

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences et Technologie et sciences de la Matière

N° d'ordre :
N° de série :



DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE
ET DE GENIE CIVIL

Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER

Spécialité : Génie civil
Option : Géo Matériaux
Préparé par : REZIG DJEBAILI

Thème

*Etude d'un béton à haute performance à base de sable de dune
destinés aux ouvrages
en milieu agressif et très agressif*

Soutenu publiquement le 05 / 06 / 2012

Devant le jury composé de :

Mr BEBBA AHMED ABDELHAFID	Maître de conférence (A)	U. Ouargla	Président
Mr KRIKER ABDELOUAHED	Professeur	U. Ouargla	Examineur
Mr BOUTOUTAOU DJAMEL	Maître de conférence (A)	U. Ouargla	Examineur
Mr BENTEBBA MOHAMED TAHAR	Maître de conférence (A)	U. Ouargla	Promoteur

Année 2011/2012

Soutenu publiquement le 26/06/2004

Devant le jury composé de :

Mr HALILAT Med Tahar	Maître de conférence	U. Ouargla	Président
Mr KHENFER Med Mouldi	Professeur	C.U.Laghouat	Examineur
Mr KRIKER Abdelouahd	Maître assi chargé de cours	U. Ouargla	Examineur
Mr BENTEBBA Med Tahar	Maître de conférence	U. Ouargla	Promoteur

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu mon DIEU Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Ce mémoire n'aurait pu être menée à bien sans le soutien et l'aide de nombreuses personnes.

Je remercie vivement mon promoteur de mémoire, Monsieur BENTEBBA MOHAMED TAHAR, Maître de conférence à l'Université de KASDI MERBAH à Ouargla, pour nous avoir proposé un sujet passionnant et avoir dirigé et suivi avec intérêt notre travail, pour sa sollicitude, ses conseils et ses encouragements permanents.

Ainsi qu'au autres membres du jury, Monsieur le président de jury BEBBA AHMED ABDELHAFID, Monsieur le professeur le chef de département de Génie civil KRIKER ABDELOUAHED et D^r BOUTOUTAOU DJAMEL, pour leur contribution à mon travail.

De plus, je tiens à remercier plus particulièrement Monsieur LAKHDAR LAMRI, Agent commercial de Granitex. Merci pour votre soutien, avec grand plaisir.

Mes remerciements vont aussi tout naturellement à Monsieur le directeur de laboratoire technique de sud (LTPS), unité de Ouargla. Aussi l'ensemble des membres du laboratoire, pour leur soutien qu'ils m'ont apporté.

Mes remerciements s'adressent ensuite à toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ces années de préparation de mon mémoire, professeurs, collègues et amis.

Mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement à mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent.

Résumé:

Les fluctuations du niveau de la nappe phréatique dans la région de Ouargla, le degré de salinité de cette eau, ont des conséquences très néfastes au niveau des infrastructures dans différentes constructions en béton ordinaire, notamment les ouvrages hydrauliques

Pour résister aux fluctuations de la nappe phréatique et aux agents agressifs en milieu aride. La conception d'un béton spéciale de haute performance BHP est nécessaire.

L'étude s'appuie sur la conception de cinq compositions de bétons (B10, B20, B30, B40 et B50) pour obtenir une bonne performance.

Les compositions des bétons étudiés sont:

B10: 100 % sable alluvionnaire sans cendre de palme.

B20: 100 % de sable de dune sans cendre de palme.

B30: 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune sans cendre de palme.

B40: 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune avec 5% de cendre de palme.

B50: 100 % de sable de dune avec 5% de cendre de palme.

Le béton obtenu a été soumis, dans la première partie, aux essais de compression et traction, dans la deuxième partie aux essais de carbonatation (dans les réseaux d'assainissement) et voir l'influence de l'eau de sebkhia sur la résistance mécanique du béton.

Le but recherché dans cette étude est la formulation d'un béton à haute performance à partir des matériaux disponibles localement, notamment par la valorisation du sable de dune corrigé avec le sable alluvionnaire et avec ajout de cendre de palme.

Les résultats obtenus dans cette étude

- L'utilisation de quatre classifications réduit les espaces granulaires et augmente la compacité et la résistance
- L'introduction de sable de dune de l'ordre de 25 % dans la conception du béton et 5% de cendres, augmente la valeur de la résistance de 100 %, dans les bétons B30 et B40.
- Nous pouvons dire clairement que la composition du béton à haute performance est le béton B40, de $f_{c28}=54\text{MPa}$

Mots clés: Béton à haute performance, sable de dune, sable alluvionnaire, ciment, cendre de palme, superplastifiant, résistance, carbonatation.

خلاصة:

إن التدببات في مستوى البساط المائي لمنطقة ورقلة، ودرجة الملوحة في هذه المياه هو محصلة ونتيجة جد ضارة على مستوى الهيكل السفلي في مختلف المنشآت المنجزة من الخرسانة العادية، خصوصا منشآت الري (الأساسات، شبكة التصريف الصحي... الخ).

من اجل مقاومة العدوانية الناجمة عن تدببات مستوى البساط المائي، والعناصر الضارة في الوسط الجاف، لمن الضروري إيجاد خرسانة خاصة عالية النجاعة.

هذه الدراسة تعتمد على إيجاد خمس تركيبات خراسانية (B50, B40, B30, B20, B10) وهذا من اجل الحصول على أحسن نجاعة .

هذه التركيبات الخراسانية هي كالتالي:

B10 : 100% رمل الوديان بدون رماد النخيل.

B20 : 100% رمل الكثبان بدون رماد النخيل.

B30 : 75% رمل الوديان مع 25% رمل الكثبان بدون رماد النخيل.

B40 : 75% رمل الوديان مع 25% رمل الكثبان بإضافة رماد النخيل.

B50 : 100% رمل الكثبان بإضافة رماد النخيل.

الخرسانة المحصل عليها، تخضع في الجزء الأول إلى تجارب الضغط والشد ، وفي الجزء الثاني إلى تجارب النجاعة بما فيها تجارب الكربنة (في شبكة الصرف الصحي)، وكذلك تأثير مياه السبخة على المقاومة الميكانيكية.

إن الهدف المرجو في هذه الدراسة هو إيجاد تركيبية خراسانية عالية النجاعة باستعمال مواد متوفرة محليا، خصوصا تنمين واستغلال رمل الكثبان، رمل الوديان، مع إضافة رماد النخيل.

النتائج المحصل عليها في هذه الدراسة:

- استعمال اربعة تصانيف في الخلطة الخرسانية تقلص من الفراغات وتزيد في المقاومة.
- ادراج رمل الكثبان بنسبة 25 في المئة مع 5 في المئة من الرماد يزيد في قيمة المقاومة الى 100 في المئة .
- ومنه نستطيع ان نقول ان تركيبية الخرسانة رقم 40 تعد خرسانة عالية النجاعة بمقاومة تساوي 54 ميغاباسكال خلال 28 يوما.

الكلمات المفتاح: خرسانة عالية النجاعة، رمل الكثبان ، رمل الوديان ، اسمنت مقاوم للأملح ، رماد النخيل، الملدنات، مقاومة، كربنة.

Abstract:

level fluctuations of Ouargla ,ground water, the salinity of this water, have very negative consequences in terms of infrastructure in various constructions in ordinary concrete, including hydraulic

To withstand the fluctuations of the groundwater and aggressive agents in the drylands. The design of a special high-performance concrete BHP is required.

The study is based on the confection of five concrete compositions (B10, B20, B30, B40 and B50) to obtain a good performance.

The compositions of the concretes studied are:

B10: 100% ashless alluvial sand palm.

B20: 100% sand dune ashless palm.

B30: 75% sand and 25% alluvial sand dune ashless palm.

B40: 75% sand and 25% alluvial sand dune with palm ash.

B50: 100% sand dune with palm ash.

The concrete obtained was subjected, first, test compression and tension, on the other hand, the performance tests is chosen testing carbonation (donations sewage systems) and the influence of water sabkha on the strength of concrete.

The aim in this study is the formulation of a high-performance concrete using locally available materials, including the valuation of fixed sand dune with alluvial sand and ash with added palm.

The obtained Results in this research:

- the utilisation of four classifications reduce the granular spaces and increase the compactness and the resistance
- the introduction of 25 % sand dune in the conception of the concrete and 5% of ash ,increase the resistance value to 100%,in the concretes B30 and B40 .
- we can say clearly that the composition of the concrete with highly performance is the concrete B40 with resistance equal at 54 mpa in 28 day.

Keywords: High performance concrete, sand dune, alluvial sand, cement, ash, superplasticizer, strength, carbonation.

Liste des Tableaux

I-1	Classification des bétons selon leurs affaissements au cône d'Abrams.....	04
I-2	Classe du béton ordinaire.....	05
I-3	Eprouvettes utilisées en compression et en traction.....	07
II-4	Classe du béton à haute performance (BHP) et (BTHP).....	15
II-5	Eprouvettes utilisées en compression et en traction.....	15
II-6	Catégories des granulats.....	22
II-7	Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.....	23
II-8	Forme des granulats.....	26
II-9	Influence du rapport G/S.....	27
II-10	Classe de ciment.....	30
II-11	Résistance à la compression du BHP en fonction Eau/Liant.....	31
II-12	Composition chimique et classification des cendres.....	33
II-13	:Caractéristique granulaires de la cendre traitée.....	43
II-14	Masse volumique et surface spécifique BET de la cendre volante traitée.....	43
II-15	Compositions théorique des bétons.....	44
II-16	Résistance a la compression.....	44
III-17	Composition du béton.....	46
III-18	Résultat de la résistance à la compression en fonction de E/C.....	46
III-19	Granulométrie des sables utilisés au Maroc.....	47
III-20	Les résultats de résistance obtenue par les compositions proposées (au Maroc).....	47
III-21	Composition du béton de sable (Ahmed chaouch).....	49
III-22	Résultats des résistances.....	49
III-23	Composition du béton de sable (Batata).....	50
III-24	Composition et résultats de résistance du béton.....	51
III-25	Résultats de résistance(E/C=0.7, teneur en adjuvant est de 2.5%).....	51
III-26	Composition des déférents types du béton (Bentata).....	51
III-27	Résultats de résistance des différents types du béton(Bentata).....	52
IV-28	Composition chimique et minéralogique de ciment CRS.(CPA CEM I42.5).....	54
IV-29	Caractéristiques mécaniques du ciment CRS.....	56
IV-30	Analyse chimiques des sables utilisés.....	56
IV-31	Caractéristiques physiques des différents sables utilisés.....	57
IV-32	Analyse granulométrique des différents sables utilisés.....	57
IV-33	Analyse chimiques des graviers utilisés.....	58
IV-34	Caractéristiques physiques des graviers mélangés 3/8 et 8/15.....	59
IV-35	Analyse granulométrique des différents graviers utilisés.....	59
IV-36	Composition chimique de l'eau.....	60
IV-37	Analyse chimique de la cendre.....	62

Liste des tableaux

IV-38	Caractéristiques physique de la cendre.....	62
IV-39	Caractéristiques physico-chimique du superplastifiant.....	63
IV-40	Comparaison entre les caractéristiques du sable alluvionnaire et celle du sable de dune.....	63
.		
V-41	La concentration des éléments agressifs.....	65
V-42	Composition théorique des différents bétons.....	77
V-43	Taux des ingrédients des compositions des bétons.....	77
V-44	Programme des essais sur bétons.....	80
V-45	Variation de l'affaissement et la teneur de superplastifiant.....	81
V-46	Masse volumique des différents bétons frais.....	81
V-47	Masse volumique des différents bétons durcis.....	82
V-48	Résistance à la compression des éprouvettes conservées à l'air libre.....	83
V-49	Ecart de quantité d'eau évaporé pour chaque béton.....	85
V-50	Résistance à la compression du béton B40 dans différents milieux.....	86
V-51	Résistance à la traction du béton B40 dans différents milieux.....	87
V-52	Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.....	89
V-53	Variation de la résistance par la vitesse du son et module d'élasticité dynamique.....	89
V-54	Résistance comparatives (ultra-son et compression).....	90
V-55	Variation du retrait du béton type (B40).....	92
V-56	Composition finale du béton type B40.....	93

Liste des figures

II-1 Schéma et graphes (retrait-fluage).....	17
II-2 Forme d'un granulat.....	21
II-3 Détermination de l'équivalent de sable piston.....	23
II-4 Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable (ES).....	25
II-5 Fuseaux préférentiels du sable.....	26
II-6 Résistance en compression de deux bétons. L'un le béton témoin sans adjuvant. L'autre avec fluidifiant.....	32
II-7 Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances.....	32
II-8: Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.....	37
II-9: relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression.....	38
II-10: Détermination du dosage en eau.....	38
II-11 Temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.....	39
II-12 Dosage en gros granulat.....	39
IV-13 Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.....	55
IV-14 Courbe granulométrique des différents sables avec le fuseau granulaire.....	58
IV-15 Courbe granulométrique des différents graviers.....	59
IV-16 Courbe granulométrique de gravier 25% (3/8) + 75% (8/15).....	60
V-17 Représentation schématique d'un granulat à l'état SSS.....	66
V-18 Détermination de l'état SSS pour un sable.....	66
V-19 Représentation schématique de la mesure de l'absorption et de la densité d'un gros granulat à l'état SSS.....	67
V-20 Représentation schématique d'un granulat mouillé.....	67
V-21 Représentation schématique d'un superplastifiant.....	69
V-22 Proportion des différents composants des bétons.....	78
V-23 Résistance à la compression des différents bétons.....	83
V-24 Influence de la cendre de palme sur différent béton (B20,B50 et B30,B40).....	84
V-25 Résistance à la compression du béton B40 dans différents milieux.....	86
V-26 Résistance à la traction du béton B40 dans différents milieux.....	87
V-27 Résistance par la vitesse de son du béton B40.....	90
V-28 Appareillage pour la mesure du retrait.....	91
V-29 Evolution du retrait	92
V-30 Pourcentage des ingrédients du béton type B40.....	93

Introduction générale:

Le béton se présente comme un mélange artificiel de cailloux, de graviers et de sable réunis entre eux à l'aide d'un liant hydraulique. Ce matériau composite est utilisé de nos jours aussi bien pour la réalisation des constructions les plus modestes, les ouvrages d'art les plus hardis, en passant par les bâtiments de grande hauteur.

L'emploi du béton, en grande quantité, nous permet d'affirmer que ce matériau est toujours en évolution. Ainsi, aujourd'hui, on dispose d'une large gamme de bétons et l'on choisit donc, pour chaque type d'ouvrage le béton adéquat. Nous citerons comme exemple les bétons légers, les bétons lourds,.....etc

Avec les exigences de la construction et la nature des ouvrages à réaliser, les chercheurs sont amenés à améliorer les propriétés du béton. La technologie des bétons à hautes performances (trouver la formule représentant la meilleure coordination entre maniabilité et résistance, ces deux caractéristiques étant généralement les plus importantes).

Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité soit en agissant sur la granulométrie en ajoutant des particules ultrafines, soit en ajoutant un adjuvant de type superplastifiant, soit le plus souvent les deux.

La porosité et la perméabilité du béton améliorent par ailleurs la durabilité. La résistance aux agressions chimique comme les bétons en milieu marin ou en milieu agressif (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides.....). La forte résistance au cycle gel-dégel et la faible perméabilité sont autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant durable.

Bien que la qualité du liant et la nature des agrégats soient des facteurs très importants pour avoir un béton de qualité, construire avec des matériaux peu coûteux et disponible en grande quantité est le but recherché par de nombreux pays en voie de développement.

Cependant la région de sud de l'Algérie présente des réserves très importantes en matériaux (sable de dune) en abondance et dont le techniques d'exploitation et de mise en œuvre peuvent être maîtrisées par des études assez poussées.

L'intérêt réside dans son utilisation rationnelle par correction ou avec d'autre matériaux ou ajouts d'adjuvants et autres, afin d'améliorer ces caractéristiques physico-chimiques ou mécaniques.

La fin des années 1980 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.

Les bétons à hautes performances (BHP), grâce à leur durabilité et résistances mécaniques élevées, sont de plus en plus utilisés dans la construction. Ces bétons manifestent parfois un comportement fragile appelé éclatement. Un des principaux paramètres régissant

l'éclatement est la perméabilité qui contrôle les transferts des fluides. Cette propriété est fonction de la microstructure du matériau, caractérisée par la porosité, la distribution des tailles de pores, la connectivité et la tortuosité du réseau poreux, la densité et l'ouverture des fissures

Le but recherché dans cette étude est la formulation d'un béton à haute performance à partir des matériaux disponibles localement, notamment le sable de dune avec l'utilisation de la cendre de palme et super plastifiant.

Pour répondre à cette problématique, cette étude se décompose en deux parties, chaque partie partagée en trois chapitres.

Première partie:

- Une recherche bibliographique
- **Dans le premier chapitre** nous exposons les propriétés essentielles d'un béton ordinaire.
- **Dans le deuxième chapitre** nous présentons les propriétés essentielles d'un béton à haute performance (BHP).
- **Dans le troisième chapitre** nous citerons les recherches effectuées sur l'exploitation des sables de dune dans le secteur bâtiment et travaux publics.

Deuxième partie:

- Une étude expérimentale.
- **Dans le quatrième chapitre** nous présentons les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des différents matériaux à utiliser dans notre étude.

Le cinquième chapitre l'étude porté sur la formulation des bétons (BHP) avec une série d'essais sur les différents bétons à haute performance (B10, B20, B30, B40, B50).

B10: 100 % sable alluvionnaire sans cendre de palme.

B20: 100 % de sable de dune sans cendre de palme.

B30: 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune sans cendre de palme.

B40: 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune avec 5% de cendre de palme.

B50: 100 % de sable de dune avec 5% de cendre de palme.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés sous forme de graphes et de tableaux.

Ensuite une analyse des résultats est faite **dans le dernier chapitre**, avec (discutions et commentaires).

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'étude élaborée, et donnons des recommandations à prendre en considération dans les prochaines recherches pour arriver à de meilleurs résultats.

Chapitre I:*Propriétés essentielles des bétons ordinaires***Introduction:**

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre (sable, gravier, cailloux), le liant qui est généralement un ciment portland, et l'eau. Ce dernier constituant joue double rôles: assure l'hydratation du ciment, et participe activement à l'ouvrabilité du béton frais, qui lui donne une rhéologie satisfaisante.

Le liant fait prise et durcit pour obtenir finalement une résistance plus ou moins élevée qui dépend de la nature propre du liant.

I-1 Ouvrabilité :

Le béton est mis en place dans le coffrage. Cette opération doit pouvoir se faire avec le maximum de facilité. D'abord, pour raccourcir le temps de travail nécessaire à la mise en place, ensuite, pour éviter de découvrir au moment du décoffrage, des désordres difficilement réparables voir irréparables, conséquence de la faible maniabilité du matériau. On dira qu'un béton est d'autant plus maniable ou ouvrable, qu'il est d'autant plus aisé à mettre en place dans les coffrages.

Le problème est de quantifier cette ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps. Donc le béton avant prise, se classe suivant une échelle de fluidité croissante: très ferme, ferme, plastique, mou et très mou. Par des essais de consistance très divers. Nous ne décrivons ici que ceux qui sont le plus utilisés (Essai d'affaissement au cône d'Abrams) [1]

Tableau I.1: Classification des bétons selon leur affaissement au cône d'Abrams. [1]

Béton	Affaissement (cm)
Très ferme	0 à 2
Ferme	3 à 5
Plastique	6 à 9
Mou	10 à 13
Très mou	> 13

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm. [1]

I -2 Résistance mécanique:

Introduction:

En général la résistance des matériaux est sa capacité de résister aux actions des forces externes (les charges, les conditions climatiques) qui sont définies en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

Les propriétés principales du béton durci sont la résistance à la compression et la résistance à la traction.

I -2-1 Résistance à la compression:

La résistance à la compression est définie par des essais de compression simple, à 28 jours d'âge, sur des éprouvettes cylindriques dont la hauteur est égale au double de leur diamètre. [2]

Le béton ordinaire se classe selon le tableau suivant:

Tableau I.2: Classe du béton ordinaire [3]

classe	Résistance caractéristique à la compression à 28 jours (MPa)
Bétons ordinaires	20 à 50

La résistance à la compression du béton est liée par la relation suivante.

$$f_{cj} = \frac{F}{S}$$

F: l'effort de compression maximal.

S: la section normale de l'éprouvette.

La résistance caractéristique f_{cj} obtenue à **j** jour est égale à: [4]

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{4,76 + 0,83 \cdot j} \quad \text{si } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

I -2-2 Résistance à la traction:

Expérimentalement, la résistance à la traction d'un béton peut se mesurer par trois méthodes.

Essais par traction directe :

On peut également déterminer la résistance à la traction par une mesure directe, cependant l'essai est assez délicat à réaliser. [1]

Cet essai s'effectue en faisant agir un effort de traction suivant l'axe d'une éprouvette allongée.

La rupture est toujours brutale. Elle est due à la formation d'une fissure qui sépare l'éprouvette en deux morceaux, et dont la direction est un plan perpendiculaire à l'effort de traction. On obtient alors directement:

$$f_{tj} = \frac{F}{S}$$

F: l'effort de traction maximal en déca newtons.

S: la section normale de l'éprouvette en cm²

Les règles BAEL définissent la résistance caractéristique à la traction, à partir de la résistance à la compression, par les formules suivantes: [3]

$$f_{tj} = 0.06 f_{cj} + 0.6 \quad \text{si } f_{cj} < 60 \text{ MPa}$$

f_{tj} et f_{cj} exprimée en MPa

Essais de traction par fendage (ou essai brésilien):

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées.

La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée **F** par la formule empirique suivante: [4]

$$f_{tj} = \frac{0,85 \cdot 2F}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{0,55 \cdot F}{d \cdot l}$$

0.85: représente le coefficient de correspondance entre la résistance à la traction pure et la résistance à la traction par fendage.

F : représente la charge de compression transversale provoquant la rupture par fendage.

d : représente diamètre de l'éprouvette testée .

l : représente la longueur de l'éprouvette testée .

Essais de traction par flexion :

Cet essai permet de contrôler la résistance d'un béton sous l'action d'un moment de flexion.

Il consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique de section ($h \times h$) et de portée (L) à une charge concentrée appliquée au milieu (P), on utilise l'essai de flexion à quatre points (deux charges appliquées symétriquement) qui offre l'avantage de présenter toute une zone de moment maximal constant. [4]

La contrainte limite du béton se déduit par application de la formule suivante:

$$f_{ij} = \frac{M.V}{I}$$

M : moment de flexion est égale $\frac{P.a}{2}$.

$$V: V = \frac{a}{2}$$

I : moment d'inertie est égale $a^4/12$

I -2-3 Moules et éprouvettes utilisés:

La résistance à la compression du béton se mesure par écrasement de cylindres de 200 cm^2 de section et de 32 cm de hauteur. les éprouvettes sont coulées soit dans des moules métalliques, soit dans des moules en carton imperméabilisé . [4]

Le tableau suivant donne les principales dimensions utilisées pour la détermination de la résistance d'un béton en compression et en traction. [4]

Tableau I.3: Eprouvettes utilisées en compression et en traction [4]

Cylindres (diamètre x hauteur) cm^2 en compression	Cubes (arête x arête) cm^2 en traction
(10 x 20)	(10 x 10)
(15 x 30)	(15 x 15)
(16 x 32)	(20 x 20)
(25 x 50)	-

Le mécanisme de rupture d'une éprouvette soumise à un essai de compression est évidemment influencé par la géométrie et la taille de l'éprouvette.

Conclusion

En pratique, on lie souvent la résistance ultime du béton en compression, qui apparaît comme facteur essentiel dans la conception des ouvrages; avec le rapport E/C . Cependant on trouve d'autres facteurs qui jouent un rôle très important sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton. Ces facteurs sont:

- l'âge du béton.
- La nature et le dosage en ciment;
- La nature minéralogique des granulats;
- L'adhérence de la pâte aux granulats;
- Le dosage en eau;

-
- L'humidité;
 - Les conditions de mise en œuvre et la qualité du contrôle sur chantier.

I -3 Retrait:

Introduction:

En l'absence de toute contrainte, le béton se déforme spontanément. Ces déformations sont liées à l'humidité du milieu de conservation. Pour le béton conservé à l'air, La pâte de ciment se rétracte à l'air sec, ce phénomène se poursuit dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui cause des fissures que l'on observe dans la pièce en béton. [5]

I -3-1 Différents types de retrait:

Retrait hydraulique avant prise:

Le retrait avant prise du essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation, à la chaleur, soit par absorption (cas d'un support poreux). Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction , qui est alors pratiquement nulle , se traduit par l'apparition, a la surface du béton encore plastique, de crosses crevasses peu profondes. [2]

Retrait thermique:

La prise puis le durcissement du béton s'accompagnent d'un dégagement de chaleur. Il est donc bien évident que lors du refroidissement le matériau subira une contraction. [2]

Retrait hydraulique après prise:

Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier et d'autre part de la contraction au séchage, est de l'ordre de 0.2 à 0.4 mm/m pour le béton. Dans le cas de béton à faible rapport E/C la dessiccation d'origine peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe. [2]

I -3-2 Facteur agissant sur l'amplitude du retrait:

Composition du béton: [5]

- la quantité d'eau de gâchage utilisée.
- les vides d'air dus à un mauvais serrage.
- la présence d'éléments fins qui proviennent en général de l'emploi de granulats argileux insuffisamment lavés, ou de sables de broyage insuffisamment dépoussiérés.
- la finesse de la mouture du ciment, car cela nécessite une quantité d'eau de gâchage plus importante pour mouiller le ciment.

Nature du ciment:

Les ciments à forte proportion de laitier (ciment de fer) conduisent à des retraits plus élevés que les portlands. Environ 1.3 à 1.4 fois plus. [5]

Chlorure de calcium :

D'une manière générale, tous les produits ajoutés au béton augmentent le retrait. Parmi ces produits, le plus utilisé est le chlorure de calcium; il est très employé car il est très efficace en tant qu'antigel et accélérateur de prise et de durcissement. [5]

Carbonatation:

La carbonatation du ciment durci, qui se produit peu à peu sous l'action de l'anhydride carbonique de l'air, a pour effet d'augmenter le retrait. [5]

I -3-3 Mesure de retrait:

Les essais de retrait consistent à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur des éprouvettes prismatiques conservées après démoulage, à l'air libre [6]

Les mesures effectuées sur 3 éprouvettes, ont lieu aux temps suivant:

- au démoulage, mesure origine des variations;
- les 3e, 7e et 28e jour après la confection des éprouvettes.

Le phénomène de retrait peut être assimilé à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. En Algérie, on peut retenir les valeurs suivantes :

- Dans les régions humides $\Delta L / L = 2 \times 10^{-3}$.
- Dans les régions sèches $\Delta L / L = 5 \times 10^{-4}$.

Conclusion

La vitesse du retrait est maximum au début de la dessiccation, ensuite elle diminue et la pièce met des années pour atteindre sa longueur d'équilibre dans l'ambiance moyenne ou elle est conservée.

Le retrait est plus important sur la surface que dans la masse, qui est à l'abri de l'air.

I -4 Fluage:

Le fluage est la déformation d'un élément du béton maintenu sous charge constante. Le fluage du béton accompagne tous les modes de sollicitation du béton, mais c'est le fluage sous compression qui a la plus grande importance en béton armé. C'est pour cette raison que, lorsque l'on parle de fluage sans préciser le mode de sollicitation, il est toujours sous-entendu qu'il s'agit de fluage sous compression. [5]

I -5 Elasticité:

L'élasticité est la propriété d'un matériau de rétablir sa forme et ses dimensions initiales après l'enlèvement de la charge. [7]

La notion de module d'élasticité d'après sa définition:

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

En pratique, la déformation qui se produit au cours du chargement est considérée comme déformation élastique alors que son augmentation ultérieure, à charge constante, est considérée comme fluage.

En effet, la déformation totale est égale trois fois la déformation instantanée.

Cela conduit à considérer deux modules élastiques:

E_{ij} : module instantané

E_{vj} : module différé

$$E_{vj} = E_{ij} / 3$$

Le BAEL 91 indique la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression du béton.

$$E_{ij} = 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}} \quad \text{Pour un chargement d'une durée d'application inférieure à 24 heures.}$$

$$E_{vj} = 3700 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}} \quad \text{Pour un chargement de longue durée d'application.}$$

Le module d'élasticité du béton dépend de sa résistance, de son âge, du contenu d'humidité et de type de granulats. Pour les bétons courants, le module d'élasticité d'un béton peut varier de 25000 MPa à 45000 MPa.

I -6 Plasticité:

La plasticité est la propriété d'un matériau de changer sa forme sans se fissurer et de garder cette forme après l'enlèvement de la charge [7]

I -7 Perméabilité:

C'est la facilité avec laquelle une roche se laisse traverser par un liquide. Cette propriété croît avec la porosité, c'est-à-dire avec la proportion de vide .mais aussi avec la grandeur des pores.

La perméabilité caractérise un transfert de fluide sous gradient de pression selon la loi de Darcy. En mesurant le coefficient de perméabilité.

Les essais de perméabilité mesurent la réaction à la pression, ce qui est rarement la cause de l'infiltration des fluides dans le béton ordinaire.

Dans le béton, le coefficient de perméabilité décroît avec la diminution:

- finesse de mouture du ciment.
- rapport Eau/Ciment.

De façon générale, on peut dire que, plus la résistance de la pâte de ciment durci est élevée, plus la perméabilité du béton est faible.

I -8 Etanchéité:

Le rôle de l'étanchéité est d'assurer la protection contre la pénétration de l'eau de toutes les parties d'un ouvrage qui, sinon, seraient exposées à des détériorations graves: terrasses de bâtiments, fondations en souterrains dans le cas où la nappe phréatique est haute et l'eau est agressive.

Pour qu'un béton soit étanche, il faut que les cheminements possibles dans la masse pour les infiltrations des eaux extérieures soient aussi réduits que possible. Par conséquent, il faut réaliser un béton très compact pour éviter ces cheminements.

Des essais très nombreux ont été faits sur la perméabilité des bétons pendant plusieurs années. Leurs conclusions sont les suivantes: [5]

Le facteur essentiel est la surface spécifique des grains de ciment.

- Au-dessous de $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$ tous les ciments donnent des bétons perméables.
- Au-dessus de $1800 \text{ cm}^2/\text{g}$, les filtrations sont pratiquement nulles.

I -9 Durabilité :

Introduction:

La durabilité est le pouvoir d'un matériau en service de résister à l'action commune des facteurs atmosphérique et autres. Ceux-ci peuvent être les variations de température et d'humidité, l'action des différents gaz contenus dans l'air ou des solutions salines qui se trouvent dans l'eau. [7]

La durabilité peut être définie comme le maintien de la qualité de l'ouvrage sur une longue durée.

Mais se pose immédiatement la question de la durée pendant laquelle ces exigences doivent être satisfaites, on voit donc ainsi apparaître la notion de durabilité qui est le temps pendant lequel ces qualités persistent. Ce temps minimal, défini par des textes légaux, peut être aisément exprimé : la vie de l'ouvrage [8]

Le comportement du béton, placé dans un environnement chimiquement agressif, dépend de facteurs complexes et multiples liés, d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des éléments agressifs), d'autre part, au béton lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication). [8]

I-9-1 Résistance aux agents agressifs:

L'attaque chimique du béton consiste en une altération des hydrates de ciment sous l'effet de certains agents chimiques. On peut combattre cette action en utilisant des liants appropriés et des produits spéciaux, ou encore en adoptant pour le béton une compacité élevée, ce qui empêche le cheminement des eaux agressives. [5]

I-9-2 Résistance aux Cycle de Gel-Dégel.

Si de l'eau pénètre dans le béton durci et si cette eau gèle, cela crée des tensions très importantes, qui risquent de provoquer la fissuration et la détérioration du béton. donc pour avoir un béton résistant au gel, il faut empêcher que de l'eau puisse pénétrer à l'intérieur de ce béton, ce qui signifie qu'il faudra réaliser des bétons très compacts .[5]

En conséquence, en montagne et dans les pays froids, il faudra faire des bétons denses et compacts et en particulier, songer à utiliser des entraîneurs d'air et de plastifiants pour obtenir des bétons très résistants au gel. [5]

I-9-3 Résistance à l'abrasion:

La résistance à l'abrasion se détermine pour les matériaux destinés aux planchers, aux revêtements routiers, aux marches d'escaliers, etc. certains matériaux sont également essayés à l'usure. [7]

On appelle usure la destruction d'un matériau soumis à l'action commune de l'usure par abrasion et au choc. [7]

L'abrasion pour les matériaux solides est causée par le frottement des pièces mécaniques (ou de tout composant mécanique) entre elles. Ce frottement a généralement lieu pendant le transport, le chargement et le déchargement. L'abrasion conduit à la formation de fines poussières et donc à la perte de matières premières précieuses ou caractéristiques de valeur. Par conséquent la résistance à l'abrasion est une propriété extrêmement importante pour la circulation intense

Cette mesure se fait avec l'appareil ci-dessous.



Photo I-1: Appareil de mesure de résistance à l'abrasion (ROTAB-AS). [9]

Le ROTAB-AS se présente sous forme d'un cylindre abrasimètre rotatif permet de déterminer la résistance à l'abrasion des matériaux solides que ce soit en granulés ou en forme de pastille ou en poudre grossière. Son taux de rotation peut varier dans la gamme de 30 à 90 rpm / rotations par minute. La version ROTAB-AS à rotation constante à un taux de rotation fixe à 65 rpm. Ces deux instruments répondent à la norme ASTM d-4058 pour des particules de 0,85 à 20 mm (des mesures pouvant être faites pour des particules plus grosses).

Essais ou laboratoire du béton étudié:

Un appareil spécialement conçu qui abrase mécaniquement l'éprouvette.

Le coefficient d'abrasion est égal à la perte de masse divisée par le produit de la densité apparente par la surface.

$$\text{coefficient d'abrasion} = \frac{M_{pert}}{d_{app} \cdot S}$$

M_{pert} : Masse de perte.

d_{app} : densité apparente

S : surface de l'échantillon

Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons exposé les propriétés essentielles pour obtenir un meilleur béton notamment, la résistance et durabilité.

Les caractéristiques nécessaires sont:

- Béton plastique, l'affaissement entre 5 et 9 cm
- La résistance du béton entre 20 et 50 MPa,
- Un dosage en ciment exigé par la norme.
- Un rapport E/C > 0.40.
- Une quantité suffisante d'air entraîné.
- Une porosité optimale.

La résistance ultime du béton en compression, qui apparaît comme facteur essentiel dans la conception des ouvrages.

Chapitre II:*Propriétés essentielles du béton à haute performance
(BHP)***Introduction.**

Les bétons à hautes performances (BHP), sont des bétons durables qui donnent une résistance à la compression supérieure à 50 MPa. Ils sont maintenant couramment utilisés dans les grands ouvrages d'art, Tunnels et ouvrages souterrains, les bâtiments de grande hauteur (Gratte-ciel), les bâtiments industriels, et structures préfabriquées.

- Ouvrages soumis à l'abrasion (sols industriels, des aires de péage, des ouvrages hydrauliques...)
- Ouvrages soumis aux agressions chimiques (fosses à lisier et ouvrages agricoles en général, stations d'épuration, ouvrages industriels en ambiance agressive).

Les bétons (BHP), sont des bétons durables dont la diminution de la porosité rendue possible par le choix d'un spectre de mélange granulaire; par l'ajout d'éléments ultrafins et éventuellement par l'ajout de super plastifiant qui diminuent la teneur en eau nécessaire pour l'obtention d'une maniabilité suffisante. Ces bétons présentent une meilleure perméabilité et une bonne protection mécanique et chimique aux agents agressifs.

La perméabilité qui contrôle les transferts des fluides. Cette propriété est fonction de la microstructure du matériau, caractérisée par la porosité, la distribution des tailles de pores, la densité et l'ouverture des fissures

II-1 Ouvrabilité:

Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux super plastifiants entrant dans sa composition. La valeur d'affaissement au cône d'Abrams (\varnothing 10/20 et 30 cm) supérieure à 15cm. (d'environ 20 cm en sortie de malaxeur).[10]

II-2 Résistance mécaniques d'un BHP:**Introduction.**

La résistance se présente sous deux aspects: résistance à la compression, et résistance à la traction. La résistance à la traction joue un rôle très important en béton armé.

On doit donc s'efforcer d'aboutir à des résultats convenables aussi bien pour la résistance à la compression qu'à la traction.

II-2-1 Résistance à la compression:

Les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès le jeune âge; on atteint aisément les 15MPa au bout de 24heures; 40MPa après une semaine et plus de 60 MPa après 28 jours.

A l'heure actuelle, l'expression "béton à haute performance" couvre des bétons ayant une grande gamme de résistances.

On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP. (Voir le tableau II-4) [11]

Tableau II-4: Classes du Béton à haute performance (BHP) et (BTHP). [11]

Type du béton	Béton à haute performance (BHP).			Béton Très haute performance (BTHP)	
Classe de BHP	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Résistance à la compression (MPa)	50	75	100	125	150

II-2-2 Résistance à la traction:

Le gain est aussi important en termes de résistance en tractions.

II-2-3 Moules et éprouvettes utilisés:

Le contrôle des propriétés mécaniques des bétons à hautes performances, sur des échantillons de forme cylindrique en acier. [10]

Tableau II-5: Eprouvettes utilisées en compression et en traction [10]

Cylindres (diamètre x hauteur) cm ²
(7.5x15)
(10 x 20)
(15 x 30)
(16 x 32)

L'éprouvette (16 x 32) cm² est la forme la plus courante.

Conclusion:

Les principaux avantages des bétons à haute performance sont apportés par leur haute résistance en compression d'où la nécessité d'accorder une importance primordiale à cette propriété.

En conclusion, une bonne résistance à la compression est la qualité bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette bonne résistance est généralement liée à une bonne compacité, ce qui est favorable à la durabilité du béton.

La résistance d'un béton dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la classe et le dosage du ciment, la porosité du béton et le rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

II-3 Retrait:

Introduction.

Les déformations libres du béton (retraits ou gonflements) sont des propriétés de première importance pour le constructeur. Le contrôle géométrique de l'ouvrage exige leur prise en compte. De plus, des déformations libres non homogènes dans des parties monolithes provoquent souvent des fissurations, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs.

La conception d'ouvrages durables passe donc par une maîtrise des déformations libres.

II-3-1 Différents types de retrait:

Il existe les retraits suivants:

- Avant prise (retrait plastique)
- Pendant la prise et le durcissement : phénomènes thermiques et retrait endogène
- A long terme: retrait exogène

Retrait avant prise (retrait plastique)

A près mise en œuvre, le béton frais est susceptible de perdre une partie de son eau par évaporation. [10]

Retrait Pendant la prise et le durcissement : (phénomènes thermiques et retrait endogène)

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'autodessiccation ou retrait d'hydratation. (la quantité totale de chaleur dégagée pendant la prise augmente avec le dosage en ciment)[10]

Retrait à long terme:(retrait exogène)

Diminution de volume de la pâte liante provoquée par l'évaporation de l'eau libre ; on dit aussi retrait de dessiccation ou retrait de séchage.

A partir du décoffrage, et lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du béton, des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure. [10]

II-4 Fluage:

Le fluage reste proportionnel à la contrainte appliquée (donc à la déformation initiale) pour des chargements au même âge du béton.

Pour un béton avec fumées de silice, le fluage augmente rapidement immédiatement après le chargement; il peut atteindre dans la première journée de 25 à 30 % du fluage totale. Tout en restant inférieur à celui d'un béton classique.

Le fluage total est par contre inférieur d'environ 40 à 50 % de celui des bétons usuels, ceci en fonction du pourcentage de fumée de silice incorporé, des pourcentages élevés donnant de moins bons résultats que des pourcentage limités à 6 % pour lesquels on observe les fluages les plus faible.[12]

Le coefficient ϕ , rapport entre la déformation finale de fluage et la déformation réelle instantanée, habituellement égale à: [12]

$$\text{Coefficient de fluage } \phi = (\text{déformation différée} / \text{déformation instantanée})$$

Dans les règles BAEL, le coefficient de fluage à prendre en compte est fonction de la présence de fumées de silice. Il est égal à :

- 0,8 pour les BHP avec fumée de silice ;
- 1,5 pour les BHP sans fumée de silice.

Ce coefficient de fluage est égal à 2 pour les bétons traditionnels.

La figure suivante représente un diagramme approximatif de fluage et retrait

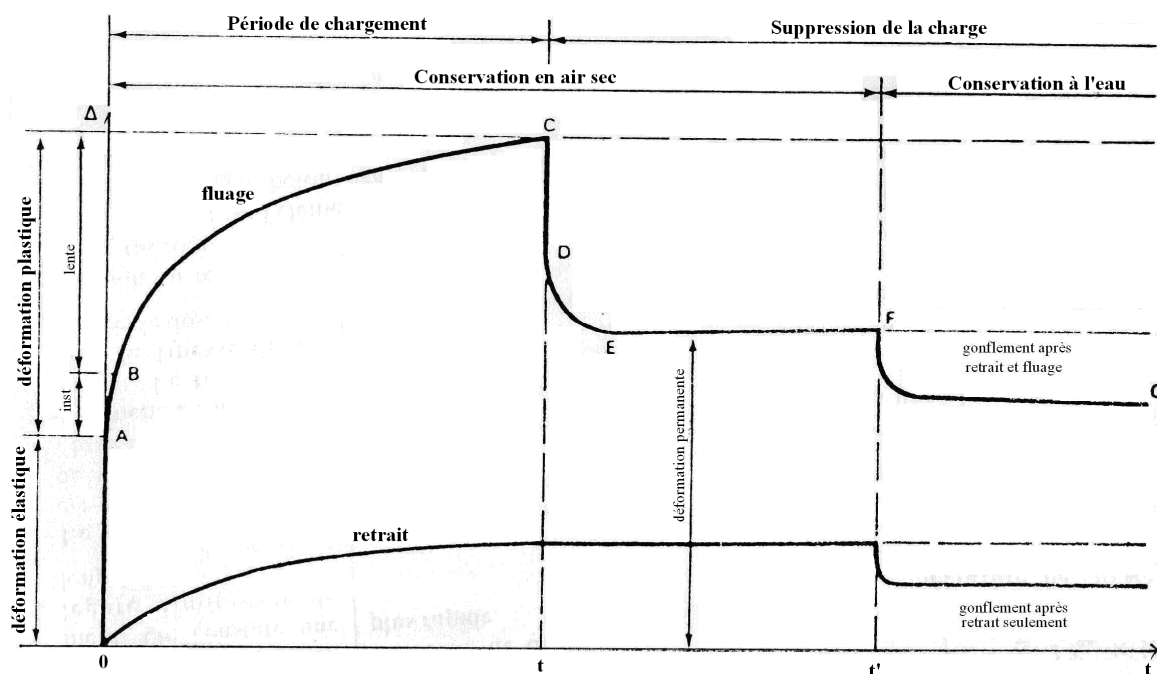


Figure II-1: Schémas et graphes (retrait-fluage). [13]

Dans l'air non saturé il se produit toujours une perte d'eau et un retrait. Dans l'eau se produisent une absorption et un gonflement.

Au-delà d'une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente, c'est ce qu'on appelle le phénomène du fluage.

On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois (voir années), est de l'ordre de trois fois la déformation instantanée.

Conclusion.

Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage).

Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C est d'un coefficient plus élevé (150 à 250×10^{-6}) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60×10^{-6}) [3]. Le retrait d'autodessiccation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C faible.

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

II-5 Elasticité:

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

II-6 Plasticité:

La plasticité est la propriété d'un matériau de changer sa forme sans se fissurer et de garder cette forme après l'enlèvement de la charge [7]

II-7 Perméabilité:

La perméabilité K des bétons caractérise leur aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY, valable en régime d'écoulement laminaire et s'exprime en m^2 dans le système internationale: [10]

$$Q = \frac{K.A}{M} .dP/dZ$$

Q : Débit volumique du fluide

M: Viscosité de fluide

K : Perméabilité

A : Aire apparente du matériau

II-8 Etanchéité:

Le rôle de l'étanchéité est d'assurer la protection contre la pénétration de l'eau de toutes les parties d'un ouvrage qui, sinon, seraient exposées à des détériorations graves: terrasses de bâtiments, fondations en souterrains dans le cas où la nappe phréatique est haute et l'eau est agressive.

Pour qu'un béton soit étanche, il faut que les cheminements possibles dans la masse des infiltrations des eaux extérieures soient aussi réduits que possible. Par conséquent, il faut réaliser un béton très compact pour éviter ces cheminements.

Des essais très nombreux ont été faits sur la perméabilité des bétons pendant plusieurs années. Leurs conclusions sont les suivantes: [5]

Le facteur essentiel est la surface spécifique des grains de ciment.

- Au-dessous de $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$ tous les ciments donnent des bétons perméables.
- Au-dessus de $1800 \text{ cm}^2/\text{g}$, les filtrations sont pratiquement nulles.

II-9 Durabilité:

II-9 -1 Résistance aux agents agressifs:

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eau de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc....) [3]

II-9 -2 Résistance aux Cycle de Gel Dégel:

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel par leur forte compacité et à leurs résistances mécaniques élevées. [3]

II-9 -3 Résistance à l'abrasion:

La résistance à l'abrasion se détermine pour les matériaux destinés aux planchers, aux revêtements routiers, aux marches d'escaliers, etc. certains matériaux sont également essayés à l'usure. [7]

On appelle usure la destruction d'un matériau soumise à l'action commune de l'usure par abrasion et du choc. [7]

L'abrasion pour les matériaux solides est causée par le frottement des pièces mécaniques (ou de tout composant mécanique) entre elles. Ce frottement a généralement lieu pendant le transport, le chargement et le déchargement. L'abrasion conduit à la formation de fines poussières et donc à la perte de matières premières précieuses ou caractéristiques de valeur. Par conséquent la résistance à l'abrasion est une propriété extrêmement importante pour la circulation intense.

Conclusion:

La résistance des bétons à hautes performances aux agressions chimiques est en générale supérieure à celles des bétons normaux, c'est particulièrement le cas pour la réaction alcalis granulats. Cette amélioration est lié à:

- Une structure poreuse fins et discontinue qui réduit la perméabilité, la percolation, les diffusions ionique au travers de la matrice et de l'interface matrice granulats;
- une réduction de la teneur en Ca(OH)_2 par l'effet pouzzolanique de la fumée de

silice;

- une réduction des ions OH^- dans la solution interstitielle, également par effet pouzzolanique.

II-10 Caractéristiques des différents matériaux utilisés dans le BHP:

II-10-1 Granulat:

Introduction:

Le granulat est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 125 mm .destiné à la composition des matériaux destinés à la fabrication d'ouvrage de travaux publics, de génie civil et de bâtiment.

Le granulats représentent 75 % du volume du béton et selon leur qualité, peuvent non seulement limiter la résistance du béton, mais d'effectuer sa durabilité et ses performances structurales.

La norme européenne définit le granulat comme le " matériau granulaire utilisé en construction. Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé"

- Naturel: Est le granulat d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. dans cette catégorie se rangent des granulats de roche.
- Artificiel: Est le granulat d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermique ou autres (mécanique.....etc.). Dans cette catégorie se rangent des granulats transformés.
- Recyclé: Est le granulat d'origine résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, déchets de brique.

II-10-1-1 Caractéristiques des granulats:

Texture et forme des granulats:

Les caractéristiques d'aspect des granulats sont important plus particulièrement les formes du grain et l'état de leur surface.

Dans le béton les grains d'un granulat sont liés par la pâte de ciment qui constitue une matrice pour ces derniers. L'adhérence pâte granulat est alors un facteur important du point de vue résistances mécaniques du béton. On conçoit donc que l'état de surface des granulats, surtout du sable est un paramètre qui influe beaucoup sur les performances physico-chimiques des bétons. Par ailleurs l'état de surface d'un granulat n'influe pas uniquement sur l'adhérence, mais également il y a une incidence sur la maniabilité du béton.

Forme des granulats: La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques:[2]

- La longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,

- La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Coefficient d'aplatissement: Est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

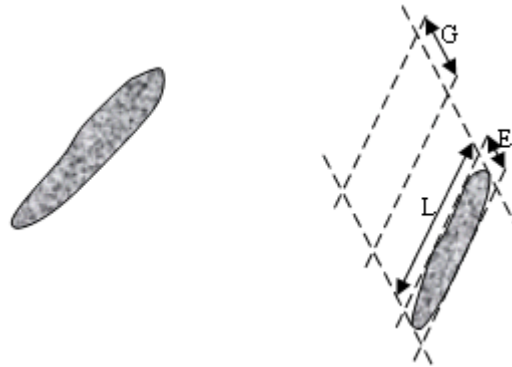


Figure II-2: Forme d'un granulat [2]

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi:

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

En générale la texture et la forme géométrique des granulats se distinguent par deux catégories essentielles:

- Granulats roulés: ils sont plus faciles à mettre en place, ne nécessitent pas de moyens de serrage importants. Glissent bien entre les armatures et conviennent particulièrement au béton armé.
- Granulats concassés: ils donnent lieu à des bétons raides à mise en place difficile. Par contre, ils adhèrent bien à la pâte de ciment et procurent au béton une plus grande résistance notamment à la traction.

Granularité:

Le granulat est d'abord caractérisé par sa granularité, qui est la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La mesure de la granularité se nomme granulométrie, on déduit sa classe granulaire en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée par la dénomination d/D , des dimensions exprimées en millimètre.

Les granulats sont classés en catégories en fonction de leurs dimensions. On distingue généralement les catégories suivantes:(selon AFNOR) [5]

Tableau II-6: Catégories des granulats [5]

Catégories	Dimensions en (mm)
Farines, fines ou filler	0.0 à 0.1
Sable fin	0.1 à 0.4
Sable moyen	0.4 à 1.6
Sable gros	1.6 à 6.3
Gravillons petits	6.3 à 10
Gravillons moyens	10 à 16
Gravillons gros	16 à 25
Pierres cassées et cailloux, petits	25 à 40
Pierres cassées et cailloux, moyens	40 à 63
Pierres cassées et cailloux gros	63 à 100
Moellons et galets	100 et plus.

Propreté des granulats:

Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impureté. Les impuretés ont un caractère commun à toutes ces impuretés: leur effet néfaste sur les qualités essentielles du béton (résistance, imperméabilité, durabilité). Cependant, on peut classer en deux catégories:

Impuretés prohibées:

- particules de carbone, de bois, ou de leurs résidus (coke, cendre,.....etc.)
- pour les gravillons et pierres cassées: une pellicule adhérente d'argile ou d'un Corps (farineux) analogue isolerait le granulat du liant:cette pellicule est donc prohibée. [14]

Impuretés tolérées:

Eléments très fins et/ou solubles:

Ne peuvent être tolérés que s'ils sont en grains de moins de 0.5 cm^3 et régulièrement répartis dans la masse du granulat.

Les quantités limitées sont déterminées par deux voies:

- pour les sables: l'essai d'Equivalent de sable
- pour tous les granulats: par lavage et décantation, du pourcentage en masse des ces éléments fins, qui ne doit pas dépasser 5 % .

Matières organiques:

Ce sont des matières très fines. On emploie une méthode indirecte, l'essai colorimétrique

Sulfates et sulfures:

Les sulfates (le gypse) et les sulfures (pyrites) provoquent la désagrégation du béton par augmentation du volume des parties qui les contiennent.

La teneur qui ne doit pas dépasser 1%.en masse

Les quantités limitées sont déterminées par: l'essai d'Equivalent de sable, et la détermination du pourcentage d'éléments fins par lavage et décantation et l'essai colorimétrique.

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. [14]

La propreté désigne:

D'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.

D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

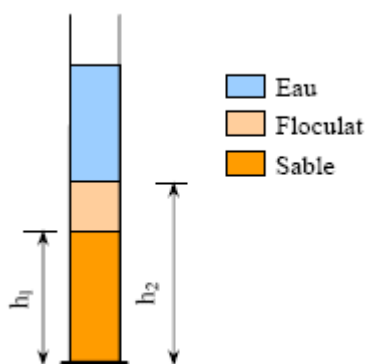


Figure II-3: Détermination de l'équivalent de sable piston:[2]

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de sable piston PS" (norme P 18-597) qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm. La valeur de PS doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65. L'essai dit "équivalent de sable piston" permet de mesurer le degré de propreté du sable.

Tableau II-7: Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX:[2]

L'Equivalence de sable Par piston (PS)	Nature et qualité du sable
< 60	" Sable argileux " risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq PS < 75$	" Sable légèrement argileux " de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$75 \leq PS < 85$	" Sable propre " à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 85$	" Sable très propre " l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Module de finesse d'un granulat :

Le module de finesse d'un granulat est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante:

$$0.16 - 0.315 - 0.63 - 2.5 - 5 - 10 - 20 - 40 \text{ et } 80 \text{ mm}$$

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés est:

$$0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 \text{ et } 5 \text{ mm.}$$

C'est une caractéristique intéressante surtout en ce qui concerne les sables. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins, ce qui nécessite une augmentation de quantité de l'eau.

Dreux admet qu'un bon sable à béton haute performance doit avoir un module de finesse compris entre 2.7 à 3 [11]

Porosité des granulats:

Toutes les roches présentent, dans une proportion plus ou moins grande, des fissures ou des petits vides, qui renferment souvent de l'eau. Certaines cavités communiquent (directement ou non) avec l'extérieur: elles constituent la porosité ouverte et porosité fermée

C'est la porosité ouverte qui est la plus importante en construction, car l'eau peut pénétrer dans ces pores, et geler en faisant éclater la roche. [14]

On appelle porosité d'un granulat ou d'une roche le volume des vides contenus dans l'unité de volume de matière:

$$P (\%) = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{matiere}}} . 100$$

$$P (\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} . \rho . 100$$

P : représente la porosité.

M₁ - M₀:représente la masse de l'eau contenue dans les pores.

ρ : représente la masse volumique absolue

II-10-1-2 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton:**Influence de la granulométrie du sable:**

La granulométrie du sable à une grande importance sur les qualités du béton. Une bonne granulométrie permet d'économiser le liant sans réduire la résistance.

La distribution granulométrique et la surface spécifique sont liées l'une de l'autre; si la taille de grains augmente, la surface spécifique globale et la demande en eau diminue. Donc plus le sable est riche en élément grossiers, plus la maniabilité s'améliore.

Influence de la propreté des sables:

La présence d'éléments fins dans un granulat améliore la maniabilité du béton. Un Equivalent de sable très élevé correspond donc à un sable donnant un béton "raid". auquel il faudra ajouter de l'eau pour obtenir une maniabilité satisfaisante; d'où une valeur faible de C/E, et une résistance mécanique diminuée. La perte de résistance due à l'eau ajoutée pour la maniabilité est plus grande que le gain résultant de l'absence d'éléments fins. Et une valeur maximale de ES n'est pas la condition optimale. [14]

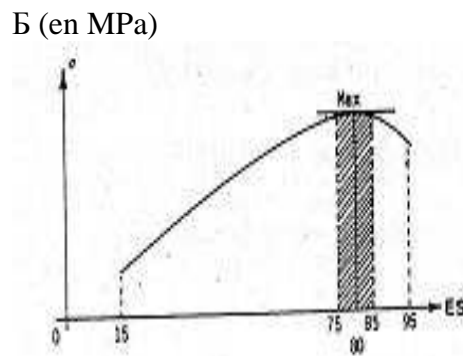


Figure II-4: Résistance du béton en fonction de l'équivalent de sable (ES) [14]

Influence du module de finesse du sable:

Le module de finesse M_f est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité. [15]

Fuseau A : Pour $2.2 < M_f < 2.8$ le sable est utilisé si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Fuseau B : Pour $1.8 < M_f < 2.2$ le sable est utilisé si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

Fuseau C : Pour $2.8 < M_f < 3.2$ le sable est utilisé si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.

- Pour $M_f > 3.2$ le sable est à rejeter.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularité admissibles.

Ces fuseaux sont représentés sur la figure II-4.

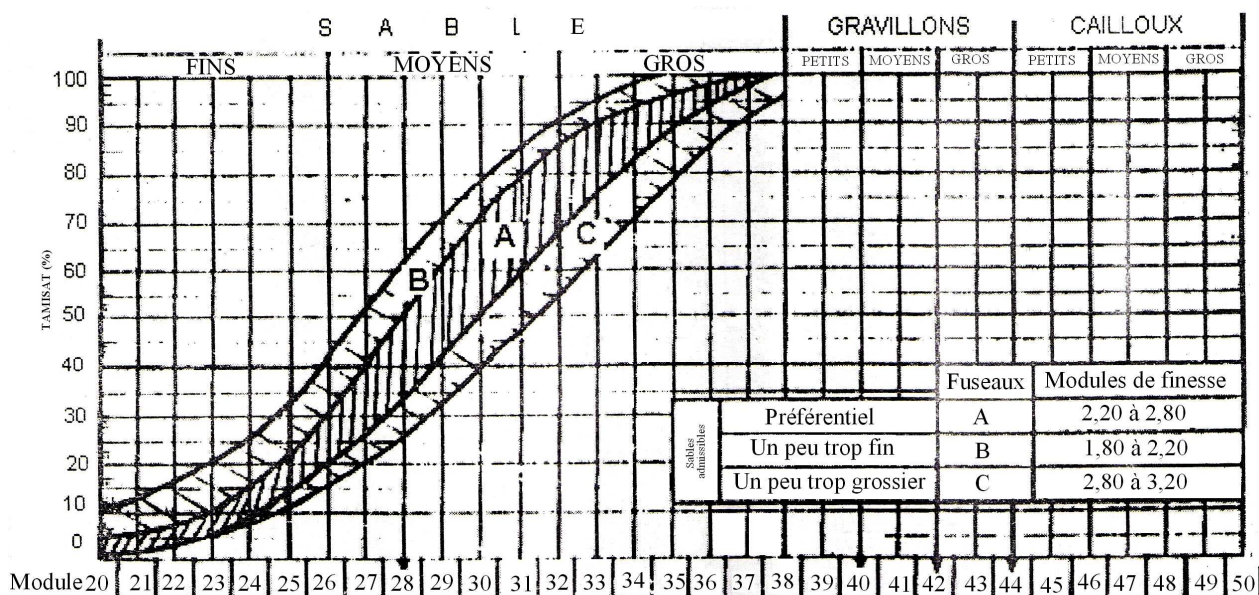


Figure II-5: Fuseaux préférentiels du sable [4]

Influence de la forme des granulats:

- La facilité de mise en oeuvre et le compactage du béton.
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube:

Tableau II-8: Forme des granulats [2]

Cubes sphères	Trois dimensions à peu près égales (bonne compacité)
plaquettes	Une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (mauvaise compacité)
aiguilles	Une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (très mauvaise compacité)

Influence de rapport G/S (gravier/sable):

(G/S) exprime le rapport volumique entre le dosage en gravier (G) et le dosage en sable (S).

Au cours des nombreuses études réalisées sur la composition des bétons, ce qui surprend, c'est l'influence relativement faible de la composition granulométrique du béton, tant en ce qui concerne les proportions relatives de sable et de gravier (G/S) que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique. Les appréciations concernant cette influence sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le Tableau II-8.

Tableau II-9: Influence du rapport G/S. [13]

Principales Qualités	Constatations	
	G/S élevé par rapport à G/S faible	Granularité continue par rapport à granularité discontinue
Ouvrabilité	Un peu moins bonne si: G/S > 2.2	Moins bonne si: G/S > 2.2
Résistance à la compression	Meilleure si: G/S > 2.2	Légèrement supérieure
Compacité	Légèrement Plus élevé si: G/S > 2.2	Un peu plus élevé

Pour des raisons d'ouvrabilité, le rapport G/S ne doit pas dépasser 2.00 à 2.2 pour les bétons courants.

II-10-2 Ciment:

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450–1550 °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 et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

Le ciment joue dans la construction les rôles suivants:

- Assurent la cohésion des éléments de maçonnerie en les reliant entre eux.
- Assurer la prise, le durcissement.
- Dans le béton participe au bouchage des vides, c'est-à-dire à l'accroissement de la compacité.
- L'étanchéité à l'eau en augmentant les dosages.

II-10-2-1 Les constituants principaux des ciments:

Le clinker:

Le clinker, constituant de base des ciments Portland courants, est issu de la cuisson à haute température (1450°C), appelée clinkérisation, d'un mélange d'environ 80% de calcaire et de 20% d'argiles. Sa fabrication peut être réalisée selon quatre méthodes: par voie humide, semi-humide, sèche (la plus courante) et semi-sèche.

Le clinker est composé de quatre phases minérales majeures, dites hydraulique. Il renferme également de faibles quantités d'alcalis (Na₂O, K₂O) et des traces de métaux lourds. Il peut renfermer, par ailleurs, de faibles proportions de chaux vive (CaO) et/ou Magnésie (MgO). Ces dernières sont strictement contrôlées; leur teneur est limitée par crainte de gonflement en présence d'eau. La distinction et la caractérisation des différentes phases du

clinker peuvent être réalisées par microscopie optique sur section polie (voir figure II-2). La notation cimentière est indiquée entre parenthèses: C: CaO, S: SiO₂, A: Al₂O₃, F: Fe₂O₃.



1: C₃S, 2:C₂S, 3:C₃A, 4:C₄AF

Photo II-2: Microscopie optique en lumière réfléchie sur section polie d'un clinker [17]

A la sortie du four, le clinker est finement broyé avec environ 5% de gypse (sulfate de calcium) afin de réguler sa prise. Le produit ainsi obtenu est le ciment Portland. Mélangé avec l'eau, le ciment donne une pâte de ciment composée de phases solides hydratées et d'une phase liquide interstitielle alcaline imprégnant un réseau de pores et de capillaires.

II-10-2-2Hydratation la pâte de ciment:

Les principales réactions d'hydratation sont schématisées ci-après. La photoII-3 montre des hydrates formés dans une pâte de ciment une semaine après gâchage avec un rapport E/C=0,5.

Par ailleurs, les réactions d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur, plus ou moins important selon la composition minéralogique.

L'hydratation des grains de clinker pouvant se poursuivre pendant plusieurs mois, voire plusieurs années.

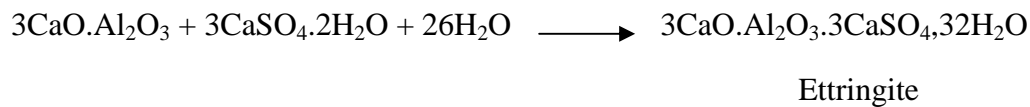
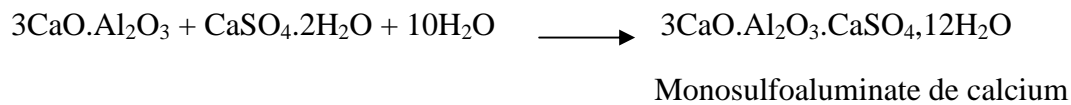
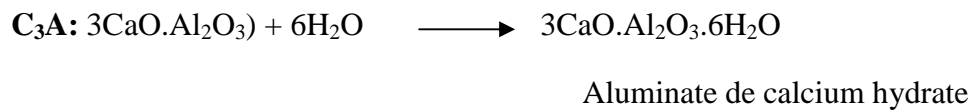
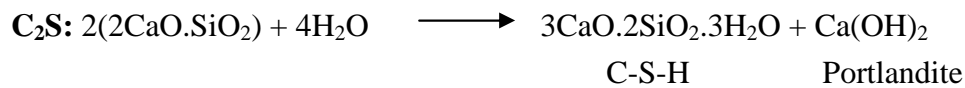
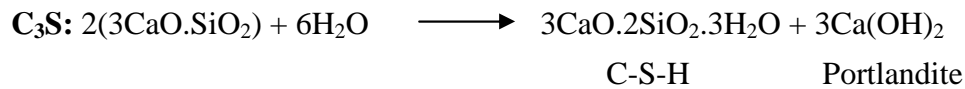


1: Portlandite, 2: C-S-H, 3: Aluminate de çà hydraté, 4:Ettringite.

PhotoII-3: Matrice cimentaire (MEB) [17]

Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début du durcissement.

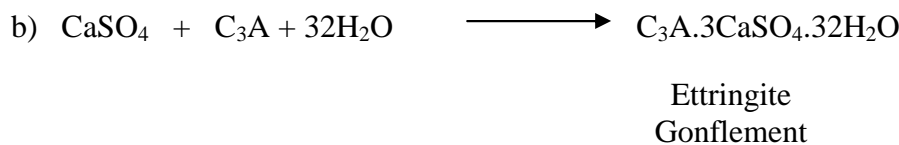
Ce dernier dure plus longtemps et varie en fonction de la nature du liant. Le CSH développe la résistance de la pâte de ciment, et représente environ 70% de la matrice cimentaire durcie. La portlandite participe aux résistances à très jeune âge, sa teneur est de l'ordre de 20%. Les aluminates et les sulfo-aluminates de calcium hydratés (ettringite et monosulfo-aluminates) participent également aux résistances mécaniques, et représentent environ 10% de la matrice durcie. [17]



II-10-2-3 Action de milieu agressif sur le ciment (CPA):

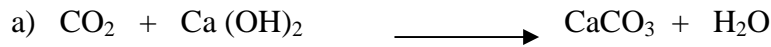
L'action chimique due aux attaques par les ions les plus nocifs (chlorure, sulfate et magnésium). [18]

Action des sulfates (par exemple):



Action de CO₂:

Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates et principalement sur la portlandite pour donner du carbonate de calcium comme produit final:



C'est la portlandite qui se carbonate le plus rapidement, mais les autres composés hydratés, aluminates et silicates de calcium, sont aussi sensibles à l'attaque par le dioxyde de carbone et donnent également du carbonate de calcium. [8]

II-10-2-4 Principales catégories de ciment:

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

Classification des ciments en fonction de leur composition:

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse): [4]

- CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- 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).

Classification des ciments en fonction de leur classe de résistance:

Outre leur composition, les ciments peuvent être également classés selon leur résistance nominale ou classe. Cette classe est déterminée conformément à la norme NA234.

Cette norme distingue trois classes de résistances des ciments, exprimées en (N/mm²) et qui sont les suivantes:

Tableau II-10: Classe de ciment [4]

	Classe I	Classe II	Classe III
Résistance en (MPa)	32.5	42.5	55

Ciments spéciaux:

Les ciments résistants aux sulfates résultent de la mouture d'un mélange de clinker Portland et du sulfate de calcium [19]

II-10-3 Eau:

L'eau considérée comme matériau, n'est guère utilisée en construction que pour la confection des mortiers et bétons.

Le mélange sec des granulats et du liant ne peut se transformer en béton ou mortier que par addition d'eau. La quantité d'eau que l'on ajoute au mélange sec s'appelle l'eau de gâchage.

II-10-3-1 Influence de la quantité d'eau de gâchage :

La quantité d'eau de gâchage introduite dans le béton a une influence prépondérante sur la résistance. Le tableau II-11. Donne la variation de résistance du béton à la compression en fonction du rapport E/L. [11]

Tableau II-11: Résistance à la compression de BHP en fonction Eau/liant [11]

E/L	Variation de la résistance à la compression maximale (en MPa)
0.40-0.35	50à75
0.35-0.30	75à100
0.30-0.25	100à125
0.25-0.20	Plus de 125

II-10-4 Adjuvants:

Introduction:

Les adjuvants des bétons sont des produits organiques ou minéraux ajoutés en faible teneur (à la dose du pour cent environ). Certains d'entre eux permettent de modifier le temps de prise (accélérateurs et retardateurs). D'autre la fluidité du béton (tensioactifs, plastifiants, fluidifiants), ou encore permettent de réduire la proportion d'eau de gâchage (réducteur d'eau). Les adjuvants sont donc une grande utilité pratique.

Les adjuvants sont des produits utilisés dans les bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressassage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

II-10-4-1 Influence des adjuvants sur les bétons:

Les fluidifiants augmentent la densité des charges électriques de surface des particules et empêchent la floculation des grains. Ces molécules peuvent jouer un rôle de lubrifiant, par leur encombrement stérique, et modifient la morphologie des hydrates en s'adsorbant sur leurs sites de croissance. Elle interviennent dans les réactions d'hydratation et présentent souvent des effets secondaires, un peu comme les médicaments. Leur utilisation doit donc faire l'objet de précaution ou, du moins, être optimisée par le fabricant de béton. [1]

B (en MPa)

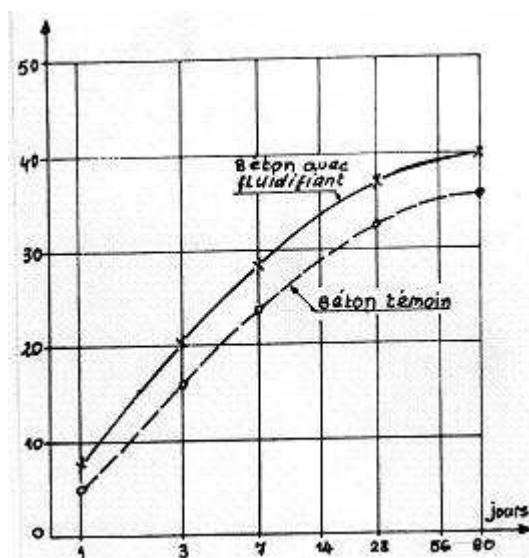


Figure II-6: Résistances en compression de deux bétons. L'un le béton témoin sans adjuvant. L'autre avec fluidifiant. [1]

B (en MPa)

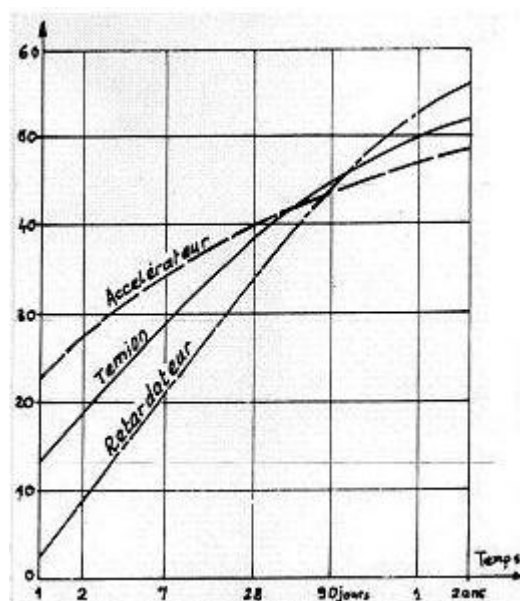


Figure II-7: Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances. [1]

II-10-5 Ajouts ou additions minérales:

Les ciments, dont le constituant principale est le clinker, peuvent contenir d'autres éléments minéraux, sous forme d'ajouts au clinker ayant ou non des propriétés pouzolaniques ou hydraulique.

Ces constituants, quand ils se substituent à une partie du clinker, agissant sur les propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci. En effet, ils modifient le processus

d'hydratation du ciment, la nature et la structure des produits hydratés. Leur incorporation agit ainsi sur l'ouvrabilité, la porosité, la perméabilité, la diffusivité et les résistances mécaniques des matériaux cimentaires.

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- poudres fines pouzzolanique (cendres, fumée de silice..);
- fibres de différentes natures;
- colorants (naturels ou synthétiques);

Conformément à la norme, les ciments portland peuvent être additionnés de divers minéraux naturels ou artificiels, ce qui permet de moduler leurs propriétés d'usage. Les dosages sont en général de l'ordre de 12% à 15% et peuvent aller jusqu'à 35%, pour les classes CPJ. Elles peuvent s'élever à plus de 80% dans les CLK.

II-10-5-1 Pouzzolanes:

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple). [17]

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés. Ces composés sont semblables à ceux formés lors de l'hydratation des matières hydrauliques. Elles peuvent être utilisées en tant que constituant principal du ciment et en tant qu'addition minérale. [17]

II-10-5-2 Cendres volantes:

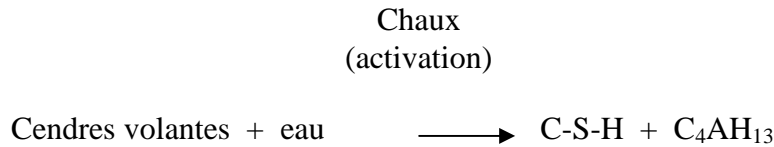
Ceux sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques.



Photo II-4: Cendres volantes de charbon: Point d'origine:Guangdong China (Mainland) [20]

Les cendres volantes se présentent généralement sous forme de sphère de verre solide (voir photo II-2), et peuvent être partiellement ou totalement cristallisées. Ces sphères peuvent être creuses ou pleines et ont un diamètre compris entre un et 100 μm . Comme le laitier granulé, les cendres volantes ont besoin d'être activées pour développer des propriétés

hydrauliques. Leur activation par la chaux libérée lors de l'hydratation du clinker conduit à la formation des produits suivants: [17]



On distingue deux classes des cendres volantes sont définies près ASTM C618:

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolanique. [17]

Composition chimique et classification:

Tableau II-12: Composition chimique et classification des cendres. [21]

Composant	Bitumineux	Sub-bitumineux	Lignite
Bioxyde de silicium SiO ₂ (%)	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Oxyde d'aluminium Al ₂ O ₃ (%)	5 - 35	20 - 30	20 - 25
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃ (%)	10 - 40	4 - 10	4 - 15
Oxyde de calcium CaO (%)	1 - 12	5 - 30	15 - 40
LOI (%) Pertes sur allumage	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Charbon bitumineux:

Charbon dense, noir, souvent formé de couches claires et sombres bien définies et ne contenant habituellement pas plus de 20% d'humidité. Aussi appelé charbon mou. Utilisé principalement pour la production d'électricité et de coke et pour le chauffage. Ce charbon malgré sa forte teneur en carbone, comprise entre 76 et 90 %, peut contenir des teneurs variables en soufre et autres éléments nocifs. [21]

Charbon sub-bitumineux:

Charbon noir utilisé principalement pour la génération thermique et qui contient entre 15 et 30 % d'humidité. Ce charbon est en règle générale très peu soufré. Il peut contenir par contre des carbonates (sidérite, calcite). Sa teneur en carbone est comprise entre 72 et 76 %. [21]

Lignite:

Charbon brun noir de qualité inférieure contenant de 30 à 40 % d'humidité et de matière volatile, de formation tertiaire. Le lignite peut contenir des teneurs en soufre très élevées, jusqu'à parfois 8 %. Une telle teneur en soufre signifie que la tourbe originelle était proche de la mer. Sa teneur en carbone est comprise entre 65 et 72 %. [21]



1: cendre volante en cours d'hydratation

2:cendre volante totalement hydratée

3:carbone imbrûlé.

Photo II-5 : Aspect d'une matrice cimentaire contenant des cendres volantes
au MEB [17]

II-10-5-3 Influence des additions minérales:

Les pouzzolanes et les cendres volantes de centrale thermique produisent un effet plus lent et consomment la portlandite pour former des C-S-H (effet pouzzolanique). Les fumées de silice ont un rôle analogue et permettent de parfaire le remplissage granulaire des ciments dans le domaine des grains ultrafins (béton à très hautes performances). [17]

Conclusion :

Dans ce béton (BHP) les propriétés essentielle notamment la résistance à la compression est entre 50 à 100 MPa, le rapport $(E/C) < 0,40$

La résistance des bétons à hautes performances aux agressions chimiques est en général supérieure à celles des bétons normaux, C'est particulièrement le cas pour la réaction alcalis granulats. Cette amélioration est liée à:

- Une structure poreuse fine et discontinue qui réduit la perméabilité, la percolation, les diffusions ioniques au travers de la matrice et de l'interface matrice granulats;
- Une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par l'effet pouzzolanique de la fumée de silice;
- Une réduction des ions OH^- dans la solution interstitielle, également par effet pouzzolanique.

II-11 Méthode de formulation:**Introduction:**

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des béton est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible, [11]

En règle générale , une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de quelques gâchées d'essai. Bien que les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton. [11] A ce titre il y a lieu de présenter quelques méthodes de formulation.

- La méthode de L'Université de Sherbrooke.
- Méthode suggérée par le comité ACI 363 (1993).
- Méthode proposée par de Larrard (dite des coulis du LCPC en 1990).
- Méthode présentée par Mehta et Aitcin(1990).

II-11-1 La méthode de L'Université de Sherbrooke:

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. [11]

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1.IL S'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous figure II-8:

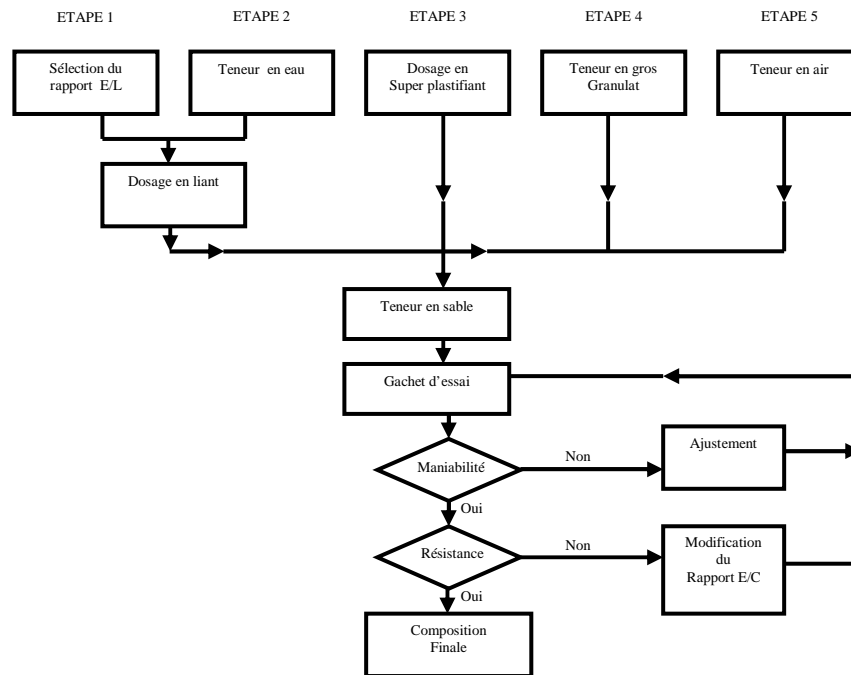


Figure II-8: Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [11]

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés:

- le rapport eau / liant;
- le dosage en eau ;
- le dosage en super plastifiant;
- le dosage en gros granulat;
- la teneur en air.

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présentes sur une seule feuille de calcul (voir page 42)

Rapport eau/liant :

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figureII-9 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figureII-9 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau. [11]

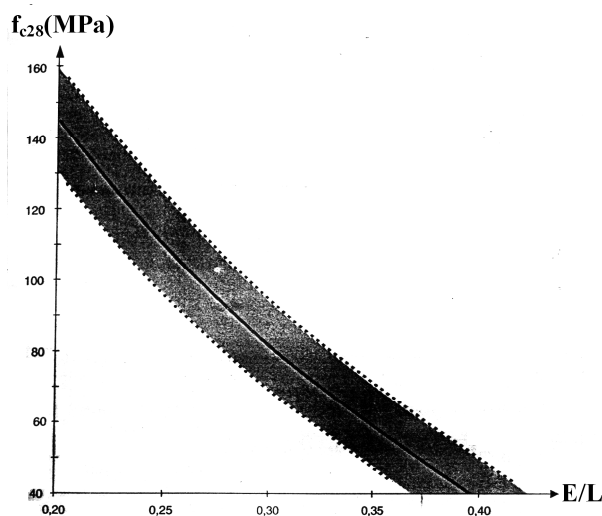


Figure II-9: relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [11]

Dosage en eau:

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier. [11]

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de super plastifiant est d'utiliser un plan d'expérience (Rougeron et Aitcin, 1994). La figure II-10 présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5L/m^3 à toutes les valeurs présentées à la figure V-29. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec un quantité d'eau de malaxage égale à 145 L/m^3 . [11]

Point de saturation	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120 à 125	125 à 135	135 à 145	145 à 155	155 à 165	l/m^3

Figure II-10: Détermination du dosage en eau [11]

Dosage en superplastifiant:

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

Point de saturation:

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en super plastifiant à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le super plastifiant par rapport à la masse de ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la figure II-11. Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaire est ce que l'on appelle le " point de saturation ", c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en super plastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en super plastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

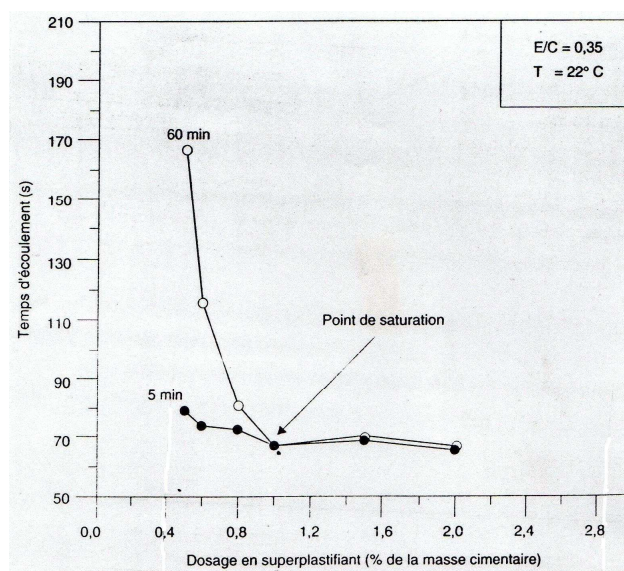


Figure II-11 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant [11]

Dosage en gros granulat:

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la figure II-12 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3 .

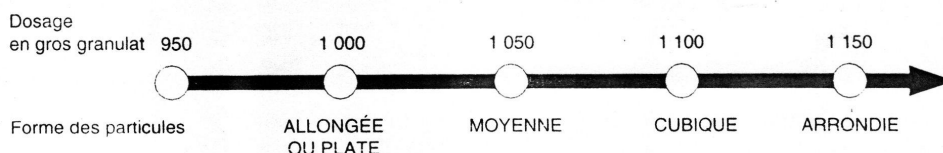


Figure II-12: Dosage en gros granulat [11]

Teneur en air:

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP. [11]

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé. [11]

Feuille de calcul:

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

Avant de présenter la pratique de la méthode, les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la feuille de calcul

Calculs:

Case1: Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie à la figure

Case2: Ecrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure.

Case3: calculer la masse de liant.

Case 4-1,4-2,4-3: calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire.

Case5: Reporter la masse un gros granulat trouvé à la figure.

Case6: Ecrire la quantité d'air piégé que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case7: Ecrire la quantité de superplastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est la masse de granulat fin qu'il faut utiliser. Cette valeur peut se calculer par la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire que l'on soustrait de 1m^3 le volume de tous les ingrédients déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1,8-2,8-3: calculer les volumes des différents ajouts cimentaires.

Case9: calculer le volume de gros granulat.

Case10: Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégé en $1/\text{m}^3$.

Case11: calculer le volume V_{sol} .

Case12: inscrire la somme de tous les volumes déjà calculés.

Case13: calculer le volume de granulat fin en $1/\text{m}^3$

Case14: calculer la masse de granulat fin.

Case15: calculer la masse de solides dans le superplastifiant M_{sol} .

Case16: calculer le totale de toutes les masses, pour obtenir la masse volumique du béton.

Jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage.

Case17: Multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+Eh/100)$.

Case18: Soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la case 5.

Case19: Calculer la masse SSS du granulat fin.

Case20: Soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14.

(écrire la valeur en signe négatif)

Case21: Ecrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant (le signe négatif apparaît déjà dans cette case).

Case22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de 1m^3 de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case23: Ajouter la correction de l'eau.

Case24: Ecrire le dosage en superplastifiant V_{liq} .

Gâchée d'essais : (Colonne 6)

Il nécessaire de fabriquer de (x) kg de béton, ce qui reprisant $(x)/\text{case16} = (f) \text{m}^3$ donc toutes les valeurs de la colonne (5) doivent être multipliées par (f).

Case25 à 29 : Multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur f.

Case30: Calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les cases 25 à 29.

Composition d'un béton à haute performance

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

F_{c28}: MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment		
cencre		

	%			
Granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros				
fin				

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad M = M_{sss}(1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
		15	E	24	F
				21	G
					11
					H

Matériaux		1	2	3	4	5	6
		Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition	
						1 m3	Gâchée d'essais
Eau	1	2	2	2		23	25
Ciment	E/L = 0.	3	4-1	8-1		4-1	26-1
		4-2	8-2	4-2		26-2	
		4-3	8-3	4-3		26-3	
		-	-	-	-		
Gros granulat	5	9	5	18	17	27	
Granulat fin		13	14	20	19	28	
Air	6	POURCENTAGE		10			
		%		0			
Super plastifiant	7	11	15	21	-	24	V _{liq} 29
Total		12	16	22			30

La feuille de calcul utilise les symboles suivants:

d_c : densité du ciment ou des ajouts cimentaires

d_{sss} : densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec

E_{abs} : quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pour cent)

E_{tot} :teneur en eau totale des granulats (en pour cent)

E_h : humidité des granulats (en pour cent)

d_{sup} : densité du super plastifiant liquide

s : teneur en solides du super plastifiant (en pour cent)

M_{sol} : masse de solides dans super plastifiant

d :dosage du super plastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires .

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

V_E : volume d'eau dans le super plastifiant

V_{sol} : volume de solides dans le super plastifiant

E :masse d'eau en kg/m^3 dans le béton

L :masse de liant par mètre cube de béton

II-12 Recherches sur les BHP et la cendre:

Dans ce chapitre, on doit présenter quelques travaux et recherches sur le BHP avec la cendre.

1-Etude (Jean-Emmanuel Aubert):[45]

Cette étude apportée par Jean-Emmanuel Aubert (Toulouse en France),la communication présente une méthodologie d'étude des déchets en vue de leur introduction dans les béton illustrée par un exemple concret: celui d'une cendre volante d'Incinérateurs d'Ordures Ménagères traitée.

La granulométrie des particules plus fins et mesurée par granulométrie laser. les caractéristiques granulaires de la cendre étudiée sont données dans le tableau.

Tableau II-13 :Caractéristique granulaires de la cendre traitée

	D10	D50	D90
Taille (μm)	6	38	200

La masse volumique est aussi une caractéristique physique importante du matériau. Les résultats obtenus sur la cendre traitée sont présentés dans le tableau

Tableau II-14: Masse volumique et surface spécifique BET de la cendre volante traitée

Masse volumique (g/cm^3)		Porosité intragranulaire (%)	S_s BET (m^2/g)
Réelle	Absolue		
2.83	2.95	4.1	2.260

Les compositions théoriques de ces bétons sont présentées dans le tableau:

Tableau II-15: Compositions théorique des bétons

Constituants	Mélanges			
	T12	C12	T50	C50
Ciment [kg/m ³]	262	262	150	150
Cendre volante [kg/m ³]	0	38	0	150
Sable [kg/m ³]	762	724	874	724
Gravillon [kg/m ³]	1087	1087	1087	1087
Eau [l/m ³]	195	195	200	200

Les deux premières approches ont été étudiées dans le cas de la cendre traitée. Des bétons contenant 38 et 150kg de cendres par m³ de béton (C12 et C50) ont été comparés à des bétons de même composition, les cendres étant remplacées par un sable traditionnel (T12 et T50).

Les résistances à la compression sont mesurées selon la norme française NF P 18-406 sur des cylindres de 11 cm de hauteur et de 22 cm de diamètre, les éprouvettes étant conservées à 20°C dans une atmosphère à plus de 95% d'humidité relative. Les résultats sont donnés sur le tableau:

Tableau II-16: Résistance a la compression

Types des bétons	Résistance à la compression en (MPa)			
	2 jours	7 jours	28 jours	91 jours
T12	17	27	29	30
C12	16	24	29	30
T50	/	5	7	12
C50	/	7	11	13

Les résistance en compression obtenues sont équivalentes pour les deux types de matériaux, quel que soit le dosage utilisé. Pour de forts dosages en cendre, l'ajout de ces dernières semble même avoir un effet positif sur les résistances mécaniques des bétons.

On peut donc conclure que d'un point de vue technique, l'introduction de la cendre traitée dans les bétons est possible, même pour dosages en cendre important, cette dernière se comportant, au pire, comme un sable traditionnel.

Chapitre III:*Valorisation des sables de dune dans le secteur
Bâtiment et travaux publics***Introduction**

Le sable joue un rôle très important dans la fabrication du béton, car il influe à la fois sur les propriétés du béton à l'état frais (rhéologie) et à l'état durci (durabilité et résistance). Cette importance se traduit sur la qualité des sables que l'on peut utiliser pour fabriquer du béton.

Une caractéristique très importante des sables à béton est leur teneur en eau. L'état saturé superficiellement sec (la quantité d'eau contenue dans le sable qui pourrait modifier la rhéologie, la durabilité et la résistance du béton).

Avec l'amenuisement des réserves naturelles des sables (sable alluvionnaire, sable ordinaire) il est nécessaire de se préoccuper dès aujourd'hui de l'utilisation des sables de dunes, de façon à fabriquer des bétons économiques et durables.

Dans ce chapitre, on doit présenter quelques travaux et recherches menés dans le sens de la valorisation du sable de dune.

III -1 Sable de dune:

Photo III-6:Sable de dune. [24]

Définition:

D'après OBERTO OSSERA; le sable de dune c'est un ensemble des grains fins de différentes compositions, gypseuse, quartzeuse, et carbonées avec des proportions très faibles d'argile. [24]

Ces grains subissent une déflagration éolienne, et sont caractérisés par une granulométrie fine, la grosseur entre 0 et 0.63mm, et une granulométrie arrondie et bien serré.

III -2 Recherches sur les utilisations du sable de dune:

A l'aide de cette définition on peut dire que l'exploitation du sable de dune dans le domaine de génie civil et travaux publics n'est pas un problème nouveau, au point que cette utilisation se manifeste dans les travaux de remplissage des fouilles, travaux de revêtement, étanchéité...etc.

Dans la recherche bibliographique qui se suit nous rassemblons quelques recherches menées dans ce sujet, notamment dans la région où ce matériau est abondance, ainsi que les régions qui présentent un sable de même caractéristique que le sable de dune.

III -2-1 Recherche menée dans le golfe d'Arabie :

Suivant le rapport de synthèse des travaux élaboré par KOTZIAS relatif aux recherches menées dans ces régions, le sable de dune a été utilisé dans le béton de sable pour les deux raisons suivantes :

- Les gros granulats ne sont disponibles que dans des endroits très lointains.
- Il y a abondance de sable de dune qu'on peut obtenir à moindre frais

Le sable de dune de ces régions se caractérise par un module de finesse égale à 1.5 par ailleurs la granulométrie de ce sable était en dehors de la limite du fuseau granulaire recommandé.

Le mélange adopté pour la construction est le suivant:

Tableau III-17:composition du béton

Sable	Ciment (CPJ II)	E/C
1350 kg/m ³	460 kg/m ³	0.5 à 0.65

Les résultats des essais de résistance obtenue pour deux valeurs de rapport E/C

Tableau III-18:Résultat de la résistance à la compression en fonction de E/C.

E/C	Résistance à la compression à 28 jours en MPa
0.5	22
0.65	12

L'utilisation de ce matériau dans ces régions, généralement consiste dans la construction des fondations, murs de soutènement et dalles des planchers

III -2-2 Recherche menée au Maroc:

L'expérience consiste à la confection d'un béton de sable à base de deux types de sable, un sable grossier et un autre fin de la région de casablanca. Le tableau ci- dessous présente la granulométrie de ces types de sable:

Tableau III-19: Granulométrie des sables utilisés

sable	>2mm	0.08 à 2mm	< 0.08mm
Grossier	98%	1%	1%
Fin	7%	74%	19%

Les compositions proposées et leurs résultats de résistance sont récapitulés dans le tableau ci-après:

Tableau III-20: les résultats de résistance obtenue par les compositions proposées (au Maroc)

béton	Dosage en ciment	Sable fin (kg)	Sable grossier (kg)	Eau (L)	E/C	Résistance à 28 jours (MPa)	
						à la compression sur cubes	à la traction sur prismes
A	350 kg/m ³	644	966	238	0.68	30.8	2.7
B		483	1127	245	0.7	13.3	2.27
C		805	805	245	0.7	19.2	2.08

III -2-3 Recherches menées en Afrique occidentale:

TYLER dans son rapport il a collecté toutes les informations disponibles sur les bétons de sable.

En ce qui concerne les matériaux utilisés :

Sable: a une qualité qui varie beaucoup d'une région à l'autre mais généralement il se caractérise par une granulométrie fine, et module de finesse est de l'ordre de 1,6.

Ciment utilisé: est conforme aux normes britanniques BS12

Pour la composition recommandée c'est : 1 volume de ciment avec 6 volumes du sable. L'utilisation de cette composition se manifeste dans les blocs des murs. Les résistances en compression de ces blocs, ne dépassaient pas 4,5 Mpa .

Dans la même région une autre recherche a été effectuée par UZOMAKA, au Nigeria dont le but était l'analyse des quelques facteurs comme l'effet de la dimension des particules du sable, qui affecte la résistance des blocs.

UZOMAKA [50] a utilisé deux sables différents, un sable de dune très fin, et autre grossier, les résultats obtenus montrent que la résistance augmente avec le sable grossier, ce qui n'est pas le cas pour le sable de dune.

Il apparaît évident, quand il s'agit de sable de dune pour obtenir une résistance égale à celle du matériau coulé avec du sable grossier, on est obligé d'utiliser une grande quantité de ciment.

III -2-4 Recherches menées en Russie:

La Russie parmi les premiers pays qu'a connu la technique de béton du sable, ce ci peut être expliqué par le fait que ce pays est très pauvre en gros granulats, et ses ressources sont mal réparties.

Dans certaines régions de ce pays, le sable a des caractéristiques presque similaires à celle du sable de dune particulièrement, la propreté et la granulométrie.

La plupart des articles du Russie ne donnent pas assez d'information sur les compositions choisies. Ils sont très peu les documents qui traitent sur le comportement de béton de sable.

Parmi ces documents :

L'étude qui a été élaboré par I. J.CHAUVIN porte sur l'influence de la forme des grains et la granularité dans la qualité du béton de sable.

Autres études effectuées par MIKHAILOV, dans laquelle il définissait un nombre limité des essais permettant de connaître les caractéristiques à obtenir pour une large gamme de ce matériau

L'utilisation du béton de sable se manifeste dans ces régions dans :

- Les dalles pavées pour allées piétonnières.
- Des toitures.

III -2-5 Recherches menées en Algérie:

Vu l'abondance de sable de dune dans le sud Algérien, plusieurs recherches ont été établi pour la composition d'un béton a base de sable de dune pendant les deux dernières décennies.

Etude (CNERIB):

Dans ce cadre, les premières études ont été lancées par le CNERIB d'où une série de travaux de recherche ont été engagé pour la valorisation de ce matériau dans la masse de béton.

La première étude avait été menée sur un sable apporte de Djelfa vers l'année 1985, ce sable présente une porosité de 45% et classe granulaire de 0/0,63 mm

L'étude consiste en première phase à une recherche d'une formule à dosage optimum en ciment pour le sable utilisé.

- Le dosage en ciment varie de 300, 330 et 350kg/m³
- La granulométrie du sable a été corrigée par l'incorporation des fillers en trois types différents, calcaire, siliceuses et chaux aérienne,

Les résultats des essais de résistance obtenus lors de cette étude n'ont pas dépassées 10 MPa

Etude (A. Ahmed Chaouch):[46]

L'étude apportée par A. AHMED CHAOUCH consolide les premiers pas dans ce sens. Cette étude vise principalement, l'étude des propriétés physiques du béton de sable de dune.

AHMED CHAOUCH a traité en première étape l'effet du rapport E/C et le dosage en filler calcaire sur la maniabilité de ce béton, ainsi il a pris un aperçu sur l'influence de ces deux paramètres sur la résistance du béton, pour le retrait et le fluage.

Le sable utilisé c'est le sable de dune provenant de la région d'EL Golea, qui présente une granulométrie très fine avec un module de finesse de l'ordre de 1,5.

La composition minéralogique de ce sable, est quartzreuse et très peu de portion de feldspath et de gypse.

Pour le ciment c'est le CPA 325

L'étude a commencé par la formulation d'une composition sur la base de maniabilité. cinq (5) valeurs ont été prises pour le rapport E/C : 0,4- 0,5- 0,6- 0,7 et 0,8; Chaque valeur est accompagnée par une variation croissante de concentration en ciment et en sable.

En deuxième étape d'autres séries d'essais ont été effectués avec l'incorporation des fillers et des adjuvants pour le but d'améliorer les propriétés du béton de sable de dune avec le minimum de dosage en ciment. Les compositions obtenues ont subi des essais mécaniques, à savoir les essais de compression et de traction.

La composition optimum aboutie dans cette étude a été formulée comme suit :

Tableau III-21: composition du béton de sable

E/C	Dosage en filler (kg / m ³)	Dosage en ciment (kg/ m ³)	Sable de dune (kg/ m ³)	Eau (l/m ³)	Adjuvant (% du poids de ciment)
0,6	300	400	1160	240	2,8

Par ailleurs les résultats des essais pour cette composition sont:

Tableau III-22: résultats des résistances

Jours	Résistance	Résistance
	en compression (en MPa)	en traction (en MPa)
7	14,9	1,3
28	20,6	1,9

Etude (A .BATATA):[47]

L'étude menée par le CNERIB, c'est l'étude qui a été présentée par A .BATATA. L'étude consiste à formuler un béton de sable de dune pour l'obtention d'une compacité maximale.

La démarche suivie lors cette étude est:

- Recherche du dosage en ciment pour atteindre la compacité optimale.
- Substitution d'une fraction du ciment par des fines.

Le sable utilise c'est le sable de dune d'EL GOLEA, qui se distingue par sa finesse et granulométrie serrée, l'équivalent de sable égal 90%, et le module de finesse égal (1,47).

Les fines utilisées se sont les fillers calcaires par calibrage de sable de concassage (0/3) à travers un tamis de 80 μ m, ciment employé c'est le CPJ 325.

En première phase l'étude a consisté à la formulation d'une composition de ciment + sable pour le but d'obtenir une compacité maximale allant jusqu'à 70%, avec un dosage en ciment de 400 kg/m³.

La deuxième phase dans cette étude consiste d'ajouter les fines par des portions croissantes de (0 à 10%), et suivant un dosage en ciment varié (270 kg/m³, 330 kg/m³, 370 kg/m³, 400 kg/m³).

En troisième phase, des essais de compression ont été réalisés, et les résultats sont traités par deux manières différentes :

- La résistance en fonction E/ C+F
- La résistance en fonction C/ S+F

E : est le dosage en eau.

C, S, F sont les dosages respectifs en ciment, sable et fines.

La composition finale obtenue comporte:

Tableau III-23: composition du béton de sable

Le ciment kg/ m ³	Le sable (kg/ m ³)	Eau (L/ m ³)	Fine (%)
330	1530	260	6

Etude M.Guettela A.H / Mezghiche .B et Chebili .R.(Université de Biskra):

Une étude consiste à améliorer les caractéristiques du béton de sable par différentes manières à savoir:l'addition de fillers et adjuvant pour augmenter la résistance.

Les matériaux utilisés:

Sable de dune : la région de Biskra au module de finesse de 1.4 et ES = 87 %

Ciment: CPJ45 de Ain-Touta.

Fillers : déchets de polissage de carrelages a une porosité de 45% et une surface spécifique de 275 m²/kg

Les adjuvants: Plastifiant (SFA) et Fluidifiant (SF)

Le rôle d'adjuvant est de réduire la quantité d'eau et d'obtenir des bétons fluides.

Les résultats expérimentaux sont indiqués sur les tableaux suivants:

- Pour béton du sable témoin:

Tableau III-24: composition et résultats de résistance du béton

Type du béton	Ciment (Kg/m ³)	sable (kg/m ³)	E/C	Résistance en compression f _{c28} en MPa
Béton de sable (témoin)	350	1660	0.7	12.5

- Pour béton du sable avec adjuvant est filler:

Tableau III-25 : Résultats de résistance
(E/C = 0.7, teneur en adjuvant est de 2.5%)

Filler (Kg/m ³)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	
	Fluidifiant (SF)	Plastifiant (SFA)
170	14.4	19.2
200	19.0	20.4
250	26.3	23.5
260	31.0	27.5
290	28.0	28.7
320	26.0	29.0
350	23.6	29.8

La concentration des fillers assurant la meilleure résistance est de 260 kg/m³ avec l'adjuvant (SF). Par contre on remarque que la résistance augmente en parallèle avec l'augmentation du dosage en fillers avec l'adjuvant (SFA).

Etude M.Bentata .A (Université de Ouargla):[25]

En 2003 une étude à été faite avec un béton à base de sable de dune par M.Bentata. Il propose un certain nombre de composition de béton :

Le sable de dune utilisé de la région de Ain El-Beida (Ouargla) qui donne les caractéristiques suivantes :

MF=1.02, ES=97%, ciment CPJ CEM-A/325 de AIN-TOUTA

Une série d'essais à été faite sur les compositions suivantes:

Tableau III- 26: compositions des différents types du béton. [25]

Béton	E/C	Dosage de ciment (kg/m ³)	Sable alluvionnaire	Sable de dune
A	0.52	400	100 %	-
B	0.52		75 %	25 %
C	0.52		50 %	50 %
D	0.53		25 %	75 %
E	0.55		-	100 %

Les résultats de résistance sont indiqués dans le tableau suivant:

Tableau III-27 : résultats de résistance de différents types du béton[25]

Béton	E/C	Résistance à 28 jours (MPa)	
		à la compression	à la traction
A	0.52	31	2.5
B	0.52	24	2.2
C	0.52	27	2.6
D	0.53	24	2.4
E	0.55	24	2.5

Le béton à base de sable de dune présente une réduction de résistance à la compression allant jusqu'à 20 %.

Le béton (C) de 50% de sable de dune et 50 % de sable alluvionnaire présente un bon résultat de résistance à la compression et traction de 27 et 2.6 MPa

Conclusion

L'eau dans le béton joue un double rôle : elle est nécessaire pour hydrater le ciment, mais aussi pour assurer la maniabilité du béton à l'état frais. En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un béton accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains.

Egalement, on a rassemblé préalablement dans cette étude bibliographique, les propriétés essentielles du béton à base de sable de dune, afin de ressortir les arguments de comparaison entre les propriétés d'un béton ordinaire et celles trouvées expérimentalement dans le béton de sable de dune, cependant on constate que le béton de sable de dune présente des comportements presque similaires aux bétons ordinaires, mais pour l'ouvrabilité, demande beaucoup d'eau de gâchage, donc diminuant la résistance et la compacité.

Dans le cadre de la valorisation du sable de dune, on est obligé de mélanger au béton des réducteurs d'eau pour obtenir de meilleurs résultats.

Les résultats précédents nous encouragent à continuer les recherches dans cette axe afin d'assurer une bonne utilisation de ces matériaux (sable de dune et déchets de polissages et autres).

Chapitre IV:

Caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des matériaux utilisés et essais réalisés

Introduction :

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de super plastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs.

IV-1 Matériaux utilisés :

Introduction:

Les BHP sont préparés en sélectionnant de façon très soigneusement chacun des ingrédients qui les constituent.

La performance et la qualité de chacun des ingrédients que l'on utilise pour fabriquer un BHP deviennent critiques à un moment donné au fur et à mesure qu'on augmente la résistance visée. [11]

IV-1-1 Ciment:

Définition :

Le ciment est le liant le plus utilisé pour la fabrication du béton. Il se présente sous forme de poudre très fine qui mélangée à l'eau forme une pâte plastique qui durcit progressivement à la suite de réactions chimiques. On classe par conséquent le ciment dans la famille des liants hydrauliques puisqu'il fait prise en présence d'eau. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. [26]

Dans cette formulation, le ciment utilisé est un ciment résistant aux sulfates CRS. (CPA CEM I42.5)

IV-1-1-1Caractéristiques chimiques et minéralogiques:

La composition chimique et minéralogique du ciment en question est indiquée sur le tableau suivant:

Tableau IV-28: Composition chimique et minéralogique de ciment CRS. (CPA CEM I42.5) [19]

Elément	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF+2C ₃ A	Pertes au feu	résidu insoluble
%	≤ 5	≤ 3.5	≤ 50	≤ 5	≤ 22	≤ 4	≤ 3

IV-1-1-2Caractéristiques physiques:

La masse volumique apparente:

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m³ (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment. [27]

La masse volumique absolue:

Représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m³ suivant le type de ciment. [27]

Prise du ciment:

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.

Début et fin de prise:

Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. [27].

Temps de prise en minutes:

Début: 1h30 min.

Fin: 4h20min.

Durcissement:

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle. [27]

La surface spécifique:(finesse Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible

et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influe sur la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que sur son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

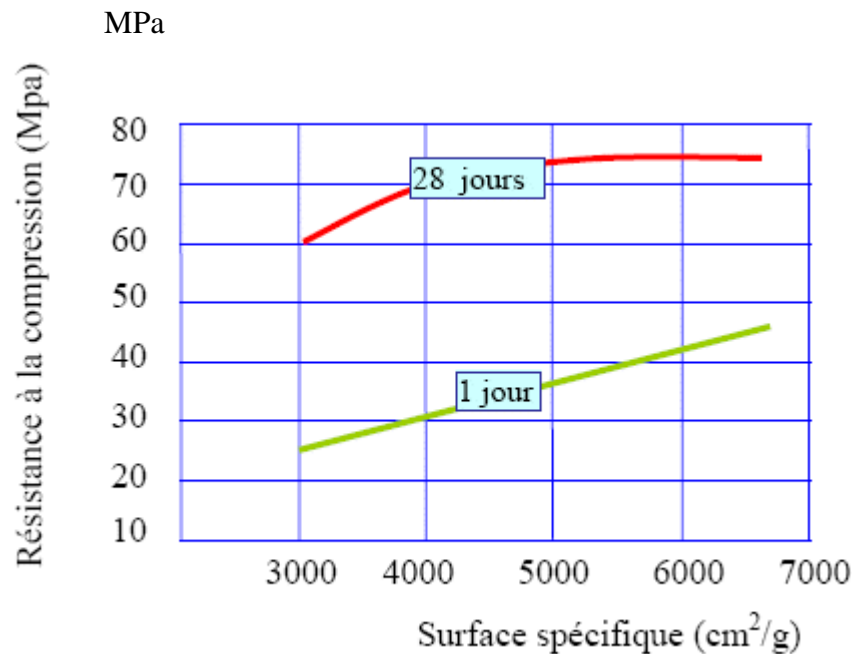


Figure IV-13: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue: Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine».

La surface spécifique de Blaine est donnée par la formule suivante:

$$S = \frac{k \cdot \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\varphi \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{\eta}}$$

K: constante de l'appareil.

φ : la masse volumique du ciment exprimée en (g/ cm³)

η : la viscosité de l'aire à la température d'essai.

e: la porosité.

t: temps mesuré en secondes.

La surface spécifique de Blaine de ciment CRS est 3200 cm²/g.

IV-1-1-3Caractéristiques mécaniques:

Tableau IV-29: caractéristique mécanique de ciment CRS. [19]

Classe de résistance	Résistance minimale à la compression en bars		Résistance minimale à la traction par flexion en bars	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
400	315	400	55	65
500	355	500	60	70

IV-1-2Granulats:

En effet, la quantité, la forme, la granulométrie et le type de granulats sont des facteurs qui influent beaucoup sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

IV-1-2-1Granulats fins (sable):

Vu l'abondance de sable de dune dans la région de Ouargla et vu son coût faible, une étude appropriée est nécessaire sur la composition chimique, physique et minéralogique. En vue de son utilisation dans des bétons à hautes performances, les sables utilisés dans la composition des agrégats fins sont:

- sable de dune de AIN EL-BEIDA, 5 km de Ouargla.
- sable alluvionnaire de H.ESSAYEH, 30km de ouargla.

Composition chimique:

D'après l'analyse chimique réalisée au laboratoire de OUARGLA (LTPS), le tableau ci-après présente les pourcentages des éléments rentant dans les compositions chimiques de chacun de ces sables.

Tableau IV-30:Analyse chimiques des sables utilisés

Type de sable	SO ₃	CaSO ₄ .2H ₂ O	CaCO ₃	insolubles
Sable alluvionnaire	0.00 %	0.03 %	3.04 %	90.48 %
Sable de dune	0.39 %	2.10 %	1.30 %	93.80 %

Caractéristiques physiques :

Tableau IV-31: Caractéristiques physiques des différents sables utilisés.

Caractéristiques	Granulats fins		
	Sable de dune	Sable alluvionnaire	25% (S.D.D) +75% (S.A)
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1.40	1.41	1.41
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2.52	2.45	2.48
E_{tot} (Eau totale) %	0.058	0.314	0.226
E_{abs} (Eau absorbée) %	0.234	0.638	0.453
E_{h} (Eau humide) %	- 0.176	- 0.324	- 0.227
ESV (%) Equivalent de sable visuellement	97.8	79.64	82
ES (%) Equivalent de sable par piston	96.7	78.76	81
Mf (Module de finesse)	1.02	2.40	2.36

Analyse granulométrique:

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau IV-32: Analyse granulométrique des différents sables utilisés.

	Tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.160	0.08
Sable de dune	Tamisât (%)	100	100	100	99.84	78.32	10.62	0.7
Sable alluvionnaire		99.18	96.46	88.36	63.34	16.40	2.15	0.6
25 % SDD +75 % SA		99.59	97.97	92.77	75.98	30.76	3.98	0.57

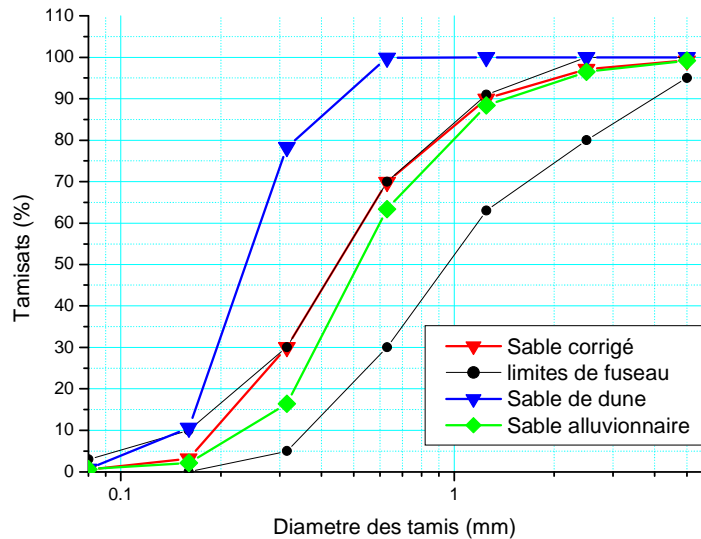


Figure IV-14: Courbe granulométrique des différents sables avec le fuseau granulaire

Ces courbes montrent bien que la granulométrie du sable de dune utilisé est très serrée.

IV-1-2-2 Granulats grossiers (gravier):

Le gravier utilisé provenant de la carrière de HAUD EL-HAMRA est constitué de calcaire compact.

Dans cette formulation on choisit deux classes de gravier:

- Gravier G1 (3/8)
- Gravier G2 (8/15)

Composition chimique:

Le tableau suivant indique les résultats de l'analyse chimique du gravier selon le laboratoire de Ouargla (LTPS). [28]

Tableau IV-33: Analyse chimique des Graviers utilisés

Elément	Calcite (CaCO ₃)	Sulfate (CaSO ₄ · 2H ₂ O)	Insolubles
%	55 à 70 %	0 à 5 %	25 à 45 %

Caractéristiques physiques :

Tableau IV-34: Caractéristiques physiques des graviers mélangés 3/8 et 8/15.

Gros granulats 25% (3/8) +75% (8/15)						
Masse volumique apparente (kg/m ³)	Densité (kg/m ³)	Eau totale (E _{tot}) %	Eau absorbée (E _{abs}) %	Eau humide (E _h) %	Taux d'impuretés (%)	coefficient de Los Angeles L _A %
1.22	2.5	0.308	2.207	- 1.899	0.80	25

Analyse granulométrique:

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau IV-35: Analyse granulométrique des différents graviers utilisés.

	Tamis	20	16	12.5	10	8	6.3	5	3.15	2
Gravier (3/8)	Tamisât (%)	100	100	100	100	99.81	90.68	69.15	28.62	8.83
Gravier (8/15)	(%)	100	78.78	38.34	17.89	5.99	0.86	0.55	0.27	0.27

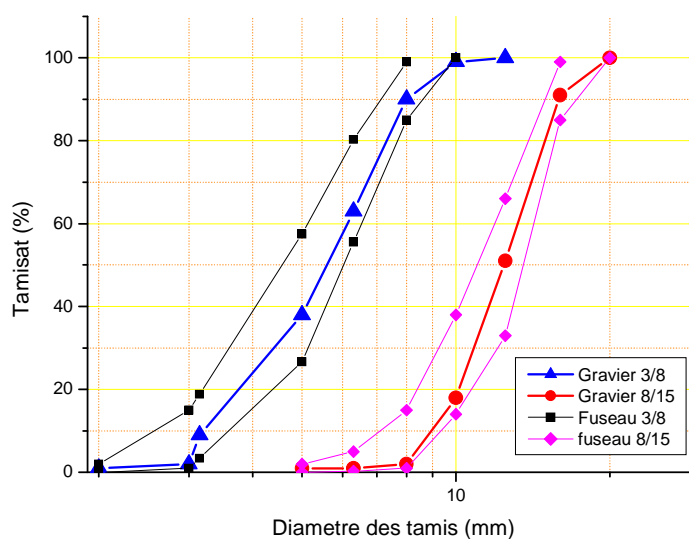


Figure IV-15: Courbe granulométrique des différents graviers

On choisie un pourcentage de gros granulats 25% (3/8) +75% (8/15) selon la composition du béton de référence [3]

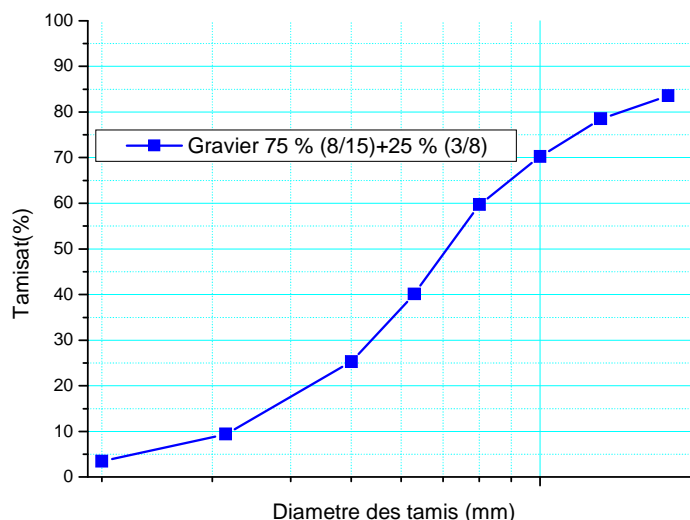


Figure IV-16: Courbe granulométrique de gravier 25% (3/8) + 75% (8/15)

La courbe granulométrique du mélange de deux agrégats est continue.

IV-1-3 L'eau:

L'Eau de gâchage nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite la mise en œuvre du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles telles que matières organiques et alcalines. L'eau potable convient toujours.

La quantité d'eau utilisée, ou plus précisément le rapport eau/liant, détermine (à une forte influence sur la porosité d'un béton), donc elle influe indirectement sur la perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc.

L'eau de gâchage était l'eau qui provient du système d'eau potable de la ville de Ouargla (du laboratoire LTPS).

IV-1-3-1 Composition chimique:

Leur composition est indiquée sur le tableau suivant:

Tableau IV-36 : composition chimiques de l'eau

Eléments	Ca	Mg	K	Na	Cl ⁻	NO ₃	SO ₄	HCO
Mg/l	242	125	31	536	755	14.5	755	124

IV-1-4 Ajout (cendre):

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance. [11]

La plupart des ajouts cimentaires ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et

du C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland. [11]

IV-1-4-1 Cendre des déchets végétaux (palme):

Définition:

Le charbon est une roche carbonée sédimentaire. A l'origine, ce sont des plantes très variées tels que végétaux supérieurs, fougères, spores ou algues. Lors de l'enfouissement de cette matière organique, celle-ci subit un traitement thermique, appelé houillification. La houillification est une carbonisation à basse température, généralement inférieure à 100 à 200°C.

La matière organique libère alors de l'eau, du gaz carbonique et des hydrocarbures, tandis que le résidu s'enrichit en carbone.

Le choix de la matière de l'étude expérimentale s'est révélé stratégique. Parmi les solutions technique et économiquement acceptables.

Dans cette formulation on choisit les palmeraies de la zone de Oued Righ à Témacine située à 150Km au nord du chef lieu de la Wilaya de Ouargla.

Les palmes lorsqu'elles sont sèches, utilisées comme combustible de la maison, la partie supérieure, qui brûle rapidement, est utilisée pour faire partir le feu et la partie proche du tronc comme bois de combustion. La cendre qui en résulte peut être utilisée comme ajouts cimentaire.

La température d'ignition, pendant un certain temps sur le combustible. Pour le bois cette température varie entre 300°C et 600°C, selon l'humidité, la densité du bois et surtout la masse de la pièce à brûler.



Photo IV-7: Palmeraie.

Lorsque le feu a bien refroidi, ramassez les cendres. Passé les au tamis, afin d'éliminer les plus gros morceaux.



Photo IV-8: La cendre issue de la combustion de déchets de palmeraie

Caractéristiques chimiques et minéralogique:

D'après l'analyse chimique réalisée au laboratoire de Ouargla (LTPS), le tableau ci-après présente les pourcentages des éléments rentrant dans les compositions chimiques de la cendre.

Tableau IV-37 : Analyse chimique de la cendre

Elément	Insolubles (%)	Sulfates (%)		Carbonates (%)	Chlorures (%)	
		SO ₃	CaSO ₄ , 2H ₂ O	CaCO ₃	CL ⁻	Na cl
%	27.8	2.89	15.54	17	1.133	1.858

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X est une technique rapide et efficace pour connaître la quantité et la nature des composants contenus dans la cendre. De plus la réactivité pouzzolanique de la cendre est probablement liée à la présence de métakaolinite. [30]

Caractéristiques physiques:

Tableau IV-38: caractéristiques physique de la cendre

couleur	Densité (D _{sup})	Diamètre en (mm)
gris	2.2	<0.08

IV-1-5 Adjuvants:

Définition:

La sélection d'un super plastifiant efficace est aussi cruciale que celle d'un ciment quand on veut fabriquer des BHP parce que tous les types et toutes les marques des superplastifiants ne réagissent pas de la même façon avec tous les ciments. L'expérience démontre que tous les superplastifiants commerciaux n'ont pas la même efficacité pour disperser les particules de ciment à l'intérieur d'un béton en réduisant la quantité d'eau de gâchage et en contrôlant la rhéologie des bétons de très faible rapport eau/liant durant la première heure qui suit le contact entre le ciment et l'eau. [11]

Le produit suivant a été utilisé :

- MEDAFLOW 113 est un superplastifiant haut réducteur d'eau formulé à base de polymères de synthèse combinés.

Caractéristiques physico-chimique:

Tableau IV-39 : Caractéristiques physico-chimique du superplastifiant. [17]

SUPERPLASTIFIANT				
couleur	PH	Teneur en chlore (g/L)	Densité (D_{sup})	Teneur en solides S (%)
Marron	6.5 - 7.5	1	1.12 ±2	36 ±1

Conclusion:

Dans une synthèse des résultats d'identification, on peut tirer les conclusions suivantes:

Les bétons seront fabriqués avec le ciment CRS de type CPA CEM I 42.5.

On utilisera la cendre issue de la combustion des déchets de palme, et un adjuvant super plastifiant de type MEDAFLOW 113 qui est un super plastifiant haut réducteur d'eau formulé à base de polymères de synthèse combinés.

Granulats fins (sable alluvionnaire de H.ESSAYEH, sable de dune de AIN EL-BEIDA),

Tableau IV-40: comparaison entre les caractéristiques du sable alluvionnaire et celle du sable de dune.

caractéristiques	Sable Alluvionnaire	Sable de dune
granulométrie	Étalée	serrée
Module de finesse	Dans les normes	Hors normes
propreté	Bonne	Hors normes

D'après ce tableau, le sable de dune ne peut pas être utilisé seul pour le confectionnement du béton, à cause de certaines caractéristiques hors normes. Le mélange des deux sables pourrait conduire à un bon résultat après une correction de leurs caractéristiques.

Pour le gravier, deux classes seront utilisées, gros granulats concassés Calcaires (gravier 3/8 et gravier 8/15), de la carrière de HAUD EL-HAMRA.

Après étude des caractéristiques physico-mécanique et chimique des différents matériaux qui rentrent dans la composition des bétons à haute performance, nous pouvons étudier la formulation d'un béton BHP dans le chapitre qui suit et faire les analyses afférentes.

Chapitre V:*Formulation des bétons (BHP) et Essais.***Introduction :**

La recherche des bétons à hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

V-1 Formulation et dosage des bétons.

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton,

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes : [3]

- a- Détermination d'une formule théorique prévisionnelle
- b- Optimisation du mélange en laboratoire
- c- Validation de la formule centrale

V-1-1 Environnement des ouvrages :

Certains milieux sont agressifs pour les matériaux de construction ; eaux usées, eaux souterraines chargées en sulfates, milieux marins ou agricoles.

La nappe phréatique de la région de Ouargla avec sa nature agressive forme l'assiette d'un nombre important d'ouvrages hydraulique et génie civil qui reposent sur celle-ci, parmi les éléments agressifs contenus dans la nappe nous citons: le chlore, le carbone et le sulfate.

Les analyses chimiques des eaux de cette nappe, sont représentées sur le tableau suivant:(selon ANRH).

Tableau V-41: la concentration des éléments agressifs. [31]

	Concentration minimale (mg/l)	Concentration maximale (mg/l)
Chlore (CL ⁻)	68	185000
Carbonate (HCO ₃)	24	655
Sulfate (SO ₄)	688	115000

Le béton, par une composition adaptée lui procurant des caractéristiques spécifiques, résiste durablement dans ces environnements (fondations dans des sous-sols agressifs, ouvrages soumis à des conditions climatiques sévères, aux cycles gel dégel,.....etc.).

Dans cette étude, la résistance du béton recherché est un béton de résistance à la compression entre à 50 et 100 MPa.

V-1-2-1 Définitions et formules:

Avant de traiter la méthode de formulation des BHP utilisée à L'Université de Sherbrooke, on commencera par présenter brièvement les définitions et les formules suivantes:

Granulats à l'état saturé superficiellement sec (SSS):

Par convention, en Amérique du nord, l'état de référence des granulats est appelé l'état **saturé superficiellement sec** (état SSS). Cet état est défini dans la norme ASTM C127 pour le gros granulat et dans la norme ASTM C128 pour le granulat fin.

Pour obtenir et mesurer l'état **saturé superficiellement sec** (état SSS), en laissant les gros granulats immergés dans de l'eau pendant 24 heures, en les essuyant et en séchant ensuite jusqu'à la masse constante dans une étuve.

L'état **saturé superficiellement sec** (état SSS) du granulat fin est atteint lorsqu'un petit tronc de cône de sable s'affaisse par suite des forces de capillarité entre les grains de sable humide qui ne sont plus suffisamment fortes pour assurer la cohésion du cône.

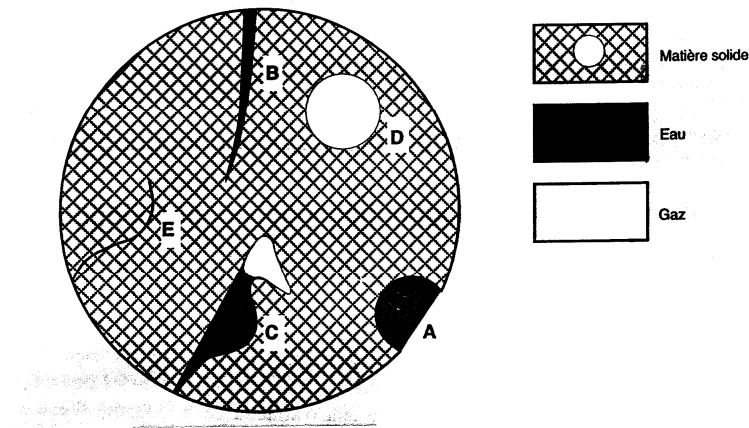
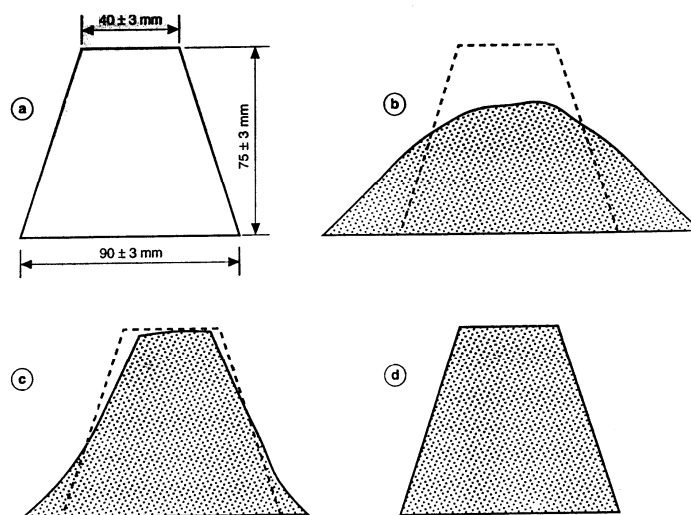


Figure V-17: Représentation schématique d'un granulat à l'état SSS. [11]



- Utilisation du minicône normalisé.
- Sable ayant une teneur en eau inférieure à l'état SSS.
- Sable à l'état SSS.
- Sable ayant une teneur en eau supérieure à l'état SSS.

Figure V-18: Détermination de l'état SSS pour un sable. [11]

Teneur en eau totale d'un granulat (E_{tot}):

Est définie comme étant la quantité d'eau évaporable divisée par la masse sèche du granulat et elle s'exprime en pourcentage. Pour mesurer cette valeur, il suffit de placer une certaine quantité de sable humide ou de granulat humide dans une étuve à 105°C et de peser le granulat lorsqu'il a atteint une masse constante.

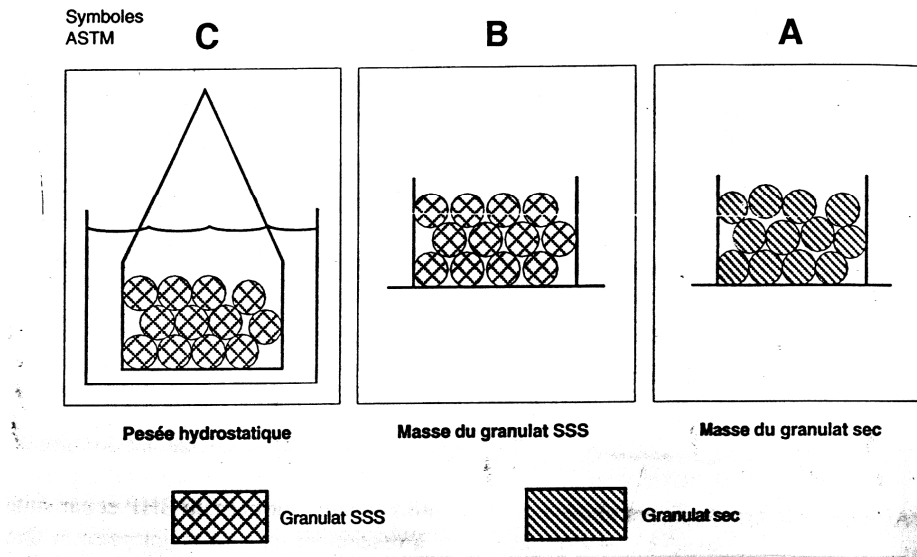


Figure V-19: Représentation schématique de la mesure de l'absorption et de la densité d'un gros granulat à l'état SSS. [11]

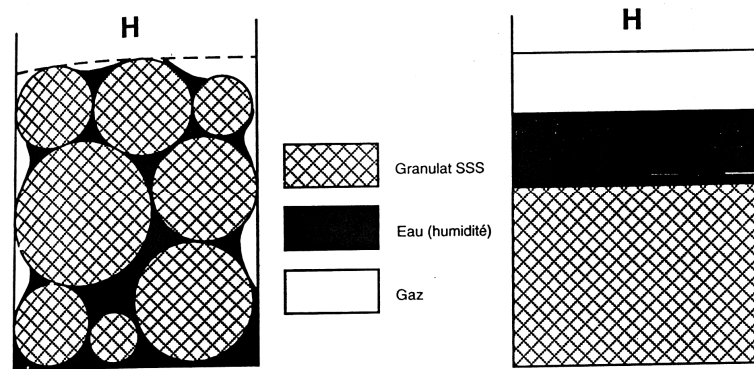


Figure V-20: Représentation schématique d'un granulat mouillé. [11]

La teneur en eau totale, E_{tot} est définie comme suite:

$$E_{tot} = \frac{H - A}{A} \cdot 100$$

H : Masse des granulats humides.

A : Masse des granulats secs.

Teneur en eau absorbée d'un granulat (E_{abs}):

L'absorption d'un granulat, est égale à :

$$E_{abs} = \frac{B - A}{A} \cdot 100$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

A : Masse des granulats secs.

Humidité d'un granulat (E_h):

L'humidité d'un granulat E_h est égale à :

$$E_h = E_{tot} - E_{abs}$$

E_{tot} : La teneur en eau totale.

E_{abs} : L'absorption d'un granulat.

Densité d'un granulat (SSS):

La densité SSS d'un granulat correspond à la densité du granulat lorsqu'il est à l'état SSS. Voir la figure V-20

$$d_{sss} = \frac{B}{B - C}$$

B : Masse des granulats à l'état SSS.

C : Pesée hydrostatique des granulats

V-1-2-1.6 Teneur en ajout cimentaire:

Lorsque les ajouts cimentaires ou les fillers sont ajoutés lors du malaxage, le terme teneur en ajout cimentaire se rapporte à la masse de ciment utilisée pour fabriquer le béton. Quand ils sont incorporés dans le ciment, le terme teneur en ajout cimentaire se rapporte à la masse totale du liant (ciment + ajout cimentaire ou filler).

La densité, d_c , du ciment Portland ou de tout autre ajout cimentaire peut être calculée selon la méthode ASTM C188 en utilisant l'expression:

$$d_c = \frac{A}{A - C}$$

A : Masse de ciment sec.

C : Pesée hydrostatique du ciment

V-1-2-1.7 Teneur en superplastifiant:

Il est toujours préférable d'exprimer la teneur en super plastifiant en pourcentage de solides par rapport à la masse de ciment parce que les super plastifiants commerciaux n'ont pas la même teneur en solides (actifs) ni la même densité.

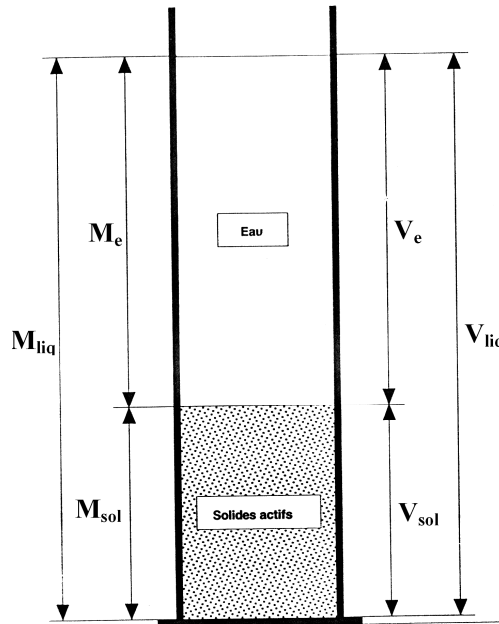


Figure V-21 : Représentation schématique d'un super plastifiant [11]

a- Densité d'un super plastifiant:

En utilisant les notations qui apparaissent à la figure V-23, la densité est égale à :

$$d_{sup} = \frac{M_{liq}}{V_{liq}}$$

M_{liq} : Masse de liquide de super plastifiant

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

b- Teneur en solides:

Elle est égale à :

$$s = \frac{M_{sol}}{M_{liq}} \cdot 100$$

M_{sol} : Masse des particules solides de super plastifiant

M_{liq} : Masse de liquide de super plastifiant

c- Masse d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant:

Lorsque l'on ajoute plusieurs litres de super plastifiant dans un béton, il faut tenir compte de la quantité d'eau que l'on ajoute ainsi, de façon à pouvoir calculer le rapport (eau / liant) réel du béton. Il est donc nécessaire de savoir calculer la quantité d'eau contenue dans un certain volume de super plastifiant.

$$M_E = \frac{V_{liq} \cdot d_{sup}}{s} \cdot (100 - s)$$

Lorsque l'on utilise les unités g et cm³ ou kg et L, on peut alors exprimer M_E et V_E par la même valeur:

$$V_E = \frac{V_{liq} \cdot d_{sup}}{s} \cdot (100 - s)$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de superplastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

d- Masse des particules solides et volume de super plastifiant nécessaire:

Si C est la masse de liant utilisée dans un béton et si d est le dosage en super plastifiant suggéré par le fabricant, alors la masse de solides est:

$$M_{sol} = \frac{C \cdot d}{100}$$

C : est la masse de liant.

d : est le dosage en super plastifiant (la masse de solides)

Le volume de super plastifiant liquide qui contient M_{sol} se calcule de la façon suivant:

$$V_{liq} = \frac{M_{SOL}}{s \cdot d_{sup}} \cdot 100$$

M_{sol} : Masse des particules solides de super plastifiant

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de superplastifiant.

e- Volume des solides contenus dans V_{liq} :

$$V_{sol} = V_{liq} \cdot \left(1 - d_{sup} \cdot \frac{100 - s}{100}\right)$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant

s : Teneur en solides de superplastifiant.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

L'étude a été menée sur cinq types des compositions des bétons suivantes :

- Béton (10): 100% sable alluvionnaire sans cendre de palme.
- Béton (20): 100% de sable de dune sans cendre de palme
- Béton (30): 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune sans cendre de palme.
- Béton (40): 75 % de sable alluvionnaire et 25 % sable de dune avec cendre de palme
- Béton (50): 100% de sable de dune avec cendre de palme.

V-1-2-2.7 Type et composition des différents bétons:

Composition d'un béton à haute performance a base de sable Alluvionnaire
Sans cendre (B10)

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

F_{c28}: ≥50 MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment	3.14	100

	%			
Granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros	2.50	2.20	0.308	-1.9
fin	2.45	0.638	0.314	-0.32

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad M = M_{sss} (1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
1.12	36	4.92	12.20	8.74	3.46

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3		Volume L/m3		Dosage état SSS kg/m3		Correction D'humidité L/m3		Composition 1 m3		Gâchée d'essais	
Eau	150	150	150						160			
Ciment	410	131	410						410			
	410											
Gros granulat	1075	430	1075			+ 20			1055			
Granulat fin		270	662			-2			660			
Air	POURCENTAGE	15	0									
	1.5 %											
Super plastifiant	1.2 %	3.46	4.92			- 8.74			12.2			
Total		730	2302			9.26						

**Composition d'un béton à haute performance a base de sable de dune
Sans cendre (B20)**

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

F_{c28} ≥ 50 MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment	3.14	100

	%			
granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros	2.50	2.20	0.308	-1.90
fin	2.52	0.234	0.058	-0.176

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad M = M_{sss}(1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
1.12	36	15 4.92	24 12.20	21 8.74	11 3.46

Matériaux		1	2	3	4	5	6
		Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition	
						1 m3	Gâchée d'essais
Eau	1	2 150	2 150	2 150		23 161	25
Ciment	E/L = 0.37	3 410	8-1 131	4-1 410		4-1 410	26-1
		4-2	8-2	4-2		4-2	26-2
		4-3	8-3	4-3		4-3	26-3
Gros granulat	5	1075	9 430	5 1075	18 + 20	17 1055	27
Granulat fin			13 270	14 681	20 -1	19 680	28
Air		POURCENTAGE	10 15	0			
	6	1.5 %					
Super plastifiant	7	1.2 %	11 3.46	15 4.92	21 - 8.74	24 12.2	29
Total			12 730	16 2321	22 10.26		30

**Composition d'un béton à haute performance a base de sable de dune
Corrige sans cendre (B30)**

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

$F_{c28} \geq 50 \text{ MPa}$

COMPOSITION D'UN BHP

	G_c	%
ciment	3.14	95

	%			
Granulat	G_{sss}	E_{abs}	E_{tot}	E_h
Gros	2.50	2.2	0.308	-1.9
fin	2.48	0.453	0.226	-0.227

$E_h = E_{tot} - E_{abs}$ $M = M_{sss}(1 + E_h)$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G_{sup})	Teneur en solides (s) (%)	$M_{sol} = c*d/100$	$V_{liq} = M_{sol} * 100 / s * G_{sup}$	$V_E = V_{liq} * G_{sup} * (100-s) / 100$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E$
1.12	36	4.92	12.20	8.74	3.46

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3		Volume L/m3		Dosage état SSS kg/m3		Correction D'humidité L/m3		Composition 1 m3		Gâchée d'essais	
Eau	150	150	150						161			
Ciment	410	131	410						410			
	-	-	-						-			
	-	-	-						-			
Gros granulat	1075	430	1075			+ 20			1055			
Granulat fin		270	670			- 1			669			
Air	POURCENTAGE		15		0							
	1.5 %											
Super plastifiant	1.2 %	3.46	4.92			- 8.74			12.2			
Total		730	2310			10.26						

**Composition d'un béton à haute performance a base de sable de dune
corrige avec cendre (B40)**

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

F_{c28} ≥ 50 MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment	3.14	95
cendre	2.2	5

	%			
granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros	2.50	2.20	0.308	-1.9
fin	2.48	0.453	0.226	-0.227

$$E_h = E_{tot} - E_{abs} \quad M = M_{sss}(1 + E_h)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
1.12	36	4.92	12.20	8.74	3.46

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	1 m3	Gâchée d'essais						
Eau	150	150	150		161							
Ciment	400	128	400		400							
Cendre	20	9.09	20		20							
	-	-	-		-							
Gros granulat	1075	430	1075	+ 20	1055							
Granulat fin		264	655	-1	654							
Air	POURCENTAGE	15	0									
	1.5 %											
Super plastifiant	1.2 %	3.46	4.92	- 8.74	12.2							
Total		736	2305	10.26								

**Composition d'un béton à haute performance a base de sable de dune
avec cendre (B50)**

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke
GACHEE :

F_{c28} ≥ 50 MPa

COMPOSITION D'UN BHP

	G _c	%
ciment	3.14	95
cendre	2.2	5

	%			
granulat	G _{sss}	E _{abs}	E _{tot}	E _h
Gros	2.50	2.20	0.308	-1.9
fin	2.52	0.234	0.058	-0.176

$E_h = E_{tot} - E_{abs}$ $M = M_{sss}(1 + E_h)$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{liq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _E = V _{liq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{liq} -V _E
1.12	36	4.92	12.20	8.74	3.46

Matériaux	1		2		3		4		5		6	
	Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état SSS kg/m3	Correction D'humidité L/m3	1 m3	Gâchée d'essais						
Eau	150	150	150		161							
Ciment	400	128	400		400	26-1						
Cendre	20	9.09	20		20	26-2						
	-	-	-		-	26-3						
Gros granulat	1075	430	1075	+ 20	1055	27						
Granulat fin		264	666	- 1	665	28						
Air	POURCENTAGE	15	0									
	1.5 %											
Super plastifiant	1.2 %	3.46	4.92	- 8.74	12.2	29						
Total		736	2316	10.26		30						

Après application numérique, les compositions des bétons étudiés sont représentées dans le tableau ci-après:

Tableau V-42: Composition théorique des différents bétons.

Désignation		Béton10	Béton 20	Béton 30	Béton 40	Béton 50
E/L		0.39	0.39	0.39	0.38	0.38
L'eau de gâchage (Kg)		160	161	161	161	161
Ciment (Kg)		410	410	410	400	400
Cendre (Kg)		-	-	-	20	20
Gros granulats		1055				
Gravier (Kg)	3/8	264				
	8/15	791				
Granulat fin		660	680	669	654	665
Sable de dune (Kg)		-	680	167	164	665
Sable Alluvionnaire (Kg)		660	-	502	490	-
super plastifiant	(Kg)	12.2				
	(%)	1.2				

Tableau V- 43: Taux des ingrédients des compositions des bétons.

Désignation		B10	B20	B30	B40	B50
L'eau de gâchage (%)		06.96	06.94	06.97	07.00	6.96
Ciment (%)		17.84	17.68	17.77	18.24	18.15
Cendre (%)		-	-	-	0.86	0.86
Gravier (%)	3/8	11.49	11.38	11.44	11.46	11.41
	8/15	34.43	34.12	34.28	34.35	34.19
Sable de dune (%)		-	29.33	07.24	07.12	28.74
Sable Alluvionnaire (%)		28.73	-	21.75	21.28	-
super plastifiant (%)		00.53	00.52	00.52	00.53	00.52
Totale en (kg/m ³)		2297.2	2318.2	2307.2	2302.2	2313.2

Dans cette formulation, le ciment utilisé pour les compositions des bétons est un ciment résistant aux sulfates, représente entre 17 et 18,30 % des différents type des bétons, qui mélange à de l'eau forme une pâte plastique.

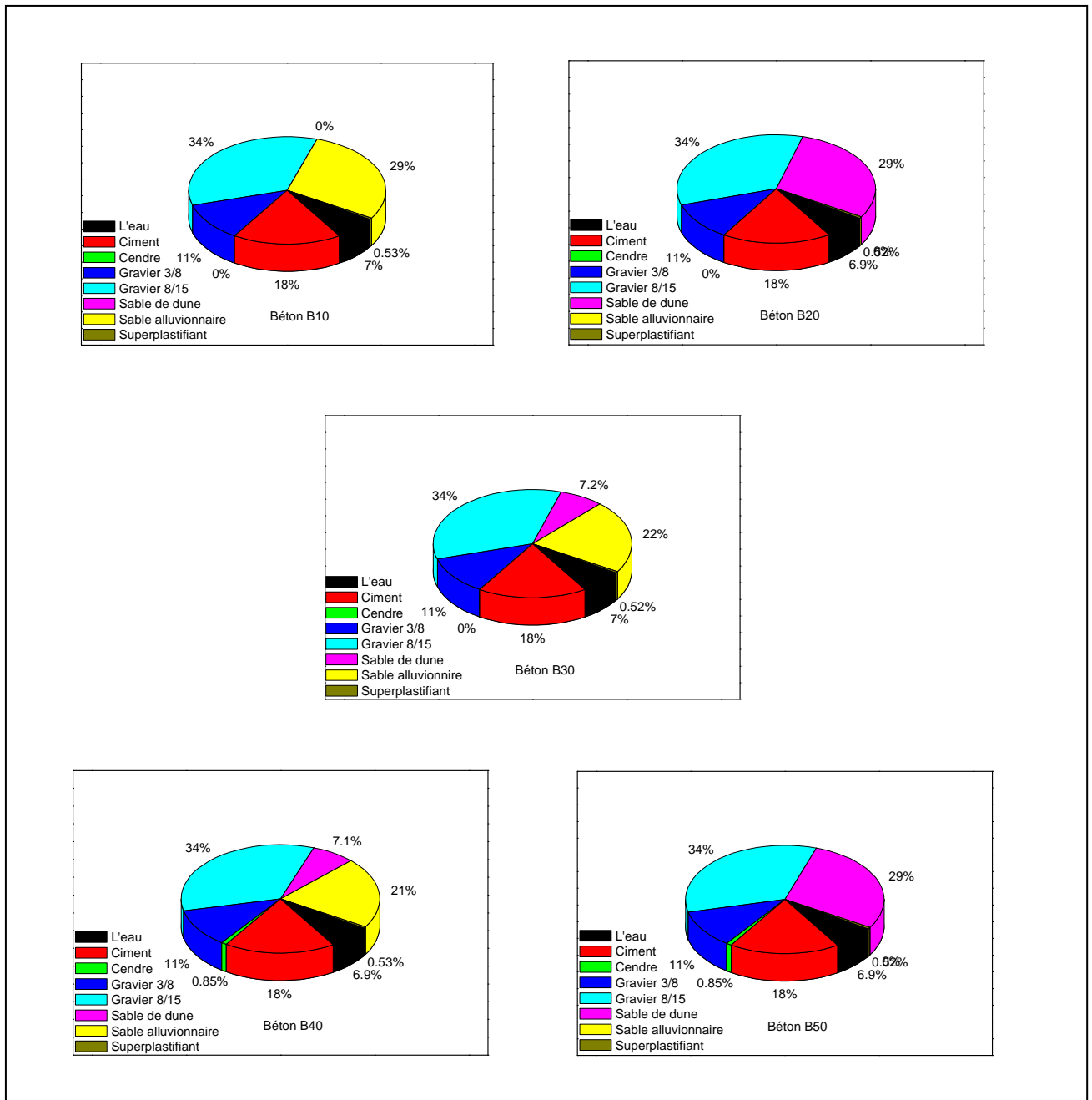
La cendre utilisée issue de la combustion de déchet de palmeraie est de 5% du poids du ciment (0,86 % du mélange).

La formulation adoptée pour composer ces bétons a été basée sur une meilleure maniabilité, pour cette raison l'utilisation du superplastifiant d'environ 1,2 et 1,8 % est nécessaire (0.52 à 0.53 % de mélange).

Les granulats constituant de 74 à 75 % du volume d'un béton.

La quantité d'eau utilisée, ou plus précisément le rapport eau/liant, qui représente entre 0,38 et 0.39.

Les graphiques ci-après présente une répartition des ingrédients des différentes compositions des bétons (B10, B20, B30, B40 et B50)



FigureV-22: Proportion des différents composants des bétons

Après la détermination du dosage avec différents composants, une série d'essais a été effectuée ayant pour but de connaître la performance de cette composition.

V-2 Confection et contrôle des éprouvettes:**V-2-1 Malaxage du béton:**

Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion, pour cela on commence à malaxer selon les étapes suivantes:

1. Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et les fines.
2. Malaxer pendant 30s.
3. Ajouter l'eau pendant 1 min 30 s, le malaxeur en marche.
4. Arrêter le malaxeur et ajouter le super plastifiant à la surface du béton.
5. Malaxer pendant 2 min.



Photo V-9: Malaxeur ZYKLOS d'une cuve de diamètre 80 cm et 32 cm d'hauteur.



Photo V-10: Malaxage béton 40

V-2-2 Serrage du béton:

Les éprouvettes sont moulées en deux couches et compactées respectivement à l'aide d'une aiguille et d'une table vibrante, l'opération consiste à réduire au maximum le pourcentage des vides à l'intérieur du béton et augmenter la compacité. Ils sont conservés ensuite à une température $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Photo V-11: Photo d'une table vibrante

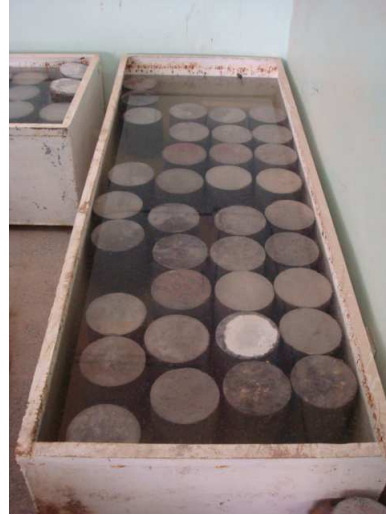
V-2-3 Conservation des éprouvettes:Photo V-12: Conservation dans l'air libre en température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).Photo V-13: Conservation dans l'eau Potable en température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).**V-3 Essais effectués sur les bétons:****V-3-1 Programme des essais:**

Tableau V-44: Programme des essais sur bétons.

Essais réalisés	Eprouvtes utilisées		Echéances (jours)
	Ø 16x32 cm	7x7x28 cm	
Démoulage après à 24 heures. Conservation dans l'air			
Compression	3/15	-	4, 7, 14, 28,91
Traction par Fendage	3/15	-	4, 7, 14, 28,91
retrait	-	3/3	4, 7, 28,91
Conservation dans l'eau Potable			
Compression	3/12	-	7, 14, 28,91
Traction par Fendage	3/12	-	7, 14, 28,91
Conservation dans environnement agressif (sebkha)			
Compression	3/9	-	7, 28,91
Traction par Flexion	-	3/9	7, 28,91
Conservation dans environnement agressif (réseau d'assainissement)			
Compression	3/9	-	7, 28,91
Traction par Flexion	-	3/9	7, 28,91

V-3-2 Essai d'Ouvrabilité:

Après étude de la formulation théorique des différents bétons haute performance nous expérimentons ces formulations en adaptant la quantité nécessaire d'eau avec un rapport $E/L \leq 0.40$ plus un superplastifiant et en respectant un affaissement au cône d'Abrams (supérieur ou égale à 15 cm).

Le dosage des bétons B10, B20 et B30 sont arrondis à 420 kg/m³ de ciment au lieu de 410 kg/m³ afin de les comparer aux bétons B40 et B50 dont les dosages sont 400kg de ciment plus 20 kg de cendre de palme.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau V-45: Variation de l'affaissement et la teneur de super plastifiant.

Désignation	Béton10	Béton 20	Béton 30	Béton 40	Béton 50
E/L	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
L'eau de gâchage (Kg)	163	163	163	163	163
Ciment (Kg)	420	420	420	400	400
Cendre (Kg)	-	-	-	20	20
super plastifiant (%)	1.2	1.6	1.4	1.6	1.8
L'affaissement en (cm)	19	17	18	16	15

Le tableau V- 46 présente les résultats de la masse volumique des différents types du béton.

Tableau V-46: Masse volumique des différents bétons frais.

Type du béton	B10	B20	B30	B40	B50
Masse de l'éprouvette (Kg)	15.65	15.90	15.65	15.98	15.65
Masse volumique du béton frais (kg/m ³)	2443.2	2484.37	2444.30	2496.87	2445.31

Résultats et discussions:

On remarque que la quantité d'eau de gâchage calculée théoriquement n'est pas suffisante pour l'obtention de la maniabilité recherchée. donc une quantité supplémentaire d'eau est nécessaire et/ou un ajout de superplastifiant. (Selon tableau V-45)

Selon tableau V-45. On constate que le béton de type B40, exige une consistance de 16 cm mesuré au cône d'ABRAMS.

L'utilisation de la cendre de palme a provoqué une accélération de prise remarquable, donc l'emploi du retardataire de prise s'avère nécessaire, estimer la probabilité d'obtenir des pertes d'affaissement.

L'emploi d'un fluidifiant est obligatoire pour l'obtention de performances intéressantes, c'est donc dans cette perspective que l'augmentation du dosage en fluidifiant est nécessaire afin d'abaisser au maximum le rapport E/L.

V-3-3 Essais de résistance:

Pour chacune des compositions, 192 éprouvettes cylindriques Ø 16x32 cm et 21 éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³ sont fabriquées à partir d'une gâchée présentée dans les bétons 10, 20, 30, 40 et 50. Les éprouvettes sont moulées en deux couches et compactées respectivement à l'aide d'une aiguille et d'une table vibrante, puis placées en chambre de 20±1°C.

La machine d'essai est une presse hydraulique à deux plateaux horizontaux appliquant la charge d'une manière continue et sans choc.

Le tableau V- 47 présente les résultats de la masse volumique des différents types du béton.

Tableau V- 47: Masse volumique des différents bétons durcis.

Type du béton	B10	B20	B30	B40	B50
Masse d'éprouvette cylindrique (Kg)	15.30	15.50	15.30	15.80	15.30
Masse volumique durcie (kg/m ³)	2389.9	2421.87	2390.0	2430.76	2390.62

Mesure des résistances

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm surfacées. L'effort est appliqué par une presse hydraulique. La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 16x32 cm par des essais de fendage.



Photo V-14: Essais de résistance à la compression



Photo V-15: Essais de résistance à la traction par fendage.

Les résultats de la première série d'essais sur ces compositions sont donnés dans le tableau ci après:

Tableau V- 48: Résistance à la compression des éprouvettes conservées à l'air libre

Types des Bétons	Résistance en MPa				
	4 jours	7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
Béton 10	-	12	14	20	23
Béton 20	-	14	21	22	22
Béton 30	12	14	17	25	29
Béton 40	29	33	37	54	58
Béton 50	12	18	18	18	18

Les résultats de ces essais pour les différents types de bétons sont représentés graphiquement ci-après:

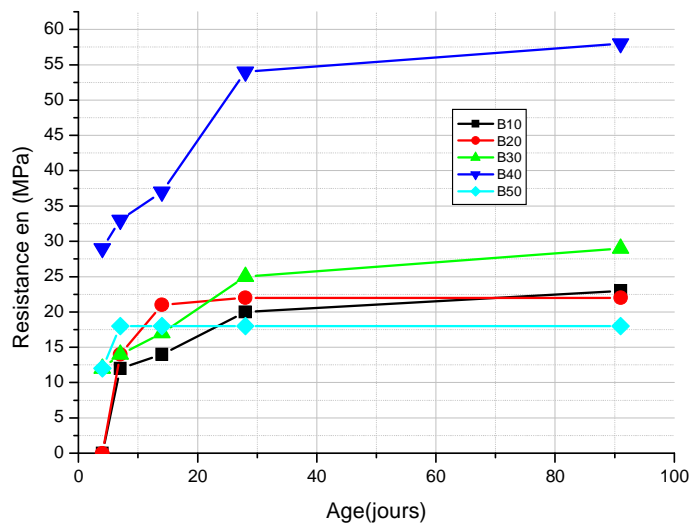
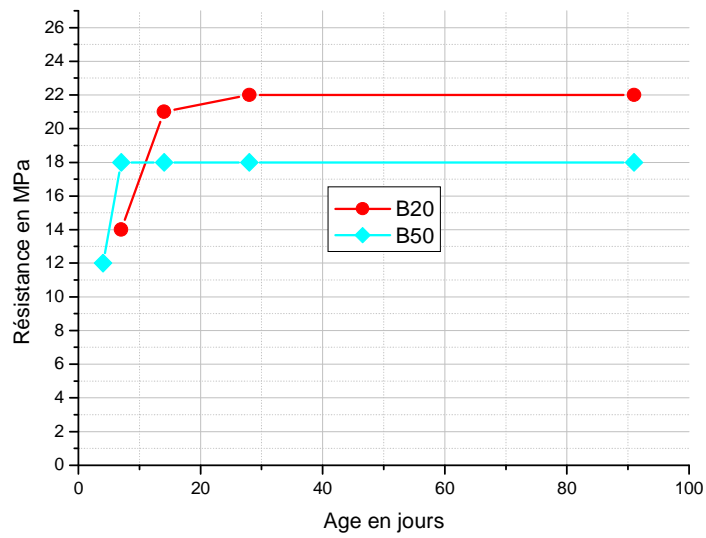


Figure V- 23: Résistance à la compression des différents bétons

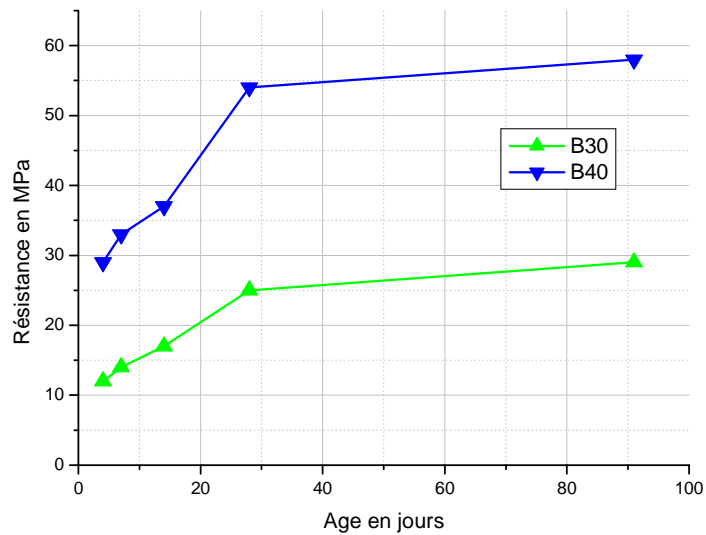
Les graphes représentant l'évolution des résistances en fonction de la cendre sont donnés ci-après:

Résistance a la compression en MPa



(a)

Résistance a la compression en MPa



(b)

Figure V- 24: Influence de la cendre sur différents bétons (B20, B50) et (B30, B40)

Résultats et discussions:

Le broyage de la cendre et un malaxage à sec a diminué la teneur en air dans le béton. Ce qui justifier l'absence relative de bulles d'air sur la face extérieure et à l'intérieure des éprouvettes.

L'observation de la figure V-24, (a) et (b) permet de constater l'influence positive de l'introduction de la cendre de palme dans le béton B40, et négative pour le béton B50.

A première vue nous constatons que les résultats les plus frappants et les plus forts du tableau V-48, sont celles du béton B40, à 4j,7j,14j,28,91 jours. En analysant ce béton B40 et B30 qui est aussi sensiblement meilleur que les autres bétons B10,B20,B30 et B50, nous remarquons que c'est deux bétons B30 et B40 ont la même composition (voir Tableau V-41) , en eau , sable, agrégats, sauf que la quantité de ciment diminuée de 20 kg à été substituée par la cendre de palme dans le béton B40.

Afin, de bien analyser les résultats du tableau V-42, les bétons ont été regroupés deux à deux (B20 et B50), (B30 et B40), figure V-24 a et b, les bétons ont une même composition (eau, sable, agrégats), la différence réside seulement par la substitution de 20 kg de ciment avec la même quantité de cendre de palme dans les bétons B40 et B50 se la figure V-24-b les courbes des bétons(B30,B40) sont toujours croissant en fonction de l'age du béton. L'écart est toujours supérieur à 50%, depuis la jeune age jusqu'à 91 jours, 58.62% à 4j; 57.57% à 7 j; 54.05% à 14 j; 53.7% à 28 j et 50% à 91 j.

Cela veut dire que l'effet de la cendre sur ce béton est positif du point de vue résistance à la compression.

Dans le tableau V-45 nous constatons aussi que l'affaissement au cône d'Abrams pour les béton B40 et B50 est inférieur par rapport aux autres; nous supposons que la cendre introduite dans ces bétons à une faculté d'absorption d'une quantité d'eau importante pour son hydratation ce qui s'explique aussi par l'augmentation du superplastifiant. L'écart de quantité d'eau 66.1 l figurant dans le tableau V-49 pour le B40 s'explique par le fait que la cendre de palme probablement favorise et accéléré l'évaporation d'eau de la masse volumique du béton et remplace les vides d'air à l'intérieure du béton. Conclusion nous pouvons dire que le sable de dune pourrait être introduit dans la masse du béton en quantité bien étudiée avec le sable alluvionnaire afin d'obtenir une granulométrie continue et acceptable. L'ajout de la cendre de palme ou une substitution d'une certaine quantité de ciment pourrait donner de bons résultats de résistance à la compression ainsi qu'à la traction.

Tableau V-49: Ecart de quantité d'eau évaporé pour chaque béton.

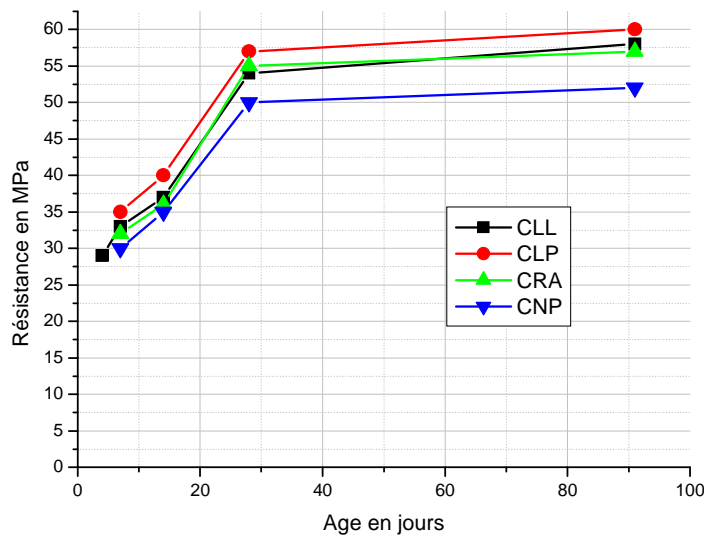
Type du béton	B10	B20	B30	B40	B50
Masse volumique du béton frais M_1 (kg/m ³)	2443.2	2484.37	2444.30	2496.87	2445.31
Masse volumique du béton durci M_2 (kg/m ³)	2389.9	2421.87	2390.0	2430.76	2390.62
Ecart (M_1-M_2)	53.3	62.5	54.3	66.11	54.69

Sur la base des résultats des essais effectués (Selon la figureV-23), nous pouvons conclure clairement que la composition du béton à haute performance est B40.

Donc le béton B40 est le béton qui a été pris et étudié dans les différents essais et dans différents milieux. Les résultats sont notifiés sur le tableauV-50.

Tableau V- 50: Résistance à la compression du béton B40 dans différents milieux.

Types des Bétons	Résistance à la compression en MPa				
	4 jours en	7jours	14 jours	28 jours	91 jours
Béton 40	Conservation a l'aire libre				
	29	33	37	54	58
	Conservation dans l'eau potable				
	-	35	40	57	60
	Conservation dans réseau d'assainissement				
	-	32	36	55	57
	Conservation dans la nappe Phréatique				
-	30	35	50	52	



CLL: conservation dans l'aire libre.
 CLP: conservation dans l'eau potable.
 CRA: conservation dans réseau d'assainissement.
 CNP: conservation dans la nappe Phréatique

Figure V- 25: Résistance a la compression du béton B40 dans différents milieux

Résultats et discussions:

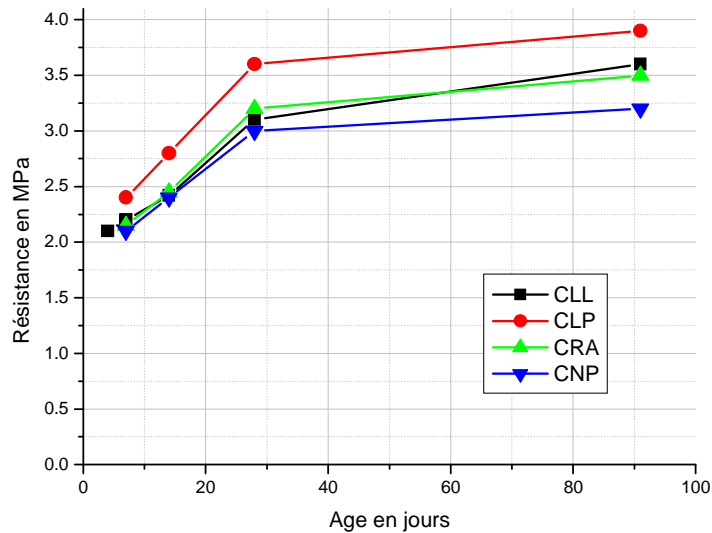
Les résultats obtenus de ce béton B40 dans différents milieux et à différents ages, tableauV-50 confirment les résultats du tableauV-48. Tous les bétons croient proportionnellement malgré que les milieux soient complètement différents. Nous constatons que les résistances à la compression après 28 jours restent toujours supérieur à 50 MPa quelque soit le milieu de conservation. Encore plus, les résistances augmentent avec l'age.

Dans le tableau V- 51 nous montrons les résultats de l'essai de traction.

Tableau V- 51: Résistance à la Traction du béton B40 dans différents milieux

Types des Bétons	Résistance en MPa				
	4 jours en	7jours	14 jours	28 jours	91 jours
Béton 40	Conservation a l'aire libre				
	2.10	2.20	2.42	3.10	3.60
	Conservation dans l'eau potable				
	-	2.4	2.8	3.6	3.9
	Conservation dans réseau d'assainissement				
	-	2.15	2.45	3.2	3.1
	Conservation dans la nappe Phréatique				
-	2.10	2.4	3	3.2	

Résistance a la traction en MPa



CLL: conservation dans l'aire libre.
 CLP: conservation dans l'eau potable.
 CRA: conservation dans réseau d'assainissement.
 CNP: conservation dans la nappe Phréatique

Figure V-26: Résistance a la traction du béton B40 dans différents milieux

Résultats et discussions:

Après analyse des résultats des essais de traction dans les mêmes milieux de conservation que les éprouvettes en compression et aux mêmes ages, nous observons les mêmes allures des courbes. Les meilleurs résultats en compression et en traction sont obtenus dans les milieux eau potable, ensuite à l'air libre, après en milieu assainissement et enfin dans la nappe phréatique.

V-3-4Essai ultrasonique:

C'est un essai non destructif très important qui permet de détecter a la fois plusieurs caractéristiques du béton durci telles que: le degré de compacité, le taux de fissuration.

Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton.

Mesure de la vitesse de son:

Trois méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse de son :

- Mesure par la transmission indirecte ou de surface
- Mesure par la transmission semi direct.
- Mesure par la transmission directe.

Cette dernière présente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface du béton doit être raisonnablement plane et bien nettoyée.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde. La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante: [4]

$$V = \frac{S}{t}$$

V: vitesse de propagation en m/sec

S: distance entre les têtes en m.

t: temps en microseconde

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique (E_d) selon l'expression suivante: [4]

E_d : module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa.

$$E_d = V^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

V: représente la vitesse de ondes, exprimée en Km/s.

γ : la masse volumique du béton en Kg/m³

ν : coefficient de poisson du béton, dont la valeur est 0.15 pour un béton haute résistance

Pour les bétons courants, on pourra admettre que la résistance et le module d'élasticité dynamique sont liés par la relation: [4]

$$\text{Résistance} = 16.7 \text{ Exp} \left(\frac{E_d}{122500} \right)$$

Des travaux effectués montrent qu'il y a une relation directe entre la vitesse de propagation des ondes dans un béton et sa qualité. Le tableau V-51 donne un classement.

Tableau V-52: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions [4]

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4575	Excellente
3660 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3600	Mauvaise
Inférieure à 2135	Très mauvaise

Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) sur béton de type B40.



Photo V-16: Appareil de mesure la vitesse de son

Le tableau V-53 nous donne les résultats trouvés dans cet essai.

Tableau V-53: Variation de la résistance par la vitesse de son et module d'élasticité dynamique en fonction de l'âge du béton.

Types des Bétons	Béton 40				
	4 jours en	7 jours	14 jours	28 jours	91 jours
Vitesse de propagation (m/s)	3939	3940	3940	3942	3943
Module d'élasticité dynamique en (MPa)	35777,09	35795,26	35795,26	35831,61	35849,79
Résistance en (MPa)	22,364	22,367	22,367	22,374	22,377

Le graphe représente l'évolution de la résistances sont donnés ci-après:

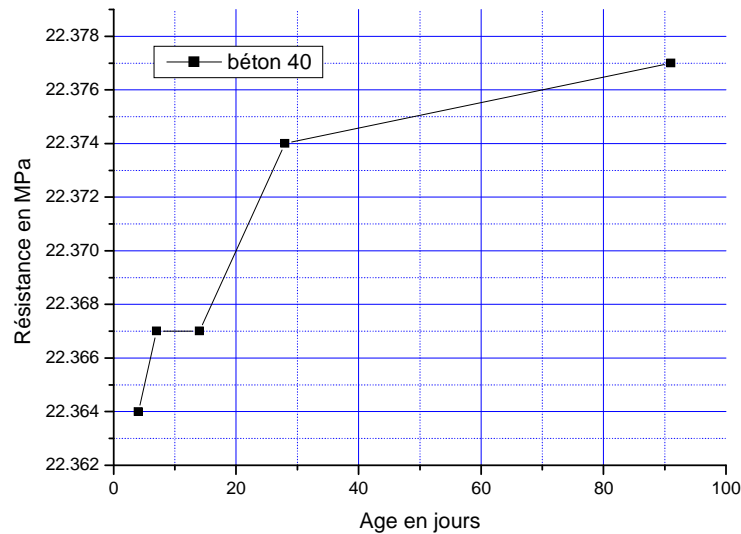


Figure V-27: Résistance par la vitesse de son du béton B40

Le tableau suivant donnée les résultats des résistance mesures (ultra-son et par compression)

Tableau V-54: résistances comparatives (ultra-son et compression)

Technique utilisée	Résistance (en MPa)				
	4 (jours)	7 (jours)	14 (jours)	28 (jours)	91(jours)
Ultrason	22.364	22.367	22.367	22.374	22.377
Compression	29	33	37	54	58

Discutions des résultats:

On estime que l'écart entre la résistance réelle (par compression) et la résistance (a 28 jours) estimée par cette technique est de l'ordre de 40 %.[4]

L'essai d'auscultation dynamique est très efficace pour le contrôle de la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures ou les imperfections intérieures. Cependant leur utilisation pour une évaluation de la résistance reste tributaire de beaucoup de paramètre. [4]

D'une façon générale, la résistance augment avec la vitesse de propagation des impulsions. Mais il n'existe pas encore de relation unique valable pour tous les bétons. En effet pour un béton très haute résistance, la vitesse de son n'augmente plus au-delà de 35 MPa environ car elle est principalement fonction de la compacité du béton , étant donné qu'un béton de classe supérieure à 35 MPa est pratiquement toujours très compact [4]

V-3-5 Essais de Retrait:

Mesure de retrait:

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules à trois alvéoles prismatiques (7x7x28 cm) munies de plots en laiton à leurs extrémités qui serviront à les positionner sur l'appareil de mesure. Trois éprouvettes sont coulées à l'occasion pour le retrait total.

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans une chambre dont l'ambiance est contrôlée avec une température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).

Les mesures sont effectuées, suivant un rythme adapté à la cinétique du phénomène observé, sur un rétractomètre digitale de précision de ± 0.02 mm (figure V-46).

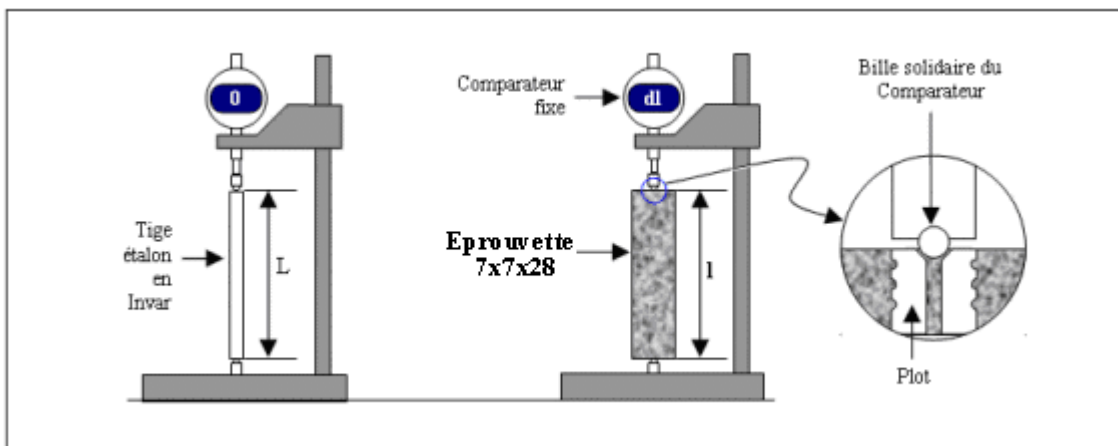


Figure V-28: Appareillage pour la mesure du retrait (rétractomètre)

Le retrait du béton durci est égale à la somme des retraits individuels, soit le retrait thermique, le retrait endogène et le retrait de séchage. On peut alors écrire: [26]

$$e_{\text{tot}} = e_{\text{thermique}} + e_{\text{endogène}} + e_{\text{séchage}}$$



Photo V-17: éprouvette 7x7x28 après démoulage



Photo V-18: Appareil de mesure du retrait (rétractomètre)

Nous présentons les résultats du retrait dans le tableau suivant:

Tableau V-55: Variation de retrait du béton type (B40).

Types des Bétons	Retrait x 10 ⁻³				
	1 jours	7jours	14 jours	28 jours	91 jours
Béton 40	8,9	428,5	589,2	607,1	692,8

Les résultats des mesures sont représentés sur la figure suivante en fonction de l'age.

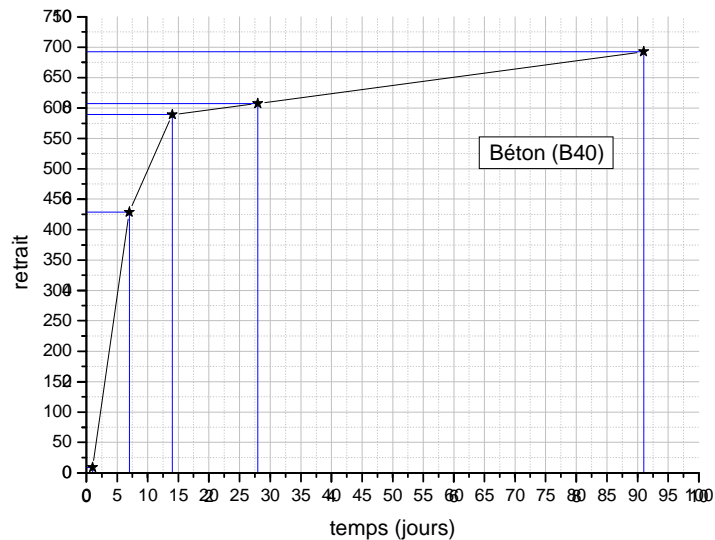


Figure V-29: Evolution du retrait

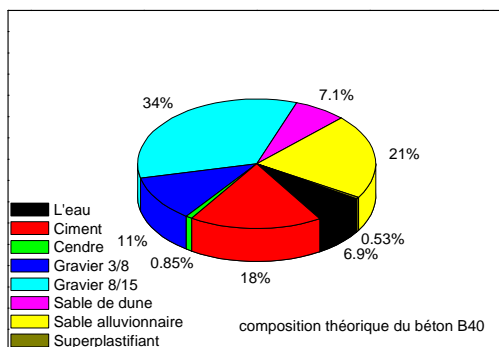
Discutions des résultats:

L'observation de la courbe de la figure V-49, montre la cinétique du retrait totale se développe pendant tous les jours (1j,7j,14j,28j et 91jours). les premiers jours (7jours), le retrait est rapide et important (la cinétique plus forte au jeune age) mais par la suite, (14j et 28 jours) le séchage étant un processus diffusionnisme, sa cinétique devient extrêmement lent.

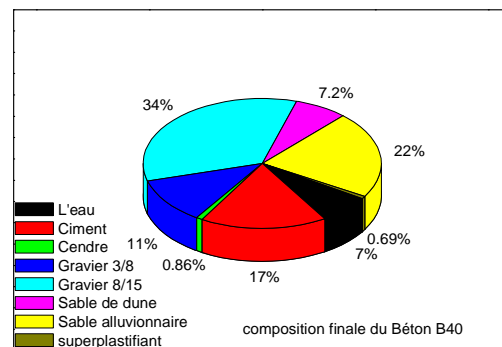
La formulation finale:

Tableau V- 56: Composition finale du béton type B40

Désignation	Composition théorique		Composition réelle (finale)	
	Béton 40	Taux (%)	Béton 40	Taux (%)
E/L	0.38		0.38	
L'eau de gâchage (Kg)	161	07.00	163	7.01
Ciment (Kg)	400	18.24	400	17.21
Cendre (Kg)	20	0.86	20	0.86
Gros granulats	1055		1055	
Gravier (Kg)	3/8	264	264	11.36
	8/15	791	791	34.05
Granulat fin	669		669	
Sable de dune (Kg)	167	07.12	167	7.18
Sable Alluvionnaire (Kg)	502	21.28	502	21.61
super plastifiant	(Kg)	12.2	16	0.69
	(%)	1.2	1.6	
Totale (Kg/m ³)	2302.2		2323	



(a)



(b)

Figure V- 30: Pourcentage des ingrédients du béton type B40

Conclusion:

Ce chapitre explique comment formuler et de concevoir un béton à haute performance selon les méthodes utilisées. Dans notre étude nous avons adopté la méthode de l'Université de Sherbrooke, Canada.

Cette méthode très simple suit la même approche que les normes ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison des résultats empiriques et de calculs basées sur la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire sans vide. Donc la conception d'un béton à haute performance passe par trois étapes principales. Dans la première étape détermination d'une formule théorique prévisionnelle, avec la quantité correcte des eaux dans le béton. La quantité d'eau contenue dans le superplastifiant et dans les agrégats est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage.

Ensuite, nous représentons le mélange en laboratoire, et enfin la validation de la formule du béton par des tests d'échantillons de béton. Les résultats obtenus suggèrent que l'exploitation de sable de dune et la cendre dans la conception du béton sont importantes pour augmenter la résistance et la durabilité.

Conclusion générale:

L'objectif de cette étude est d'obtenir une résistance à la compression plus ou moins égal à 50 MPa à 28 jours, avec l'utilisation des matériaux locaux (sable de dune et la cendre en palme). Les recherches pour un béton haute performance est sa résistance et sa durabilité réduction de la porosité. Donc haute compacité et il doit résister aux agents agressifs (gaz et sels).

L'augmentation de la résistance signifie une plus grande compacité et donc moins de pores. La limitation de la porosité implique essentiellement par la diminution de sa teneur en eau avec une granulométrie comportant des éléments fins et en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

L'utilisation de plusieurs classifications granulaires avec des éléments ultrafins comme ceux que nous avons utilisés dans notre étude, (sable + gravier + cendres + ciment), avec l'ajout de superplastifiant type Médaflow 113 pour réduire la quantité d'eau de gâchage.

Après utilisation de tests de compression sur chaque échantillon de béton nous constatons que l'utilisation de quatre classifications réduit les espaces granulaires et augmente la compacité et la résistance, contrairement au béton normal avec trois classifications.

Nous concluons que l'introduction de sable de dune de l'ordre de 25 % dans la conception du béton et 5% de cendres, augmente la valeur de la résistance de 50 %, dans les bétons B30 et B40.

Enfin vu les résultats positifs obtenus nous pouvons en déduire que l'utilisation du sable de dune dans la composition du béton avec un ajout de cendre de palme augmente sensiblement sa résistance comme BHP et réduit son prix de revient.

Recommandations:

Pour confirmer les résultats obtenus d'autres recherches et études sont à envisager éventuellement dans plusieurs domaines tel que:

- réaction chimique de la cendre de palme avec le ciment et l'effet engendré.
- Les essais chimiques et minéralogiques de la cendre.
- Les essais de la surface spécifique de la cendre.
- Influence de la cendre de palme sur la résistance du béton.

Il y a lieu d'approfondir les essais sur cette cendre de palme dans toutes ces caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques afin de pouvoir comprendre l'effet de ce produit sur la matrice ciment, mortier et béton.

Référence Bibliographiques

- [1] **A. BRAHMA** "Le béton " UNIVERSITE DE BLIDA INSTITUT DE GENIE CIVIL .Edition OPU,1996.
- [2] [http:// WWW.la.refer.org/materiaux/default.html](http://WWW.la.refer.org/materiaux/default.html) "Matériaux de construction expériences"
- [3] CIMbéton, Centre d'information sur le ciment et ses application, Fiche technique Tome2 "Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre "1997.
- [4] **Dr.CHerait yacine/Mr.Nafa Zahredinne** "Eléments de matériaux de construction et essais" UNIVERSITE 08 MAI 1945 GUELMA. Edition OPU
- [5] Réunion d'Ingénieurs "Matériaux de construction "Troisième édition.
- [6] **Naser-Eddine Kedjour** "Le laboratoire du béton " Edition OPU
- [7] **A.KOMAR** "Matériaux et éléments de construction" Edition MIR 1978.
- [8] L'école nationale des ponts et chaussées "La durabilité des bétons "
- [9] **M.LAQUERBE;I.CISSE;G.AHOUANSOU**" Pour une utilisation rationnelle des graveleux latéritique et sable de dunes comme granulats à béton Application au cas du sénégal"laboratoire de géomécanique(G.T.Ma)1995,28,604-610
- [10] "Les bétons a hautes performances/caractéristique, durabilité, applications".
- [11] **PIERRE-CLAUDE AITCIN** est Professeur à l'Université de Sherbrooke "Bétons haute performance" Editions Eyrolles 2001.
- [12] Matériaux de construction (Fiche Technique).
- [13] **H.RENAUD/F.LETERTRE** "Ouvrage en béton armé"
- [14] (R. LANCHON) tome I "Cours de laboratoire / Granulats, Béton, sols "
- [15] **Laboratoire STS Bâtiment** "Etude sur les granulats" (Laboratoire STS Bâtiment).
- [16] contrôle et essais concernant le béton durci.
- [17] [http:// WWW.lasim.org](http://WWW.lasim.org) / Société de l'industrie minérale "Les composantes de la matrice cimentaire"Rappels et interactions.
- [18] **Abdelouahed Kriker** " Durabilité du béton a base de laitier" Thèse de Magister 1992.

- [19] Groupe ERCO (Ciment résistants aux sulfates).fiche technique.
- [20] <http://french.alibaba.com>.
- [21] <http://www.worldlingo.com>.
- [22] EMILE OLIVIER "Technologie des matériaux de construction " tome I
- [23] EMILE OLIVIER "Technologie des matériaux de construction " tome II
- [24] Article extraite de Wikipedia)
- [25] BENTATA AISA, 2003"Etude expérimentale d'un béton avec le sable de dune de la région de Ouargla. Mémoire de magister UNIVERSITE DE OUARGLA
- [26] <http://lebeton.free.fr/ciment.html>
- [27] Les constituants des bétons et des mortiers (Fiche technique CIMbéton ,Tome1)
- [28] **BOUHNİK BRAHİM** ,2007"Valorisation du sable de dune dans la production du béton destiné aux ouvrages hydrauliques en milieux sahariens" Mémoire de magister UNIVERSITE DE OUARGLA
- [29] Fiches Techniques de Granitex nouveaux produits WWW.granitex.dz.2010.
- [30] "valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans filière du génie civil"
- [31] **MECHERI BACHIR** "Etude de l'influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydraulique et Génie Civil" Mémoire de Magister UNIVERSITE DE OUARGLA -2009.
- [32] ADEME DVNAC "Etude de la valorisation des cendres de chaufferies bois" dans le cadre du "programme bois-énergie 1999-2006" MARCHE N° 0001026, Novembre 2001
- [33] Jean-Emmanuel Aubert "Utilisation de déchets dans les bétons: exemple des cendres volantes d'incinérations d'ordures ménagères"LMDC-INSA/UPS, Toulouse cedex. Rencontres Universitaires de Génie² Civil 2003.
- [34] Daniel Gagné "Principes de combustion Appliquée au chauffage au bois" santé environnementale, Octobre 2007.
- [35] **R.Chaid, R.Jauberthie et A. Boukhaled**"Effet de l'Ajout calcaire sur la durabilité des bétons".Université de Boumerdèse, Algérie2010.

- [36] AMAR DERBALA ,1999 " Contribution aux possibilités d'amélioration de la qualité du béton . Mémoire de magister
- [37] Abderrazak KHadaoui " Eaux et sols en algérie /gestion et impact sur l'environnement "
- [38] EMMANUEL ROZIERE "Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle"Thèse de Doctorat -2007- à l'Ecole Centrale de Nantes
- [39] Ecole Française du béton "LES BETONS,Bases et données pour leur formulation.
- [40] Joumana Yammine "Béton fluides à hautes performances: Relation entre formulation, rhéologie et propriété mécanique"
- [41] BAEL 91.
- [42] Ecole Hassania des travaux Publics (EHTP)" Sable et Environnement, solution Alternatives" COLLOQUE INTERNATIONAL Casablanca, 25 et 26 Juin 2003.
- [43]<http://www.planete-tp.com>
- [44] <http://is-beton.epfl.ch/recherche/BHP/default.asp>.
- [45] **Jean-Emmanuel Aubert.2003**"Utilisation de dechets dans les bétons: exemple des cendres volantes d'incinérateurs d'ordures ménagères (Toulouse cedex).
- [46] - **Ahmed-Chaouch A.**,1993« Etude des caractéristiques de béton de sable de dune » thèse de majistère - ENP- P 104
- [47] - **Batata A.**, 1994 « le béton de sable de dune - sa formulation et ces propriétés » -CNERIB- P (345-353)
- [48] -**GHRIEB A.**, 1994 « Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautique » -thèse de magistère -E.N.P- P 98
- [49] - **C.T.T.P** ,1999 « choix de formulation de sable de enrobé » -Ouargla- P 21
- [50] - **Uzomaka O.J.**,1977« Some factors with effet the cruching strenght of sandcréte blocks »