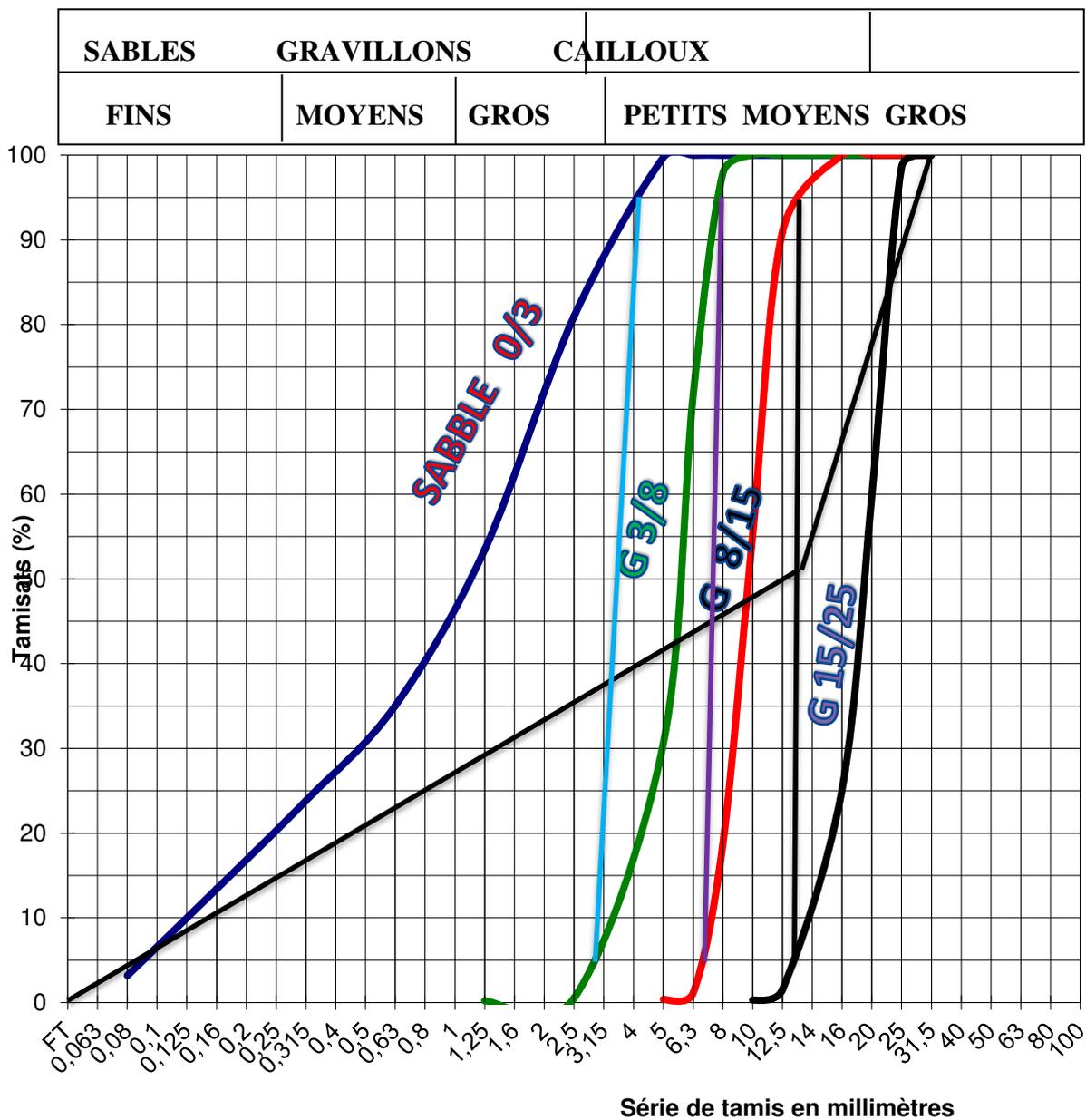


Figure IV.4 : Courbe granulométrique

- Les proportions de sable et de gravier nécessaire obtenu à partir d'une méthode graphique appelée la ligne de partage sont :

Le sable (0/3) :38 %

Le gravier (3/8) :9%

Le gravier (8/15) :10%

Le gravier (15/25) :43%

Après correction :

Le sable (0/3) :38%

Le gravier (3/8) :10%

Le gravier (8/15) :24%

Le gravier (15/25) :28%

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V_{abs} = 1000\gamma - V_c$$

Avec : V_c volume du ciment et $V_c = C / \rho_c$ (ρ_c : masse spécifique du ciment).

$$\rho_c = 3.03 \text{ g/cm}^3 / C = 450 \text{ kg}$$

$$\text{DONC : } V_c = 450 / 3.03 = 148.51$$

$$V_{abs} = 1000(0.80) - 148.51$$

$$V_{abs} = 651.49$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

-Sable 0/3 : V_s (en litre) = $P_s\% V_{abs}$ ou P_s : le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique.

$$\text{Donc : } V_{0/3} = P_s\% V_{abs} = 38 * 651.49 / 100 = 247.56 \text{ l}$$

-Gravier 3/8 : $V_{3/8}$ (en litre) = $P_{3/8}\% V_{abs}$ ou $P_{3/8}$: le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique.

$$\text{Donc : } V_{3/8} = P_{3/8}\% V_{abs} = 10 * 651.49 / 100 = 65.14 \text{ l}$$

-Gravier 8/15 : $V_{8/15}$ (en litre) = $P_{8/15}\% V_{abs}$ ou $P_{8/15}$: le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique.

$$\text{Donc : } V_{8/15} = P_{8/15}\% V_{abs} = 24 * 651.49 / 100 = 156.87 \text{ l}$$

Gravier 15/25 : $V_{15/25}$ (en litre) = $P_{15/25}\% V_{abs}$ ou $P_{15/25}$: le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique.

Donc : $V_s 15/25 = P_s \% V_{abs} = 28 * 651.49 / 100 = 182.47 \text{ l}$

Dosage en masses de chaque constituant :

On a : $\rho_c = M/V$ $M = \rho_c * V$

3-2-COMPOSITION DES BETONS :

Tableau IV.16: Dosage en masses des constituants pour 1m³ de béton

Constituants	Masse volumiques (g/cm ³)	La masse (kg)
Ciment	3.03	450
Sable (0/3)	2.62	648.62
Gravier (3/8)	2.63	171.34
Gravier (8/15)	2.64	412.78
Gravier (15/25)	2.66	485.22

Tableau IV.17 : Composition des bétons

Type de béton	Type de ciment	Ciment (kg/m ³)	Affaissement (cm)	Poudre de laitier		Super plastifiant (kg)
				(%)	(kg)	
Béton ordinaire	42.5	450	21	0	0	4.5
Béton avec laitier	42.5	450	22	5	22.5	4.5
			21	10	45	
			20	15	67.5	
			19	20	90	

3-3-Les étapes d'élaboration du mélange :

1-Verser les trois types de graviers 15/25 puis 8/15 ensuite 3/8 dans le malaxeur.

2-Verser le ciment.

3-Verser le sable

4-- Malaxer un peu puis ajouter la poudre de laitier

5- Malaxer pendant 1min puis ajouter l'eau lentement, ensuite ajouter l'adjuvant et continuer le malaxage durant 4min.

6-Remplir les éprouvettes.

Désignation :

- BO : béton ordinaire témoin avec ciment 42.5 et 0% d'ajout.
- BO 5% poudre de laitier : béton ordinaire avec ciment 42.5 et 5% d'ajout.
- BO 10% poudre de laitier : béton ordinaire avec ciment 42.5 et 10% d'ajout.
- BO 15% poudre de laitier : béton ordinaire avec ciment 42.5 et 15% d'ajout.
- BO 20% poudre de laitier : béton ordinaire avec ciment 42.5 et 20% d'ajout.

-Abréviation (Cette abréviation sera utilisée le long de cette étude.) :

-BO : Béton ordinaire

-PL : Poudre de laitier

3-3Préparation des éprouvettes pour les essais mécaniques :

Pour chaque essai (7j ,28j) et pour chaque type de béton On a préparai :

-6 éprouvettes de 16/32 pour les essais de compression

- 3 éprouvettes 7*7*28 pour les essais de flexion



Figure IV.5 : Remplissage des éprouvettes.

4-Propriétés des bétons :

4-1-L'affaissement :



Figure IV.6 : L'essai d'affaissement (cône d'ABRAMS)

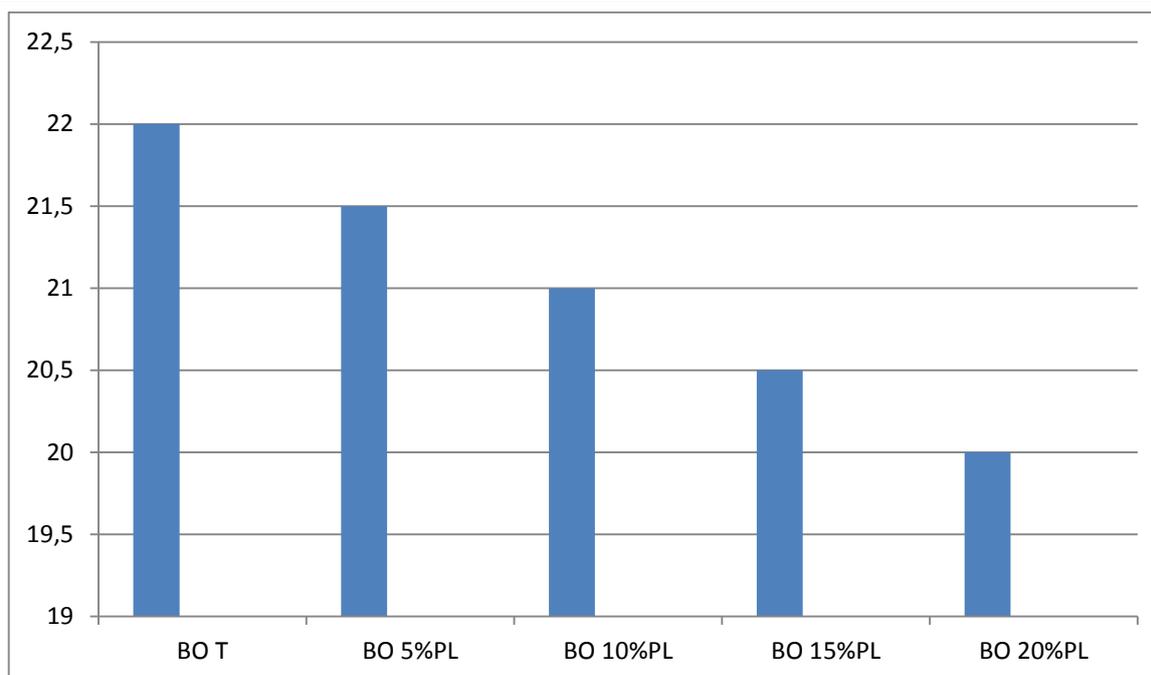


Figure IV.7 : L'affaissement en fonction de pourcentage de poudre de laitier au cône d'ABRAMS

Commentaire : On remarque une diminution de l'affaissement lorsqu'on augmente le pourcentage de la poudre de laitier, il faut de grandes quantités d'eau pour mouiller et diminuer le frottement entre les grains et transformer les fines du ciment en une pâte plastique capable d'occuper l'espace inter granulaire.

Remarque : le pourcentage utilisé et la finesse du laitier ont une très grande influence sur le comportement du béton frais.

4-2- La masse volumique :

La masse volumique des bétons a été déterminée par la formule suivante :

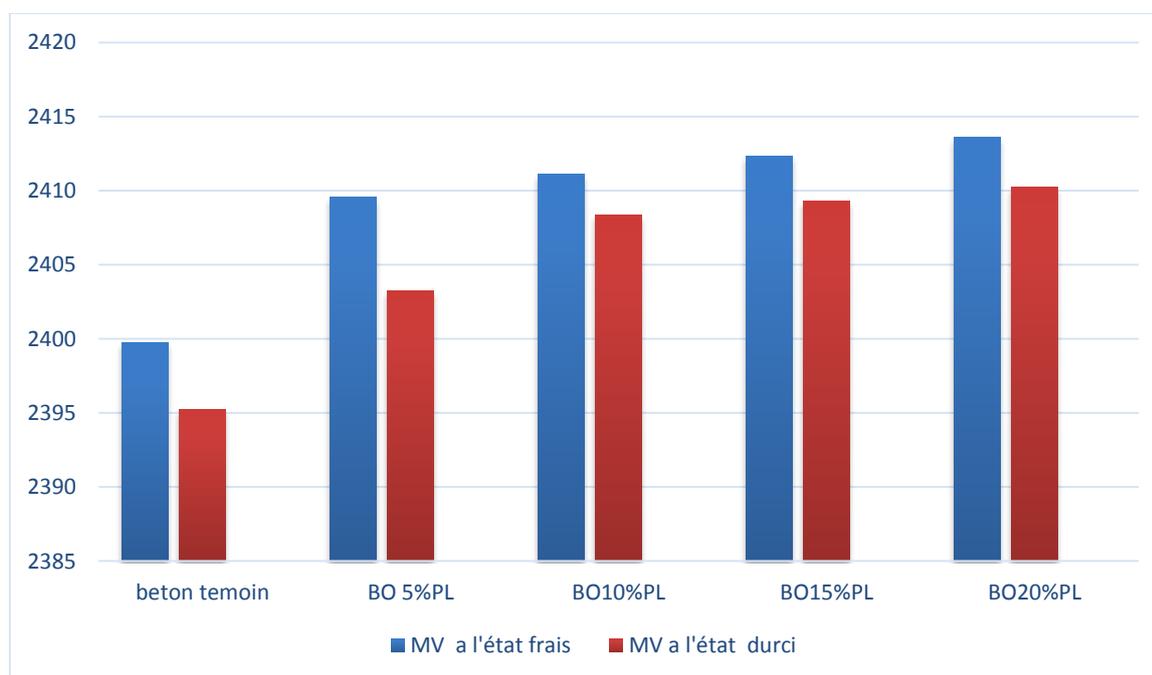
$$\varphi = \frac{M}{V} \text{ (M est la masse de l'éprouvette et V son volume),}$$

- La masse volumique à l'état frais : mesurée après le moulage des éprouvettes.
- La masse volumique à l'état durci : calculée après le démoulage.

Les résultats sont inscrits dans le Tableau IV.18 :

Tableau IV.18: Masse volumique aux états frais et durci

Type de béton		Masse volumique du béton frais (kg/m ³)	Masse volumique Béton durci (kg/m ³)
Béton Témoin	Ciment (42.5)	2399.75	2395.23
Béton avec Poudre de laitier	Ciment (42.5)	5% PL	2409.56
		10%PL	2411.12.
		15%PL	2412.36
		20%PL	2413.63

**Figure IV.8 :** Masse volumique aux états frais et durci des différent bétons

Commentaire : On constate une légère diminution de la masse volumique des bétons aux états frais par rapport aux l'états durci (0.32%), cela est dû à l'effet de l'hydratation d'eau, et l'augmentation de la masse volumique des bétons avec poudre de laitier par rapport au béton témoin (1.2%).

Ces résultats sont concordants avec les données bibliographiques sur l'évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage et la finesse d'ajout.

4-3-La résistance à la compression :

Des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont été confectionnées puis démoulées après 24 heures, ensuite conservées dans l'eau à une température de 20 à 23 °C pendant 28 jours.

Les éprouvettes ont été écrasées aux différents âges (7j, 28j), à l'aide d'une presse de charge maximum 2000KN. L'écrasement faite à une vitesse de 0.6 MPa/s.



Figure IV.9:Conservation des éprouvettes dans l'eau potable (gauche), la presse de compression (droite).

Les résultats de la résistance à la compression à 7, 28 jours sont inscrits dans le Tableau IV.19

Tableau IV.19: La résistance à la compression des différents bétons

Type du béton		La résistance à la compression (MPa)		
		7j	28j	
Témoin	Ciment (42.5)		37.75	40.60
	Poudre de laitier	Ciment (42.5)	5%	40.86
10%		41.33	43.61	
15%		43.57	45.98	
20%		44.01	47.44	

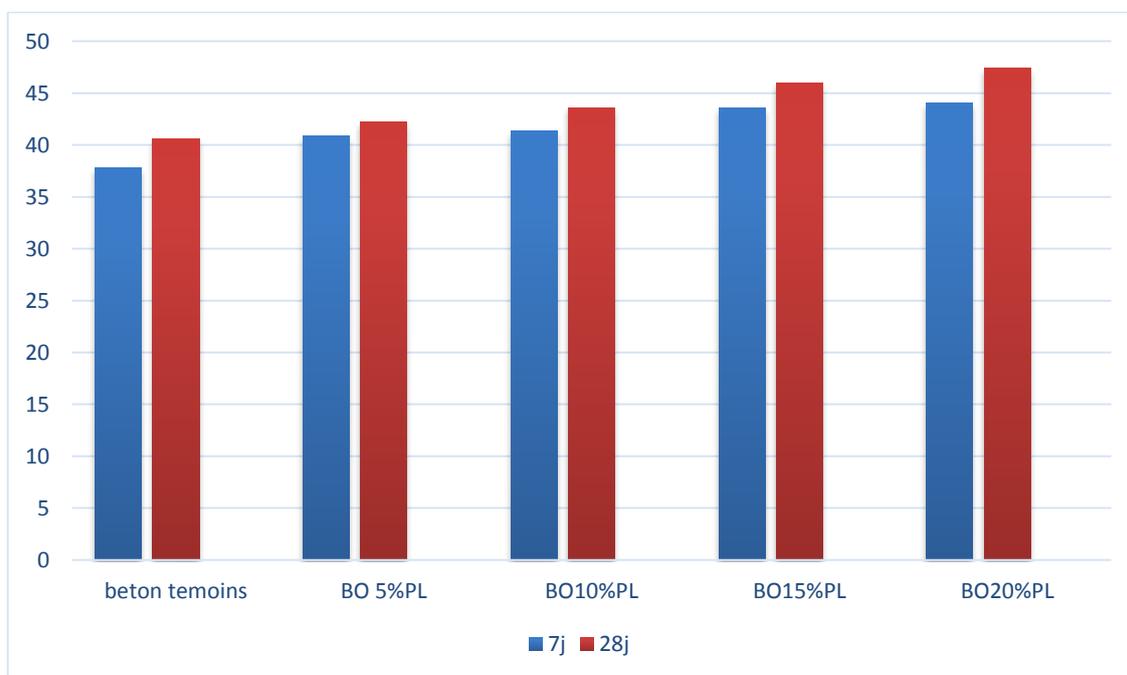


Figure IV.10: L'évolution de la résistance à la compression avec l'age du béton

Commentaire : Au jeune âge (7jours), la PL donne des résistances un peu améliorées avec les bétons à base de ciment 42.5, mais à 28jours on a un gain de résistance 7MPa (13.5%)de la résistance comparée à un béton témoin.

Remarque : On a remarqué que la PL améliore la résistance à la compression.

Le mode de rupture obtenu sur l'ensemble des éprouvettes testées est illustré par la Figure IV.12.



Figure IV.11 : Mode de fissuration des éprouvettes (7J.28J béton avec 20%PL).

Commentaire : ce mode de fissuration selon la norme EN 12390-3 -2001 est correct (voir l'annexe)

4-4-La résistance à la flexion :

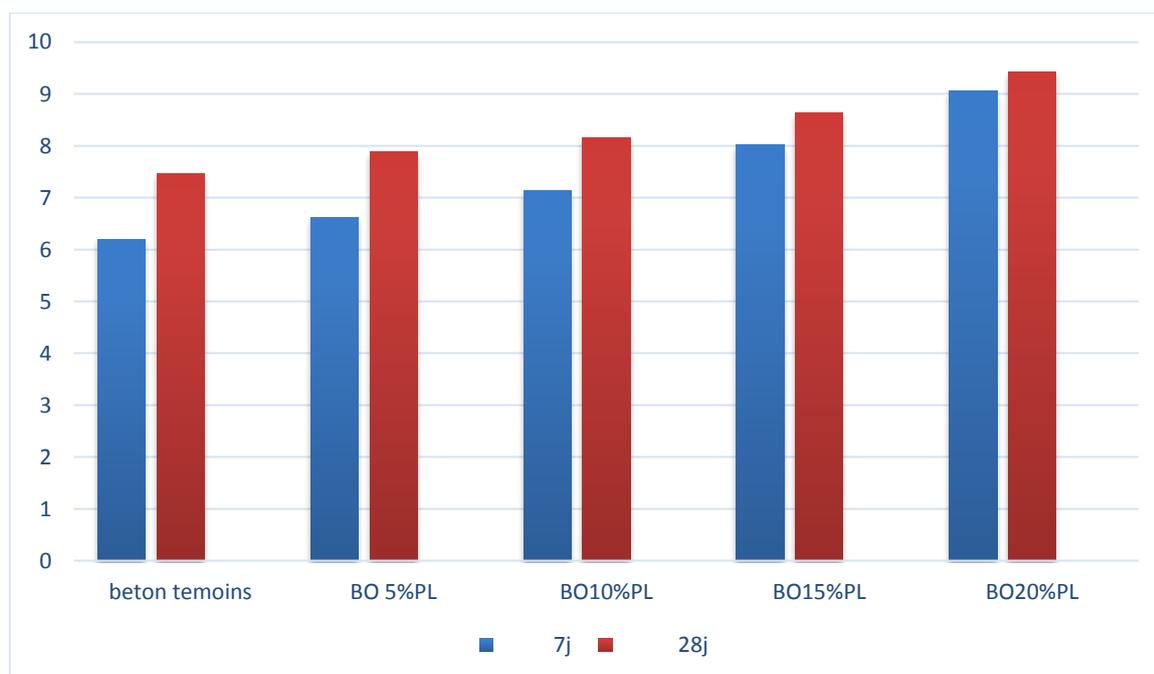
Des éprouvettes cylindriques (7×7×28) ont été confectionnées puis démoulées après 24 heures, ensuite conservées dans l'eau à une température de 20 à 23 °C pendant 28 jours.

Les éprouvettes ont été écrasées aux différents âges (7j, 28j), à l'aide d'une machine d'essai de flexion maximum 120KN.

Les résultats sont illustrés dans le Tableau IV.21

Tableau IV.20: La résistance à la flexion

Type du béton		La résistance à la flexion (MPa)		
		7j	28j	
Témoin	Ciment (42.5)	6.2	7.46	
Poudre de laitier	Ciment (42.5)	5%PL	6.62	7.89
		10% PL	7.14	8.16
		15% PL	8.02	8.64
		20% PL	9.05	9.42



Commentaire : on a obtenu une amélioration des résistances par rapport au béton témoin 12%

Figure IV.12 : L'évolution de la résistance à la flexion avec l'age du béton



Figure IV.13 : Mode de rupture des éprouvettes (7J.28J béton avec 20%PL).

Commentaire : ce mode de fissuration selon la norme EN 12390-3 -2001 est correct (voir l'annexe)

5-2-a-Aspect macroscopique :

Figure IV.14 : vue macroscopique de la surface de rupture (epr ;7J.28J béton avec 20%PL).

Ces photos nous renseignent clairement sur :

- La répartition homogène de tous les constituants du béton (surtout les granulats) c'est-à-dire absence de ségrégation, ce qui va influencer positivement les résistances mécaniques.
- L'adhérence parfaite entre la pâte et les granulats.
- Absence totale des bulles d'air, donc ce sont des bétons compacts avec une meilleure résistance aux agressions chimiques

6-Discussion et interprétation :

Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois éprouvettes testées pour chaque béton à chaque échéance. Globalement, on remarque une nette évolution des résistances de tous les mélanges. Les résultats obtenus confirment que plus le béton est compacte grâce à la finesse et le pourcentage d'ajout plus il est résistant. En outre, la haute teneur en silice amorphe SiO_2 de la PL lui confère des propriétés pouzzolaniques qui augmentent avec la teneur en PL, le SiO_2 réagit avec la portlandite libérée par l'hydratation des silicates en présence d'eau, ce qui

donne naissance à des nouveaux C-S-H similaires à celui obtenu par le ciment portland, qui font densifier d'avantage la matrice cimentaire et occupent les pores libres et rendre la structure plus compacte et plus résistante.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif de notre travail concerne l'utilisation de la poudre de laitier finement broyé comme ajout cimentaire dans le but de formuler un béton ordinaire destiné au béton précontraint.

L'étude s'est articulée autour des trois principaux points suivants:

Caractérisation des matières premières utilisées étude de l'influence de la poudre de laitier sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons élaborés.

Caractérisation des bétons avec poudre de laitier par des essais physico-mécaniques.

Les résultats obtenus au cours de ce travail, mènent aux conclusions suivantes :

1-En fixant le rapport E/C à 0,38, la méthode, de Dreux-Gorisse conjuguée à celle de coulis nous ont conduits à des compositions de béton satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs suivants :

a- la teneur en adjuvant par rapport à la masse du ciment est 1%.

b- diamètre maximal des gros granulats à 31.5cm.

c-SSB du poudre de laitier = 3200cm²/g

d- teneur en poudre de laitier: 5%,10%,15% ,20% , par rapport au poids de ciment.

2. L'utilisation de la poudre de laitier finement broyée et d'un superplastifiant arrivé à un faible écoulement du béton par rapport au béton de référence.

3. L'effet de l'introduction de la poudre de laitier, conjuguée à celui du super plastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores suite au remplissage de ces derniers par la poudre de laitier

4. La masse volumique des bétons avec poudre de laitier, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton de référence, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines.

5. Les résistances mécaniques des bétons avec poudre de laitier augmentent d'une façon graduelle par rapport à celle du béton de référence. Au niveau de la résistance à la flexion, le

Conclusion générale

béton avec poudre de laitier développe des résistances améliorées à celles du béton de référence.

les résistances à la compression du béton de poudre laitier ayant obtenues une amélioration significative par rapport à celles du béton de référence. De façon générale, un double rôle de la poudre de laitier est reconnu : pouzzolanique et granulaire.

Enfin, la valorisation de laitier dans le béton se présente comme une issue importante dans la préservation de l'environnement. Néanmoins, il faut concilier les deux effets qu'a cette valorisation sur le comportement des bétons (l'activité pouzzolanique et la réaction alcali-silice).

Perspectives

Ce travail a permis d'effectuer une étude globale sur l'utilisation de la poudre de laitier dans le béton, mais il a également soulevé certains points qu'il serait intéressant d'exploiter :

-Il semble primordiale que la poudre de laitier soit finement broyé avant son utilisation pour assuré une bonne réactivité avec le ciment.

- Le travail présenté dans ce manuscrit est expérimental. Il semble que la modélisation devrait permettre de conforter ou d'infirmier certaines hypothèses, notamment pour les mécanismes d'action du laitier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] NEBBOU Mohamed , MADANI AMER « influence de la poudre de marbre sur les propriétés du béton »
- [2] CHAID.R : les cours théoriques sur le béton , université de Boumerdes , 2008 .
- [3] MAUD CODINA : « Les bétons bas ph Formulation, caractérisation et étude à long terme », thèse de doctorat INSA. France 2007.
- [4] document de granites « études de la faisabilité de B A P avec adjuvant ».
- [5] thèse AYAD.
- [6] Mr BOUFEDAH BADISSI Ahmed : « influence de la granularité classe granulaire 4/22. Sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires », Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2011.
- [7] ABDELAZIZ Yazid « béton précontraint cours et exercices » 2006
- [8] ADAM M.Nerville, « propriétés des bétons » Eyrolles paris,2000.
- [9] Jean-Marie Reynourad ,GillePijaudier-Cabot comportement mécanique du béton, paris 2005 .
- [10] Technologie du béton, Edition 1998, Groupement Belge du Béton
- [11] NEBBOU Mohamed ,MADANI AMER « influence de la poudre de marbre sur les propriétés du béton ».
- [12] Cendres volantes pour béton - Définitions, exigences et contrôle de qualité: indice de classement P 18-050.
- [13] Behim Mourda « sous-produits industriels et développement durable: réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrices » Thèse de doctorat d'état en génie civil. , institut de génie civil Annaba, 2005
- [14] Document technique de la direction de la recherche appliquée (DRA) du complexe sidérurgique d'EL HADJAR, 1989.
- [15] ALEXANDRE L. et SEBILEAU J L., « Le laitier de haut fourneau », édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [16] SMOLCZYK H. G., « Structure et caractérisation du laitier », rapport principal du 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, P 1 - 16.

Références bibliographiques

[17] source internet

[18] Rapport d'essai N°0428/16 « CETIM »Boumerdes 12/04/2017

[19] Achoura Djamel, Contribution a l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons à base de laitier de hauts fourneaux d'EL HADJAR, thèse, Université de Annaba, 2005.

[20] thèse-univ-biskra.dz

ANNEXE

Annexe

Essai de Los Angeles

1) Objectif de l'essai

Déterminer la résistance à l'abrasion (fragmentation par chocs plus usure par frottements réciproques) des granulats

Le coefficient Los Angeles obtenu est le pourcentage de l'échantillon initial passant au tamis de 1.6 mm après fragmentation dans un cylindre en présence de boulets d'acier.

2) Matériel

- machine Los Angeles, composée d'un cylindre et d'un moteur.

Le cylindre mesure à l'intérieur (508 +/- 5) mm et a un diamètre de (711 +/- 5) mm et fabriqué avec une tôle de 12 mm d'épaisseur.

Le moteur doit entraîner ce cylindre à une vitesse comprise entre 31 et 33 tours par minute et être équipé d'un compte tours permettant un arrêt automatique après 500 tours.

- boulets d'acier de diamètre compris entre 45 et 49 mm et de masse comprise entre 400 et 445 g.



Figure 1 : Le tambour Los Angeles et les boulets

3) Principe :

Il faut préparer par lavage et tamisage les fractions suivantes : 10/14 ; 11.2/16 ; 8,11.2 ; 6.3/10 ; 4/6.3.

Ces fractions sont encore divisées, dans lequel on prélève une certaine quantité, en rajoutant la masse de bille indiquée dans le Tableau .1 .

Annexe

Tableau .1 : la masse des billes

coupure granulaire	3500 g de la fraction :	1500 g de la fraction :	Nombre de boulets :
10-14	10/12.5	12.5/14	11
11.2/16	11.2/14	14/16	12
8/11.2	8-10	10/11.2	10
6.3/10	8-10	6.3/8	9
4/6.3	5/6.3	4-5	7

Mettre la prise d'essai, les boulets et mettre à tourner pendant 500 tours ; séparer l'échantillon obtenu des boulets.

Laver les granulats restant au tamis de 1.6 mm en éliminant tous le passant à ce tamis. Sécher et peser le refus à 1.6 mm

Remarque : le LA obtenue varie suivant la coupure, il est donc conseillé de prendre toujours la même fraction pour pouvoir comparer les résultats.



Figure 2 : Le granulat avant et après essai

4) Résultat

Le coefficient Los-Angeles (LA) obtenue par cette relation :

$$LA = \frac{m}{M} * 100$$

Avec **m** masse du refus à 1.6 mm **M** masse initial

Conclusion

Les forces de frottements entre les particules et augmente ainsi leur mobilité relative les unes vis à vis des autres, cela explique l'intérêt de l'essai los Angeles

-Plus le pourcentage Los Angeles est bas, plus l'échantillon est résistant à la fragmentation.

Annexe

ESSAI DE MICRO DEVAL

1) Objectif de l'essai

Cet essai Micro-Deval permet de déterminer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulat par attrition à l'aide de l'appareil MICRO DEVAL.

-obtenu Le coefficient Micro-Deval

-Equipement nécessaire :

- L'appareil Micro deval.
- Balance – tamis de 1.6 mm ; 8 mm ; 10 mm ; 12.5 mm et 14 mm
- Charge abrasive :billes sphériques de diamètre 10 mm±0.5 mm.

2) Principe de l'essai :

Il faut préparer par lavage et tamisage les fractions suivantes : 10/14 ; 11.2/16 ; 8,11.2 ; 6.3/10;4/6.3.

Ces fractions sont encore divisées, dans lequel on prélève une certaine Quantité (500gr), en rajoutant la masse de bille indiquée dans le Tableau .2.

Tableau .2 : la masse des billes .

coupure granulaire	350 grammes de la fraction :	150 grammes de la fraction :	masse de bille
10 – 14	10 - 12.5	12.5 – 14	5000
11.2 – 16	11.2 – 14	14 – 16	5400
8 - 11.2	8 – 10	10 - 11.2	4400
6.3 – 10	8 – 10	6.3 – 8	4000
4 - 6.3	5 - 6.3	4 - 5	2000

Mettre la prise d'essai, la masse de bille d'incox (servant de charge abrasive) et compléter avec (2.5 +/- 0.05) l d'eau par cylindre.

Pour chaque essai, il est demandé de préparer deux cylindres identiques. Mettre à tourner pendant 1200 tours; séparer l'échantillon obtenu des billes d'acier (par exemple à l'aide d'un aimant) et laver les granulats restant au tamis de 1.6 mm en éliminant tous le passant à ce tamis. Sécher et peser le refus à 1.6mm.

Remarque : le MDE obtenue varie suivant la coupure, il est donc conseillé de prendre toujours la même fraction pour pouvoir comparer les résultats.

Annexe



Figure 2 :L'échantillon avant et après l'essai

Résultat

Le coefficient M_{DE} pour chaque cylindre:

$$M_{DE} = (500 - m) / 5 \quad \text{avec } m \text{ masse du refus à } 1.6 \text{ mm.}$$

La valeur du M_{DE} à utiliser, arrondi à l'entier le plus proche, est la moyenne des deux essais.

Plus le pourcentage d'usure est bas, plus l'échantillon est résistant à l'usure.

L'adjuvant

1-Description de l'ADVAFlow390 :

est un Super plastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération. Il est conçu à base de poly carboxylate qui améliore considérablement les propriétés des bétons prêt à l'emploi. L'ADVAFlow390 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. L'ADVAFlow390 ne présente pas d'effet retardateur.

Tableau 3 : Caractéristiques de L'ADVAFlow390

Forme	Liquide
Couleur	Jaunâtre
Ph	6 – 6,5
Densité	1,05 ± 0,02. 20°C
Teneur chlore	< 0.1%

Annexe



Figure 3 : l'ADVAFlow390

2-Propriétés et effets l'ADVAFlow390 :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Domaines d'application :

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

Annexe

SSB DU LAITIER Result Analysis Report

Sample Name:
laitier SSB 1h

SOP Name:

Measured:
lundi 23 avril 2018 14:16:25

Sample Source & type:

Measured by:
lmmc

Analysed:
lundi 23 avril 2018 14:16:26

Sample bulk lot ref:
23/04/2018

Result Source:
Measurement

Particle Name:
DEFAULT

Accessory Name:
Scirocco 2000 (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1,520

Absorption:
1

Size range:
0,020 to 2000,000

Obscuration:
22,45 %

Dispersant Name:
Dry dispersion

Dispersant RI:
1,000

Weighted Residual:
0,316 % um

Result Emulation: Off

Concentration:
0,0018 %Vol

Span :
4,563

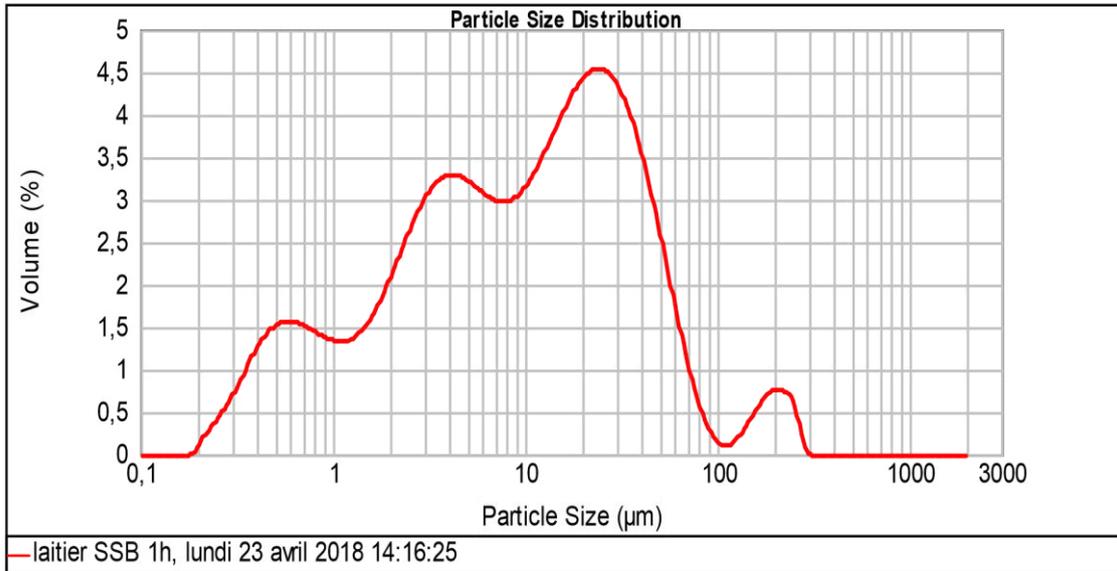
Uniformity:
1,8

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
2,39 m²/g
d(0.1): 0,822 um

Surface Weighted Mean D[3,2]:
2,509 um
d(0.5): 9,829 um

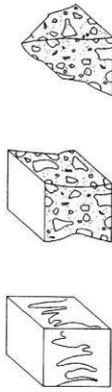
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
21,193 um
d(0.9): 45,675 um



Size (µm)	Volume In %										
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	1,21	11,482	3,18	120,226	0,19	1258,925	0,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	1,21	13,183	3,18	138,038	0,19	1445,440	0,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	1,28	15,136	3,44	158,489	0,38	1659,587	0,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,660	1,43	17,378	3,70	181,970	0,57	1905,461	0,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	1,66	19,953	3,92	208,930	0,69	2187,762	0,00
0,020	0,00	0,209	0,07	2,188	1,95	22,909	4,07	239,883	0,67	2511,886	0,00
0,023	0,00	0,240	0,25	2,512	2,26	26,303	4,11	275,423	0,46	2884,032	0,00
0,026	0,00	0,275	0,42	2,884	2,54	30,200	4,02	316,228	0,01	3311,311	0,00
0,030	0,00	0,316	0,61	3,311	2,77	34,674	3,81	363,078	0,00	3801,894	0,00
0,035	0,00	0,363	0,84	3,802	2,92	39,811	3,46	416,869	0,00	4365,158	0,00
0,040	0,00	0,417	1,09	4,365	2,98	45,709	3,00	478,630	0,00	5011,872	0,00
0,046	0,00	0,479	1,28	5,012	2,95	52,481	2,45	549,541	0,00	5754,399	0,00
0,052	0,00	0,550	1,39	5,754	2,87	60,256	1,86	630,957	0,00	6606,934	0,00
0,060	0,00	0,631	1,42	6,607	2,77	69,183	1,28	724,436	0,00	7585,776	0,00
0,069	0,00	0,724	1,39	7,586	2,70	79,433	0,77	831,764	0,00	8709,636	0,00
0,079	0,00	0,832	1,33	8,710	2,70	91,201	0,38	954,993	0,00	10000,000	0,00
0,091	0,00	0,955	1,26	10,000	2,78	104,713	0,15	1096,478	0,00		
0,105	0,00	1,096	1,21	11,482	2,95	120,226	0,10	1258,925	0,00		

Le rapport d'essai pourra inclure :

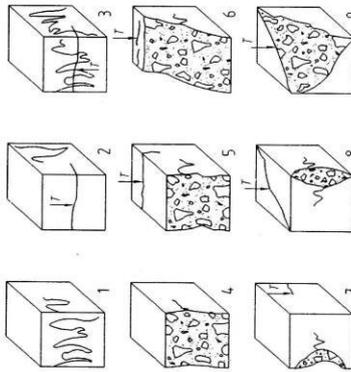
- a) masse de l'éprouvette ;
- b) masse volumique apparente de l'éprouvette, à 10 kg/m³ près ;
- c) état de l'éprouvette à la réception ;
- d) état de la conservation depuis la réception ;
- e) heure de l'essai (le cas échéant) ;
- f) âge de l'éprouvette au moment de l'essai.



Rupture par éclatement.

NOTE Les quatre faces opposées sont fissurées approximativement de la même façon, en général sans dommage important des faces en contact avec les plateaux.

Figure 1 — Ruptures correctes d'éprouvettes cubiques



NOTE T = fissure de traction.

Figure 2 — Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cubiques

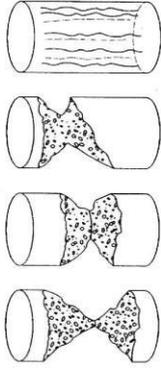


Figure 3 — Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques

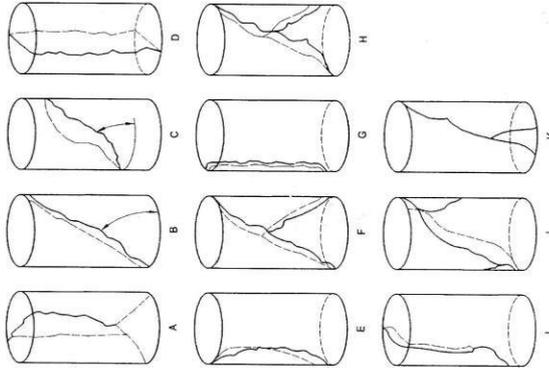


Figure 4 — Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques

Résumé

Résumé :

L'utilisation des ajouts cimentaires dans le béton est devenue de plus en plus une approche économique et environnementale incontournable dans le domaine de la construction. Par leur substitution au ciment Portland, ils peuvent améliorer les propriétés à l'état frais et durci du béton ainsi que la durée de vie des ouvrages. La disponibilité, le coût et le transport de certains ajouts cimentaires ont un impact écologique et économique. Pour éviter toute augmentation de gaz à effet de serre lié au transport, l'utilisation de certains matériaux cimentaires alternatifs locaux peut être une avenue intéressante à considérer.

Dans cette étude, nous avons utilisé le laitier granule comme ajout alternatif par addition de 5%,10%,15%,20% de ciment. Tous les mélanges de pâtes et de béton ordinaire sont préparés avec un rapport E/L de 0,38.

L'objectif est d'étudier les propriétés des mélanges à l'état frais, à l'état durci ainsi que la durabilité des bétons ordinaires incorporant le laitier granule. Les résultats montrent que, le laitier granule n'affecte pas les propriétés à l'état frais des mélanges.

L'amélioration des propriétés mécaniques est très marquée dans le temps, les gains de résistance en compression, en traction, en flexion.

Le gain de la résistance en compression des bétons incorporant le laitier granule à long terme.

On peut dire qu'il est possible de produire un béton ordinaire incorporant le laitier granule comme ajout cimentaire alternatif local dans le développement durable.

Mots clés : État frais, État durci, durabilité, le laitier granule.

ملخص:

أصبح استخدام الإضافات الإسمنتية في الخرسانة أكثر نهج اقتصادي وبيئي أساسي في مجال البناء بواسطة البديل للإسمنت بورتلاند، فإنها يمكن تحسين خواص الخرسانة الطازجة والصلبة وحياة الهياكل. توافر وتكلفة ونقل بعض الإضافات الإسمنتية لها تأثيرا بيئيا واقتصاديا. لتجنب أي زيادة في انبعاثات الغازات الناتجة عن سائل النقل، واستخدام بعض المواد الإسمنتية البديلة المحلية يمكن أن يكون وسيلة مهمة للنظر فيها.

في هذه الدراسة، استخدمنا خبث الحبيبات كإضافة بديلة بإضافة 5 و10 و15 و20 ٪ خبث الحبيبات بالنسبة لكمية الاسمنت.

الهدف هو دراسة خواص المخاليط الطازجة والصلبة، ومتانة الخرسانة العادية المدمجة مع خبث الحبيبات. وأظهرت النتائج أن خبث الحبيبات لا يؤثر على خصائص الخليط الطازج.

كذلك تحسن الخواص الميكانيكية واضح جدا مع مرور الوقت، وتحقيق مكاسب القوة الضاغطة والجر، والانحناء وتحسين معامل المرونة الذي يكون كبير في الخرسانة المدمجة مع خبث الحبيبات.

نستطيع القول إنه من الممكن إنتاج الخرسانة العادية واستعمال خبث الحبيبات كإضافة إسمنتية بديلة محلية في التنمية المستدامة.

الكلمات الرئيسية: الحالة الطازجة، الحالة الصلبة، خبث الحبيبات، الصلابة