

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

Université Ibn Khaldoun Tiaret



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie civil

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

Spécialité : Génie Civil
Option : Génie De La Construction

Présenté par :
BOUKHORS IBRAHIM
DAHMACHE ABDEL HAKIM

Sujet du mémoire

**Influence du type de ciment sur le comportement
mécanique d'un béton à haute performance à base
de la fumée de silice condensée**

Soutenu publiquement le 15 /06/2013 devant le jury composé de :

Mr : BOUAKAZE Khaled

Président

M^{elle} : RENNAK Zohra

Rapporteur

Mr : BELMAHI Samir

Examineur

Mr : HAMIDI Ahmed

Examineur

Promotion 2013

DEDICACES

nous dédions ce modeste travail ;

A nous parents

A notre encadreur, RENNAK Zohra.

A nos meilleurs amis et nos collègues de la promotion

A tous les enseignants de l'université Ibn Khaldoun Tiaret.

A tous les proches et tous ceux qui nous aidé moralement et matériellement.

REMERCIEMENT

Nous adressons nos sincères remerciements à notre enseignante promotrice Mlle.RENNAK Zohra, pour ses conseils, son aide et sa compréhension durant l'élaboration de cette recherche.

Nous remercions Monsieur le président Mr.Bouakaze khaled qui nous a fait le grand honneur d'accepter la présidence du jury, qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect.

Nous remercions également les enseignants Mr.belmahi Samir et Mr.hamidi Ahmed qui nous ont honorés de leur présence pour Nous jury

n'oublions pas de remercier tous les enseignants de la faculté de sciences appliquées département de génie civil à TIARET pour leurs patience et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur savoir pour assurer notre formation.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui de près ou de loin, nous ont aidé à réaliser ce travail.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de caractériser expérimentalement l'influence du type de ciment sur le comportement mécanique d'un béton à hautes performances et de le comparer avec un béton ordinaire.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne des essais de compression effectués sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées, réalisés grâce à une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester permettant d'atteindre des niveaux de contrainte de l'ordre du Miga Pascal, et des essais de traction réalisés sur des éprouvettes prismatiques de béton à hautes performances et béton ordinaire, les essais ont permis de comparer les résultats expérimentaux développés.

Les études concernant l'influence du type de ciment sur le comportement mécanique ont nécessité la formulation d'un béton ordinaire témoin et un béton à hautes performances.

L'analyse des essais effectués sur le béton à hautes performances et le béton ordinaire montre que le type de ciment de M'sila (CEM II /42,5) a une influence sur le comportement mécanique. Cette influence se remarque particulièrement sur les courbes de variation de résistance en fonction du temps.

Mots-clés : Béton à hautes performance ; type de ciment ; essai de compression ; essai de traction

abstract

The objective of this not is to experimentally characterize the influence of the type cement on the mechanical behavior of a high-performance concrete and to compare it with ordinary concrete.

The work presented in this not relates to compression tests on cylindrical specimens whose ends have already been rectified, made through a test machine is a press force and appropriate dimension to the specimen to be tested enabling reaching coercive agenda Miga Pascal levels and tensile tests on prismatic samples of high performance concrete and ordinary concrete, tests were used to compare the developed experimental results.

Studies on the influence of cement type on the mechanical behavior necessitated the formulation of a plain concrete witness and a high-performance concrete.

Analysis of the testing of the high performance concrete and ordinary concrete shows that the type of cement M'sila (CEM II / 42.5) has an influence on the mechanical behavior. This influence is particularly noticeable on resistance variation curves as a function of time.

Keywords:

high performance concrete; type of cement; compression test; tensile test

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو تميز تجريبي لتأثير نوع الاسمنت على السلوك الميكانيكي للخرسانة عالية الأداء ومقارنته مع الخرسانة العادي.

العمل المقدم في هذه المذكرة يوضح لنا اختبارات الضغط والشد على عينات اسطوانية الشكل ، التي تتم من خلال آلة اختبار تتميز بقوة الضغط وأبعاد مناسبة وذلك لفحص العينة و التمكين من التوصل إلى مستويات الشدة بالميجا باسكال على عينات من الخرسانة عالية الأداء والخرسانة العادية، حيث استخدمت الاختبارات لمقارنة النتائج التجريبية المتقدمة.

الدراسات المتعلقة بتأثير نوع الأسمنت على السلوك الميكانيكي مطلوبة لصياغة الخرسانة العادية والخرسانة عالية الأداء. تحليل اختبار الخرسانة عالية الأداء والخرسانة العادية يظهر أن هذا النوع من الاسمنت مسيلة (42,5) له تأثير على السلوك الميكانيكي هذا التأثير ملحوظ بشكل خاص على منحنيات اختلاف المقاومة بالنسبة للزمن.

كلمات البحث:

الخرسانة عالية الأداء , نوع من الاسمنت , اختبار ضغط , اختبار الشد

Intitulées	page
CHAPITRE I: Les constituants du béton	
Figure I.1: matières première de ciment	8
CHAPITRE II : Les caractéristiques des bétons	
Figure II.1 Relation entre la résistance à la traction directe et le volume de granulat	33
CHAPITRE III : L'emploi du béton a hautes performance	
Figure III.1. Le pont de Joigny (Bourgogne, France.1989 [26])	39
Figure III.2 Le pont « Stichtse » au Pays-Bas	39
Figure III.3. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) [26]	40
Figure III.4: Tours NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001)	42
Figure (III.5) : Les tours cœur-défenses	42
Figure III.6: Plates-formes pétrolières en Norvège	43
Figure (III.7): Le Water Tower Place	43
Figure III.8. La Pacific Tower (France)	43
Figure (III.9):Le pont sur l'Elorn	44
Figure (III.10):Le pont de joigny	47
Figure (III.11): Le pont de Normandie	45
Figure III.3.12. Tunnel de Barcelona	45
Figure III.13. Le Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (Mucem)	46
Figure (III.14): Le pont de l'île de Ré	47
Figure (III.15):Tunnel sous la Manche (France et Angleterre)	47
CHAPITREIV: Formulation du B.H.P (avec différent type de ciment)	
Figure IV.1: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) [23].	67

CHAPITRE V : ESSAIS SUR LES BETON	
Figure V.1 : ciment CPJ CEMII/A.	75
Figure V.2: ciment CPJ CEMII/B.	75
Figure V.3: ciment CPJ CEMII/A.	75
Fig. V.4 : Essai de la masse volumique du ciment.	76
Figure V.5: Essai de la masse spécifique du ciment.	77
Figure V.6: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance.	78
Figure V.7: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible	79
Figure V.8: détermination de la consistance et la prise des ciments	79
Figure V.9: Essais de la masse spécifique du sable.	80
Figure V.11: Essais de la masse volumique apparente du sable	
Figure V.12: Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontale).	81
Figure V.13: les trois éprouvettes pour l'essai de l'équivalent de sable (ES) (phase de repos (20 mn).	81
Figure V.13: la courbe granulométrique de sable.	82
Figure V.14: Essai de la masse spécifique du gravier 3/8,8/15	83
Figure V.15 : Essai de l'analyse granulométrique du gravier (3/8,8/15)	84
Figure V.16: la courbe granulométrique des graviers 3/8	85
Figure V.17: la courbe granulométrique des graviers 8/15	86
Figure V.18: Superplastifiants MEDAFLOW145	86
Figure V.19 : Les fumées de silice	87
Figure .20 malaxage du béton	90
Figure V.21 : Test d'affaissement, Au cône d'abrams	92
Figure V.22 : Fabrication et vibration des éprouvettes cylindrique et prismatique.	93
Figure V.23 : Démoulage et Conservation les éprouvettes(cylindriques et prismatiques)	94
Figure V.24 : Conservation les éprouvettes(cylindriques et prismatiques)	94
Figure V.25:Machine pour essai de compression simple sur des éprouvettes cylindriques	95
Figure V.26: Essai de traction par flexion quatre points sur des éprouvettes prismatiques	96

CHAPITRE VI: Résultats et interprétations	
Figure VI.1 : la résistance à la compression des bétons (Chlef).	102
Figure VI.2 : la résistance à la compression des bétons (Saida).	104
Figure VI.3: la résistance à la compression des bétons (M'sila).	106
Figure VI.4 : la résistance à la compression des bétons ordinaires.	106
Figure VI.5 : la résistance à la compression des bétons à hautes performances.	107
Figure VI.6 : la résistance à la traction des bétons réalisés par ciment de Chlef.	108
Figure VI.7 : la résistance à la traction des bétons réalisés par le ciment de Saida.	109
Figure VI.8 : la résistance à la traction des bétons réalisés par le ciment M'sila.	110
Figure VI.9 : la résistance à la traction par flexion des bétons ordinaires.	111
Figure VI.10 : la résistance à la traction par flexion des bétons à hautes performances.	111
Figure VI.11 : module d'élasticité de béton du ciment de classe B (M'sila).	110

Intitulées	page
CHAPITRE I:	
Les constituants du béton	
Tableau (I.1) : les valeurs limites garanties des résistances caractéristiques.	10
CHAPITRE II :	
Les caractéristiques des bétons	
CHAPITRE III :	
L'emploi du béton a hautes performance	
CHAPITRE IV :	
Formulation du B.H.P (avec différent type de ciment)	
Tableau IV.1: la valeur de A.	57
Tableau IV.2: Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants.	58
Tableau IV.3: Valeur de A.	60
Tableau IV.4: Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G).	63
Tableau IV.5: Valeurs du coefficient de compacité .	65
Tableau IV.6: appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.	66
CHAPITRE V :	
ESSAIS SUR LES BETON	
Tableau VI.1: Analyse granulométrique du sable.	77
Tableau VI.2: Analyse granulométrique des granulats de fraction 3/8.	79
Tableau VI.3: Analyse granulométrique des granulats de fraction 8/15.	80
Tableau V.4: Composition d'un m3 de béton témoin de ciment M'sila (en kg).	83
Tableau VI.5: Composition d'un m3 de béton témoin de ciment Chlef (en kg).	83
Tableau V.6: Composition d'un m3 de béton témoin de ciment Saida (en kg).	83
Tableau V.7: compositions d'un B.H.P de ciment M'sila (kg/m3).	84
Tableau V.8: compositions d'un B.H.P de ciment Chlef (kg/m3).	84
Tableau V.9: compositions d'un B.H.P de ciment Saida (kg/m3).	84
Tableau (VI.10) Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.	87
CHAPITRE VI:	
Résultats et interprétations	
Tableau VI.1 : les caractéristiques physiques des ciments.	93
Tableau VI.2 : les caractéristiques physiques de sable.	93
Tableau VI.3 : les caractéristiques physiques de gravier.	94

Liste des tableaux

Tableau VI.4 : résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe A (CHLEF).	95
Tableau VI.5: résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe A (SAIDA).	96
Tableau VI.6 : résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe B (M'SILA).	97
Tableau VI.7 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe A (CHLEF).	100
Tableau VI.8 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe A (SAIDA).	101
Tableau VI.9 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe B (M'SILA).	102
Tableau VI.10 : module d'élasticité de béton du ciment de classe A (Chlef).	104
Tableau VI.11 : module d'élasticité de béton du ciment de classe A (Saida).	104
Tableau VI.12 : module d'élasticité de béton du ciment de classe B (M'sila).	105

Liste des notations

Symbole	signification
D	diamètre
D _p	diamètres des passoires
D _t	diamètres des tamis
MV	masse volumique
MS	masse spécifique
P	la masse d'un corps
V	Le volume
f _{c28}	La résistance caractéristique du béton à la compression à 28
f _{t28}	La résistance caractéristique du béton à la traction à 28
E	Le module d'élasticité
E _{ij}	Module de déformation longitudinale instantanée du béton
f _{cj}	résistance caractéristique à « j » jours
E _{vj}	Module de déformation différée
ε _n (t)	le fluage au temps t
σ	La contrainte
ε _{ic}	la déformation instantanée
E _{i28}	le module de déformation instantanée du béton à âge de 28 jours
Δl	le coefficient de dilatation thermique du béton
C _E	la résistance à la compression du ciment à 28 jours
C _{min}	la valeur minimale de résistance à la compression à 28 jours du ciment
h	un coefficient égal à 1
R	La résistance
C	le dosage en ciment
E	Le dosage en eau
K	un coefficient qui est censé contenir beaucoup de paramètres
G	coefficient granulaire
p	le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre
A	un coefficient donné par le tableau, varie de 8 à 16
$\sqrt[5]{D}$	dimension de passoire
B	varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou
R	le rayon moyen du moule
R' ₂₈	Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours)

Liste des notations

σ'_c	Classe vraie du ciment (à 28 jours)
MV_{app}	la masse volumique apparente
M_2	La masse du récipient + matériau
M_1	La masse du récipient
V_{app}	Le volume apparente du récipient
Mv_{abs}	la masse volumique absolue
ESv	équivalent de sable visuelle
ESp	équivalent de sable piston
f_{cj}	résistance caractéristique à la compression
m_a	résistance moyenne
S	écart type
n	le nombre de mesure
V	Le coefficient de variation
m_i	Résistance mesuré de compression

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

INTRODUCTION GENERALE :

Des grandes quantités de béton sont utilisées chaque année dans le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, depuis sa première mise en œuvre, le béton a été réalisé à partir du composant de base qui sont: le ciment, l'eau et les granulats.

Le béton est donc par excellence un matériau composite puisque sa matrice est composée en partie de granulats de différentes dimensions, du sable et de la pâte cimentaire. Ce matériau est présent dans tous les domaines de la construction, notamment bâtiment d'habitation ou industriel, dans les murs de soutènement, dans les ouvrages d'art comme les ponts, les centrales nucléaires, les barrages et les tunnels.

Le béton est un matériau de construction qui a connu, depuis la découverte des liants minéraux, une évolution passant de l'empirisme pur à une rationalisation de plus en plus scientifique.

Pour beaucoup d'ingénieurs, le béton n'est encore qu'un matériau lourd dont les performances mécaniques est relativement modeste. Cependant, grâce aux développements technologiques survenus dans le domaine du béton, il est maintenant possible de fabriquer et de livrer en chantier des bétons ayant une résistance en compression comprise entre 50 et 100 MPa. Ce sont surtout les récentes découvertes dans le domaine de la dispersion des grains de ciment à l'aide de molécules organiques de synthèse fort complexe plus connues dans la technologie du béton sous le nom de "Superplastifiant" que l'on a pu atteindre de telles résistances.

Durant les dernières décennies, les chercheurs ont élaboré plusieurs travaux scientifiques dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci, au début des années 1980, les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont vu le jour, ces bétons, caractérisés par une résistance à la compression qui dépasse les 60 MPa, sont actuellement très utilisés dans le monde dans le domaine des constructions importantes.

Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (fumée de silice,) et des super plastifiants ont mené à la production du béton à haute résistance (≥ 50 MPa). Sa haute résistance est une fonction inverse de son contenu de vide total. Ainsi, le critère crucial dans la production du béton de haute résistance est l'utilisation de systèmes de rapport E/C (Eau/Ciment) bas, couplée à une consolidation optimale et la cure du béton.

INTRODUCTION GENERALE :

Plusieurs autres de ses caractéristiques s'améliorent : la maniabilité, le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la perméabilité et la durabilité .

L'utilisation des Bétons à Hautes Performance (BHP) est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (superplastifiant, fumée de silice, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite. Il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc., donc le BHP est le béton le plus économique à long terme.

Pour être rationnel, l'utilisation de ces bétons a nécessité et nécessitera encore beaucoup de recherche, en particulier au niveau de la caractérisation des propriétés physico-mécaniques : résistance à la compression simple, à la traction, module d'élasticité, module de rupture, coefficient de poisson, fluage etc...

Ce mémoire est constitué de six chapitres, la synthèse des connaissances sur les composants du matériau (chapitre I). Ensuite, on essaiera de faire le point sur ses principales propriétés (chapitre II). Après, la discussion sera centrée sur les différents domaines où le B.H.P est déjà utilisé (chapitre III). Puis, le problème de formulation du B.H.P (chapitre IV) et on s'intéressera aux essais sur le BO et B.H.P (chapitre V). Résultats et interprétation au (chapitre VI).

En fin, nous finirons notre travail par une conclusion générale et des recommandations futures.

Les constituants du béton

I.1.Introduction :

Le béton est un mélange de plusieurs composants très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes [1].

Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants.

Le béton ordinaire est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant, le liant peut être «hydraulique», car il fait prise par hydratation, il est appelé ciment, on obtient dans ce cas un béton de ciment, ou béton tout court.

On appelle matériau de construction toute matière utilisée pour réaliser un béton, ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble, c'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et caractéristiques en vue d'un usage spécifique, la nature chimique et la forme physique, l'état de surface des différentes matières premières d'un béton, qui sont à la base des caractérisations des matériaux premières utilisés pour la fabrication d'un béton.

I.2.Le ciment(Historique):

Les ciments hydrauliques furent d'abord inventés par les Égyptiens puis améliorés par les civilisations suivantes par l'utilisation de Chaux.

Plus tard, les grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques, usage repris par les romains.

Jusqu'à l'époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée d'ajouts, comme les tuiles ou briques concassées dont l'argile a des propriétés hydrauliques.

Il ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^e siècle, lorsque Louis Vicat identifie le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817 [2] et celle des ciments (qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques).

En 1824, [2] le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour ce qu'il appelle commercialement le ciment portland (car la couleur de son ciment ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de « Portland » situées en Manche.

C'est un produit similaire à celui de vicat encore que son brevet soit imprécis, mais il faut attendre 1840, et la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents dits ciments portland toujours par louis vicat une cuisson à la température de lésion pâteuse soit 1450° C qui permet d'obtenir le clinker pour voir une réelle fabrication de ces ciments et apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis béton armé.

La fin des années 80 voit l'arrivée du béton à hautes performances (BHP), d'une résistance à la compression supérieure à 50 MPa.

Allié à la précontrainte, ce matériau révolutionne la construction des ouvrages d'art qui deviennent plus fins, plus élancés et plus durables.

Au début des années 90, bouygues, lafarge et Rhodia [2] , explorent le domaine de l'ultra-haute résistance, bien au-delà des 150 MPa , en 1997, ils déposent des brevets pour le béton fibré à ultra-hautes Performances (BEFUP), derniers progrès en date : les bétons autoplacants et autonivelants (BAP et BAN); mis en œuvre sans vibration, ils s'imposent progressivement sur tous les chantiers depuis 1998 et trouvent leurs applications aussi bien dans les fondations et dalles de maisons individuelles que dans les voiles d'ouvrages ou de bâtiments.

I.2.1.Définitions :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté de 1450 a 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.



Figure (I.1): matières première de ciment [2]

I.2.2. Constituants de base du ciment (Clinker)

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bi calcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A) (2-15% du clinker).
- L'alumine-ferrite tétra calcique (Ferro-aluminate tétra calcique) $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (Mago), diverses traces de métaux.

- La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent nuancer défavorablement la stabilité du ciment durci.

I.2.2.1. Les autres constituants des ciments :

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont:

- Calcaires
- Laitier granulè de haut fourneau
- Cendres volantes (V ou W)
- Schistes calcinès
- Fumèe de silice
- Filles

I.2.3. Fabrication du ciment :

Les matériaux naturels de carrière (calcaire, marne, argile...) doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange intime, homogène et bien dosé (environ 75% de calcaire pour 25% d'argile).

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

- extraction:
- concassage:
- cuisson :
- refroidissement :
- Broyage :
- Stockage, ensachage et expédition:

I.2.4. Types de ciment :

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et vingt-sept variantes principales la norme pour plus de détails :

- CEM I: Ciment portland (CPA)

- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
 - CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
 - CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),
 - CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).
-
- Le CEM I ou ciment Portland :

Contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
 - Le CEM II ou Ciment Portland composé :

Contient au moins 65% de clinker et au plus 35 % d'autres constituants :

Laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires..., les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.
 - Le CEM III A ou ciment de haut-fourneau :

Contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker.
 - Le CEM III B ou ciment de haut-fourneau :

Contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker
 - Le CEM IV ou ciment de type pouzzolanique :

Avant l'introduction de la NF EN 197-1, [9] il était connu sous l'appellation CPZ.

Ce type de ciment n'est pas fabriqué en France.
 - Le CEM V ou ciment composé :

(Anciennement ciment au laitier et aux cendres) contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.
 - Les CEM III et CEM V :

Qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations et aux travaux en milieu agressif. Leur utilisation permet de réduire considérablement les émissions de CO₂ grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants. Entre 2000 et 2008, la part de production de ce type de ciment est ainsi passée de 5 à 11%.

I.2.5. Classe de résistance du ciment :

Les ciments se caractérisent en fonction de classe de résistance à la compression, ces dernières, mesurées à 28 jours d'âge, étant exprimées en MPa.

Pour les ciments fabriqués jusqu'à fin 1994[31], on distinguait 4 classes de résistances (35, 45, 55, hautes performances HP).

Les nouveaux ciments comportant quant à eux, trois classes de résistances 32,5, 42,5, 52,5 ; Classes de résistances des ciments conformes à la norme NF P 301 de juin 1994[31].

Les valeurs limites garanties sont précisées dans le tableau ci-dessous, étant entendu qu'un ciment comportant un ou plusieurs échantillons dépassant les valeurs limites garanties ne serait pas conforme à la norme (cette disposition s'appliquant aux autres caractéristiques garanties).

Tableau (I.1) : les valeurs limites garanties des résistances caractéristiques [31].

classes	2 jours	7 jours	28 jours
32.5	-	17.5	30.0
32.5R	12.0	-	30.0
42.5	10.0	-	40.0
42.5R	18.0	-	40.0
52.5	18.0	-	50.0
52.5R	28.0	-	50.0

Il est très important de noter que les classes de ciments commercialisés jusqu'en 1995 étaient indiquées en fonction de leur résistance moyenne à la compression à 28 jours, chaque dénomination de classe comportant une limite inférieure de 10 MPa en moins et une limite supérieure de 10 MPa en plus (ex : classe 45, limite inférieure nominale 35 MPa limite supérieure nominale 55 MPa, valeur minimale garantie 35 MPa).

Avec la nouvelle normalisation, la classe de résistance correspond à la limite inférieure, la résistance étant comprise entre cette valeur inférieure et une limite supérieure de +20 MPa, la valeur limite garantie pouvant être de 2.5 MPa inférieure à la valeur désignant la classe (ex : un ciment de la classe 32.5 pour laquelle la limite inférieure de la résistance aucune valeur inférieure à 30 MPa qui est la valeur limite garantie).

I.3.Les granulats :

I.3.1.Définition :

On appelle granulats un matériau granulaire utilisé dans le domaine de construction, soit lié à d'autres substances (liant, bitume) pour obtenir mortier, bétons, bétons routiers ...etc., soit non lié comme les ballasts des voies ferrées, les granulats pour le système de drainage.

I.3.2.Dimensions des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées inférieures est exprimée en mm.

La partie des granulats qui est passée à travers le tamis, on l'appelle « tamisât » et « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

Le terme « granulats d/D » est réservé aux granulats dont la dimension s'étale de d pour les plus petits à D pour les plus grands.

Nature minéralogique des granulats :

- ✓ siliceux,
- ✓ calcaires,
- ✓ granitiques (argileux ou schisteux).

I.3.3.Propriétés des granulats :

Tous les granulats contiennent une quantité, plus au moins grande, d'impuretés.

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée.

On distingue plusieurs familles de granulats :

- Fillers 0/D où $D < 2$ mm et contenant au moins 70% de passant à 0.063mm.

- Sable 0/D où $D < 6.3$ mm sauf les sables pour béton où $D < 4$ mm.
- Graves 0/D où $D > 6.3$ mm.
- Gravillons d/D où $d > 1$ mm et $D < 31.5$ mm.
- Cailloux d/D où $d > 20$ mm et $D < 125$ mm.

Les impuretés ont un caractère commun ; ils influent négativement sur les qualités essentielles du béton (résistance, imperméabilité, longévité), cependant, on peut les classer en deux catégories :

- Impuretés prohibées : particules de charbon, de bois d'argile, micas.
- Impuretés tolérées, dans des limites qui seront à définir, parmi lesquelles on peut citer : les éléments très fins et/ou solubles, les matières organiques, les sulfates, les sulfures

Les sables constituent la partie fine des granulats d'un béton, ils sont donc la partie qui a la plus grande surface spécifique et conditionnent par leur adhérence au ciment les propriétés du béton.

Pour déceler la présence d'éléments fins dans le sable, et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique, un essai est couramment pratiqué : la mesure de l'équivalent de sable.

Cet essai consiste à faire flocculer, dans des conditions normalisées de temps et d'agitation, les impuretés du sable.

I.3.4. Module de finesse :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, ce module est égal à la somme des refus cumulés exprimé en pourcentage sur les tamis.

I.3.5. Adhérence au liant :

L'adhérence est un facteur important de la résistance à la traction des bétons, et aussi de leur résistance à la compression, à cet égard, les granulats de roches altérables et ceux susceptibles de réagir au contact du ciment sont à utiliser avec précautions.

Les sulfates (ex : gypse) et les sulfures (ex : pyrite), provoquent la désagrégation du béton par augmentations du volume des parties qui les contiennent.

I.3.6. Analyse granulométrique:

L'analyse granulométrique d'un matériau divisé a pour but de déterminer les dimensions des grains qui le constituent.

D'une manière générale, les particules d'un matériau divisé ont une forme quelconque et la définition de leurs dimensions n'est pas aisée.

Les granulats des bétons sont analysés par des tamis ou passoires.

La dimension d'un grain est alors par définition le diamètre de la passoire qui le laisse juste passer.

➤ Courbe granulométrique :

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des grains composant un granulat donné (d/D).

Les courbes granulométrique sont tracées en coordonnées semi-logarithmiques.

En ordonnée on porte le pourcentage, en poids, des tamisats sous les tamis dont les mailles sont indiquées en abscisse selon une granulation logarithmique.

I.3.7. Composition granulométrique:

Dans un béton on s'efforce de combler un maximum de vide par les granulats, ceci n'est pas réalisable si les granulats ont une même grosseur, il est donc nécessaire de définir une courbe granulométrique de référence et de connaître le sens et l'étendue des variations admissibles à partir de cette dernière, on aboutit alors à une zone, comprise entre deux

courbes extrêmes, à l'intérieur de laquelle doit se situer chaque courbe granulométrique conduisant à un béton de qualité.

I.3.8. Les types des granulats :

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même.

A / En fonction de leur masse volumique réelle :

- Granulats légers
- Granulats courants
- Granulats lourds

B / En fonction de leur origine :

- Les granulats naturels
- Les granulats artificiels

C / En fonction de la forme de leurs grains :

- Les granulats concassés
- Les granulats roulés

I.3.9. Caractéristiques physiques des granulats :

- **masse volumique** : est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant (densité apparente) $\rho_v = P/V$.

- **masse spécifique** : est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu) $\rho_s = P/V$.

I.4. Eau de gâchage:

L'eau de gâchage et la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton.

Cette eau est d'une grande importance, elle est soumise à certaines exigences et a même fait l'objet d'une norme (NF p 18-303) [3].

On conçoit donc, en premier lieu, que les impuretés nocives interdites pour le granulat ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

- Les eaux potables conviennent évidemment.
- Les eaux de rinçage de bétonnières sont habituellement utilisables mais leur aptitude est à vérifier (changement de ciment, adjuvants). Il en est de même pour les eaux de ruissellement les eaux pompées ou, surtout, de rejets industriels.

Les eaux usées et eaux de vannes ou contenant des détergents ne doivent en aucun cas être utilisées.

La norme autorise l'emploi d'eau de mer pour la confection des bétons qui ne sont ni armés ni précontraints, mais les spécifications sont plus rigoureuses et en interdisent formellement l'emploi lors du gâchage. Bien que les textes officiels ne traitent pas de ce sujet, l'emploi d'eau de mer pour le gâchage de bétons non armés ne présente pas de risque quant à la pérennité de l'ouvrage, seules des efflorescences, dues à une migration des sels, pouvant apparaître sur les parements.

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée. La plus disponible et aussi celle qui sert de référence, c'est l'eau potable distribuée par le réseau du service public.

Les autres eaux les plus utilisées sont les eaux de pompage en provenance de nappes phréatiques, de cours d'eau ou de réservoirs, l'eau de mer, les eaux de rejets industriels, les eaux de recyclage de l'industrie du béton elle-même.

Toutes ces eaux ne présentent pas les mêmes risques vis-à-vis du béton et, si l'eau potable est toujours utilisable, il peut ne pas en être de même pour les autres eaux.

Déjà, en 1941, la norme française NF P 18-303 [3] sur l'eau de gâchage caractérisait l'aptitude à l'emploi selon deux critères :

- La teneur en matières en suspension (2 ou 5 g/l),
- La teneur en sels dissous (15 ou 30 g/l).

Ces critères sont insuffisants car toutes les matières en suspension ne sont pas également nocives, pas plus d'ailleurs que tous les sels solubles ne sont nocifs. C'est la raison

pour laquelle cette norme, qui est toujours en vigueur, sera remplacée à terme par la norme européenne EN 1008.

L'eau de gâchage des bétons doit être propre : ne pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises.

Les tolérances réglementaires sont les suivants :

-2 g/litre pour les bétons des types A et B,

-5 g/litre pour les bétons du type C.

Remarque : les matières en suspension n'ont pas la même nocivité.

Béton A : béton de haute qualité à résistance élevée.

Béton B : béton à faible perméabilité.

Béton C : béton à faible résistance peu ou non armé.

➤ **Caractéristique chimiques de l'eau de gâchage:**

L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

-15 g/litre pour les bétons des types A et B,

-30 g/litre pour les bétons du type C.

Ceci à condition que la proportion de certaines matières dissoutes (acides, sulfates, matières organiques..) ne puissent pas nuire à la pérennité des bétons.

Toute eau douteuse doit être soumise à l'analyse chimique.

L'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf avec les ciments aluminieux ou le ciment de laitier à la chaux, son emploi est déconseillé avec les ciments spéciaux, pour les bétons très armés et les bétons précontraints dont les armateurs fortement tendues sont très sensible à la corrosion.

I.5.Fumée de silice :

En raison de son extrême finesse et de sa haute teneur en silice, la fumée de silice (FS, parfois aussi appelée micro silice) possède un indice d'activité pouzzolanique très élevée. Environ 100 fois plus fine que le ciment, elle peut occasionner des difficultés de dosage ou

d'homogénéité durant la production du béton. En cas de manipulation incorrecte, il peut se former un nuage de poussière, en infraction à l'ordonnance sur la protection de l'air. Pour surmonter ces problèmes, la fumée de silice est commercialisée sous trois formes:

- Incorporée dans le ciment (p. ex. Fortico 5R, qui est un ciment Portland à la fumée de silice CEM II/A-D 52,5 R) [32].
- En suspension aqueuse (slurry)
- En poudre densifiée.

I.5.1.Obtention d'un BHP à base de la fumée de silice :

L'obtention d'un béton à hautes performances ne nécessite pas forcément l'utilisation d'une fumée de silice ; puisque, on a pu fabriquer un béton dont sa résistance a atteint 60 MPa sans l'utilisation de fumée de silice.

L'utilisation des fumées de silice dans le but d'obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 15% ; même si l'effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l'ordre de 33%. Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en œuvre. P-C. AÏTCIN [32] propose un dosage optimal compris entre 6 et 10%, il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant , qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice, sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau, car les ions de calcium Ca^{+2} , libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel , cette structure diminue fortement la maniabilité du béton.

I.5.2.Mode d'action de la fumée de silice dans le BHP

le nom d'effet filler ou encore effet granulaire, les particules de fumée de silice sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciments eux même et les petits vides entre les grains fins du sable et du ciment, ceci rend la structure de la matrice du béton plus homogène et beaucoup plus étanche, il en résulte une meilleure

compacité et une plus faible porosité, la diminution de la perméabilité à l'eau augmente la résistance contre le gel/dégel et améliore la résistance contre les agressions chimiques.

I.5.3. Avantages de la fumée de silice

L'introduction de la fumée de silice dans le béton présente un nombreux avantage, elles réduisent considérablement les phénomènes de ressuage et de ségrégation et augmente aussi significativement la résistance en compression du béton entre 7 jours et 28 jours.

Certaines propriétés des bétons durcis, telle que la résistance au cycle de gel-dégel sont notablement amélioré, lors du malaxage les grains de la fumée de silice s'insèrent entre les grains de ciment et diminuer ainsi le dosage en eau, de plus, elles sont reconnue comme étant un produit efficace entre les réactions alcalis-silice, par contre les difficultés rencontrées lors de la manipulation et le transport des fumées de silice constituent un inconvénient majeur, a cause du fait de la petite taille des grains, ceux-ci ont tendance à former une structure très lâche sous l'action d'attraction électrostatique.

I.6. Les Adjuvants :

Les plastifiants réducteurs d'eau et les superplastifiants modifient la consistance des bétons à l'état frais, avant le début de prise.

On cherche à obtenir une grande « fluidité » sans autre de l'eau, afin que le béton puisse facilement se mettre en place dans le coffrage.

Ces adjuvants ont pour fonction principale, soit d'améliorer l'ouvrabilité du béton, soit d'améliorer les résistances mécaniques.

Leurs dosages est compris entre 0,5 et 3% du poids de ciment.

Conclusion :

Avec la recherche de performances toujours plus élevées, la fabrication joue un rôle de plus en plus important sur la qualité du béton, tant sur l'obtention du niveau de performances que sur leurs régularités pendant la construction des ouvrages.

Il faut pour cela, bien connaître les caractéristiques des constituants dont certaines sont très variables dans le temps.

Conserver les caractéristiques des constituants et mettre tout en œuvre pour que les propriétés finales du mélange bénéficient au mieux de ces caractéristiques, doivent être les objectifs permanents et le souci premier pour le conducteur de la centrale.

CHAPITRE II:

Les caractéristiques du

béton

II.1.Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil, il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

Le Matériau adopté universellement pour ses différentes qualités :

- il est formé de matériaux naturels primaires largement distribués à la surface de la Terre ;
- ses capacités de résistances dépassent celles des meilleures roches naturelles ;
- sa durabilité peut être séculaire, et il résiste à des environnements corrosifs (comme l'eau de mer), au feu, ...
- sa mise en œuvre est assez simple ;

II.2.Les caractéristiques des bétons :

On étudier les caractéristique mécanique et physique

II.2.1.La résistance :

Maximum d'un béton s'acquiert progressivement avec le temps. On parle du temps de prise, qui dépend du ciment utilisé (qualité, âge) des conditions météo (température, hygrométrie) et de la qualité des agrégats et de leur proportion.

Au bout de 7 jours de prise, un béton a acquis de 40 à 60 % de sa résistance finale.

Et de 60 à 80% au bout de 28 jours, il n'est donc pas recommandé de décoffrer trop rapidement les dalles en béton par exemple, il durcit lorsqu'il cesse d'être en mouvement.

Le ciment n'a pas de résistance en soi, c'est le gravier, dans le cas du béton, qui lui procure la résistance (le sable dans le cas du mortier), il est donc de première importance de bien choisir les agrégats.

Le ciment prend non pas par évaporation de l'eau mais par réaction chimique. Le « séchage » du ciment (au soleil par exemple) l'empêchera d'acquérir toute sa résistance (il se fendillera ou même s'effritera), il est donc recommandé de mouiller les ouvrages en béton pendant la prise et de les protéger du soleil dans les premières heures.

Un béton prend même en immersion complète à condition qu'il ne soit plus en mouvement.

II.2.2.Résistance à la compression :

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} , elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 (d = 15,96 cm) dont la section est de 200 cm², la normalisation européenne indique comme dimension des cylindres d = 15 cm de H = 30 cm.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées, plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées, la résistance sur cylindre d'élanement 2

(par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm.

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essai normalisé (il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes), la résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (ou à la référence à la norme utilisée) et à l'échéance fixée .

Lorsqu'on comprime une pièce de béton, on observe l'apparition de petites -fissures longitudinales qui se multiplient avec l'accroissement de la charge, on est donc en phase de pré rupture qui s'achève, après la jonction des fissures, par la séparation en plusieurs morceaux : (rupture).

Cette caractéristique est la plus importante, elle est souvent utilisée seule pour caractériser le béton, mais l'essai de compression étant , à tort ou à raison, le plus utilisé plusieurs opérations se succèdent au cours de cet essai, que la tradition plus que la normalisation réglées approximativement, le prélèvement et le moulage consistent à placer dans un moule, dont les faces parallèles doivent être rectifiées à moins de 1/10 de millimètre, trois couches de béton qui doivent être soigneusement tassées, le tassement se fait à l'aide d'une tige en acier de 20 mm de diamètre arrondie à son extrémité que t'on enfonce énergiquement au moins 20 fois par couche, on peut encore opérer le tassement par vibration sur une table vibrante ou en plaçant un vibreur sur le côté du moule, on laisse alors le béton durcir 1 ou 2 jours et on le démoule. Il faut ensuite attendre la date d'écrasement , rien n'est

prévu pour la conservation qu'on laisse au hasard des circonstances, soit sur le chantier, soit au laboratoire.

L'écrasement a lieu entre les plateaux d'une presse hydraulique supposée précise. L'un des plateaux doit être articulé pour pallier les défauts de parallélisme des faces.

La vitesse de mise en charge n'est pas indifférente ; elle varie, en pratique, entre 5 et 30 kg/cm² par seconde, suivant l'état de fatigue de la machine et l'ardeur au travail de l'opérateur. Le taux de travail à l'écrasement correspond au maximum indiqué sur le cadran du dynamomètre.

II.2.3.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} .

La mesure de la résistance à la traction est généralement tirée d'un essai de flexion, une éprouvette prismatique de section carrée et de longueur égale à quatre fois le côté est soumise à l'action d'un moment constant, l'éprouvette, placée verticalement et encastrée à sa base dans une pince, reçoit à son autre extrémité un levier horizontal que l'on charge.

Les dimensions les plus courantes de prismes d'essais sont : 7 x 7 x 28 cm pour les bétons dont les plus gros agrégats font 2 à 3 cm. Pour les gros bétons, on utilise des prismes de 10 x 10 x 40 cm. La difficulté réside dans l'évaluation de la résistance à la traction à partir du moment de flexion de rupture M , les expériences faites en comparant des essais de traction directs et des essais de flexion montrent que la formule habituelle $n = 3,6 M/b^3$ où b est le côté du prisme, était valable à ± 9 % près. Cette formule suppose que la partie tendue de la section est plastique tandis que la partie comprimée est élastique et que la fibre neutre est au tiers de l'épaisseur. Quelles que soient d'ailleurs les hypothèses, on constate que sa validité pratique est justifiée.

La résistance obtenue par fendage est la plus représentative et utilisée dans la littérature du fait de sa simplicité. De plus cet essai, par rapport à l'essai de flexion trois points, est le moins perturbé par la zone en compression qui influence la valeur finale de la résistance. En effet, l'éprouvette, soumise à la flexion, est pour moitié soumise à la compression donc une modification de la résistance finale, car la partie en compression va

reprendre une partie de l'effort. Concernant l'essai par fendage, il existe une zone en compression, mais nettement moins importante (zone en contact avec les plateaux de chargement) qui influe plus faiblement sur la résistance finale. De plus, avec ce type d'essai, la masse de matériau est nettement supérieure à celle des éprouvettes d'essai en flexion. C'est pour cela, que nous avons choisi de déterminer à chaque échéance, la résistance en flexion sur des éprouvettes.

II.2.4.Résistance à l'abrasion :

L'évolution de cette propriété a, une fois de plus, fait l'objet de nombreuses études en fonction de la qualité de la pâte mais il existe également des études relatives à l'influence de la dureté des granulats sur la résistance à l'abrasion. La majeure partie des études réalisées sur les granulats ne s'intéressé pas à leur volume, et se concentrent surtout sur leur nature. Il existe donc un vide dans la bibliographie [28], en ce qui concerne l'influence du volume de pâte ou de granulats sur les phénomènes érosifs. Et ce, malgré le fait que l'emploi de granulats dans le béton est en partie justifié par l'augmentation de la résistance à l'abrasion qui en résulte.

II.2.5.Module d'élasticité :

Le module d'élasticité E est défini par le rapport :

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courants, on admet : (Module de déformation longitudinale instantanée du béton)

$$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3} \dots\dots\dots (\text{II.1})$$

Avec

f_{cj} = résistance caractéristique à « j » jours.

$$E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3} \text{ (Module de déformation différée) avec } f_{cj} - 1,1 f_{c28}$$

Il s'ensuit que : $E_{vj} \approx \frac{1}{3}$ de $E_{ij} \dots\dots\dots (\text{II.2})$

Notes : E_{ij} , E_{vj} , f_{c28} , f_{cj} sont exprimés en MPA.

II.2.6. Durabilité du béton :

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité.

Il est utile d'ajouter que le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression. De plus, on constate maintenant, ce que n'était pas toujours le cas auparavant, que dans bien des cas, un entretien régulier du béton est nécessaire.

II.3. Les caractéristiques physiques:**II.3.1. Masse volumique :**

- La masse volumique « ρ » des bétons courants est comprise entre 2,2 et 2,4 t/m³ (le poids volumique « γ » 22 et 24 kN/m³ ou KPa).

II.3.2. Fluage du béton :

Le terme de fluage désigne les déformations différées du béton sous l'effet d'une contrainte constante, le retrait étant par convention déduit des déformations différées totales, le théorème de superposition s'applique donc aux déformations de retrait et de fluage.

On évalue le fluage au temps t , compté à partir du bétonnage, sous l'effet d'une contrainte de compression, σ , exercée au temps t_1 et maintenue constante ensuite, au moyen de la formule suivante :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{ic} K(t_1) f(t - t_1) \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

Dans cette expression, ε_{ic} représente la déformation instantanée qu'aurait produite la contrainte σ si le béton avait été âgé de 28 jours au moment de la mise en charge, on l'appelle la déformation conventionnelle instantanée, en nous limitant à des charges modérées (moins de 60 % de la résistance à la compression à l'âge t_1), on peut admettre de linéariser le comportement instantané du béton et écrire :

$$\varepsilon_{ic} = \frac{\sigma}{E_{i28}} \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

E_{i28} Étant le module de déformation instantanée du béton âgé de 28 jours, on dit que le fluage est linéaire et les mesures expérimentales le confirment [29], lorsque les contraintes

restent inférieures aux deux tiers de la résistance à la compression du béton parce que la déformation de fluage est proportionnelle à la déformation instantanée du béton sous la même contrainte, elle est même directement proportionnelle à la contrainte, lorsqu'on admet la linéarité du comportement instantané du béton, pour les valeurs faibles et moyennes des contraintes.

II.3.3. Retrait et gonflement :

Immédiatement après le gâchage, on observe une rétraction de la pâte fraîche de ciment ; c'est le "premier retrait" ou retrait plastique, ce retrait se poursuit après la prise, puis diminue pour faire place à un gonflement plus ou moins important. Entre 24 h et 48 h, si l'éprouvette est conservée dans l'air, ce gonflement fait place à nouveau à un retrait appelé "second retrait", soit(l) la dimension de l'éprouvette étudiée dans la direction considérée ; soit(Δl) la variation de longueur correspondante (positive s'il s'agit d'un gonflement, négative s'il s'agit d'un retrait), la mesure du retrait consiste à évaluer les variations de($\Delta l / l$) en fonction du temps t .

II.4. Facteur influençant sur le comportement mécanique des bétons :

II.4.1. Influence du rapport C/E : [4]

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît en fonction du dosage en eau E et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport C/E comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Il est également d'usage pour certains d'adopter le facteur inverse E/C . Dans sa forme C/E , il permet d'exprimer la valeur de la résistance par une simple fonction linéaire et croissante comme par exemple celle qui correspond à la formule de Bolomey :

$$\sigma' = K \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \dots\dots\dots \text{(II.5)}$$

De plus sa plage d'utilisation est apparemment plus nuancée puisque pour C/E variant de 1,5 à 2,5 le rapport E/C ne varie que de 0,66 à 0,4.

Comme dans toutes ces formules, car il y en a bien d'autres, il est prévu un coefficient K qui est censé contenir beaucoup de paramètres : nature et classe du ciment, qualité des granulats (nature minéralogique, adhérence, forme, propreté), granulométrie du mélange, module de finesse des sables, intensité et procédé de serrage, on ne peut donc prétendre expliciter numériquement ce coefficient autrement que par des essais préalables prenant en

compte ces paramètres dans les conditions réelles et particulières au béton étudié, cependant, si l'on veut que la formule ait quelque utilité pratique, il convient de pouvoir fixer, grossièrement peut-être, mais numériquement, une valeur moyenne approximative de K, nous avons déjà indiqué que la résistance du béton était sensiblement fonction linéaire de la classe vraie du ciment C_E , si donc nous choisissons la formule de Bolomey parce que c'est la plus simple et celle qui nous a semblé se vérifier lors de très nombreux essais, celle-ci peut s'écrire :

$$f_{c28} = G \times C_E \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

f_{c28} = résistance du béton en compression à 28 jours (en valeur moyenne),

C_E = classe vraie du ciment à 28 jours (ou valeur moyenne),

C = dosage en ciment (en kg/m^3),

E = dosage en eau totale sur matériaux secs (en $1/\text{m}^3$).

G = coefficient granulaire (valeur moyenne) $G > 0,50$;

La formule précédente pourrait faire croire que l'on obtiendra des bétons de résistance analogue quel que soit le dosage en ciment à condition de maintenir le même rapport C/E en déduisant le dosage en eau E à partir de la valeur choisie pour le dosage en ciment C, il n'en est rien, car en choisissant par exemple un faible dosage en ciment on trouvera un dosage en eau faible, et d'autant plus que la valeur de C/E sera plus grande, et l'on obtiendra alors à coup sûr un béton beaucoup trop sec, le dosage en ciment est donc fonction de ce rapport C/E mais en même temps du dosage en eau nécessaire pour obtenir une plasticité et une ouvrabilité convenables, on peut exprimer le principe suivant :

À plasticité équivalente le dosage en ciment doit être d'autant plus élevé que le rapport C/E est grand.

II.4.2. Influence de la qualité du ciment :

Les caractéristiques essentielles de la qualité d'un ciment était sa « classe de résistance » et nous rappelons qu'un ciment de la classe 42,5 par exemple présente une résistance comprise entre 42,5 et 62,5 MPA, en sorte que le béton fabriqué avec ce ciment présentera donc lui-même une résistance plus ou moins importante fonction de la « classe vraie » de ce ciment, dans une étude de béton, il conviendra de tenir compte (dans toute la mesure du possible) de cette « classe vraie d'essai » que nous désignerons par CE, si cette classe vraie n'est pas connue, on pourra adopter dans l'étude, la valeur médiane 52,5 en sachant que cette valeur risque d'être un peu inférieure à la classe moyenne.

La résistance du béton ainsi étudié devra être également considérée comme valeur moyenne probable : cette valeur moyenne devra évidemment être fixée, pour l'étude, au-dessus (+ 15 à 20 %) de la résistance caractéristique spécifiée f_{ck} pour le béton.

Remarque : nous rappellerons simplement dans ce paragraphe que les documents réglementaires spécifient que lors des éprouves d'étude des bétons, si on désigne par f_{ce} la résistance moyenne à la compression obtenue sur trois éprouvettes, la valeur trouvée doit répondre simultanément aux deux conditions suivantes :

$$f_{CE} > f_{C28} + h(C_E - C_{min}) \dots \dots \dots (II.7)$$

$$f_{CE} > 1,1f_{C28} \dots \dots \dots (II.8)$$

Formules dans lesquelles :

f_{C28} : est la résistance caractéristique spécifiée du béton à 28 jours ;

C_E : est la résistance à la compression du ciment à 28 jours ;

C_{min} : est la valeur minimale de résistance à la compression à 28 jours du ciment (classe minimale garantie à 99 %).

h : est un coefficient pris égal à 1 sauf justification de la relation entre la résistance du béton et celle du ciment utilisé.

Bien qu'il s'agisse de comparer une valeur d'essai f_{ce} à la valeur caractéristique f_{C28} , cette valeur paraît trop forte compte tenu que dans le béton, la classe vraie du ciment fait certes varier la résistance du béton, mais non pas en « valeur absolue » mais proportionnellement, le coefficient de proportionnalité étant de l'ordre de 1/2).

Indique par ailleurs que si l'on dispose d'éléments permettant de prévoir la résistance du ciment avec plus de précision qu'en considérant strictement les tolérances fixées par la norme, ce qui peut être le cas lorsque l'on dispose des résultats d'autocontrôle du fournisseur, on peut remplacer C_c par la valeur minimale susceptible d'être respectée.

Par ailleurs, il convient de tenir compte de l'aspect statistique de ces appréciations (la classe minimale du ciment est garantie à 99 % de valeurs supérieures) et qu'en pratique les résistances minimales trouvées sont toujours nettement au-dessus de cette résistance minimale C_{min} garantie.

II.4.3. Influence du dosage en ciment et du dosage en eau :

Le Rapport C/E :

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît en fonction du dosage en eau E et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport C/E comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Il est également d'usage pour certains d'adopter le facteur inverse E/C . Dans sa forme C/E , il permet d'exprimer la valeur de la résistance par une simple fonction linéaire et croissante comme par exemple celle qui correspond à la formule de Bolomey :

$$\sigma' = K \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \dots\dots\dots \text{(II.9)}$$

Comme dans toutes ces formules, car il y en a bien d'autres, il est prévu un coefficient K qui est censé contenir beaucoup de paramètres : nature et classe du ciment, qualité des granulats (nature minéralogique, adhérence, forme, propreté), granulométrie du mélange, module de finesse des sables, intensité et procédé de serrage, on ne peut donc prétendre expliciter numériquement ce coefficient autrement que par des essais préalables prenant en compte ces paramètres dans les conditions réelles et particulières au béton étudié. Cependant, si l'on veut que la formule ait quelque utilité pratique, il convient de pouvoir fixer, grossièrement peut-être, mais numériquement, une valeur moyenne approximative de K . Nous avons déjà indiqué que la résistance du béton était sensiblement fonction linéaire de la classe vraie du ciment C_E ; si donc nous choisissons la formule de Bolomey parce que c'est la plus simple et celle qui nous a semblé se vérifier lors de très nombreux essais, celle-ci peut s'écrire :

$$f_{c28} = G \times C_E \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \dots\dots\dots \text{(II.10)}$$

f_{c28} = résistance du béton en compression à 28 jours (en valeur moyenne),

C_E = classe vraie du ciment à 28 jours (ou valeur moyenne),

C = dosage en ciment (en kg/m^3),

E = dosage en eau totale sur matériaux secs (en l/m^3).

G = coefficient granulaire (valeur moyenne) $G > 0,50$;

La formule précédente pourrait faire croire que l'on obtiendra des bétons de résistance analogue quel que soit le dosage en ciment à condition de maintenir le même rapport C/E en déduisant le dosage en eau E à partir de la valeur choisie pour le dosage en ciment C. Il n'en est rien, car en choisissant par exemple un faible dosage en ciment on trouvera un dosage en eau faible, et d'autant plus que la valeur de C/E sera plus grande, et l'on obtiendra alors à coup sûr un béton beaucoup trop sec. Le dosage en ciment est donc fonction de ce rapport C/E mais en même temps du dosage en eau nécessaire pour obtenir une plasticité et une ouvrabilité convenables. On peut exprimer le principe suivant :

À plasticité équivalente le dosage en ciment doit être d'autant plus élevé que le rapport C/E est grand.

II.4.4. Propriété des gros granulats :

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance, non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais selon leurs propriétés, ils affectent la durabilité et les performances structurelles du béton.

La sélection des granulats doit être faite avec beaucoup de soin au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée, puisque les granulats peuvent devenir le chaînon le plus faible où va s'initier la rupture du béton lorsqu'il sera soumis à des contraintes élevées, la contrainte à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés des gros granulats telles que : leur forme, leur nature, leur propreté, leur porosité, leur état de surface, leur courbes granulométriques et leur dureté.

Dans le cas des BHP, les propriétés du granulat, en particulier sa forme et sa texture, influencent beaucoup moins la résistance de rupture à la compression que la résistance à la traction.

II.4.5. Influence du type de granulats :

Il n'y a aucun doute que le rapport G/C est un facteur de deuxième importance quant à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant. Dans certain cas, une partie de l'eau peut être absorbée par le granulat : plus il y a de granulats, plus la quantité d'eau absorbée par ces derniers est importante, ce qui contribue à réduire le rapport E/C réel du béton.

L'influence du volume des granulats sur la résistance à la traction est pratiquement identique à celle observée sur la résistance à la compression [30].

La liaison entre les granulats et la pâte de ciment est un facteur important pour la résistance des bétons, spécialement celle à la traction. La liaison est engendrée en partie par l'imbrication des granulats et de la pâte de ciment hydraté due à la rugosité de la surface des granulats. Une surface plus rugueuse, comme les granulats concassés, donne une meilleure liaison en raison de l'imbrication mécanique.

L'influence du type de granulat sur la résistance à la traction du béton est fonction du rapport E/C, cette influence des granulats diminue avec l'augmentation du rapport E/C, probablement parce que le comportement de la pâte de ciment hydraté prédomine sur celui des granulats dans les bétons de rapport E/C élevé. Pour des rapports E/C inférieure à 0.44, les résistances obtenues ont été majorées de 62% pour le même type de granulat. [30]

L'utilisation des granulats de basalte dans le béton à hautes performances améliore la résistance à la traction par fendage de 10% par rapport à leurs homologues calcaires. Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il faut porter une attention particulière à la nature du gros granulat lors de sa sélection. Ainsi ces études favorisent l'utilisation de granulats durs et résistants pour l'obtention des BHP [30].

II.4.6. Influence du volume en gros granulats :

(La figure II.1) présente l'allure générale de l'influence du volume des gros granulats sur la résistance à la traction directe du béton.

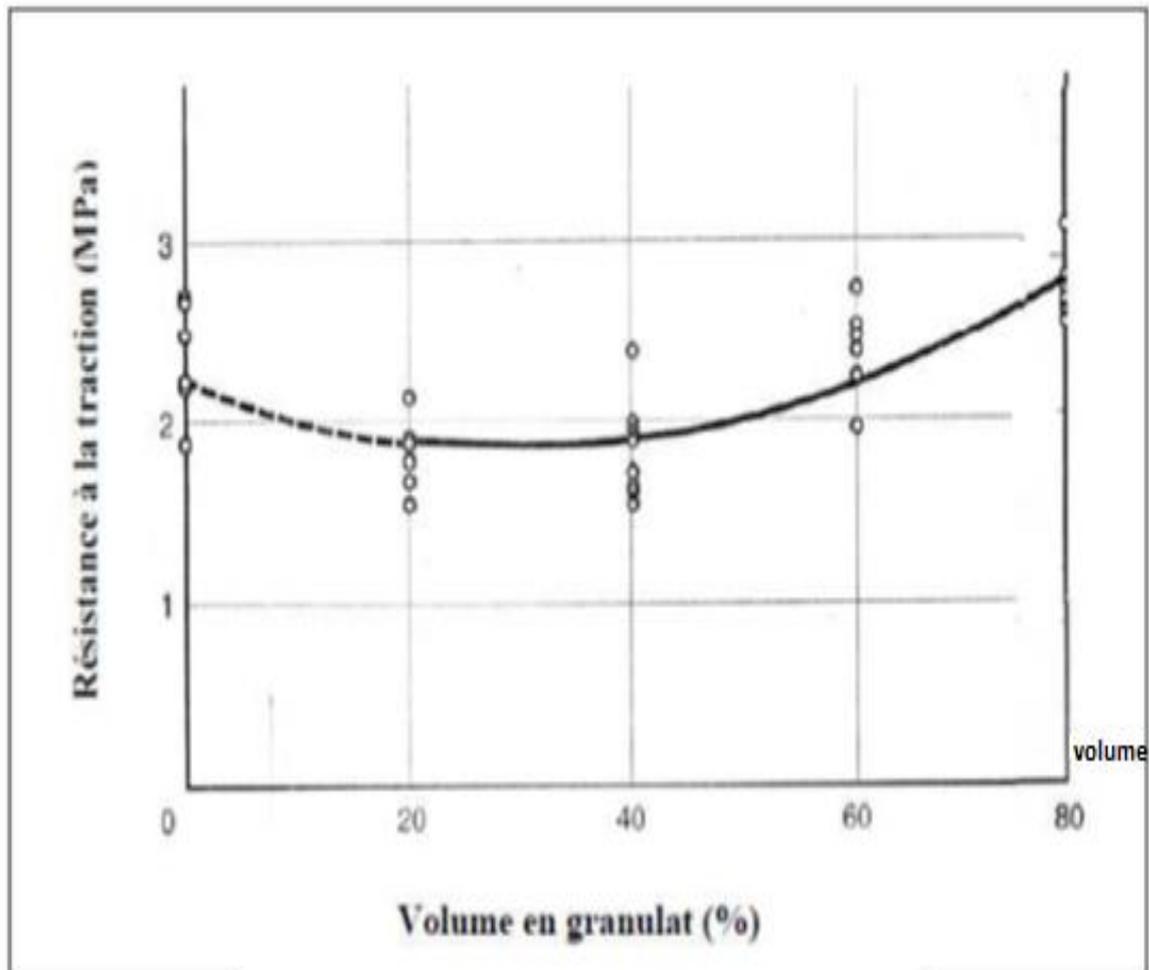


Figure II.1 Relation entre la résistance à la traction directe et le volume de granulats [30].

Pour une quantité de pâte de ciment donnée, la (figure 3) indique, que lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20%, il y a une diminution graduelle de la résistance à la traction alors que, entre 40 et 80%, on constate une augmentation de celle-ci. L'explication la plus probable de ce comportement provient du fait qu'une plus forte teneur en granulats contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulats et pâte de ciment. De même le pourcentage de vides par rapport au volume total est plus faible et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.

II.4.8. Influence de la température initiale :

L'augmentation de la température de mûrissement accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte ainsi avantageusement la résistance au jeune âge du béton sans aucun effet néfaste sur la résistance ultérieure. Une température plus élevée pendant et après le contact initial entre le ciment et l'eau réduit la durée de la période dormant, de sorte que la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt.

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

En se basant sur le rapport gel/espace, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel/espace élevé sera éventuellement atteint.

II.5.Conclusion :

Le béton est le matériau le plus connu et le plus utilisé dans le domaine de construction, ce béton qu'est l'assemblage des constituants qui permettent de déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques à partir de leur nature, leur états, dimensionnements, et leurs caractéristiques.

Le matériau béton est caractérisé par des propriétés physiques, le retrait, le gonflement, la dilatation et le fluage et autres propriétés mécaniques comme la résistance à la traction et à la compression, le module d'élasticité et la durabilité.

Toutes ces caractéristiques sont influencées par des facteurs et paramètres dus à des qualités et les dosages des matériaux premiers du béton et leurs quantités, à la nature comme la température et l'humidité.

CHAPITRE III:

L'emploi du béton a

hautes performance

III.1.Introduction :

Les BHP tirent leur résistance exceptionnelle, de leur microstructure très dense, mais ce ne sont pas leurs seuls atouts.

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance, cette caractéristique a fait des progrès spectaculaires à partir des années 80 [25], elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances.

Les caractéristiques du béton et sa souplesse d'utilisation lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées par les ouvrages de tous types :

- Génie civil
- Routes
- ouvrage d'art
- bâtiment spécifique (grande hauteur)
- ouvrage industriel
- travaux en souterrain

A ces trois domaines principaux, il faut ajouter quelques application plus particulières, comme les éléments préfabriqués pour le bâtiment, les chaussées, les assainissements, les tunnels et encore les centrales nucléaires.

III.2. Les avantage des BHP :

L'analyse des ouvrages en BHP, selon une approche en coût global, basée sur la valorisation de ses atouts permet de valider son intérêt économique :

- Résistances en traction supérieures, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton ;
- Performances en flexion qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations ;
- Fluage inférieur à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide, il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages

et une meilleure efficacité de la précontrainte, les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte;

- Réduction de l'ouverture de fissures, l'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures ;
- Meilleure adhérence acier béton, d'où une réduction sensible des longueurs de recouvrement, de scellement et d'ancrage des armatures et une simplification des dispositions constructives et des schémas de ferrailage ;
- Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles ce qui permet de réduire les sections d'armatures ;
- Réduction des épaisseurs d'enrobage compte tenu des faibles porosités et sensibilités aux agents agressifs des BHP ;
- Meilleure durabilité du béton, grâce à une compacité élevée due au faible rapport eau/ciment et à la présence du fumé de silice,
- Perméabilité 10 fois plus faible, ce qui assure une excellente protection des aciers (très faible pénétration des chlorures) ;
- Amélioration sensible des résistances au jeune âge, évitant ainsi un traitement thermique qui entraîne toujours une baisse de résistance à long terme et parfois une microfissuration ;
- Mise en œuvre facile et absence de ségrégation grâce à l'excellente cohésion ;

III.3. Exemple d'application de BHP :

III.3. 1.Le pont de Joigny (Bourgogne, France.1989) [26] :

Le pont de Joigny est un pont expérimental en béton de hautes performances, s'intégrant au projet national « Voies nouvelles du matériau béton », pour la première fois en France, les performances du béton HP ont été prises en compte dans le dimensionnement du pont sur la base d'un béton de 60 MPa de résistance à la compression à 28 jours, sans fumées de silice, l'ouvrage comporte trois travées (34 m, 46 m, 34 m) et est à deux nervures de 2,20 m de hauteur, avec précontrainte longitudinale totalement extérieure, cette technique de précontrainte permet d'alléger la structure (nervures à volume diminué aussi grâce à la

résistance du béton) et rend possible le remplacement ultérieur de l'ensemble de précontrainte, intéressant pour un ouvrage auquel le matériau apporte une grande longévité, les 1060 m³ de béton du tablier ont été coulés en continu, pendant vingt-quatre heures seulement, en plein mois de décembre.

Le béton HP étant de texture très fermée, il en résulte un aspect de surface très lisse, glacé, presque vitrifié. L'esthétique y gagne, la durabilité aussi.



Figure III.1. Le pont de Joigny (Bourgogne, France.1989 [26]

III.3.2.Pont « Stichtse » au Pays-Bas : [26]

Le premier grand pont construit aux Pays-Bas en béton à haute résistance en 1996, d'une longueur totale de 320 m.



Figure III.2 Le pont « Stichtse » au Pays-Bas [26]

III.3.3. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) :

Ce bâtiment de 175 000 m² édifié à Casablanca, en bordure de l'Océan Atlantique, est en contact direct avec les flots. Le bâtiment Mosquée, de 200 m x 100 m, d'une hauteur de 60 m, couronné par une toiture ouvrante de 2 400 m² (charpente de 800t), le minaret est une tour de 200 m de hauteur.

Les bétons de hautes performances ont fait l'objet d'études spécifiques pour résister (100 MPa) aux contraintes dues aux efforts sismiques, ainsi qu'à celles de la houle et aux effets de corrosion sur les armatures en milieu marin.



Figure III.3. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) [26]

III.3. 4. Nova Scotia-Toronto :

Le ScotiaPlaza est construit en 1987-88 [26], à Toronto au Canada. Semblant ignorer les autres performances, les architectes américains privilégient la haute résistance, par réduction et suppression d'appuis verticaux, elle leur permet de gagner, grâce à un meilleur parti architectura, « 10 à 14 % des surfaces fonctionnelles »! (calcul à 70 et 85 MPA, Rm=83 MPa , 315 kg ciment , 36 kg FS) .

III.3.4. Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001):

Le complexe se compose d'un parking souterrain de quatre niveaux et de deux immeubles-tours. Ces deux tours s'élèvent sur 30 étages.



Figure III.4 : Tours NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001) [26]

III.3.5. Les tours cœur-défenses :

Ce projet, conçu par le cabinet Jean-Paul Viguier est constitué de deux tours fines décalées, de trente-neuf niveaux, l'esplanade.

L'ensemble représente 220 000 m² de bureaux. Le noyau central de chaque tour et les poteaux de 1,10 m de diamètre ont été réalisés en béton HP de type B 80.



Figure (III.5) : Les tours cœur-défenses

III.3.6. Plates-formes pétrolières en Norvège :

Plus de 20 plates-formes pétrolières ont été construites avec 2 millions de m³ de BHP à partir des années 1970. Toutes ces structures sont installées en eau profonde par 70 m à 216 m de fond.



Figure III.6 : Plates-formes pétrolières en Norvège [27]

III.3.7 .Le Water Tower Place:

Le Water Tower place est construit à Chicago en 1975. Un des avantages du béton à haute performance n'avait cependant pas échappé à l'analyse du concepteur et l'entrepreneur puisque, en faisant simplement varier la résistance du béton utilisé pour construire les poteaux de l'édifice, il leur a été possible de leur conserver une section constante, ce qui a permis à l'entrepreneur de concevoir un seul système de coffrage préfabriqué pour tous les poteaux de

L'édifice. Une telle solution représente évidemment des économies de main-d'œuvre considérables puisqu'il n'est plus nécessaire de construire des coffrages de poteaux dont la section diminue au fur et à mesure que l'on monte dans les étages supérieurs de l'édifice (Cité en référence [27]).



Figure (III.7): Le Water Tower Place [27]

III.3.8. La Pacific Tower (France) :

La Pacific Tower à La Défense a été l'occasion d'une nouvelle avancée des BHP dans le domaine du bâtiment, pour la première fois en France, la structure verticale d'une tour a été réalisée avec un béton de hautes performances de classe B 60, mis en œuvre industriellement sur le chantier.

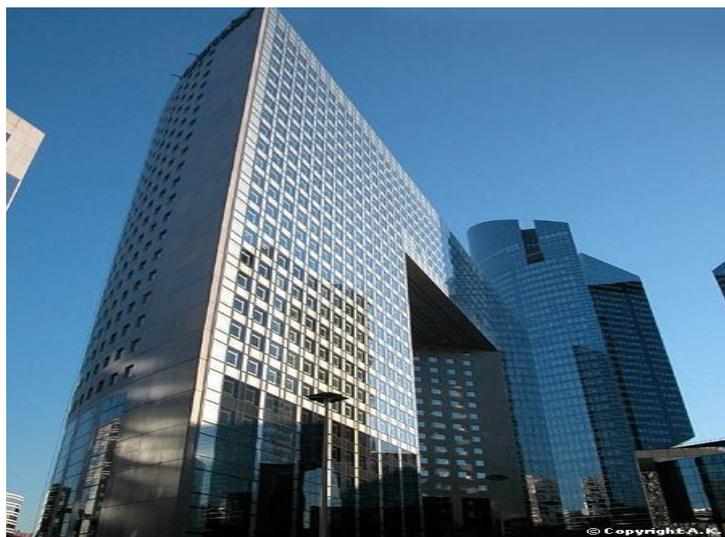


Figure III.8. La Pacific Tower (France) [27]

III.3.9. Le pont sur l'Elorn :

Le pont sur l'Elorn, qui relie Quimper à Brest, comporte une travée centrale de 400 m pour une longueur total de 800 m, c'est un record mondial pour un pont haubané à nappe centrale. Les 104 haubans répartis en quatre nappes mesurent de 37 à 240 m et sont ancrés à deux pylônes de 115 m de hauteur réalisés en B 60 [27].



Figure (III.9) : Le pont sur l'Elorn [27]

III.3.10. Le pont de Joigny:

Le pont de Joigny est un pont expérimental en béton de hautes performances, s'intégrant au projet national « Voies nouvelles du matériau béton ».

Pour la première fois en France, les performances du béton à HP ont été prises en compte dans le dimensionnement du pont sur la base d'un béton de 60 MPa de résistance à la compression à 28 jours, sans fumées de silice.

L'ouvrage comporte trois travées (34 m, 46 m, 34 m) et à deux nervures de 2,20 m de hauteur, avec précontrainte longitudinale totalement extérieure.

Cette technique de précontrainte permet d'alléger la structure (nervures à volume diminué aussi grâce à la résistance du béton) et rend possible le remplacement ultérieur de l'ensemble de précontrainte, intéressant pour un ouvrage auquel le matériau apporte une grande longévité.

Le béton HP étant de texture très fermée, il en résulte un aspect de surface très lisse, glacé, presque vitrifié, l'esthétique y gagne, la durabilité aussi [27].



Figure (III.10) : Le pont de Joigny [27]

III.3.11. Le pont de Normandie:

Avec sa travée centrale de 856 m (nouveau record pour les ponts à haubans) et ses pylônes de 214 m de hauteur en BHP, le pont de Normandie est un ouvrage d'art exceptionnel.

Du fait de sa particularité, il fait appel, pour sa mise en œuvre, à des bétons spécialement conçus pour chacune de ses parties :

- le béton de hautes performances BHP (60MPa), utilisé pour les voussoirs des rampes d'accès, permet le décoffrage rapide.
- le béton de hautes performances est encore mis en œuvre pour réaliser les deux pylônes, il s'agit du même béton que celui décrit précédemment. En effet, il rend possible le déplacement des coffrages autogrimpants dans des délais minimums pour des températures pouvant descendre à 5 °C [27].



Figure (III.11): Le pont de Normandie[27]

III.3.12. Tunnel de Barcelona:**Figure III.12. Tunnel de Barcelon[27]****III.3.13. Le Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (Mucem, 2010)**

Le Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (Mucem à Marseille) est situé en milieu urbain, d'où un accès au chantier complexe dans un environnement très dense.

Il a ouvert ses portes en Juin 2013 pour coïncider avec Marseille capitale de la culture en 2013, le bâtiment de la parcelle J4 conçu par l'architecte Rudy Ricciotti est une somme de prouesses techniques, qui ont pour point commun l'utilisation du béton fibré à ultra haute performance (BFUHP).

En l'occurrence, c'est le Ductal de Lafarge qui a été mis en œuvre, le matériau a servi à la préfabrication des poteaux précontraints par post-tension qui supportent l'édifice en périphérie, il a également été mis en œuvre dans les résilles qui forment un brise-soleil largement ajouré sur trois façades de l'édifice et en toiture. Enfin, ce béton très particulier forme également les potences qui soutiennent ces résilles en toiture, ainsi que la passerelle qui relie le nouveau bâtiment au fort Saint-Jean sur une portée de 77 m libres d'appuis.

Tous ces éléments ont été préfabriqués dans l'usine Bonna Sabla de Vendargues (Hérault) à proximité de Montpellier. Des moules verticaux ont été utilisés pour réaliser les résilles et les potences afin d'assurer la meilleure répartition des fibres métalliques et polypropylène dans le béton, « Le polypropylène était obligatoire pour tenir compte de la sécurité incendie. Ce matériau fonde et permet ainsi à l'ensemble de se dilater », explique, Patrick Mazzacane, directeur activité BFUHP de Bonna Sabla



. Figure III.14. Le Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (Mucem) [27]

III.3.15. Le pont de l'île de Ré :

Les délais imposés à l'entreprise pour cet ouvrage de près de 3 000 m de long (construit en moins de 16 mois) ont été déterminants dans le choix du béton HP.

Alors que le cahier des charges ne prévoyait qu'un béton B40 pour les voussoirs, les cadences d'exécutions de ces 798 pièces imposaient un démoulage à 15 heures, donc une résistance minimale de 12MPa, le béton réalisé qui présentait une résistance à 15 heures de plus de 20MPa, atteint à 28 jours plus de 60 MPa, l'emploi des fumées de silice en association avec un superplastifiant a également nettement amélioré la maniabilité du béton [27].

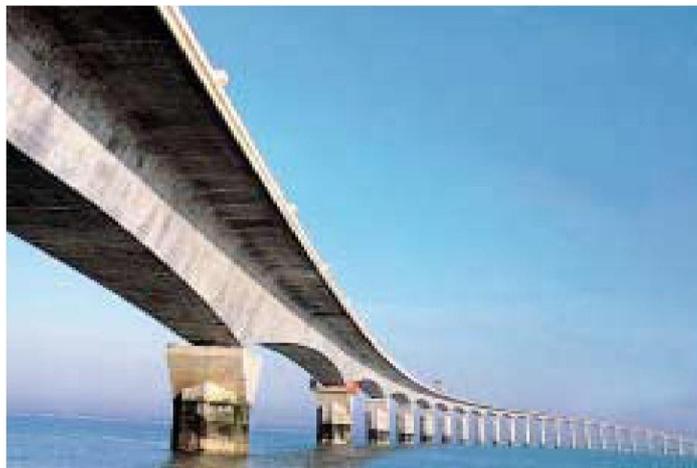


Figure (III.15): Le pont de l'île de Ré[27]

III.3.16. Tunnel sous la Manche (France et Angleterre):

Le B.H.P est caractérisé par une résistance de 56MPa à 28j pour un dosage en ciment de 400 kg /m³, affaissement 12 cm).



Figure (III.16):Tunnel sous la Manche (France et Angleterre) [27]

III.4.Conclusion :

Le béton haute résistance (BHP), qui a une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale utilisé traditionnellement.

Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux.

Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue des grandes espaces.

CHAPITRE IV :
Formulation du B.H.P
(Avec diffèrent type de
ciment)

IV.1.Introduction :

Le béton est un matériau composite, il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci), ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton »

Il est clair que formuler un béton est avant tout un problème de compacité, toutes les méthodes existantes reconnaissent ce principe en suggérant, pour certaines, de mesurer les compacités des constituants ou, pour d'autres, de s'approcher d'un « idéale courbe granulométrique » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés.

Le but ainsi construit est de trouver généralement une combinaison de constituants qui, après mélange, donneront un béton dont les propriétés seront conformes aux spécifications.

D'une façon générale, les objectifs à atteindre des formulations des bétons sont :

- obtenir un matériau frais avec une bonne mise en œuvre.
- obtenir un matériau durci avec une bonne résistance.

La recherche des performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide, on cherchera donc, pour formuler un béton à haute performance, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. [15]

IV.2.Objectifs d'une formulation :

Les performances requises pour un béton impliquent :

- Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abrams, noté ici A_f ,
- Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours, on notera f_{c28}

cette résistance,

-Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment C_{\min} et un rapport E/C maximum $(E/C)_{\max}$,

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment C le plus faible possible tout en vérifiant $C > C_{\min}$.

Il existe des logiciels efficaces qui permettent de traiter toute la partie non expérimentale du travail de formulation, même avec de tels outils, il est indispensable de comprendre comment les différents paramètres influent sur les qualités du béton, car ces paramètres sont trop nombreux et trop variables pour qu'ils puissent être pris en compte dans toute leur complexité (sans compter que des produits comme les adjuvants sont en constante évolution), outils de calcul (et les essais qui demeurent incontournables) pour celui qui cherche à résoudre un problème de formulation de béton [16,17].

IV.3.La composition du béton :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes, elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence, pondéraux, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont dites à granularité continue lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe élevant d'une façon continue, autrement dit, du plus petit grain de ciment de dimension $d_c \approx 6,3 \mu\text{m}$ au plus gros grain D des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

On dit par contre que l'on a une granularité discontinue lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires.

Ces deux types de béton, continu et discontinu, ont eu chacun leurs chauds partisans ou détracteurs.

IV.4. Critères en fonction de la destination des bétons :

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte, il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Quatre critères principaux doivent être retenus :

- la dimension maximale des granulats ;
- la résistance ;
- l'ouvrabilité ;
- l'agressivité du milieu ambiant.

IV.5. L'approche de la formulation :

IV.5.1. Dosage en ciment :

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

➤ **La fonction de liant :**

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins, il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de G. Dreux, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance, dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule :

$$Rb_{28} = G R_c (C/E - 0,5) \dots\dots\dots \text{IV.1}$$

Expression simplifiée inspirée de la formule de Féret.

Rb_{28} = résistance à la compression du béton à 28 jours.

R_c = résistance réelle du ciment.

G = coefficient compris entre 0,35 et 0,65.

Il faut cependant rappeler que la « fonction filler » conduit à un dosage en ciment supérieur aux valeurs habituellement fixées par les cahiers des charges ou les documents normatifs, la norme NF EN 206-1 ,[18] fixe des dosages minimaux en ciment C liés aux classes d'exposition du béton.

➤ **Dosage en eau :**

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton, l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0.55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre, toutes ces raisons, soulignent l'importance de l'optimisation du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier.

IV.5.2. Choix des granulats :

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler).

➤ **Choix des classes granulaires :**

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/4 et un gravillon 5,6/12,5 ; 5,6/16 ou 5,6/20, par exemple.

On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue, pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 ;
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse, le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8. [18]

IV.6. Formule de Féret :

En se limitant aux points de vue du maître d'ouvrage, du concepteur et de l'entreprise qui réalise les travaux, un béton peut être caractérisé par trois critères :

- la durabilité et la résistance à la compression du béton durci, qui garantissent la pérennité
- la sécurité des ouvrages, d'une part, et d'autre part la consistance ou la maniabilité du béton frais, qui mesure sa facilité de mise en œuvre, ces propriétés dépendent de la qualité des constituants, mais aussi de la composition du béton, c'est-à-dire des quantités des divers constituants contenus dans 1 m³ de béton en place.

Dès 1898, René Féret[18] a établi les principes d'optimisation de la composition conduisant à l'obtention de bétons de résistance spécifiée, il a énoncé la relation qui lie la résistance à la compression f_c d'un béton aux volumes de ciment **C**, d'eau **E** et de vides **V** contenus dans une unité de volume de béton durci :

Cette expression met en évidence le fait que la résistance f_c croît avec le dosage en ciment, c'est-à-dire avec le poids de ciment contenu dans 1 m³ de béton durci, les coefficients k dépendant de la nature des granulats et du ciment.

$$f_c = K_{\text{granu}} K_{\text{ciment}} \left[\frac{c}{1 + \frac{e+v}{c}} \right]^2 \dots\dots\dots \text{IV.2}$$

Elle montre aussi que la résistance est proportionnelle à la quantité d'eau et le volume des vides contenus dans le béton, si la quantité d'eau e est supérieure à celle qui est strictement nécessaire pour l'hydratation du ciment, il subsistera de l'eau excédentaire qui, après évaporation, laissera des vides s'ajoutant aux vides physiques de volume v , le béton présentera une certaine porosité du fait de ces vides, la formule de Féret met donc en évidence le fait que, pour un dosage donné de ciment, la résistance est d'autant plus grande que la teneur en eau du béton frais est plus réduite, c'est-à-dire que la porosité du béton durci est plus

faible, depuis Féret, de nombreuses méthodes ayant pour objectif la minimisation de la porosité et donc, en pratique, du volume ($e+v$), ont été proposées.

Il n'est cependant pas possible de diminuer fortement la teneur en eau, car on obtient des bétons frais très peu fluides, donc très difficiles à mettre en place.

Les méthodes de composition sont nombreuses, on distingue celles qui utilisent des courbes de références et celles basées sur d'autres principes. [19]

IV.7. Les méthodes de la formulation d'un béton :

IV.7.1. Formulation d'un béton selon la méthode Britannique :

La méthode Britannique courante de formulation basée principalement sur les conditions de durabilité dans la composition, cette méthode s'applique aux bétons ordinaires confectionnés avec du ciment Portland ou à ceux incorporant du laitier de haut fourneau ou des cendres volantes, mais elle ne s'applique pas aux bétons fluides mêmes aux bétons pompés, elle ne convient pas non plus aux bétons légers, trois dimensions maximales de granulats sont retenues : 40, 20 et 10 mm, globalement, la méthode Britannique comporte cinq étapes.

- Étape 1 : elle concerne la résistance à la compression afin de déterminer le rapport eau/ciment.
- Étape 2 : cette étape se rapporte à la détermination du dosage en eau associé à la maniabilité spécifiée,
- Étape 3 : détermination de dosage en ciment.
- Étape 4 : cette étape permet de déterminer la quantité totale de granulats.
- Étape 5 : permet de déterminer la proportion de granulats fins dans l'ensemble des granulats.

IV.7.2. Formulation d'un béton selon la méthode Américaine :

La méthode de la norme ACI 211.1-91, [20] consiste en une suite logique d'étapes progressives prenant en compte les caractéristiques des matériaux utilisés, ces étapes sont :

- Choix de l'affaissement.

- Choix de la dimension maximale du granulat.
- Estimation du dosage en eau et de la teneur en air.
- Choix du rapport eau/ciment.
- Calcul du dosage en ciment.
- Estimation du dosage en gros granulat.
- Estimation du dosage en granulats fins.
- Ajustement des proportions.

IV.7.3.Méthode de Bolomey :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique [3].

La formule de base est la suivante :

$$p (\%) = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : est le diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16. Sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus forte.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue [3].

A : est un coefficient donné par le tableau ci-après :

Tableau IV.1: la valeur de A.

Consistance du béton	Nature du granulat	
	roulé	concassé
Sec (béton vibré)	8 à 10	10 à 12
Plastique (non vibré)	10	12
Mou (béton coulé)	12 à 14	14 à 16

La méthode de Bolomey donne des bétons riches en éléments fins plastiques et donc maniables son emploi est fréquent pour les travaux routiers, et pour les bétons devant être mis en place par pompage [3].

IV.7.4.Méthode d'Abrams :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer, en dit :

Une méthode de la représentation globale de la granulométrie des agrégats à l'aide d'un indice numérique appelé « module de finesse » a été donnée, en 1918, [21] par Abrams, ce module est la somme des refus en poids divisée, par 100 obtenus par certains tamis américains de la série Tylor qui a été remplacée par les tamis.

Le module augmente avec la grosseur de l'agrégat, il sera de 1 pour les sables très fins et de 7 pour des gros gravillons.

Il existe, pour chaque granulométrie à composer, un module optimum demandant un minimum d'eau, ce module est en fonction de la grosseur maximum des agrégats et du dosage en ciment, la méthode d'Abrams est très utilisée aux U.S.A. [21]

Elle a été considérablement améliorée lorsque l'on a pensé à introduire le ciment (module de fines) et lorsque les modules ont été calculés avec les volumes absolus de matière et non plus avec les poids, on remarque alors que la grosseur maximum de l'agrégat intervient d'une manière prépondérante.

Le dosage du ciment influe peu sur les valeurs maximums à prendre, le module

diminue avec le pourcentage de vide laissé par les agrégats, c'est en particulier le cas des agrégats concassés [9].

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau (IV.2) en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau IV.2: Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants [17].

Dosage en ciment kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6,00
300	4.20	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40
450	4.50	4.90	5.30	5.70	5.90	5.98	6.50

Nous rappelons ici la règle du mélange d'Abrams : elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse Mf_1 et Mf_2 pour obtenir un module M /choisi pour le mélange [17].

IV.7.5.Méthode de Faury :

En 1942, J. Faury proposa, [18] comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation.

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen, la loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$: c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en

$\sqrt[5]{d}$ La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{d}$ L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{R}{\frac{R}{D} - 0,75} \dots \dots \dots \text{IV.4}$$

A : Ce paramètre se choisit dans le tableau suivant (tableau IV.3).

D : dimension de passoire.

B : varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R : est le rayon moyen du moule.

Tableau IV.3: Valeur de A.

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide, mise en	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide,	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	au-dessous de 22 (à déterminer dans chaque cas)	au-dessous de 24 (à déterminer)	au-dessous de 28 (à déterminer)

IV.7.6.Méthode de Vallette :

R. Vallette [22] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires, cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

La méthode Vallette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes.

Voici sommairement le principe de cette méthode :

Dans les cas les plus courants, on part en général de deux granulats (bétons binaires) : un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple.

On calcule d'abord le dosage de sable et ciment devant donner en principe le mortier plein à minimum de ciment, ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur sur la « convenance » du béton, il doit donc être un praticien connaisseur en la matière, on obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment), les dosages en ciment auxquels on aboutit ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées, la plasticité nécessaire, l'étanchéité ou autres qualités, pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe a priori, dans certains cas, ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein mouillé de sable.

IV.7.7.Méthode de Joisel :

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, A. Joisel [18] propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $m \cdot d$ dépendant de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage; m peut alors varier de 3 à 10.

Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses n'est plus systématiquement proportionnelle à d^5 (Faury) [18] mais à $m \cdot d$, m variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2}/D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode mais, en revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une étude à l'autre, d'un type de granulat à un autre, c'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats.

Comme pour les méthodes Faury et Vallette le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement sur le plan granulométrique, à la compacité maximale, ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200 kg/m³) au

dosage nécessaire ou exigé (250 à 400 kg/m³ dans la plupart des cas) , une correction doit donc être apportée dans ce sens.

IV.7.8.Methodes de G.Dreux :

-Dimension maximale des granulats :

La dimension maximale des granulats (D_{max}) est choisie suivant la spécificité de l'ouvrage à bâtir.

-Dosage en ciment :

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée R'_{28} [21].

$$R'_{28} = G\sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \dots\dots\dots \text{IV.5}$$

Avec :

R'_{28} : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en bars,

σ'_c : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars,

C : Dosage en ciment (en kg/m³),

E : Dosage en eau totale sur matériau secs (en litre),

G : Coefficient granulaire.

Tableau IV.4: Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G) [23].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16$ mm)	Moyen ($25 \leq D \leq 40$ mm)	Gros ($D \geq 63$ mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante, l'abaque de la figure (IV.1)[23] permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

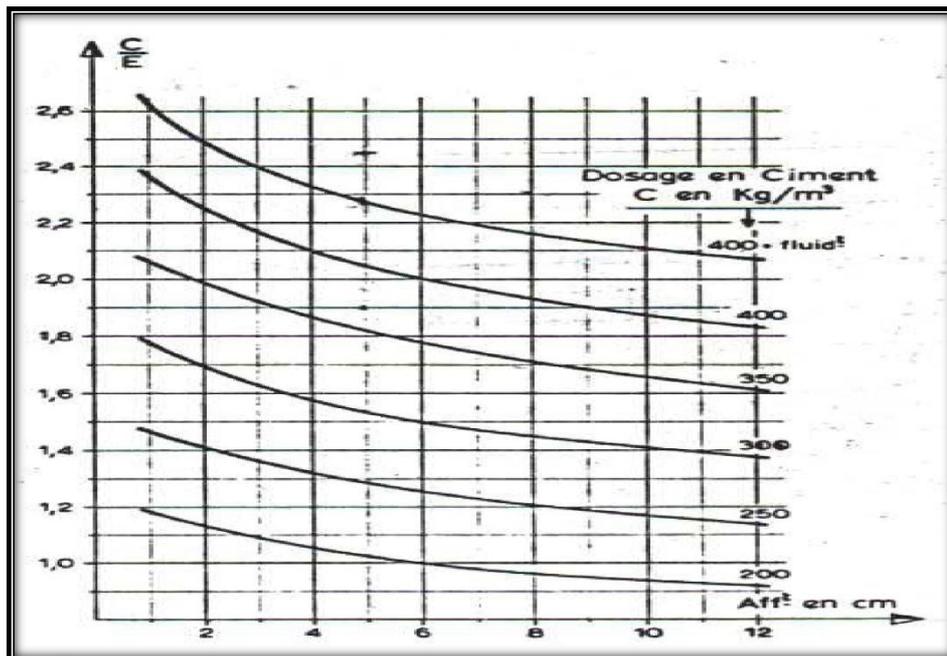


Figure IV1: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)

[23].

- Dosage en eau :

L'abaque de la figure (IV.2) [23], donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosée.

-Analyses granulométriques des granulats :

Sur un graphique d'analyse granulométrique [23], point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat. Point de brisure A à pour coordonnées :

- En abscisse Si $D \leq 25$ mm :

$$X = \frac{D}{2} \dots \dots \dots \text{IV.6}$$

Si $D > 25$ mm : X est située au milieu du segment limité par le module 38 (5mm) et le module correspond à D ;

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max} + K} \dots \dots \dots \text{IV.7}$$

Avec K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable.

- Coefficient de compacité (γ) :

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matériaux solides (ciment et granulats) réellement contenus dans un mètre cube de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de γ dans le tableau (IV.5) [23]:

Tableau IV.5: Valeurs du coefficient de compacité [23].

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=16	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
		0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
		0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration normale	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

IV.7.9. Affaissement au cône d'Abrahams :

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration, cet essai a fait l'objet de la norme AFNOR P 18-451, et nous n'en donnons ci-dessous que les principes essentiels : on remplit de béton un moule en tôle tronconique ($D=20\text{cm}, d=10\text{cm}, h=30\text{cm}$), le remplissage s'exécute en quatre couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16mm de diamètre à raison de 25 coups par couche, on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement, les mesures sont évidemment quelque peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau (III.6): appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau IV.6: appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams [18].

0 à 2 cm	Béton Très ferme	Mise en œuvre Vibration puissante
3 à 5 cm	Ferme	Bonne vibration
6 à 9 cm	Plastique	Vibration courante
10 à 13 cm	Mou	Piquage
10 à 14 cm	Très mou à liquide	Léger piquage

Certains ont voulu déconsidérer cet essai en le déparant aujourd'hui (dépassé) alors que très probablement ils ne l'avaient pas encore vraiment pratiqué : la parution de la norme NF-P 18-451 en 1966 [18] apporte le meilleur démenti à cette affirmation gratuite et par ailleurs dans la norme P18-305 (béton prêt à l'emploi préparé en usine) cet essai a été pris comme base contractuelle d'évaluation de la plasticité du béton livré par une centrale et c'est là, encore aujourd'hui, une pratique courante aux Etats-Unis ou l'on utilise beaucoup le béton de centrale.

D'ailleurs R.L'Hermite a écrit (cet essai est un excellent indice de la quantité d'eau de gâchage, dont il permet de vérifier la régularité).

IV.8.Conclusion :

L'étude de composition d'un béton pour définir un mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que les quantités de ciment et d'eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles pour la construction des ouvrages.

La diversité de ces méthodes et les nombreux paramètres à choisir en fonction de divers autres différemment appréciés a fatalement pour conséquence de faire varier à l'infini les compositions utilisées ici ou là, hier ou aujourd'hui, et ces variations ne nous semblent pas toujours bien justifiées, il suffit de faire par exemple le tour de quelques chantiers situés au voisinage les uns des autres, pour des ouvrages de type très semblable, exécutés dans des conditions analogues, on voit employer des bétons dont les formules de composition, à partir des mêmes matériaux de base, sont plus ou moins différentes les unes des autres pour la seule raison, nous semblait-il, que l'entreprise ou le service de contrôle du maître d'œuvre ne sont pas les mêmes, cependant, chacun est, au demeurant, à peu près satisfait de la formule employée et les résultats de contrôle de résistance (ou autres caractéristiques) ne sont pas très différents dans la mesure où ils sont exécutés sérieusement et suivant un processus analogue.

C'est pourquoi, il ne faut pas attacher un caractère intangible aux résultats donnés par une méthode ou par une autre.

Pour la plupart des bétons utilisés dans les cas normaux et courants, une méthode, simplifiée pour être pratique, tenant le plus grand compte de l'expérience acquise d'après ce qui se fait en général aujourd'hui, nous paraît devoir être satisfaisante et suffisante, l'essentiel est ensuite de vérifier par des essais de convenance que la formule choisie (quitte à la modifier en conséquence) convient bien pour le béton désiré en lui conférant les qualités souhaitées : ouvrabilité et résistance en particulier.

Nous avons utilisés la méthode de DREUX -GORISSE pour la formulation du béton, pour sa simplicité, et par ce qu'elle offre l'avantage d'être pratique.

CHAPITRE V :

ESSAIS SUR LES BETONS

V.1.Introduction :

Nous présenterons dans ce chapitre le matériel essentielle utilise dans les différents essais ainsi que les compositions du béton, pour cela en fabrique un béton à hautes performances avec une quantité de fumée de silice de 15 % du poids de ciment réalisé avec déférents types des ciments, afin d'avoir leur comportement mécanique et leurs caractéristiques, pour le comparé avec un béton ordinaire.

La formulation d'un béton à hautes performances a permis d'obtenir un béton amélioré a un béton ordinaire à différents âges (7, 14,21et28) jours.

V.2.Choix des matériaux utilises et essais réalises :

Les propriétés d'usage des bétons à hautes performances sont des sujets d'étude dans différents points du monde, et un certain nombre de travaux portant sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces bétons ont été publiés.

Notons que pour obtenir un béton, il faut :

1. Une sélection de granulats résistants et une granularité permettant d'obtenir une compacité optimale du béton et une meilleure adhérence avec la pâte de ciment.
2. L'utilisation d'un rapport E/C (quantité d'eau réduite au strict minimum).
3. Le choix d'un ciment portland avec moins de C3A.
4. L'utilisation des superplastifiants pour compenser la perte de maniabilité.

V.3.Les ciments :

Les ciments utilisé ont été ramené des cimenteries :

- Chlef, M'sila et Saida.

V.3.1.Classifications des ciments étudiés :

Ciment de Chlef : ciment portland composé CPJ-CEMII/A 42,5.

Ciment de M'sila : ciment portland composé CPJ-CEMII/B 42,5.

Ciment de Saida : ciment portland composé CPJ-CEMII/A 42,5.



V.3.2. Détermination de la masse volumique apparente (EN 197-1) [24] :

Objectif d'essai :

Détermination des caractéristiques physiques (masse volumiques) des différents ciments.

Principe de l'essai :

La masse volumique apparente est mesurée par un entonnoir porté par trépied et menu d'une passoire et d'un opercule mobiles, placé au-dessus d'un récipient calibré.

Le calcul de la masse volumique apparente est donné par la formule :

$$\rho_{app} = M_2 - M_1 / V_{app} \dots\dots\dots V.1$$



Fig. V.4 : Essai de la masse volumique du ciment.

V.3.3.Détermination de la masse volumique absolue(EN 197-1) [24]:

Objectif de l'essai :

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue de ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment.

Principe de l'essai :

On opère en comparant la masse (m_c) d'un volume connu de ciment (v_c) à la masse (m_t) d'un même volume d'un liquide dont la masse volumique (ρ_t) est connu. La masse volumique du ciment (ρ_c) s'en déduit en écrivant :

$$\rho_c = \rho_t(m_c / m_t) \dots\dots\dots V.2$$



Figure V.5: Essai de la masse spécifique du ciment.

V.3.4.Essai sur la pâte de ciment (Essai de consistance)

Objectif de l'essai (EN 196-3) [13]:

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps, pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées, l'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée ».

• Principe de l'essai :

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante, l'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide, la consistance évaluée de cette manière sera appelée « consistance Vicat ».

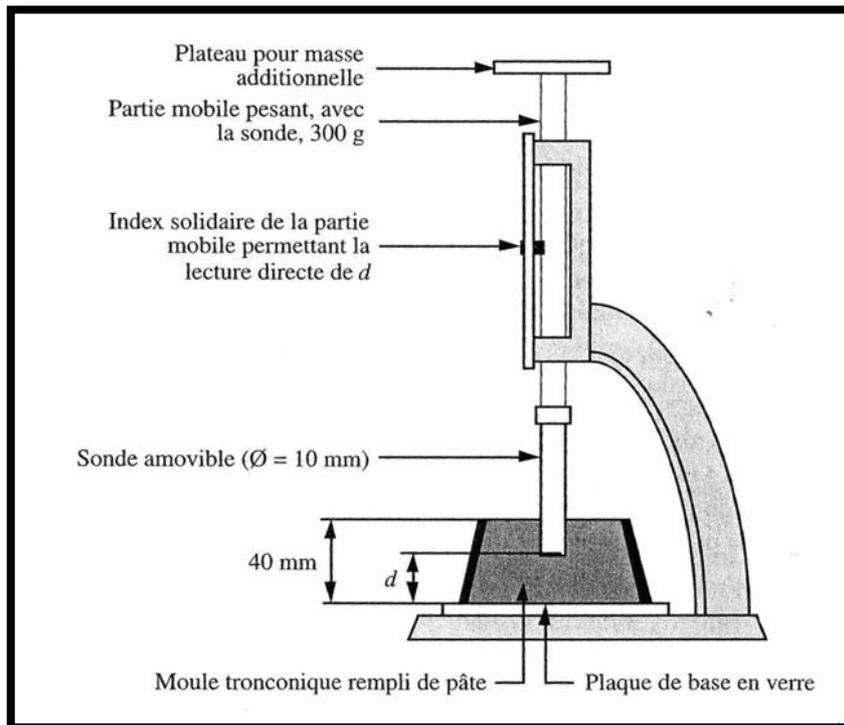


Figure V.6: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance[13].

V.3.5.Mesure des temps de début et fin de prise (NF EN 196-3) [25]:

Objectif de l'essai :

Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques :

Le début de prise et la fin de prise.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre, quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint, ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE »,

le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm [9].

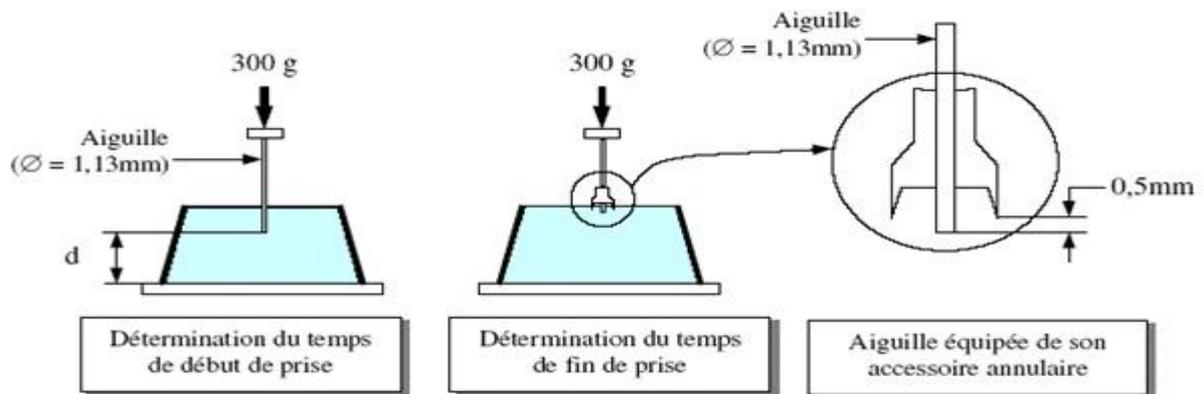


Figure V.7: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible



Figure V.8: détermination de la consistance et la prise des ciments

V.4.Sable

Le sable qu'on a utilisé c'est un sable d'ELGEULTA (région de Tiaret).

V.4.1. Les caractéristiques physique :

Figure V.9: Essais de la masse spécifique du sable.

V.4.2. L'équivalent de sable [13] :**But de l'essai :**

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, l'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

Une procédure normalisée permet de déterminer le coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier, le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout, au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

-hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,

-hauteur h_2 : sable propre seulement,

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est (figure V.8) : $ES = 100 (h_2/h_1)$.



Figure V.10: Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontale).



Figure V.11: éprouvettes pour l'essai de l'équivalent de sable (ES)

On a trouvé une valeur d'équivalente de sable $E_S = 76\%$ située entre 70 et 80% présente un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Tableau V.1: Analyse granulométrique du sable.

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	60	60	6	94
1.25	33	93	9.3	90.7
0.63	28	121	12.1	87.9
0.315	225	346	34.6	65.4
0.125	615	961	96.1	3.9
0.08	35	996	99.6	0.4
Fond	3	999	99.9	0.1

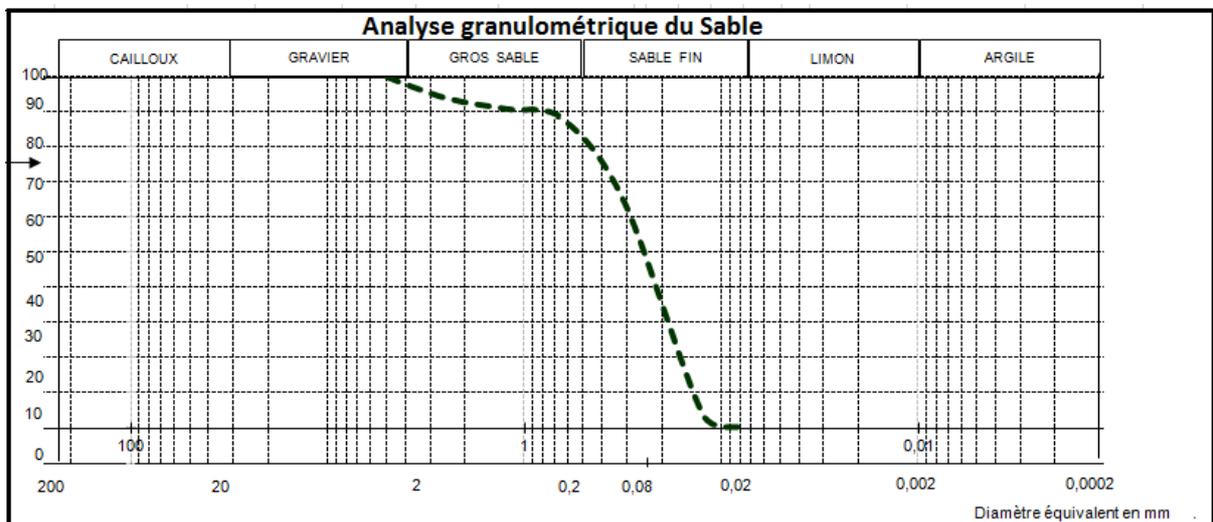


Figure V.12: la courbe granulométrique de sable.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons.

Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

V.5.Le gravier :

Les graviers de fraction (3/8, 8/15 mm) qu'on a utilisé sont d'OUED LILLI (région de Tiaret).

V.5.1.Les caractéristiques physiques : la masse volumique.

Figure V.13: Essai de la masse volumique du gravier 3/8 et 8/15

L'analyse granulométrique du gravier est fournie dans la figure (V.14).



Figure V.14 : Essai de l'analyse granulométrique du gravier (3/8 et 8/15)

Tableau V.2: Analyse granulométrique des granulats de fraction 3/8.

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
8	14	14	0.875	99.125
6.3	390	404	25.25	74.75
5	622	1026	64.125	35.875
4	294	1320	82.5	17.5
3.15	191	1511	94.03	5.57
Fond	88	1599	99.93	0.07

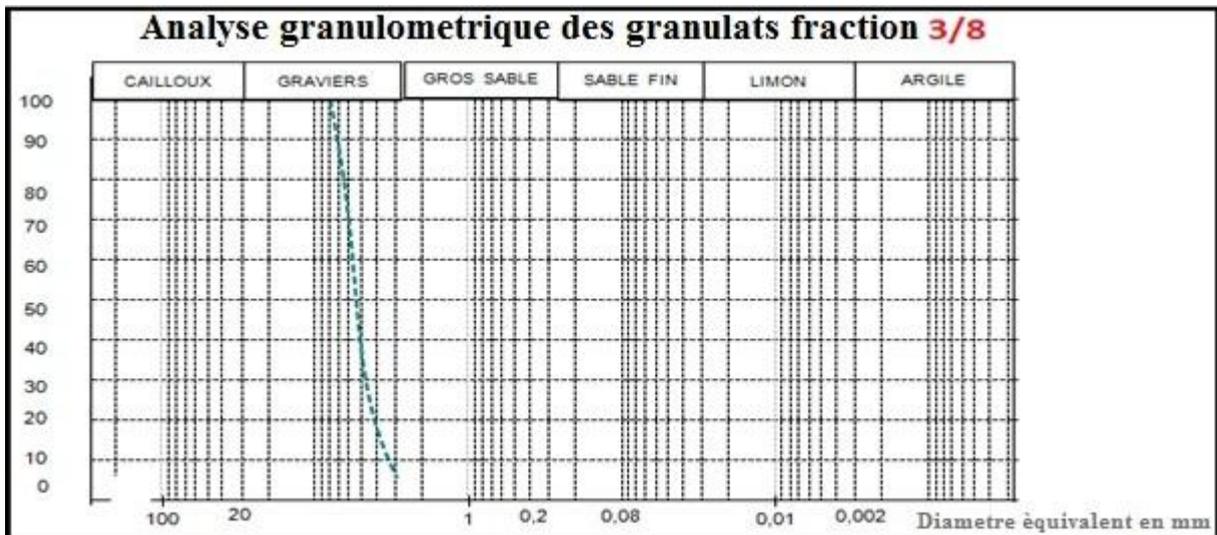


Figure V.15: la courbe granulométrique des graviers 3/8

Tableau V.3: Analyse granulométrique des granulats de fraction 8/15.

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
8	14	14	0.875	99.125
6.3	390	404	25.25	74.75
5	622	1026	64.125	35.875
4	294	1320	82.5	17.5
3.15	191	1511	94.03	5.57
Fond	88	1599	99.93	0.07

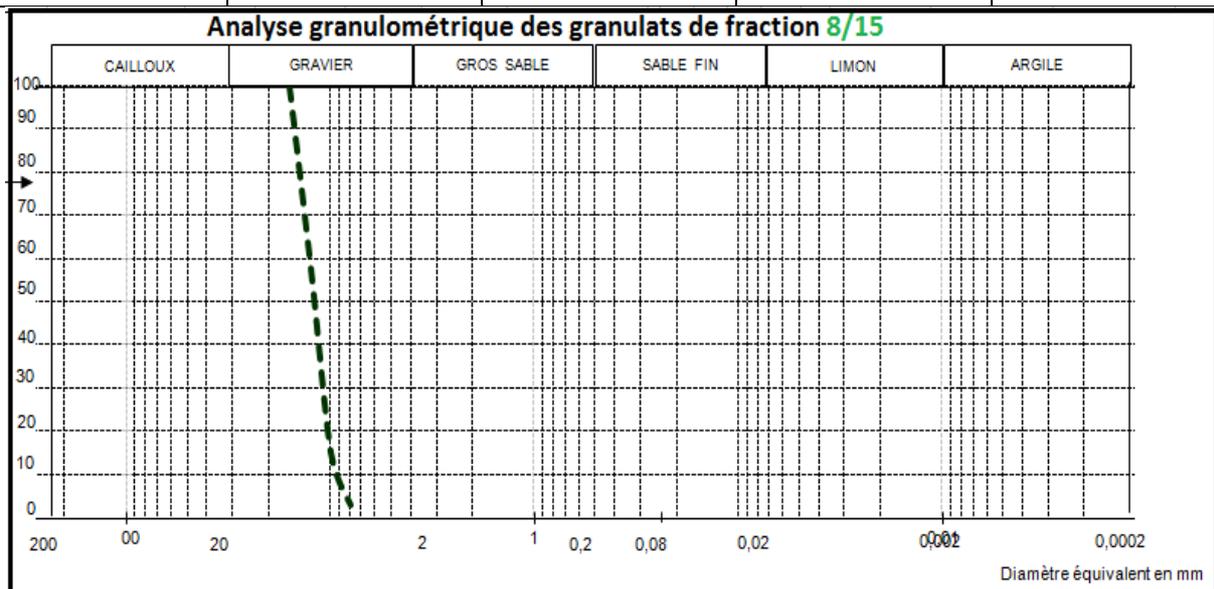


Figure V.16: la courbe granulométrique des graviers 8/15

Le coefficient d'uniformité des granulats $C_u=2,2$; la granulométrie est étalée (on variée)

V.6.L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle de robinet maintenue à une température de (20°C).

V.7.Superplastifiants :

- La société Granitex (Alger) met sur le marché deux grand type d'adjuvants fluidifiants, et plastifiant (appartiennent à la famille des super plastifiants qui sont généralement utilisés dans la fabrication des B.H.P) ,ce sont d'une part les medafluids SF et SFA à base naphtalène sulfonates, et d'autre part les medaplasts SP à base de résine mélanines.



Figure V.17: Superplastifiants MEDAFLOW145

- la fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme " fumée de silice " est le plus généralement utilisé, c'est un sous – produit des usines de fabrication d'alliages de silicium et de ferro silicium obtenu dans un four à arc à partir de quartz de grand pureté et de charbon.



FigureV.18 : Sac de fumé de silice

Par contre, les formulations diffèrent au niveau de la pâte (ciment, fumée de silice) la quantité de fumée de silice ajoutée est de 15 % du poids de ciment dans le mélange du béton.

V.8. Proportion des matériaux :

Après avoir cherché à distinguer les constituants aptes à rentrer dans la composition des B.H.P, il faut déterminer leur dosage, en vue d'obtenir une certaine maniabilité et une résistance mécanique, et à long terme, une certaine durabilité.

Les B.H.P sont des matériaux dont les résistances caractéristiques sont le plus souvent supérieures à 60MPa à 28 j, leur squelette granulaire représente un bon compromis entre l'économie, qui pousse à l'utilisation des ressources locales et exigeance d'une certaine qualité, ce sont par ailleurs des bétons à faible dosage en pâte interstitielle, cependant, le béton à l'état frais comprend deux phases : une phase solide constituée du squelette inerte (granulat et sable) et une phase qu'on peut assimiler à un liquide viscoplastique, formée par l'eau, le ciment et les additifs organiques, par le mélange de ces deux phases, on veut chercher à reconstituer une roche massive, qui se caractérise par une porosité quasi-nulle, donc une meilleure durabilité à long terme .

V.9. Formulation du béton témoin :

On entend ici par le béton témoin un béton proche de ceux qu'on emploie habituellement, les proportions du squelette granulaire de B.H.P et du béton témoin seront les mêmes .

Par contre, les formulations diffèrent au niveau de la pâte (dosage en ciment, eau et adjuvant), on utilise la méthode de DREUX-Goris pour la détermination de la composition.

Tableau V.4: Composition d'un m³ de béton témoin de ciment M'sila (en kg).

Granulats Concassés (guelta)		Sable	Ciment	Eau
3/8	8/15	De rivière	CPJ	de robinet
537.7	722.55	616.36	450	212

Tableau VI.5: Composition d'un m³ de béton témoin de ciment Chlef (en kg).

Granulats Concassés (guelta)		Sable	Ciment	Eau
3/8	8/15	De rivière	CPJ	de robinet
537,7	722.55	615.36	450	212

Tableau V.6: Composition d'un m³ de béton témoin de ciment Saida (en kg).

Granulats Concassés (guelta)		Sable	Ciment	Eau
3/8	8/15	De rivière	CPJ	de robinet
537.7	722.55	617.36	450	212

V.10. Formulation du B.H.P

Cette formulation diffèrent au niveau de la pâte (ciment, *la fumée de silice*) la quantité de *la fumée de silice* ajouté est de 15 % du poids de ciment dans le mélange du béton.

Tableau V.7: compositions d'un B.H.P de ciment M'sila (kg/m³).

Granulats Concassées		Sable	Ciment	Adjuvant		Eau
<i>3/8</i>	<i>8/15</i>	<i>S</i>	<i>CPJ</i>	<i>la fumée de silice</i>	<i>superplastifiant</i>	<i>Robinet</i>
537.7	722.55	616.36	382.5	67,5	62	150

Tableau V.8: compositions d'un B.H.P de ciment Chlef (kg/m³).

Granulats Concassées		Sable	Ciment	Adjuvant		Eau
<i>3/8</i>	<i>8/15</i>	<i>S</i>	<i>CPJ</i>	<i>la fumée de silice</i>	<i>superplastifiant</i>	<i>Robinet</i>
535.7	721.55	615.36	382.5	67,5	62	150

Tableau V.9: compositions d'un B.H.P de ciment Saida (kg/m³).

Granulats Concassées		Sable	Ciment	Adjuvant		Eau
<i>3/8</i>	<i>8/15</i>	<i>S</i>	<i>CPJ</i>	<i>la fumée de silice</i>	<i>superplastifiant</i>	<i>Robinet</i>
536.7	720.55	617.36	382.5	67,5	62	150

V.11.Fabrication des échantillons :

Les bétons ont été confectionnés dans un malaxeur à axe vertical de capacité 50 litres permettant de couler une gâchée de 6 éprouvettes.

Le cycle de fabrication que nous avons suivi est défini comme suit :

- mélange à sec des ingrédients pendant 60s ;
- introduction de l'eau de gâchage avec le 1/3 de superplastifiant ;
- malaxage pendant 90 s ;
- introduction des 2/3 restants de super plastifiant ;

-malaxage 30s.

Le tout étant malaxé pendant trois minutes.

A la fin du malaxage, le béton est mise en place dans les moules correspondant aux différentes éprouvettes et piqués par une tige d'acier de diamètre 16 mm. Chacune d'entre elles étant vibrée verticalement pendant 30 secondes (fig V-19).



Figure V.19 : malaxage du béton

V.12. Composition des béton :

On a établi la composition des bétons qu'on va étudier (les quatre séries de bétons) on a essayé de conserver tous les paramètres constants sauf la quantité d'eau de gâchage, ces paramètres sont : la quantité de granulats et ciment.

Le dosage en eau a été limité 212 l/m^3 , pour le béton témoin pour deux raison : d'une part, par l'emploi du ciment à forte teneur en C_3A , et d'autre part des granulats angulaires, en effet, cette forme trop accidentée n'est pas recommandée pour la raison qu'elle nécessite beaucoup d'eau.

On remarque aussi que la meilleure répartition du superplastifiant (introduction dans l'eau de gâchage+ introduction du restant dans le malaxeur) se trouve être $1/3 + 2/3$. Par conséquent, on a pu obtenir un béton fluidifiant après l'ajout des $2/3$ de superplastifiant (30s avant la fin de malaxage).

V.13.L'ouvrabilité du béton frais.

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci, un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place, il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés, il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton:

- Méthode et durée de transport
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats)
- Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau

Un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement.

➤ **Affaissement au cône d'Abrams**

Cet essai, consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique du béton frais, l'essai au cône d'Abrams est simple à réaliser et nécessite un cône et une tige, le moule tronconique sans fond est de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure.

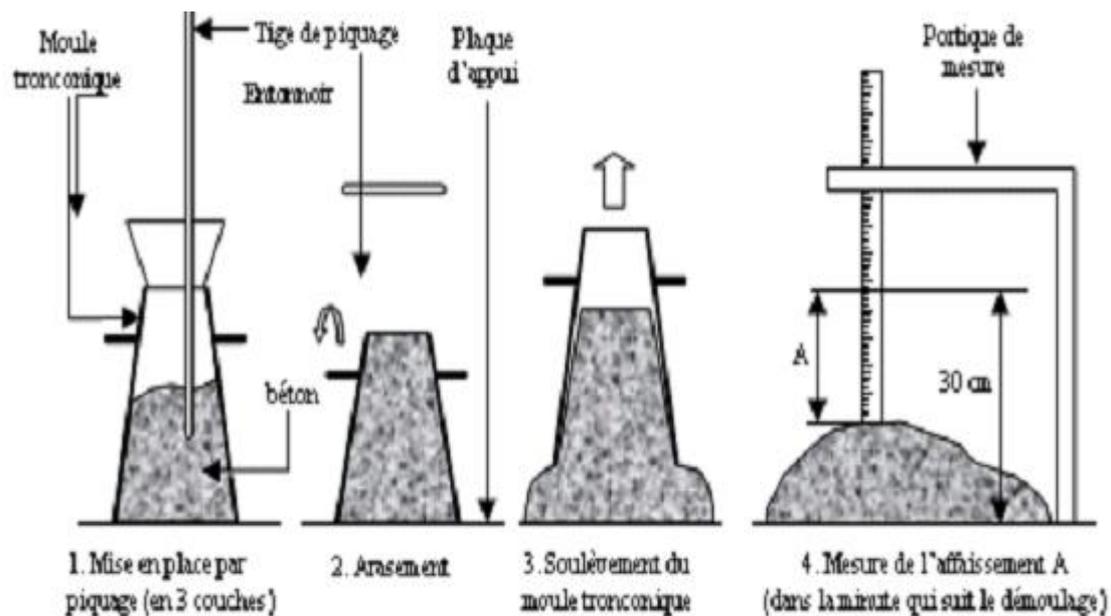


Figure V.20 : Test d'affaissement, Au cône d'abrams

L'essai d'affaissement au cône caractérise bien la consistance d'un béton ce qui permet le classement approximatif indiqué au tableau (V.6).

Tableau V.10 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

En générale, un ciment à forte teneur en C_3A a tendance à consommer beaucoup d'eau pendant les premières minutes qui suivent le gâchage et perturber le maintien de la maniabilité du béton dans le temps. Ainsi, cet inconvénient permet de modifier le comportement rhéologique du béton frais, quel que soit la quantité de superplastifiant utilisée



Figure V.21 : Fabrication et vibration des éprouvettes cylindrique et prismatique.

V.14.Démoulage et conservation des échantillons :

Les éprouvettes étaient démoulées après 24 heures, et sont en suite conservées jusqu'à la date des essais, on a choisi de les conserver dans l'eau à 20° c.(figure V-21)





Figure V.22 : Démoulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques



Figure V.23 : Conservation des éprouvettes (cylindriques et prismatiques)

V.15. Surfaçage des éprouvettes :

Seuls les cylindres étaient surfacés, le surfaçage fait par l'emploi d'une nouvelle technique (boite à sable), ou disque néoprène crée un certain confinement aux bouts des cylindres pour éviter leur extension latérale et ainsi leur détérioration.

Il permet aussi de rendre les plans d'application de la force de compression perpendiculaire à l'axe longitudinal des cylindres, cela permet de réduire, voire même annuler l'excentricité des cylindres (compression simple).

V.15.1. Détermination de la résistance à la compression (f_{cj}) :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

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.

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées, en effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette.



Figure V.24: Machine pour essai de compression simple

V.15.2. Détermination de la résistance à la traction par flexion :

Les essais sont conduits par flexion « quatre points » c'est l'essai le plus couramment utilisé, il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté ($a=10\text{cm}$) et de longueur ($4a=10\text{cm}$).



Figure V.25: Essai de traction par flexion quatre points

CHAPITRE VI:

Résultats et interprétations

VI.1. Les essais sur les ciments :

Déterminations des caractéristiques physiques des ciment

Tableau VI.1 : les caractéristiques physiques des ciments.

Type de ciment CPJ	cimenteries	Masse volumique absolue (Ton/m ³)	Masse volumique apparente (Ton/m ³)	La consistance (%)	Début de prise (mn)	Fin de prise (mn)
CEM II/A	Chlef	$\rho_s = 3,120$	$\rho_a = 1,088$	26	73	200
CEM II/A	Saida	$\rho_s = 3,180$	$\rho_a = 1,880$	23	65	200
CEM II/B	M'sila	$\rho_s = 3,158$	$\rho_a = 1,222$	23	65	250

VI.2. Les essais sur Le sable :

- Déterminations des caractéristiques physiques de sable

Tableau VI.2 : les caractéristiques physiques de sable.

Sable	Masse volumique absolue (Ton/m ³)	Masse volumique apparente (Ton/m ³)	Equivalent de sable ES _v /ES _p (%)
ELGEULTA	2,62	1,65	77/76

ES_v=77 et ES_p=76 sont situés entre 70 et 80 % présentent un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Le module de finesse(MF) :

MF = 2.57 représente un bon sable pour la formication du béton (2,2 – 2,8).

VI.3. Les essais sur Le gravier :

- Déterminations des caractéristiques physiques de gravier

Tableau VI.3 : les caractéristiques physiques de gravier.

Caractéristiques	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue (Ton/m ³)	2.5	2.5
Masse volumique apparente (Ton/m ³)	1.45	1.43

VI.4. Les essais sur le béton durci :

Les essais sur les deux types de béton

VI.4.1. Caractérisation des bétons utilisés :

La caractérisation des bétons utilisée a été réalisée sur des éprouvettes cylindriques de (16x32) cm testées en compression et des éprouvettes prismatiques de (10x10x40) testées à la traction par flexion, pour un béton d'âge : 7, 14, 21 et 28 jours.

VI.4.2. La composition d'un béton à Hautes Performances :

En va étudier un béton à hautes performances avec la même composition de celle du béton ordinaire, en conservant tous les paramètres constants, la variation porte sur le type de ciment (trois types de ciment) avec l'ajout de la fumée de silice et le superplastifiant.

VI.5. Propriétés du béton durci (résistance en compression simple)

Les éprouvettes réalisées pour les essais de compression doivent être mesurées à partir du premier jour de conservation de ces derniers, afin de déterminer la résistance caractéristique exacte.

On a utilisé la résistance caractéristique à la compression f_{cj} , exprimée par les deux relations fournies par DREUX:

$$f_{cj} = m_a - 1,28 S \quad \text{pour} \quad \longrightarrow \quad m_a < 30 \text{MPa.}$$

$$f_{cj} = m_a - 1,64 S \quad \text{pour} \quad \longrightarrow \quad m_a \geq 30 \text{MPa.}$$

Avec :

f_{cj} : résistance caractéristique à la compression.

m_a : résistance moyenne.

S : écart type calculé à partir de l'expression suivante :

$$S = \frac{\sqrt{\sum(m_i - m_a)^2}}{n-1} \dots\dots\dots \text{VI.1}$$

$\frac{\sum(m_i - m_a)^2}{n-1}$ est appelé la variance

Avec :

n : égale le nombre de mesure.

Le coefficient de variation est :

$$V = 100 \frac{s}{m_a} \% \dots\dots\dots \text{VI.2}$$

Il est à noter que d'une manière générale toute variation dans les résultats expérimentaux de mesure de la résistance en compression entre les cylindres provenant de l'échantillon est causée par des écarts sur la fabrication de plusieurs gâchées.

L'ouvrabilité dérivée est caractérisée un affaissement au cône A=7,5 cm et la consistance d'un béton Plastique P.

VI.5.1. Résistance en compression simple :

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes retenues sont récapitulés dans les tableaux suivants.

Tableau VI.4 : résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe A (CHLEF).

Type de béton	Age (jours)	Résistance à la compression f _{cj} (MPa)		Résistance moyenne f _{cm} (MPa)	Ecart type $S = \frac{\sqrt{\sum(m_i - m_a)^2}}{n-1}$	résistance caractéristique f _{cj} (MPa) f _{cj} = m _a - 1,64 S	Coefficients de variation $V = 100 \frac{s}{m_a} \%$
BO	7	31,2	32	31,6	0,8	30,288	2,53
	14	33	33,9	33,45	0,9	31,974	2,69
	21	36,4	37	36,7	0,6	35,716	1,63
	28	39	39,7	39,35	0,7	38,202	1,77
BHP	7	36,1	37	36,55	0,9	35,074	2,46
	14	43	45,9	44,45	2,9	39,694	6,52
	21	53,2	54,9	54,05	1,07	52,745	1,97
	28	60, 6	63	61,8	2,4	57,864	3,88

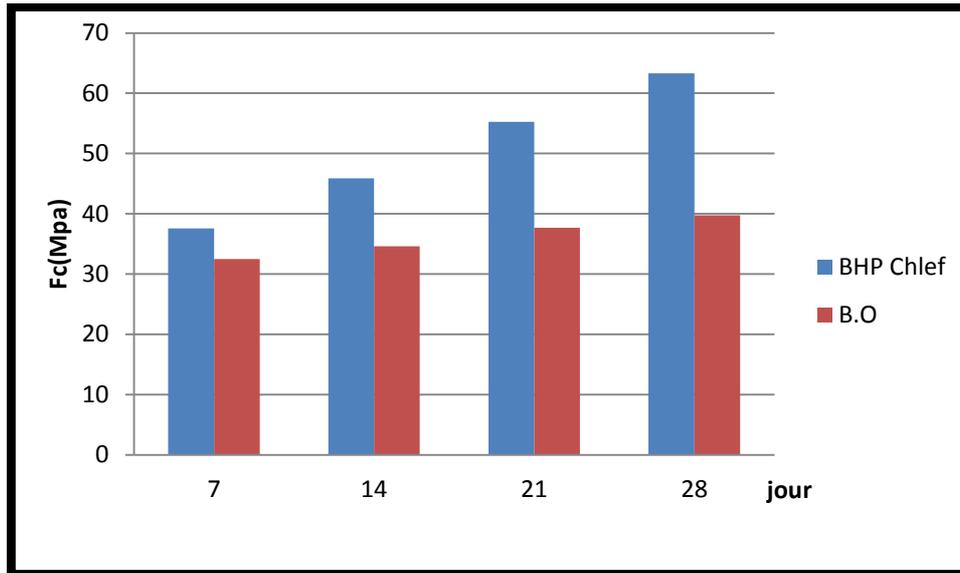


Figure VI.1 : la résistance à la compression de béton ordinaire et BHP (ciment Chlef).

On remarque qu'il y a une augmentation intéressante de la résistance à la compression du béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire pour le premier type de ciment CPJ CEM II/A (Chlef).

Tableau VI.5: résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe A (SAIDA).

Type de béton	Age	Résistance à la compression		Résistance moyenne f_{cm} (MPa)	Ecart type $s = \frac{\sqrt{\sum(m_i - m_a)^2}}{n - 1}$	résistance caractéristique	
		f_{cj} (MPa)	f_{cj} (MPa)			f_{cj} (MPa)	Coefficients de variation $V = 100 \frac{s}{m_a} \%$
BO	7	31	31,9	31,45	0,9	30	2,86
	14	32	32,8	32,4	0,8	31,9	2,46
	21	35,4	6,1	35,75	0,7	34,6	1,95
	28	38	38,8	38,4	0,8	37,9	2,08
BHP	7	35,4	36	35,5	0,6	34,71	1,69
	14	42	44,8	43,4	2,8	38,8	6,45
	21	52	53,6	52,8	1,6	50,18	3,03
	28	58,8	60,3	59,5	1,4	57,20	2,35

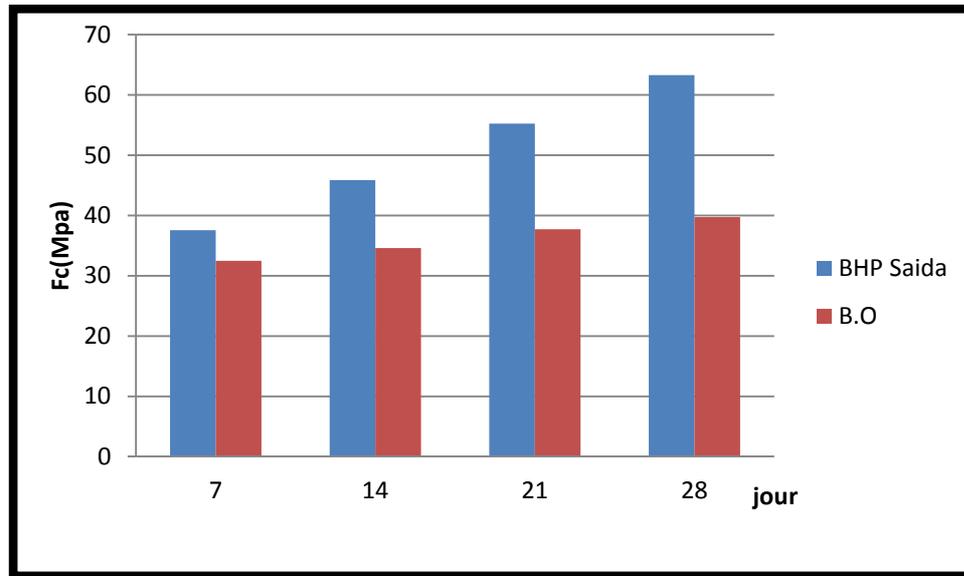


Figure VI.2 : la résistance à la compression des bétons ordinaire et BHP (ciment Saida).

Pour le deuxième type de ciment CPJ CEM II/A (Saida), on remarque qu'il y a une augmentation intéressante de la résistance à la compression du béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Tableau VI.6 : résultat de la résistance en compression de béton du ciment de classe B (M'SILA).

Type de béton	Age	Résistance à la compression		Résistance moyenne f_{cm} (MPa)	Ecart type $s = \frac{\sqrt{\sum(m_i - m_a)^2}}{n-1}$	résistance caractéristique f_{cj} (MPa) $f_{cj} = m_a - 1,64 S$	Coefficients de varia $V = 100 \frac{s}{m_a}$ %tion
		f_{c1} (MPa)	f_{c2} (MPa)				
BO	7	32	33	32,5	1	30,86	3,077
	14	34,2	35	34,6	0,8	33,29	2,312
	21	37	38,4	37,7	1,4	35,4	3,714
	28	39,4	40,1	39,75	0,7	38,6	1,761
BHP	7	37	38,1	37,55	1,1	35,75	2,93
	14	45	46,8	45,9	1,8	42,95	3,922
	21	54,5	56	55,25	1,5	52,8	2,715
	28	62	64,6	63,3	2,6	59,04	4,1

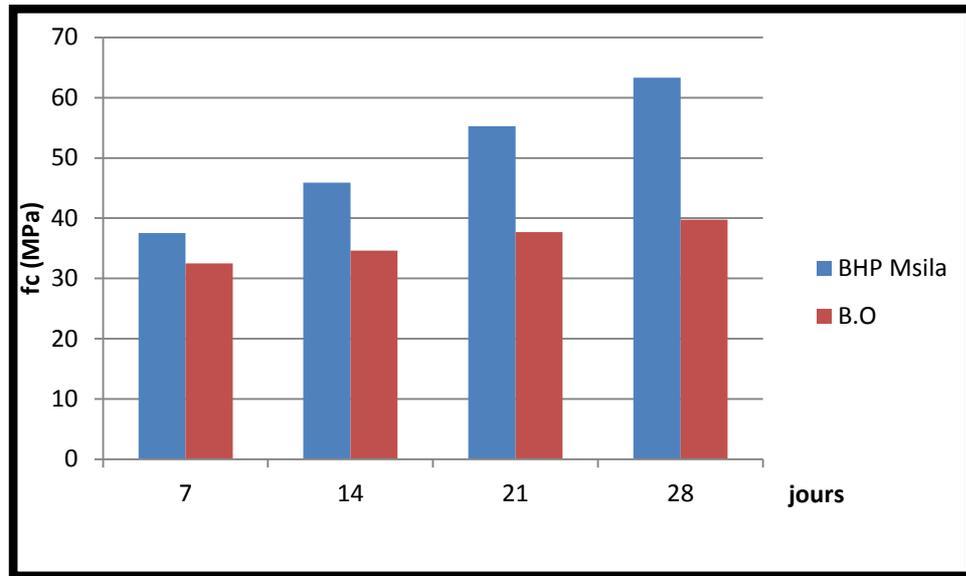


Figure VI.3 : la résistance à la compression des bétons ordinaire et BHP (ciment M'sila).

Pour le troisième type de ciment CPJ CEM II/B (M'sila), on remarque qu'il y a une augmentation intéressante de la résistance à la compression du béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Tous les valeurs du coefficient de variation V sont inférieures à 8% ce qui donne une confection des éprouvettes conforme a la norme (valeur excellentes).

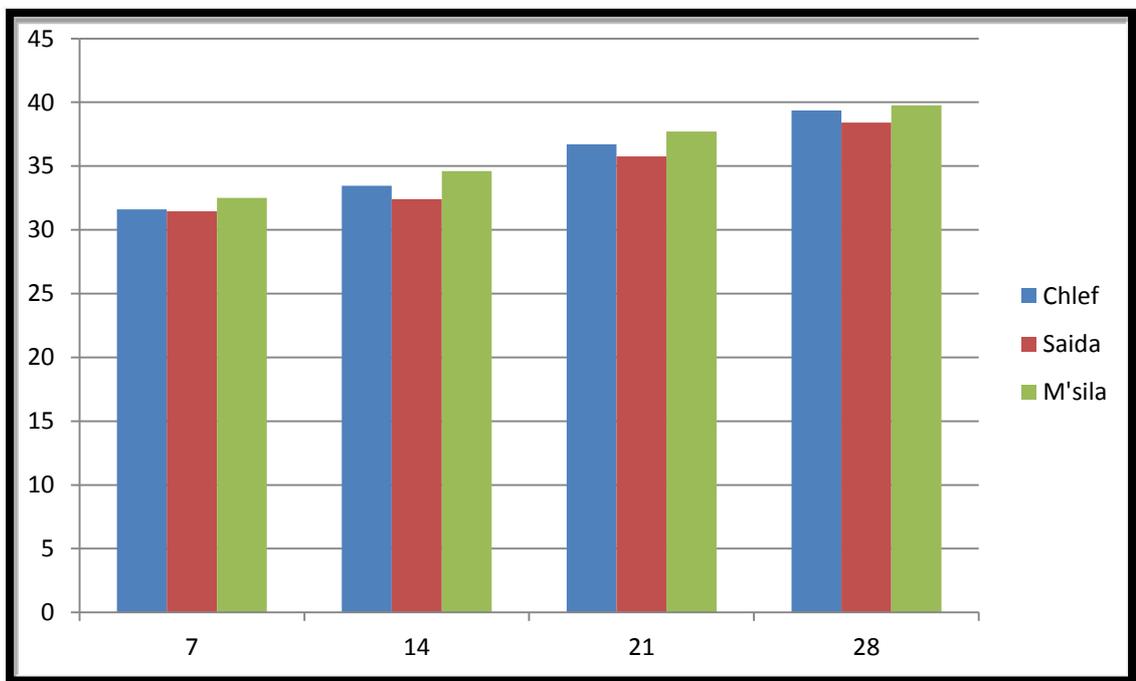


Figure VI.4 : la résistance à la compression des bétons ordinaires

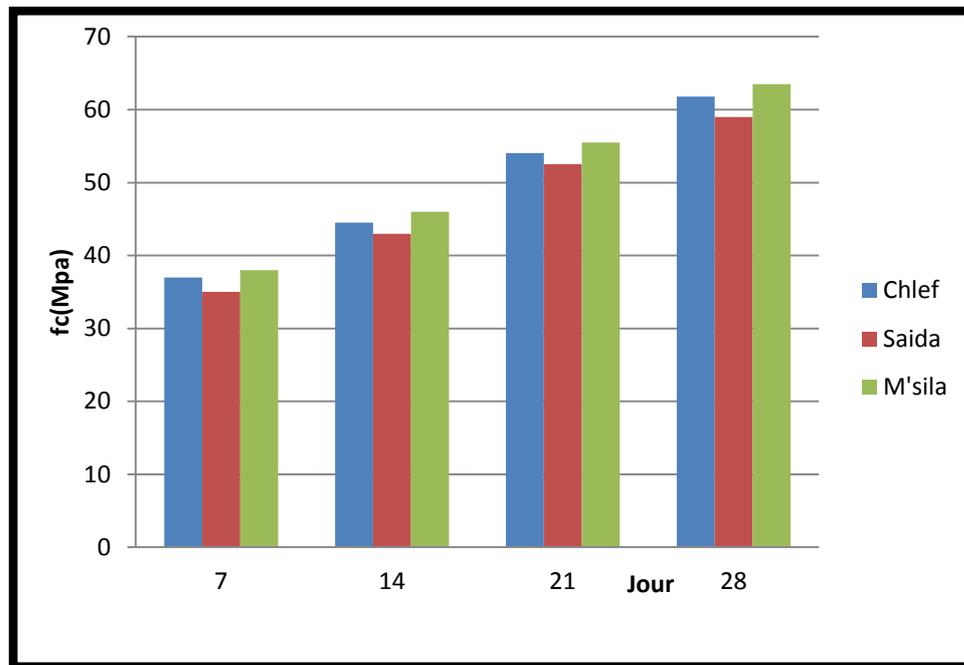


Figure VI.5 : la résistance à la compression des bétons à hautes performances.

A partir des résultats des figures des essais de compression la résistance du béton à hautes performances est plus importante que celle du béton ordinaire pour tous les types de ciment.

Ainsi le type de ciment de M'sila donne des résultats significatifs par rapport aux autres types (Chlef, Saida).

VI.5.2. Résistance à la traction par flexion à quatre points :

Les résultats des essais de traction par flexion quatre points des éprouvettes prismatiques (10x10x40) cm conservées dans l'eau à 20°C sont résumées dans les tableaux ci-après :

Tableau VI.7 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe A (CHLEF).

Type de béton	Age (jours)	Résistance à la traction (MPa x 10 ⁻¹)
BO	7 j	1,5
	14 j	1,7
	21 j	3,15
	28 j	3,9
BHP	7 j	1,8
	14 j	2,5
	21 j	3,35
	28 j	4,55

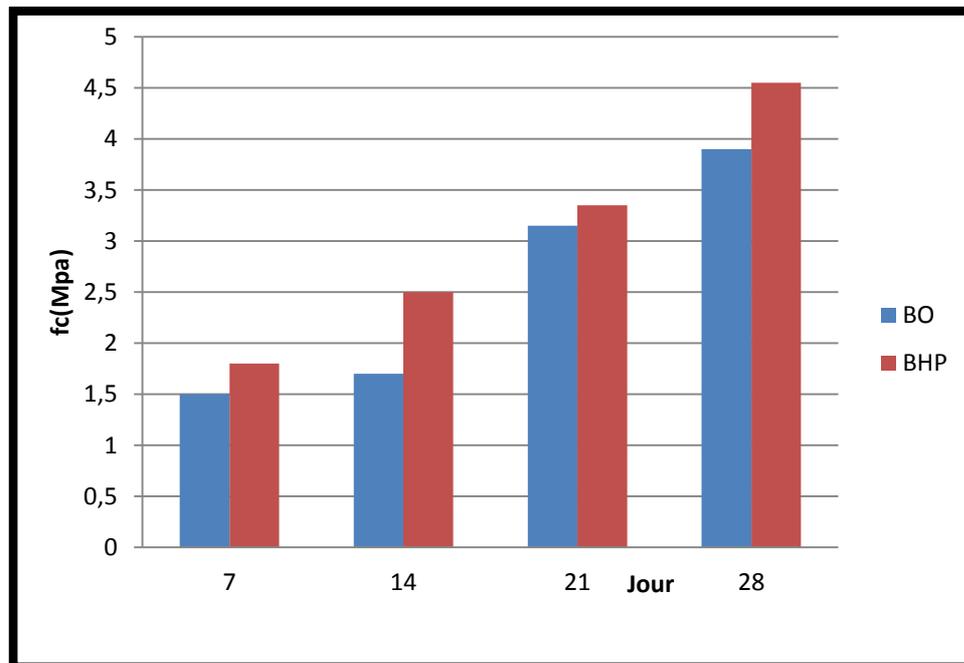


Figure VI.6 : la résistance à la traction des bétons réalisés par ciment de Chlef.

On remarque qu'il y a une augmentation de la résistance de traction par flexion de premier type de ciment CPJ CEM II/A (Chlef) pour des bétons à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Tableau VI.8 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe A (SAIDA).

Type de béton	Age (jours)	Résistance à la traction (MPa x 10 ⁻¹)
BO	7 j	1,4
	14 j	2,1
	21 j	2,9
	28 j	3,8
BHP	7 j	1,6
	14 j	2,6
	21 j	3,1
	28 j	4,35

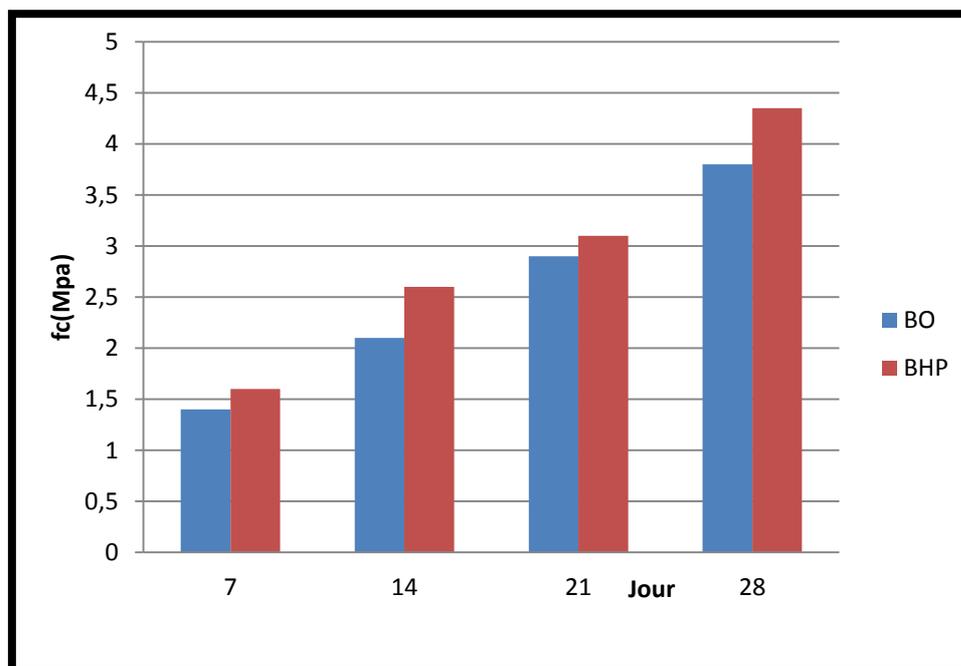


Figure VI.7 : la résistance à la traction des bétons réalisés par le ciment de Saida.

On remarque qu'il y a une augmentation de la résistance de traction par flexion de deuxième type de ciment CPJ CEM II/A (Saida) pour du béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

Tableau VI.9 : résultat de la résistance en traction par flexion de béton du ciment de classe B (M'SILA).

Type de béton	Age (jours)	Résistance à la traction (MPa x 10 ⁻¹)
BO	7 j	1,7
	14 j	2,25
	21 j	3,25
	28 j	4,1
BHP	7 j	1,9
	14 j	2,85
	21 j	3,5
	28 j	4,75

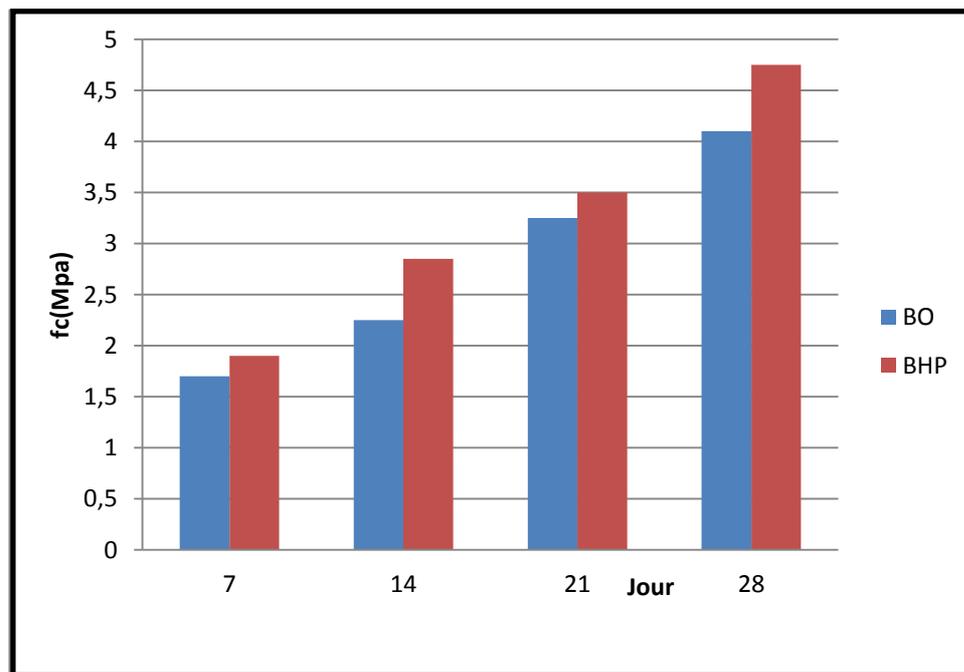


Figure VI.8 : la résistance à la traction des bétons réalisés par le ciment M'sila.

On remarque qu'il y a une augmentation de la résistance de traction par flexion de troisième type de ciment CPJ CEM II/B (M'sila) pour du béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire.

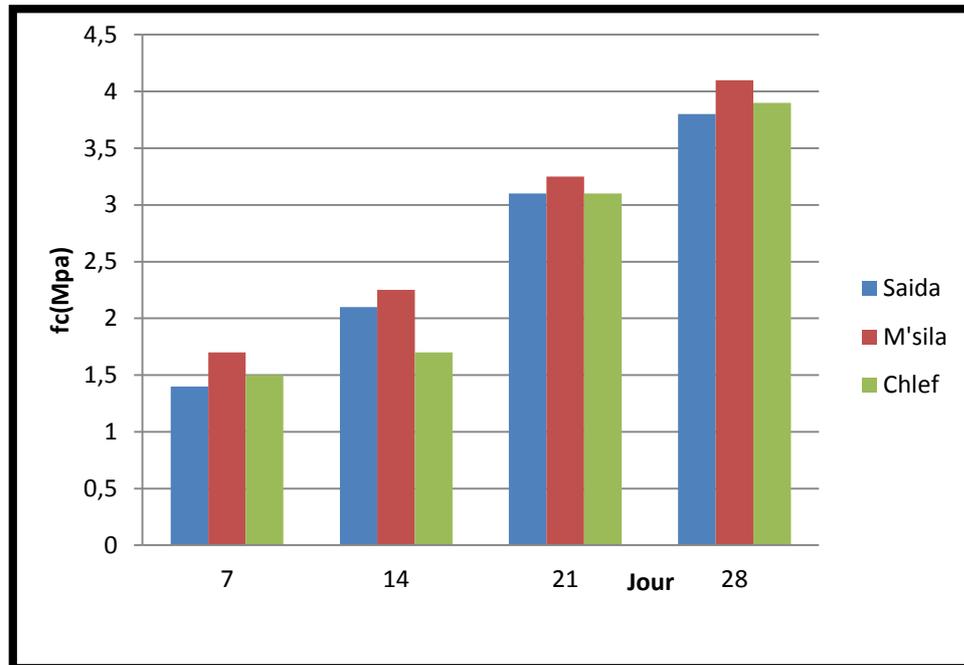


Figure VI.9 : la résistance à la traction par flexion des bétons ordinaires.

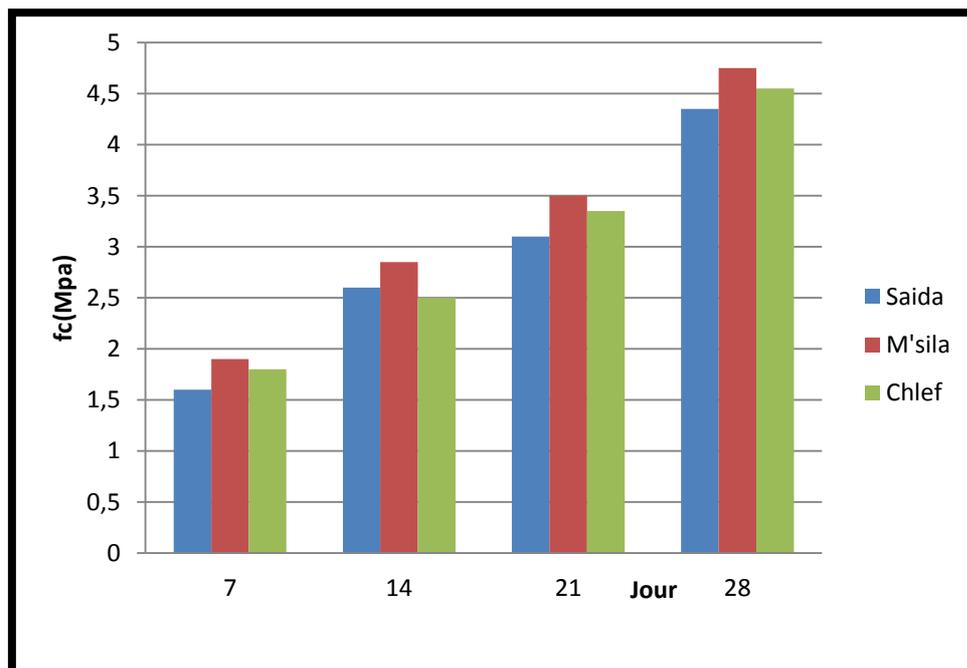


Figure VI.10 : la résistance à la traction par flexion des bétons à hautes performances.

A partir de notre travaux expérimentaux on trouve que la résistance à la traction par flexion de type de ciment M'sila élevée par rapport les autres types.

VI.5.3. Module d'élasticité :

Les valeurs des modules d'élasticités sont résumées dans les tableaux suivant :

Tableau VI.10 : module d'élasticité de béton du ciment de classe A (Chlef).

Type de béton	Age (jours)	fc(MPa)	Module d'élasticité EC (MPa) $EC=3,3\sqrt{f_{cj}+6,9}$
BO	7 j	31,6	25,45
	14 j	33,45	25,98
	21 j	36,7	26,89
	28 j	39,35	27,6
BHP	7 j	36,55	26,85
	14 j	44,45	28,9
	21 j	54,05	31,16
	28 j	61,8	32,84

Tableau VI.11 : module d'élasticité de béton du ciment de classe A (Saida).

Type de béton	Age (jours)	fc(MPa)	Module d'élasticité EC (MPa) $EC=3,3\sqrt{f_{cj}+6,9}$
BO	7 j	31,45	25,4
	14 j	32,4	25,68
	21 j	35,75	26,63
	28 j	38,4	27,34
BHP	7 j	35,7	26,61
	14 j	43,4	28,63
	21 j	52,8	30,87
	28 j	59,5	32,35

Tableau VI.12 : module d'élasticité de béton du ciment de classe B (M'sila).

Type de béton	Age (jours)	fc (MPa)	Module d'élasticité EC(MPa) $EC=3,3\sqrt{f_{cj}+6,9}$
BO	7 j	32,5	25,71
	14 j	34,6	26,31
	21 j	37,7	27,16
	28 j	39,75	27,7
BHP	7 j	37,55	27,12
	14 j	45,9	29,25
	21 j	55,25	31,42
	28 j	63,3	33,15

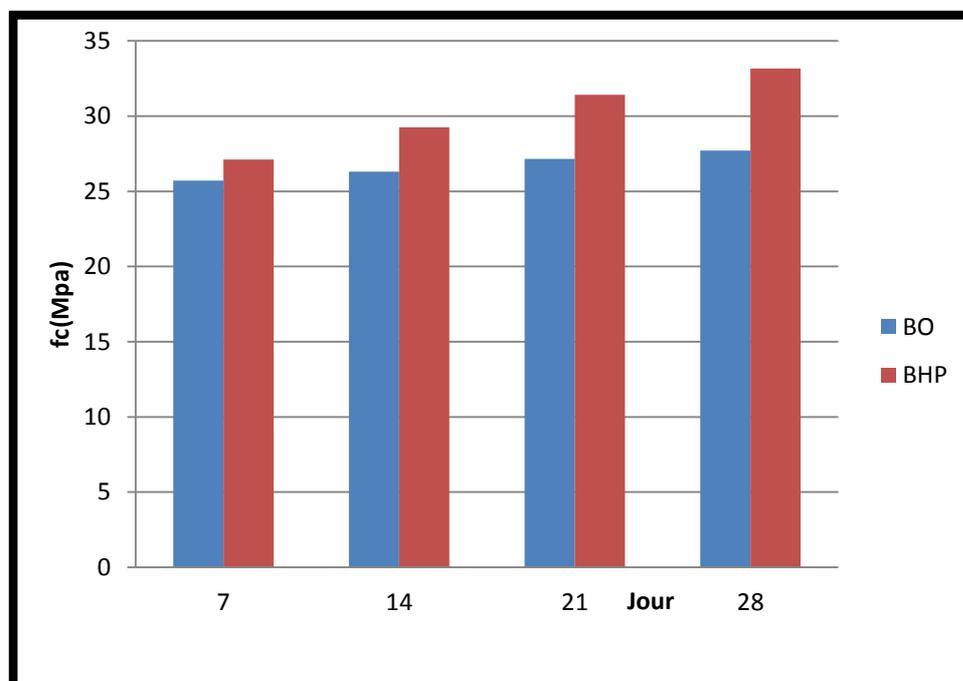


Figure VI.11 : module d'élasticité de béton du ciment de classe B (M'sila).

Le travail présenté dans ce manuscrit concerne la caractérisation expérimentale de l'influence du type de ciment sur le comportement mécanique d'un béton à hautes performances.

L'étude bibliographique a montré les principales caractéristiques du comportement mécaniques des matériaux.

Dans un premier chapitre, nous avons présenté l'état de la connaissance sur les constituants du béton, en explicitant les différentes caractéristiques à prendre en compte dans les formulations.

Nous avons consacré le deuxième chapitre aux caractéristiques du béton, nous y présentons les caractéristiques à l'état frais et durci repris dans les différents guides.

L'étude théorique développée à travers le troisième chapitre constitue à l'étude de l'emploi du béton à hautes performances, nous y présentons les exemples d'application du béton à hautes performances.

Le quatrième chapitre a fait l'objet de la formulation du béton, on cherchera pour formuler un béton à haute performance, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire

Le cinquième chapitre expose le programme expérimental effectué. Nous avons défini les caractéristiques physiques, des différents composants du béton ainsi la fabrication des éprouvettes cylindriques de 16x32 dont les extrémités ont été préalablement rectifiées, soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture, et des essais de flexion sur des éprouvettes prismatiques 10x10x40 à quatre points ont été effectués en béton ordinaire et en béton à hautes performances a différent types de ciment.

Au sixième et dernier chapitre, nous avons présenté les résultats et l'interprétation des résultats expérimentaux menés sur six mélanges de bétons ordinaire et béton à hautes performances, formulés par la méthode de Dreux Gorisse dont le principe consiste en la détermination des résistances mécaniques à la compression et à la traction à 7,14,21 et 28 jours.

Une grande part du travail présenté dans ce mémoire a consisté en la mise au point, au développement de la procédure expérimentale.

Un béton ordinaire de référence (témoin) et trois bétons modifiés ayant des types de ciment différents ont été formulés. Une procédure de fabrication et de conservation du béton a

été établie afin d'assurer une bonne reproductibilité du matériau. Une étude sur l'évolution de la résistance à la rupture en compression simple des bétons en fonction de leur âge et des conditions de conservation a été réalisée.

La mise au point des essais de compression et de traction a permis d'effectuer des tests sur des éprouvettes cylindriques de 16x32 et prismatiques de 10x10x40.

Les problèmes de surfaçage des cylindres du béton, ont été résolus grâce à un disque néoprène.

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'influence du type de ciment dans le mélange du béton sur son comportement mécanique.

Ces essais montrent que le type de ciment de M'sila (CEM II /42,5) augmente la résistance mécanique (63.3 MPa en compression et 40.75 en traction 28 jours) en comparaison avec le ciment de Chlef et de Saida.

Les conclusions de ce mémoire laissent penser qu'il y a intérêt à connaître mieux le composant essentiel dans la fabrication du béton qui est le ciment (fabrication, clinkerisation, ajouts ...etc)

Pour le développement des B.H.P, le superplastifiant reste et restera le composant essentiel dans la formulation de ce matériau, son dosage semble dépendre du degré d'hydratation du ciment qui est caractérisé par la réactivité de ce ciment.

Derrière tout cela, l'apparition des bétons de hautes performances dans la pratique des chantiers pourrait faire croire qu'à la formulation près, ces matériaux s'utilisent comme des bétons de structure classiques, leur niveau de performances est beaucoup plus sensible à la moindre variation des paramètres de composition.

Il ne reste qu'à souhaiter que, avec le développement des B.H.P. Les cimentiers développent des ciments ou des combinaisons de matériaux cimentaires particulièrement adaptés à leurs fabrications et que les producteurs de superplastifiants fassent de même, de façon que, d'ici quelques années, la production et la livraison d'un béton H.P de E/C est 0,29 soient aussi faciles que celles d'un béton de 0,60 aujourd'hui.

Il semble, à notre avis intéressant de prouver qu'il est possible de fabriquer un B60 ($f_{c28}=60\text{MPa}$) avec un ajouts minéraux dans un site donné (territoire Algérien), il suffit de choisir un granulats concassés propre et résistant, un ciment dont sa teneur en C3A est extrêmement faible et un superplastifiant permettant de réduire efficacement le rapport eau/ciment entre 0,40 et 0,30. C'est essentiellement une question de contrôle de qualité. Si le

CONCLUSION GENERALE

contrôle des matières premières est rigoureux et la surveillance est appropriée, il n'y a aucun problème.

Pour finir, nous formulons les recommandations suivantes:

- L'estimation précise du dosage en eau ;
- Amélioration du contrôle d'ouvrabilité ;
- Amélioration des méthodes de dosage des plastifiants et fluidifiants.

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des notations

Introduction générale :1

CHAPITRE I :

Les constituants du béton

I.1.Introduction :.....4

I.2. Le ciment:5

 I.2.1.Définition :6

 I.2.2.Les constituants de base des ciments :7

 I.2.2.1.Les autres constituants des ciments :8

 I.2.3.Fabrication du ciment :8

 I.2.4.Types de ciment :8

 I.2.5.Classe de résistance du ciment :10

I.3.Les granulats :11

 I.3.1.Définition :11

 I.3.2.Dimensions des granulats :11

 I.3.3.Propriétés des granulats :11

 I.3.4.Module de finesse :12

 I.3.5.Adhérence au liant :13

 I.3.6.Analyse granulométrique :13

 I.3.7.Composition granulométrique :13

I.3.8. Les type des granulats :	14
I.3.9. Caractéristiques physiques des granulats :	14
I.4. Eau de gâchage :	14
I.5. Fumée de silice :	16
I.5.1. Obtention d'un BHP à base de la fumée de silice :	17
I.5.2. Mode d'action de la fumée de silice dans le BHP :	17
I.5.3. Avantages de la fumée de silice :	18
I.6. Les Adjuvants :	18
I.7. Conclusion :	1

CHAPITRE II :

Les caractéristiques du béton

II.1. Introduction :	21
II.2. Les caractéristiques mécaniques des bétons :	21
II.2.1. La résistance :	21
II.2.2. Résistance à la compression :	22
II.2.3. Résistance en traction :	23
II.2.4. Résistance a l'abrasion :	24
II.2.5. Module d'élasticité :	24
II.2.6. Durabilite du beton :	25
II.3. Les caractéristiques physiques des bétons :	25
II.3.1. Masse volumique :	25
II.3.2. Fluage du béton :	25
II.3.3. Retrait et gonflement :	26
II.4. Facteur influençant sur le comportement mécanique des bétons :	26
II.4.1. Influence du rapport C/E :	26
II.4.2. Influence de la qualité du ciment :	28
II.4.3. Influence du dosage en ciment et du dosage en eau :	29

II.4.4.Propriété des gros granulats :.....	30
II.4.5.Influence du type de granulats :.....	31
II.4.6.Influence du volume en gros granulats :.....	31
II.4.7.Influence de la qualité du ciment :	32
II.4.8.Influence de la température initiale :.....	34
II.5.Conclusion :.....	35

CHAPITRE III :

L'emploi du béton a hautes performance

III.1.Introduction :	37
III.2.Les avantage des BHP :.....	37
III.3. Exemple d'application de BHP :.....	38
III.3. 1.Le pont de Joigny (Bourgogne, France.1989) [26] :.....	38
III.3.2. Pont « Stichtse » au Pays-Bas :.....	39
III.3.3. La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986) :.....	40
III.3. 4. Nova Scotia-Toronto :.....	40
III.3.5. Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001):.....	41
III.3.6.Les tours cœur-défenses :.....	41
III.3.7. Plates-formes pétrolières en Norvège :.....	42
III.3.8 .Le Water Tower Place:.....	43
III.3.9. La Pacific Tower (France) :.....	43
III.3.10. Le pont sur l'Elorn :.....	44
III.3.11. Le pont de joigny:.....	44
III.3.12. Le pont de Normandie:.....	45
III.3.13. Tunnel de Barcelona:.....	46
III.3.14. Le Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée (Mucem, 2010).....	46
III.3.15. Le pont de l'île de Ré :.....	46

III.3.16. Tunnel sous la Manche (France et Angleterre):.....	48
III.4. Conclusion :.....	48

CHAPITRE IV :

Formulation du béton

IV.1.Introduction :.....	50
IV.2.Objectifs d'une formulation :.....	50
IV.3.La composition du béton :.....	51
IV.4. Critères en fonction de la destination des bétons :.....	52
IV.5. L'approche de la formulation :.....	52
IV.5.1. Dosage en ciment :.....	52
IV.5.2. Choix des granulats :.....	53
IV.6. Formule de Féret :.....	54
IV.7. Les méthodes de la formulation d'un béton :.....	55
IV.7.1.Formulation d'un béton selon la méthode Britannique :	55
IV.7.2.Formulation d'un béton selon la méthode Américaine :	55
IV.7.3.Méthode de Bolomey :.....	56
IV.7.4.Méthode d'Abrams :.....	57
IV.7.5.Méthode de Faury :.....	58
IV.7.6.Méthode de Vallette :.....	60
IV.7.7.Méthode de Joisel :.....	61
IV.7.8.Methodes de G.Dreux :	62
IV.7.9.Affaissement au cône d'Abrahams :	65
IV.8.Conclusion :.....	66

CHAPITRE V :

Essais sur les bétons

V.1.Introduction :.....	69
-------------------------	----

SOMMAIRE

V.2.Choix des matériaux utilisés et essais réalisés :	69
V.3.Les ciments :	69
V.3.1.Classifications des ciments étudiés :	69
V.3.2.Détermination de la masse volumique apparente:	70
V.3.3.Détermination de la masse volumique absolue :	71
V.3.4.Essai sur la pâte de ciment(Essai de consistance) :	72
V.3.5. Mesure des temps de début et fin de prise :	73
V.4.Sable :	74
V.4.1.Les caractéristiques physiques :	75
V.4.2.L'équivalent de sable :	75
V.5.Le gravier :	78
V.5.1.Les caractéristiques physiques :	78
V.6 .L'eau de gâchage :	80
V.7 .Superplastifiants :	81
V.8. Proportion des matériaux :	82
V.9. Formulation du béton témoin :	82
V.10. Formulation du B.H.P :	83
V.11.Fabrication des échantillons :	84
V.12.Composition des bétons frais :	85
V.13.L'ouvrabilité du béton frais :	86
V.14.Démoulage et conservation des échantillons :	88
V.15.Surfaçage des éprouvettes :	89
V.15.1.Détermination de la résistance à la compression (f_{cj}) :	89
V.15.2.Détermination de la résistance à la traction par flexion :	90

SOMMAIRE

VI.1.Les essais sur les ciments :.....	93
VI.2.Les essais sur Le sable :.....	93
VI.3.Les essais sur Le gravier :.....	93
VI.4.Les essais sur le béton durci :	94
VI.4.1.Caractérisation des bétons utilisés :.....	94
VI.4.2.La composition d'un béton à Hautes Performances :.....	94
VI.5.Propriétés du béton durci :.....	94
VI.5.1.Résistance en compression simple :.....	95
VI.5.2. Résistance à la traction par flexion à quatre points :.....	99
VI.5.3. Module d'élasticité :.....	104
CONCLUSION GENERALE :.....	106

III.3.16. Tunnel sous la Manche (France et Angleterre):

Le B.H.P est caractérisé par une résistance de 56MPa à 28j pour un dosage en ciment de 400 kg /m³, affaissement 12 cm).



Figure (III.16): Tunnel sous la Manche (France et Angleterre) [27]

III.4. Conclusion :

Le béton haute résistance (BHP), qui a une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale utilisé traditionnellement.

Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux.

Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue des grandes espaces.

L'édifice. Une telle solution représente évidemment des économies de main-d'œuvre considérables puisqu'il n'est plus nécessaire de construire des coffrages de poteaux dont la section diminue au fur et à mesure que l'on monte dans les étages supérieurs de l'édifice (Cité en référence [27]).



Figure (III.7): Le Water Tower Place [27]

III.3.8. La Pacific Tower (France) :

La Pacific Tower à La Défense a été l'occasion d'une nouvelle avancée des BHP dans le domaine du bâtiment, pour la première fois en France, la structure verticale d'une tour a été réalisée avec un béton de hautes performances de classe B 60, mis en œuvre industriellement sur le chantier.

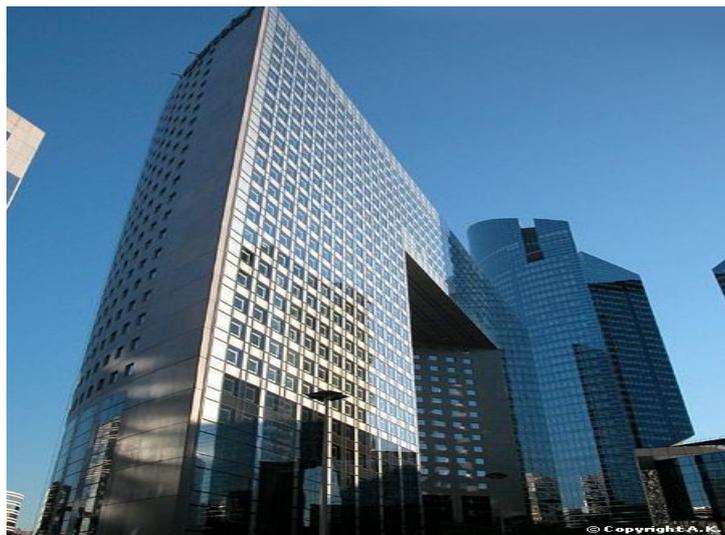


Figure III.8. La Pacific Tower (France) [27]