

REPUBLIQUE ALGRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'Obtention du Diplôme master II

En Génie Civil

Option : structure et matériaux

Thème

**l'influence des ajouts des fillers calcaire sur
le comportement Rhéologique des bétons autoplaçants**

Dirigé par :
M^{er} KACI

Etudié par :
M^{elle} : GhERNAOUT Fatma

Promotion 2015



Remerciement

Tout d'abord qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Dieu de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

J'adresse mes vifs remerciements à mon promoteur M' KACI Salah de ma voir fait profiter de ces grandes compétences et ces conseils et sans oublié M^{lle} Akmoussi Ourdia et M^{lle} Haddad.

Je remercier mes très chers parents pour leurs soutiens et leur patience.

Mes remerciements vont également :

A mes frères Yazid , Said et Nourdine.

Mes sœurs

Mon fiancé M' OUACHEHI Belaid.

Et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mon promoteur Mr Kaci.

A mes chers parents surtout ma mère, pour leur amour, leur grand soutien et leur vif et permanent encouragement pour donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui.

Une spéciale dédicace aux six personnes qui compte énormément pour moi, et pour qui je porte beaucoup de tendresse, mes sœurs Samira, Hassiba, Hadjira, Zohra et Drifa. Mes frère Yazid et Nourdine.

A mon petit frère Said, et mon fiancé Mr OUACHEHI belaid.

A mes amis Amel, Siham Radia, que je remercie chaleureusement pour leur bonne humeur et les moments inoubliables de partage ensemble.

A tous les êtres chers à mon cœur.



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux.

INTRODUCTION GENERALE.....1

Etude bibliographique

Chapitre I : Les bétons et les bétons autoplaçants.

I. Généralités sur le béton

I.	Introduction.....	3
II.	Définition d'un béton.....	3
III.	Les composants d'un béton.	
	III-1. Le ciment.....	4
	III-1-1 Principe de fabrication d'un ciment courant.....	4
	III-1-2 Les constituants du ciment.	
	III-1-2-1 Les constituants principaux	5
	1. Clinker.....	5
	2. Laitier de haut fourneau.....	5
	3. Les cendres volantes.....	5
	4. Pouzzolanes naturelles.....	6
	III-1-2-2 Les constituants secondaires.....	6
	III-1-3 Classification des ciments courants.....	6
	III-1-4 Principale catégorie de ciment.....	6
	III-2 Les granulats	6
	III-3 L'eau	7
	III-4 Les adjuvants.....	7

III-5 Les additions minérales.....	8
IV- Composition de béton.....	8
IV-1 Critère en fonction de la destination de béton.....	9
IV-1-1 La dimension maximale des granulats.....	9
IV-1-2 La résistance	9
IV-1-3 L'ouvrabilité.....	9
IV-1-4 L'agressivité du milieu ambiant.....	10
IV-2 Formulation de béton.....	10
IV-2-1 Méthode d'Abrams.....	11
IV-2-2 Méthode de Bolomey.....	11
IV-2-3 Méthode de Faury.....	11
IV-2-4 Méthode de Valette.....	12
IV-2-5 Méthode de DREUX et GORISSE.....	12
V- Conclusion.....	12

II- Le béton autoplaçant (BAP)

I. Historique.....	13
II. Résumé.....	13
III. Définition d'un BAP.....	14
IV. La normalisation d'un BAP.....	14
V. Concept du BAP	15
VI. Composition d'un BAP.....	16
VI.1 Les constituants d'un BAP.....	16
VI.2. Le critère de composition d'un BAP.....	17
VI-2-1 Un volume de pate important.....	18
VI-2-2 Une quantité de fines important.....	18
VI-2-3 L'utilisation du super plastifiant.....	18
VI-2-4 Utilisations éventuelles d'un rétenteur d'eau.....	18
VI-2-5 Un faible volume de gravions.....	18
VII Caractéristique de BAP.....	19
VII-1 Propriété de BAP a l'état frais	19
VII-1-1. Le remplissage.....	19
VII-1-2. La résistances de ségrégation	19
VII-1-3. La capacité de passage.....	19
VII Domaine d'utilisation d'un BAP.	
IX Les techniques de formulation d'un BAP.....	21

IX-1 Méthode de formulation.....	22
IX-1-1Méthode japonaise :.....	22
IX-1-2Méthode suédoise.....	23
IX-1-3Méthode française.....	23
IX-1-4Autres méthodes.....	24
IX-1-5Quelques formulations types.....	24
X- Propriété recherche des bétons autplacants.	
X-1 Caractéristique de béton à l'état frais	24
X-1-1) Essai d'étalement.....	24
X-1-2) Essai de la boîte en L.....	24
X-1-3) Essai d'entonnoir.....	25
X-1-4) Essai d'étalement modifié(J-Ring).....	26
X-1-5) Essai de stabilité au tamis.....	27
X-1-6) Essai d'écoulement au tube en U.....	27
X-1-7) Essai de l'écoulement au caisson.....	27
X-1-8) Essai de la colonne.....	28
X-2 Caractéristiques de béton à l'état durci	28
X-2-1) Les performances mécaniques de BAP.....	28
X-2-2) Le retrait	30
X-2-3) Module d'élasticité statique.....	30
X-2-3) Déformation de fluage.....	30
XI Ouvrabilité des BAP.....	30
XII Intérêt de BAP.....	31
XII-1 Intérêts techniques et impacte sociaux-économiques d'un BAP.....	31
Mise en ouvre.....	31
XIII Fabrication, transport et mise en place des BAP.	
XIII-1 Fabrication des BAP.....	34
XIII-2 Transport des BAP.....	34
XIII-3 Mise en place des BAP.....	34
XIV Conclusion.....	34

Chapitre II : Les FILLERS

I-Introduction.....	36
II-Résumé	36
III-Définition.....	36
IV-Effets des fillers en général.....	36
V –Propriété requise des fillers.....	37
VI – Les différents types des fillers.....	37
VI-1- Principaux ajouts minéraux inertes.....	38
VI-1-1 Les fillers calcaires.....	38
VI-1-2 Sable de dune.....	39
VI-2 Les ajouts minéraux actifs.....	40
VI-2-1 Le Pouzzolane.....	41
VI-2-2 La fumé de silice.....	42
VI-2-3 Le laitier de haut fourneau.....	42
VII-Rôle de l’addition minérale.....	43
VII-1 Les superplastifiants.....	43
VII-1-1 Effet fillers ou effet de remplissage.....	43
VII-1-2 Effet chimique ou pouzzolanique.....	42
VII-2 L’intérêt de l’utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil.....	43
VII-2-1 -Intérêt du point de vue technique.....	44
VII-2-2 - Intérêt du point de vue économique.....	44
VII-2-3- Intérêt du point de vue environnemental.....	44
VII-3 Les inconvénients d’utilisations des ajouts minéraux en Algérie.....	44
VII.4.Effets des ajoutes minéraux sur les propriétés des bétons_	
VII-4-1 Amélioration d’ouvrabilité.....	44
VII-4-2 Chaleur d’hydratation.....	45
VII-4-3 Durabilité.....	45
VII-4-4 Développement des résistances.....	45
VII-5 Utilisation des ajouts en Algérie.....	46
VII- Influence des fillers sur l’ouvrabilité des bétons autoplacants	46
IX-Conclusion.....	46

Chapitre III : La Rhéologie

I-Introduction.....	47
II-Historique.....	47
III-Définition.....	47
IV-Le but de la rhéologie.....	48
V-Les mesures rhéologiques et le rhéomètre.....	48
VI-Domaine d'étude de la rhéologie.....	49
VII-Les diverses applications de la rhéologie.....	49
VII-1 L'élasticité.....	50
VII-2 La plasticité.....	50
VII-3 La viscosité.....	50
VII-4 La viscoélasticité linéaire.....	51
VII-5 La viscoplasticité.....	52
VII-6 Elasto viscoplasticité.....	52
VIII Liste des modèles rhéologiques.....	53
VIII-1 Les modèles élémentaires.....	53
VIII-2 Les modèles viscoélastique.....	55
VIII-3 Les modèles viscoélastique générales.....	59
VIII-4 Les modèles plastiques.....	69
IX-La rhéologie des bétons autoplacants.....	60
IX-1 Seuil de cisaillement.....	61
IX-2 La viscosité.....	61
IX-3 Les différents types des modèles appliquées aux bétons.....	61
X-Conclusion.....	61

Etude Experimentale

Chapitre IV : Matériaux & formulation

I.	Introduction.....	61
II.	Matériaux et formulation.....	61
II.1.	Matériaux de base utilisés.....	61
II.2.	Caractéristiques des granulats.....	63
II.2.1.	Essai sur granulats.....	63
	• Echantillonnage.....	63
	• Analyse granulométrique.....	63
	• Masse volumique apparente et absolue.....	64
	• Module de finesse de sable.....	64
	• Equivalent de sable.....	64
II.3.	Elaboration des bétons.....	
II.3.1.	Formulation de béton ordinaire.....	65
II.3.2.	Formulation de béton autoplacant.....	71

Chapitre V : Expérimentation & Exploitation.

I.	introduction.....	73
II.	méthode d'évaluation d'ouvrabilité du béton.....	73
III.	Description de l'appareil de Maniabilimètre de LCPC.....	73
IV.	Confection des bétons.....	74
IV.	Préparation de gâchage.....	75
	• Béton ordinaire.....	75
	• Béton autoplacant.....	78
V.	Interprétation des résultats d'écoulement entre le BO et BAP.....	80
V.1.	Commentaire.....	81
V.2.	Conclusion.....	81
VI.	Interprétation des résultats De résistance entre le BO et BAP.....	82
VI-1	Commentaire.....	84
VI-2	Conclusion.....	84
VII-	Conclusion.....	85
	CONCLUSION GENERALE.....	86

Liste des tableaux

Partie01 : Etude Bibliographique.

I : Généralité sur les bétons ordinaires et les bétons autoplacants

Tableau I-1	Les différents types d'adjuvants avec leurs abréviations et effets principaux	08
Tableau I-2	Consistance de béton.....	09
Tableau I-3	Les limites en % des constituants dans l'eau de gâchage.....	18
Tableau I-4	Formulation d'un BAP contenant des fines.....	23
Tableau I-5	formulation d'un BAP contenant un agent viscosant.....	23
Tableau I-6	Exemple de formulation japonaise.....	24
Tableau I-7	Principale caractéristique des bétons testés par (paultre et al-1996).....	29
Tableau I-8	Présente les résultats obtenus en compression et en traction à 28 jours pour des éléments standards d'après (Gibbs et al -1999).	

III : Rhéologie :

Tableau III-1	Les racines de la rhéologie.....	42
---------------	----------------------------------	----

Partie02 : Etude Expérimentale.

I. Matériaux & formulation.

Tableau IV-1	Quelques caractéristiques de MEDAPLAST 40	62
Tableau IV-2	Masse volumique absolue et apparentes des granulats.....	64
Tableau IV-3	Module de finesse de sable.....	64
Tableau IV-4	Valeur de l'équivalent de sable.....	65
Tableau IV-5	Les valeurs approximatives du coefficient granulaire.....	66
Tableau IV-6	Le coefficient d'affaissement.....	67
Tableau IV-7	Composition volumique et pondérale du béton vibré pour 1m ³	70

I. Expérimentation et exploitation.

Tableau V-1	Les résultats de maniabilimètre pour le BO.....	77
Tableau V-2	Les résultats de résistance de BO.....	79
Tableau V-3	Les résultats de maniabilimètre pour le BAP.....	81
Tableau V-4	Les résultats de résistance pour le BAP.....	83
Tableau V-5	La moyenne des trois éprouvettes cylindriques de BO.....	86
Tableau V-6	La moyenne des trois éprouvettes cylindriques de BAP.....	87

Listes des figures

Partie01 : Etude bibliographie

I. Généralité sur le béton ordinaire et le béton autoplaçant

Figure	Désignation	
Figure I.1	Le béton.....	3
Figure I.2	Poudre de ciment courant.....	4
Figure I.3	Fabrication de ciment.....	4
Figure I.4	Microphotographie Dun clinker.....	5
Figure I.5	Les granulats.....	7
Figure I.6	L'eau de gâchage.....	7
Figure I.7	Les adjuvants.....	8
Figure I.8	Le béton autoplaçant.....	14
Figure I.9	Composition d'un BO et BAP.....	17
Figure I.10	Le pont akachi kaikyo (japon)	20
Figure I.11	La tour lanfmark towarv (Abu Dhabi)	20
Figure I.12	Cône d'Abrams.....	25
Figure I.13	Essai de boîte en L.....	25
Figure I.14	Essai d'entonnoir.....	26
Figure I.15	Essai d'étalement modifié.....	27
Figure I.16	Essai de stabilité au tamis.....	27
Figure I.17	Application verticale de béton autoplaçant.....	28
Figure I.18	Application horizontale de béton autoplaçant.....	28

II. les fillers :

Figure II.1	les fillers.....	36
Figure II.2	Illustration de l'effet filler.	37
Figure II.3	Pouzzolane naturelle.....	41

II. Rhéologie:

Figure III.1	Rhéomètre capillaire à écoulement forcé.....	48
Figure III.2	Principe de superposition de Boltzman	49
Figure III.3	Principe d'une expérience de fluage.	51
Figure III.4	Principe d'une expérience de relaxation.	52
Figure III.5	Modèle d'un solide élastique parfait (ressort).....	53
Figure III.6	La fonction de fluage d'un solide élastique parfait	54
Figure III.7	Modèle d'un liquide visqueux newtonien (amortisseur)	54
Figure III.8	Fonction de fluage d'un liquide visqueux newtonien	55
Figure III.9	Modèle de patin	55
Figure III.10	Modèle d'un solide de kelvin-Voigt	55
Figure III.11	Modèle d'un liquide de Maxwell	56
Figure III.12	Modèle de Zener	56
Figure III.13	Exemple d'un modèle viscoélastique complexe	56
Figure III.14	Modèle de kelving-voigt généralisé	57
Figure III.15	Modèle de Maxwell généralisé	57
Figure III.16	Modèle de Burgers.	58
Figure III.17	Modèle de Prandlt.	58
Figure III.18	Modèle de Bingham	59

Partie01 : Etude expérimentale

I-Materiaux et exploitation

Figure IV.1	Le superplastifiant MEDAPLAST 40 utilisé	62
Figure IV.2	Les fillers calcaires qu'on a utilisés.	63
Figure IV.3	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E de d'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).	67
Figure IV.4	Courbe granulaire des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partages.....	69
Figure IV.5	Schématisation de la mise en place du BO et BAP	72
Figure IV.6	La courbe granulométrique des BO et BAP	73

II- Expérimentation et exploitation

Figure V.1	Maniabilimètre disponible dans notre laboratoire.....	74
Figure V.2	La phase inclinée	74
Figure V.3	Schéma représentatif de Maniabilimètre.....	75
Figure V.5	Les trois traits (niveau) de maniabilimètre.	75
Figure V.6	Préparation de gâchage.	76
Figure V.7	Mettre le malaxeur à marche	76
Figure V.8	Homogénéisation du mélange (après le malaxage)	76
Figure V.9	Remplit le maniabilimètre de béton.	77
Figure V-10	Les différents niveaux de Maniabilimètre.....	77
Figure V-11	Préparation des éprouvettes.	77
Figure V-12	Vibration des éprouvettes.	78
Figure V-13	Décoffrage des éprouvettes.	78
Figure V-14	Mettre les éprouvettes dans l'eau.	78
Figure V-15	Machine de compression.	78

Figure V-16	Préparation de gâchage de BAP.....	79
Figure V-17	Mise de béton dans le maniabilimètre.	80
Figure V-18	Remplit les éprouvettes de BAP.	80
Figure V-19	Le temps d'écoulement d'un BO.	81
Figure V-20	Le temps d'écoulement d'un BAP.	82
Figure V-21	Le temps d'écoulement d'un BO et d'un BAP	82
Figure V-22	Les éprouvettes cylindriques de BO avant écrasement.	83
Figure V-23	Les éprouvettes cylindriques de BO après écrasement (déformation)	83
Figure V-24	La contrainte et déformation de BO	84
Figure V-25	Les éprouvettes cylindriques de BAP avant écrasement	84
Figure V-26	Les éprouvettes cylindriques de BAP après écrasement	84
Figure V-27	La contrainte et déformation de BAP.	85
Figure V-28	La contrainte et déformation de BO et de BAP	85

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton ordinaire longuement utilisé depuis de longues années présente actuellement des limites d'utilisation notamment dans les zones fortement ferrailles (zones de frettage) et ce a cause de manque d'ouvrabilité.

L'évolution de la science et spécialement dans le domaine de la chimie, a permis, au cours de ces dernières années, le développement d'une nouvelle génération de béton. Les performances mécaniques, physiques et esthétiques sont sans cesse développées, s'adaptant ainsi aux exigences de la mise en place et de l'environnement d'exposition.

Les recherches scientifiques concernant les mécanismes de défloculation et l'optimisation du squelette granulaire ont permis d'améliorer la rhéologie des bétons à l'état frais (ouvrabilité) donnant naissance aux bétons autoplaçants (BAP).

La particularité des BAP réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de moyen de serrage pour leur mise en place. Se comportant sous le seul effet de la gravité, ils peuvent être coulés dans des zones très ferrillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

Le BAP est plus sensible aux diverses variations des paramètres du mélange tels que le taux d'absorption des granulats, les adjuvants chimiques incorporés, la teneur des additions minérales. Afin d'assurer un meilleure contrôle de la performance de ces bétons, il est important de connaître et comprendre les effets de ces paramètres sur le comportement rhéologique, la stabilité et les propriétés mécaniques.

L'utilisation des additions minérales dans les bétons autoplaçants est une pratique courante depuis de nombreuses années. Du fait de leur grande disponibilité et leur prix modère, les additions calcaires sont majoritairement utilisées.

Dans le cadre de la formulation des bétons autoplaçants, un grand volume d'addition est nécessaire de manière à réduire la quantité de ciment induite par l'augmentation du volume de pate nécessaire pour permettre l'écoulement du béton.

Le travail que nous présentons est divisé en deux grandes parties : la première partie est essentiellement bibliographique, alors que dans la deuxième partie est d'ordre expérimentale.

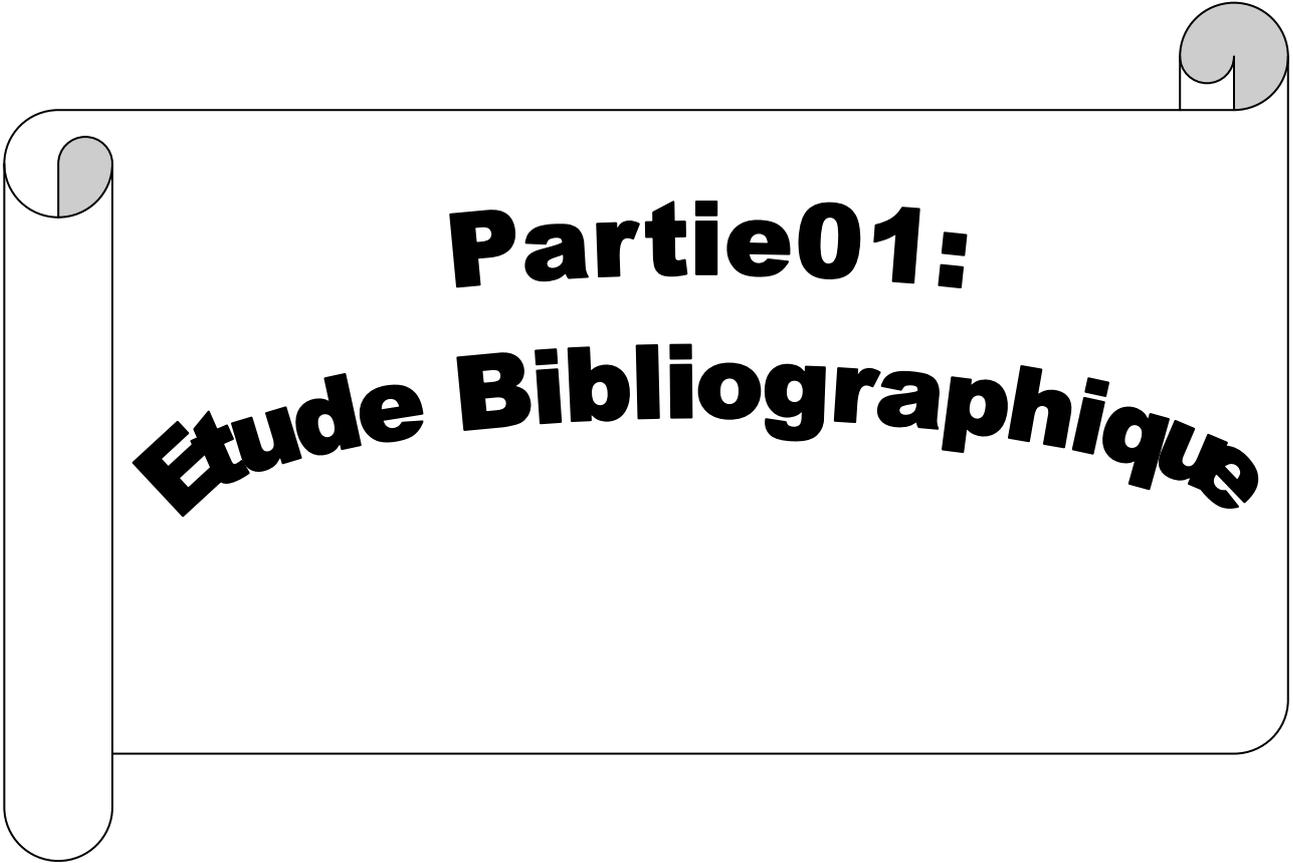
La première partie se compose de trois chapitres, l'objectif visé est de décrire et de caractériser les nouveaux bétons tels que les BAP d'un point de vue bibliographique.

Le premier chapitre, une synthèse bibliographique qui comporte un rappel des définitions fondamentales sur les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants (BAP).

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des fillers, les différents types des fillers, leur nature et à quoi sert l'utilisation des fillers dans les bétons autoplaçants.

Le chapitre trois, comporte les fondements de base de la rhéologie.

Pour la deuxième partie, l'objectif visé est de pouvoir formuler et composé un BAP à partir des matériaux locaux. Elle décrit le programme expérimental pour réaliser les objectifs déterminés pour ce mémoire. Ce programme comporte une démarche de formulation d'un BO et d'un BAP. Il comporte également le processus d'élaboration, ainsi qu'une étude paramétrique afin de comprendre l'influence des fillers sur le comportement rhéologique de béton autoplaçant. Les essais de caractérisation à l'état frais ont été effectués à l'aide d'un maniabilimètre permettant de déterminer l'ouvrabilité de ces deux types de béton (BO et BAP). Les essais de caractérisation à l'état durci ont été effectués à l'aide de machine de compression (presse hydraulique) permettant de déterminer la résistance mécanique à la compression de ces deux bétons.



Partie01:
Etude Bibliographique

I-Généralités sur les bétons

Avant de commencer ce chapitre sur les bétons autoplacants, on va faire d'abord un petit résumé sur les bétons en général :

I. Introduction :

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique, en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiment, ouvrage d'art.etc... et éventuellement dans les éléments de décoration. Il permet également la réalisation de produits de fabrication d'éléments de structure et d'autres tels que les tuyaux, blocs, poutrelles, planchers, cloisons escaliers.....

II. Définition d'un béton :

Le béton est un composite hétérogène (constitué d'éléments différentes) constitué d'un mélange intime de granulats, sable, et de pâte (ciment, eau).

La pâte de ciment représente 25 à 40% de volume totale du béton, chaque constituant joue un rôle bien défini :

- Liant hydraulique pour la pâte de ciment (ciment+eau)
- Mélange granulaire
- Produits additionnels (adjuvant, additions minéraux).

On distingue habituellement sous le nom :

- Matrice ou de mortier : le mélange (liant+ sable+ eau).
- De squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats.



Figure (I.1) : le béton

III. Les composants d'un béton :

III.1. Le ciment :

Le ciment est un 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 liant, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement instable dans l'eau, ce durcissement est dû à l'hydratation d'un certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminures de calcium.



Figure (I.2) : Poudre de ciment courant.

III.1.1-Principe de fabrication des ciments courants :

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450°C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

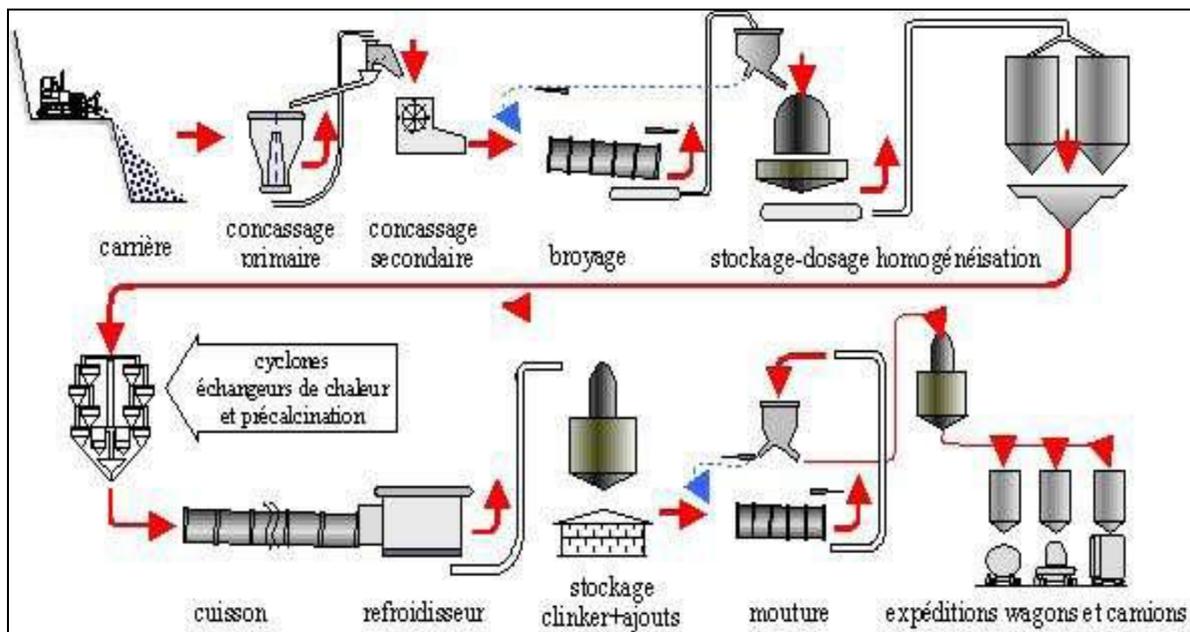


Figure (I.3) : Fabrication du ciment.

III.1.2. Les Constituants du ciment:

III-1-2-1 Les constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituant principal le Clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type (du laitier de haute fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle...), dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capable de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, en raison des conditions d'environnement par exemple.

1-Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO), de la Silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, Marne...). C'est le clinker qui, par broyages en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouent le rôle de régulateur, donne des Portland. [1]

Les éléments simples (CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants Minéraux suivants (Figure (I.4)).

- ✓ Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- ✓ Silicate bicalcique (C₂S) : 2CaO.SiO₂ (Bélite).
- ✓ Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO.Al₂O₃.
- ✓ Ferroaluminate calcique (C₄AF) : 4CaO .Al₂O₃ .Fe₂O₃ (Célite).

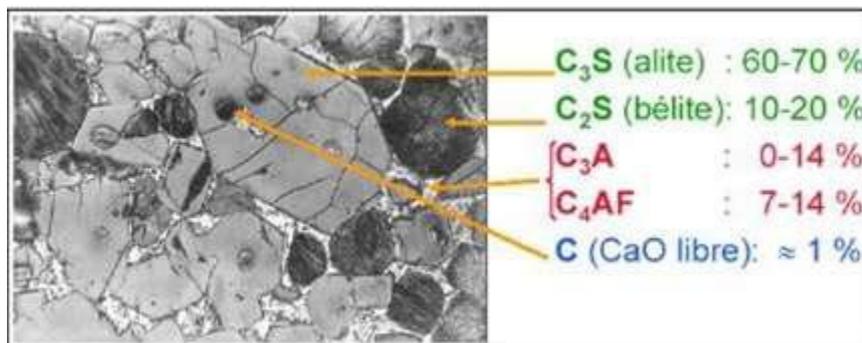


Figure (I.4) : Microphotographie D'un Clinker.

2. Laitier de haut fourneau(s) :

Est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium dans des proportions allant de 40 à 50%, la silice (25 à 35%), l'alumine (12 à 30 %) et la magnésie ainsi que d'autres oxydes en très faibles quantités.

3. Les cendres volantes (v et w) :

Les cendres volantes sont des produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage de gaz des centrales thermiques, elles peuvent être :

- Siliceuses (v), constituées de silice réactive (40 à 55 %) et d'alumine (20 à 30%)
- Ou caciques (w) avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

4. pouzzolanes naturelles (z) :

Les pouzzolanes naturelles sont des produits d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans les proportions supérieures à 25%, d'alumine et d'oxyde de fer.

III-1-2-2 Les constituants secondaires :

Ils peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$ (exception faite de Clinker)
- Soit des fillers (f), leurs natures exactes et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3 %.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydraulique ou pouzzolanique, ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment : ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

II.1.3 -Classification des ciments courants :

Les ciments courants sont classés en fonction de leur résistance mécanique à la compression, exprimée en MPA à 28j.

II.1.4. Principal catégorie de ciment :

4 catégories de ciments :

- C.P.A (Le ciment portland artificiel) \longrightarrow utilisé dans la préparation des bétons armés.
- C.P.J (Le ciment portland composé) \longrightarrow destiné aux travaux de dallage et aux routes.
- C.L.K (le ciment de laitier au clinker)
- C.H.F (le ciment de haut fourneau) } \longrightarrow réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur.

III.2- les granulats (sable, gravillons) :

Les granulats sont définis comme l'ensemble des grains inertes (sable gravions et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

On distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles. Les granulats sont classés selon la dimension des grains qui les constituent, la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage des poids des matériaux passants dans des tamis, des dimensions normalisées dans le béton frais. Les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70 % de volume) De plus, à raison de leur porosité ouverte, ils peuvent observer une certaine quantité d'eau (effet de moulage) dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures.

Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton selon :

- ✓ Leur qualité mécanique.
- ✓ Leur capacité d'adhérence avec la pâte liant.
- ✓ Leur forme (roulé ou concassés).
- ✓ Leur diamètre maximal.



Figure (I.5) : les granulats

III.3-L'eau de gâchage :

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou de mortier (effet lubrifiant). La qualité d'eau a une influence sur les caractéristiques du béton. Les eaux ne doivent contenir ni composé ni risque d'attaquer chimiquement le ciment. Les granulats ont les armatures particulières en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales, il convient donc d'apporter une grande attention surtout lors de l'emploi de rejet ou de lavage.



Figure (I.6) : l'eau de gâchage.

III.4-les adjuvants :

Sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés, l'efficacité est liée à l'homogénéisation de leurs répartitions dans le béton, les principaux adjuvants sont :

- ✓ Les fluidifiants (ou réducteur d'eau)
- ✓ Le retardateur de prise du ciment
- ✓ L'accélérateur de prise de ciment
- ✓ Les entraîneurs d'air

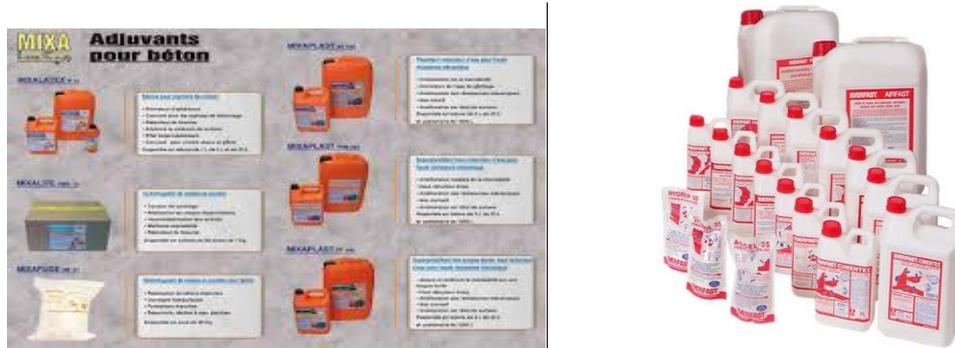


Figure (I.7) : les adjuvants

Tableau(I.1) : les différents Types d'adjuvants avec leurs abréviations et effets principaux

Adjuvant	Abréviation	Effets principaux et domaines d'application
plastifiant	BV	-Diminution de l'eau de gâchage et/ou amélioration de l'ouvrabilité (éléments préfabriqués)
Fluidifiant	FM	-Forte diminution de l'eau de gâchage et/ou amélioration de l'ouvrabilité. -Permet d'obtenir des bétons à durabilité accrue et/ou à mise en place -facilité (bétons pompes, SCC)
Entraîneur d'air	LP	-Production et dispersion de fines bulles d'air dans la masse du béton en vue d'augmenter sa résistance au gel et aux sels de déverglaçage (ouvrages d'art)
Retardateur de prise	VZ	Retardement du début de prise du béton (bétonnage par temps chaud)
Accélérateur de prise Accélérateur de durcissement	SBE HBE	-Accélération du processus de prise du béton (bétons projetés) -Accélération du processus de durcissement du béton (préfabrication)
Hydrofuge	DM	-Diminution de l'absorption capillaire (éléments préfabriqués)
stabilisateur	ST	-Amélioration de la cohésion interne du béton (SCC)

III.5- les additions minérales :

Les additions minérales sont des poudres d'origine minérale ajoutées au béton pour modifier certaines de ses propriétés. Cela peut être des cendres volantes, des fumées de silice, du calcaire ou du laitier de haut-fourneau.

IV. Composition de béton :

L'étude d'une composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en eau et en ciment à fin de réaliser un béton dans différentes conditions, soit elle est recherchée pour construire un ouvrage ou une partie donnée d'ouvrage.

IV.1-Critère en fonction de la destination des bétons :

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leurs destinations que dans leurs dimensions. Et toute étude de composition du béton doit en tenir compte. Il convient donc de définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destinée un ouvrage données.

Quatre critères principaux doivent être retenus :

- ✓ La dimension maximale des granulats
- ✓ La résistance
- ✓ L'ouvrabilité
- ✓ L'agressivité du milieu ambiant

IV.1.1.La dimension maximale des granulats :

La dimension maximal des granulats dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, structure de bâtiment voiles...) mais elle dépend également des dispositions des ferrailages (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

IV.1.2 La résistance :

La résistance caractéristique du béton est déterminée d'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on exige la valeur minimale pour le béton utilisé, cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur des éprouvettes de calcul (soumise à la rupture).

IV.1.3.L'ouvrabilité :

➤ Introduction :

Est un critère très important dans les bétons donc :

L'ouvrabilité peut se définir comme l'aptitude que peut avoir le béton frais ou bien se mettre en place pour enrober convenablement les armatures et remplir le coffrage sans ségrégation. Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par mesure de l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau suivant :

L'ouvrabilité est, pour les bétons, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de la composition d'un béton.

Tableau(I.2) : Consistance du béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤2	Vibration puissante
Ferme	3a5	Bonne vibration
Plastique	6a9	Vibration normale
Très plastique fluide	>16	Simple piquage Léger piquage

➤ **Définition de l'ouvrabilité et de la consistance :**

Le concept d'ouvrabilité du béton ne répond pas à une définition précise. Il englobe plusieurs propriétés interdépendantes, comme la consistance, la viscosité (cohésion interne), la tendance à la ségrégation, et la plasticité. Considérée sur le plan scientifique comme le résultat du frottement interne de l'ensemble des particules solides suspendues dans l'eau de gâchage, la consistance peut être évaluée dans la pratique par différentes méthodes d'essai.

➤ **Importance de l'ouvrabilité**

Une bonne ouvrabilité facilite les transbordements et la mise en œuvre du béton frais, c'est à dire sa mise en place dans les coffrages et son compactage. Elle influence aussi favorablement le cout de ces opérations. Quant au béton durci, sa résistance et surtout sa durabilité dépendent directement d'une bonne mise en place, de l'enrobage parfait des armatures et d'un compactage soigné, toutes qualités ne peuvent être obtenues qu'avec une bonne ouvrabilité.

➤ **La mesure de l'ouvrabilité :**

Une des grandeurs définissant l'ouvrabilité est la consistance. Elle peut être mesurée facilement par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams(du nom de son inventeur)

En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton, plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide.

IV.1.4. Agressivité du milieu ambiant :

Le milieu ambiant dans lequel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton, la présence d'eau agressives (eaux de mer, acide, très purs..) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrage a des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et par fois l'utilisation d'un adjuvant.

IV.2.formulation des bétons :

Les méthodes proposées sont nombreuses :

- ✓ Méthode de BOLOMEY
- ✓ Méthode D'ABRAMS
- ✓ Méthode de FAURY
- ✓ Méthode de VALETTE
- ✓ Méthode de BARON-LESAGE
- ✓ Méthode de DREUX et GORISSE

IV.2.1. Méthode d'ABRAMS :

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour un mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse, des granulats à employer. Cette règle de mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de module de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f Choisi pour le mélange.

IV.2.2. Méthode de BOLOMEY :

La formule de base est la suivante : $P=A+(100-A)\sqrt{d/D}$

P : Le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

d : Le diamètre du plus petit granulat.

D : Le diamètre du plus gros granulat.

A : Représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton.

La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats.

IV.2.3. Méthode de Faury :

Faury proposa une nouvelle loi de granulation du type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot [39] relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $5\sqrt{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $5\sqrt{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y= 17.5\sqrt{D} + \frac{B}{\frac{R}{D}-0.75}$$

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

D : Exprimé en dimension de passoire.

R : Le rayon moyen du moule

IV.2.3. Méthode de Valette :

Valette [41] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite certains nombres de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou

«dosage des bétons à granularité discontinue ». On calcule d'abord le dosage de sable et du ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum du ciment. On ajoute ensuite, le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

IV.2.4.Méthode de DREUX et GORISSE :

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ces constituants :

Dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité de serrage, module de finesse de sable, etc.

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose. Enfin la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondérale pour le béton désiré. Il s'agit ensuite d'exécuter quelques essais sur le béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

IV.2.5. Méthode de BARON-LESAGE :

Elle a pour objet d'obtenir sur chantier un béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite soit à partir de mesure de compacité, soit à partir de mesure de temps d'écoulement. Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton et ce quelque soit les conditions de mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste aussi à déterminer les proportions des constituants pour la dite fonction soit maximale.

V. Conclusion :

Le béton, en apparence un matériau simple, est en réalité très complexe, avec des milliers d'applications et de formulations différentes. Ces dernières années, on constate une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition des bétons à ultra-hautes performances, plus ductiles, plus durables, plus résistants, et des bétons autoplaçants qui améliorent considérablement l'esthétique et la mise en œuvre sur chantier. Ces innovations n'auraient vues le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle nanométrique des mécanismes de comportement du béton.

II- Béton autoplaçant

I. Historique :

L'idée de produire un béton autoplaçant est apparue au Japon pour la première fois en 1986.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires, la déformabilité et la résistance à la ségrégation, on a fait appel à la technique de béton coulé sous l'eau, en effet la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir la plus répandue dans le monde. En effet depuis son développement, la norme d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau, est répandue dans le domaine de la construction.

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines de construction tels : le renforcement de la réparation d'ouvrage d'art (application des capuches minces dans les endroits d'accès difficile) la construction des éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (béton coulé sous l'eau pour réparation, béton confiné, pieux.)

II. Résumé :

Les bétons autoplaçants sont très fluides, homogènes et stables, se mettant en place par simple effet de gravité sans recours à la vibration.

Leur composition se caractérise par :

- ✓ Un volume de pâte (ciment + filler calcaire + eau + air) élevé.
- ✓ L'utilisation de superplastifiants (entre 1 et 5% du poids du ciment).
- ✓ Une quantité de granulats plus faible et de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm.
- ✓ La présence d'agents de cohésion : dérivés cellulose, polysaccharides ou suspensions colloïdales.

Les bétons autoplaçants (B.A.P.) correspondent aux applications verticales (voiles), et les bétons autonivelants (B.A.N.) aux applications horizontales (planchers), toutefois la terminologie « béton autoplaçants » inclut également les bétons autonivelants. Leurs performances mécaniques sont comparables à celles des bétons ordinaires.

Le BAP est actuellement plus cher que le béton traditionnel. Plusieurs paramètres entrent en jeu : l'augmentation des éléments fins (ciment, filler calcaire), la présence d'adjuvants (superplastifiants), le temps de malaxage plus long en centrale, les conditions spéciales de fabrication.

L'utilisation des bétons autoplaçants permet :

- ✓ La limitation et la suppression, respectivement, des nuisances sonores et vibratoires du fait de l'absence d'utilisation de l'aiguille vibrante.
- ✓ La réduction des risques d'accident et de la pénibilité par la diminution des interventions au sommet des banches et la limitation d'un certain nombre de tâches manuelles.

III. Définition :

Le béton autoplaçant (BAP) est un matériau nouveau qui est au centre d'un enjeu important pour limiter la pénibilité de travail des ouvriers. En effet, cette forme du béton est très fluide et très déformable, comme son nom l'indique, se place tout seul dans un coffrage grâce au seul effet de son propre poids. Cela veut dire que stable et mise en œuvre sans vibration (la compaction d'un BAP effectuant par le seul effet gravitaire), il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre. [47]

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- ✓ Une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- ✓ Une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en U).
- ✓ Une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation).



Figure (I.8) : le béton autoplaçant

AGILIA, le premier béton autoplaçant lancé sur le marché français en 2000 et aujourd'hui commercialisé en France, Grande-Bretagne, Etats-Unis, Canada et Turquie. Agilia sera lancé au Chili et en Espagne courant 2007 et aujourd'hui ce béton autoplaçant se trouve dans tous les pays du monde.

IV. Normalisation du béton autoplaçant

Le béton autoplaçant fait l'objet de règles complémentaires dans la norme NF EN 206-9. Cette norme précise les règles qui s'appliquent au BAP en complément des règles communes aux bétons spécifiées dans la norme NF EN 206-1.

. La norme NF EN 206-1

Au courant de l'année 2004, la norme NF EN 206-1 a été publiée en France afin de remplacer l'ancienne norme expérimentale XP P 18-305, concernant la fabrication des bétons de

structure. Cette norme a entraîné des modifications au niveau des critères de résistance, des contrôles à effectuer, des classes d'environnement des bétons, elle s'applique à tous les bétons de structure : bétons fabriqués sur chantier, bétons prêts à l'emploi et bétons pour produits préfabriqués.

. La norme NF EN 206-9

Cette norme complète la norme NF EN 206-1 et donne les règles qui s'appliquent au béton autoplaçant (BAP). Les règles communes ne sont pas reprises dans cette norme.

V. Concept du béton autoplaçant :

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton, l'utilisation de béton très fluide ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants (traduit par bétons autoplaçants ou bétons autonivelants)

Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons ordinaires (BO) ou béton à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes aux cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour parvenir à ce cahier de charge, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte définie comme le mélange de ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.

C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie. Le rôle de la pâte et de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferrailés.

Le volume important de l'élément fin permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter au béton un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début de développement des BAP en France coïncide d'ailleurs avec l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant, ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité.

Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité d'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations d'eau. Cela étant, en pratique leur utilisation est contraire peu répandue, car ils entraînent un surcout, qui s'ajoute aux surcouts due au superplastifiant et aux additions. Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais [2].

VI. les constituants d'un béton autoplaçant :

VII.1. Les constituants :

Le béton est un mélange de plusieurs composants dont les uns sont actifs et les autres inertes, présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants. L'étude de ces composantes a été scindée en deux parties :

- ✓ La première traitant des ciments de leurs propriétés de leur emplois qui diffèrent selon la nature de construction, de leurs conditions de fabrication.
- ✓ La seconde traitant des autres composantes, c'est-à-dire des granulats, des adjuvants de l'eau qui doivent également répondre à des critères de qualité pour assurer au béton ces caractéristiques exigées en fonction des contraintes appliquées et des environnements.

VII-1-1- Les liants et les granulats :

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérale qui correspond à des additions normalisées au non.

- ✓ **Le ciment** : les BAP peuvent être réalisés avec les différents ciments, mais compte tenu des exigences de démoulage au jeune âge, le ciment le plus employé est le CPJ CEM1 52.5 ou 42.5
- ✓ **Les granulats** :
 - Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés :
 - Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés
 - Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage on limite en générale le diamètre maximal des granulats à 20mm.
 - Le rapport G/S est d'ordre 1.

✓ L'eau de gâchage :

La quantité de l'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, le développement de la résistance de béton et la protection des armatures contre la corrosion. Lors de l'évaluation de l'aptitude à l'emploi d'une eau de qualité non connue pour la production d'un béton, il convient de considérer autant la composition de l'eau que l'application au béton à produire.

Toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton.

VII-1-2-Les adjuvants :

Les deux adjuvants nécessaires pour la formulation des BAP sont le superplastifiant et l'agent de viscosité.

- ✓ **Superplastifiants** : sont des produits organiques, et leur utilisation a pour objet d'améliorer l'ouvrabilité du béton, en diminuant son seuil de cisaillement et sa viscosité. et doivent également assurer un maintien de rhéologie dans le temps, jusqu'à la mise en place (temps de confection et de transport, mise en place jusqu'au début de prise).[41]
- ✓ **Les agents de viscosité** : sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, en forme de grande chaîne, qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage et la ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

En résumé, les composants de base d'un BAP sont identiques à ceux d'un béton vibré mais leurs proportions sont différentes, à fin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et d'incorporation d'adjuvants notamment les superplastifiants sont nécessaires. (Des fines minérales et de superplastifiants).

Voir schéma suivant pour la composition d'un BO et BAP :

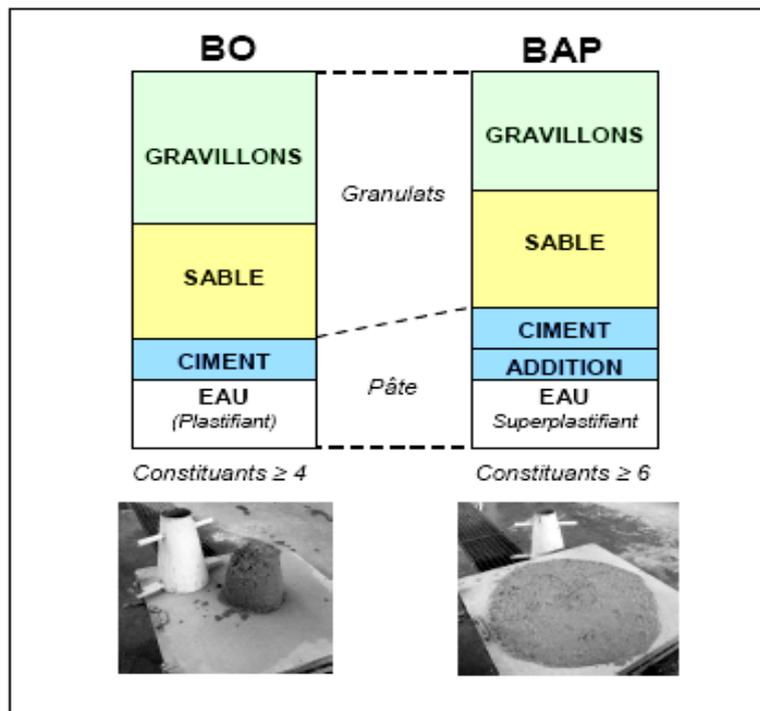


Figure (I.9) : composition d'un BO et BAP

VII.2. Les critères de composition (formulation) d'un béton autoplaçant

Après plusieurs recherches effectuées au laboratoire par beaucoup des chercheurs, les essais montrent que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques soit :

VII-2-1. Un volume de pâte important :

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons, le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) tant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans le BAP est donc élevé.

VII-2-2. Une quantité de fines (<80µm) importante :

A fin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500Kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

VII-2-3. L'utilisation des superplastifiants :

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides, ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre et plus importante, toutefois un dosage très élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter les sensibilités du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis de problème de la ségrégation et de ressuage.

VII-2-4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité) :

L'agent d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, à fin de minimiser ce dernier point. Les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulose, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci, ces produits comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus apaisée.

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

VII-2-5. Un faible volume de gravillon :

Il est possible d'utiliser les granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en zone confinée. Il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité de squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la

résistance souhaitées. En générale ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillons sable de l'ordre 1 dans le BAP.

VII. Caractéristiques du BAP

Un béton autoplaçant permet de remplir des coffrages dont la complexité de forme ou la densité en ferrailage n'aurait pu être imaginée dans le cas d'un béton ordinaire.

VII.1- Propriétés des BAP à l'état frais :

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité, ces propriétés sont étudiées sous plusieurs aspects, et peuvent se deviser en trois critères mesurables par des testes empiriques : le remplissage, la résistance a la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles qui nous appellerons capacité de passage.

VII-1-1-Le remplissage :

Le remplissage de béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, on se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations.

Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage.

Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace.

Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le teste d'étalement au cône d'Abrams donnent des indications sur les deux aspects.

VIII-1-2-La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phase solide et liquide ou bien une séparation entre la pate et les granulats , la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées , et une repartions non homogène de l'aire acculs ,

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certain agent de viscosité.

VIII-1-3- La capacité de passage :

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois (la fluidité) la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité des granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armature ou dans un confinement.

VIII. Domaine d'utilisation d'un BAP

Le domaine d'utilisation d'un BAP se trouve dans tous les segments de la profession BTP (bâtiment des travaux public), et aussi pour la réalisation des ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantiers, de bâtiment ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton.

Béton traditionnelle de chantiers (voiles, poteaux, poutre fondations,...)

Béton préfabriqué (poutre, poteaux, panneaux de façade, tuyau, regard, dalle, Mobilier, urbaine, corniche)

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en oeuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire présente des :

- ✓ Densités de ferrailage importantes
- ✓ Formes et géométries complexes : voiles, courbes
- ✓ Voiles minces et grand hauteur : piles de ponts
- ✓ Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures
- ✓ Exigences architecturales et qualité de parement particulier

➤ *A titre d'exemple nous citons quelques réalisations avec les BAP :*

*Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde (3910m) ou 390000kg de béton autoplaçant ont été versés dans le coffrage des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (Okamura et COLL 1994)



Figure (I.10) : le pont akachi kaikyo (japon) [62].

*La tour landmark tower. Où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mise en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll 1995).



Figure (I.11) : la tour landmark tower (Abu Dhabi)[63]

IX. Les techniques de formulation de béton autoplaçant :

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur. Ils sont « statiques » (une fois en place) à fin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement.

Pour ce fait, la formulation des BAP repose sur trois critères :

- ✓ Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par l'utilisation des superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- ✓ Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement ; la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de la pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mise en œuvre par vibration.
- ✓ Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et d'incorporation d'additifs (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice)

IX.1. Méthode de formulations des BAP :

La formulation d'un BAP est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP (fluidité et homogénéité). De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Ces méthodes se basent essentiellement sur des approches diphasiques du BAP.

Parmi ces méthodes on cite : approche Japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, ...etc. Pour répondre aux exigences techniques de ce type de béton.

IX.1.1. Méthode Japonaise proposée par Okamura et al :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a). Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

b). Dosage du sable : Le volume du sable est pesé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c). Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3). Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d). Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

Résumé de la méthode Japonaise :

- ✓ Volume des gravillons est limité en prenant le rapport G/S proche de 1.
- ✓ Volume de la pâte varie entre : 330 à 400 l/m^3 (C+F).
- ✓ La masse du ciment : $M_c=300$ à 450 kg/m^3 .
- ✓ MF=10% de la masse du ciment.
- ✓ Dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

IX.1.2. Méthode SUDOISE (CBI)

Proposé par (Paterson et al, 1996).

Cette méthode développée par CBI (Cement Och Betong Institutet) se caractérise par la prise en compte de ferrailage important.

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par (Tangtermisirikul et al). En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation, le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir la propriété recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

IX.1.3. Méthode française(LCPC) :

Proposée par (DE LARRARD et all, 1994)

Au LCPC, Un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange, il permet de prévoir :

- ✓ La compacité d'un mélange granulaire.
- ✓ Les distributions granulaires.
- ✓ Les proportions du mélange.
- ✓ La compacité propre.
- ✓ La densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- ✓ La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- ✓ Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminée selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- ✓ Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé.
- ✓ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixé de manière arbitraire à 5.10^4 la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également à fin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaité et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

IX.1.4. Autres Méthode :

D'autres méthodes de formulation que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de « l'excès de pate » : proposée par (Oh et al, 1999) ; la méthode d'évaluation simple utilisée par (Ouchi et al, 1999) étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines de mortier frais) etc.

IX.1.5. quelque formulation type :

La composition recommandée pour un BAP en France (AFGC[2] 2000) contenant des fines suivantes :

Tableau(I.4) : Formulation d'un BAP contenant des fines.

constituant	Quantité pour 1 m ³
Eau	180litres
Ciment	300kg
Fines	200kg
Sable	800kg
Gravillons	900kg (D_{max} limité a 16 mm en général)
adjuvant	6% du poids du ciment

Un autre exemple de formulation incluant un agent visqueux l'amidon est donné ci après.

Tableau(I.5) : formulation d'un BAP contenant un agent visqueux.

constituant	Quantité pour 1 m ³
Eau	200litres
Ciment CEMI 52.5	300kg
Fillers calcaire	100kg
Sable 0/5 mm	900kg
Gravillons 5/16	800kg
Adjuvants	3,5kg
Amidon	2kg

Il existe une très grande variété de matériaux locaux utilisés sur chantier ce qu peut conduire à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance). Il est donc impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant.

Tableau(I.6) : exemple de formulation japonaise

Type de béton	Ciment (kg/m ³)	Laitier (kg/m ³)	Cendres (kg/m ³)	Fillers (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravillon (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Super-plastifiant (kg/m ³)	Agent viscosité (kg/m ³)
Nakataki et al,1995	200	200	100	0	704	898	165	6	0
Hayakawa et al,1995	180	220	100	0	753	926	170	7,7	1,5
Yurugiat al, 1992	300	0	0	200	700	910	170	8	0,2

X. Propriétés recherchés du béton autoplaçants :

Les propriétés du béton autoplaçant peut être résumée en deux parties essentielles : à l'état frais et a l'état durci.

XI.1) Caractéristique du béton à t'état frais :

Contrairement au béton ordinaire, les BAP présente un particulier pour sa formulation et sa caractérisation. En effet, il doit concilier deux propriétés à priori contradictoires à savoir la fluidité et la ségrégation et de ressuage. Il doit satisfaire à plusieurs testes pour pouvoir être qualifié d'auto plaçant, donc la fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de faire une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

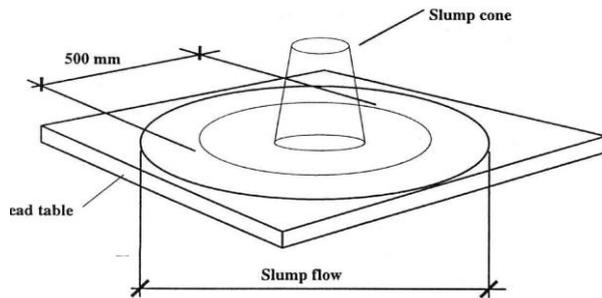
XI-1-1. Essai d'étalement (mesure rhéologique au cone d'ABRAMS)

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (Essai d'étalement ou Slump flow).

Des valeurs de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définit en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthode de mise en ouvre. Cet essai caractérise la mobilité

Etude Bibliographique

du BAP en milieu non confiné, il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.



Figure(I.12) : cône d'Abrams

XI-1-2. Essai de la boîte en L (écoulement en milieu confine) :

La cohésion de béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure).

Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2), le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H2/H1. Une valeur de ce rapport supérieure à 0.8 traduit un bon écoulement du BAP.

$H2/H1=0.8 \implies$ Bon écoulement

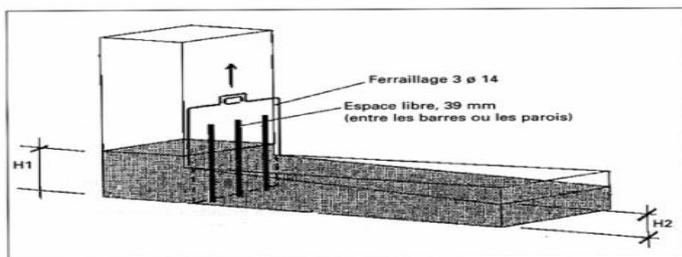


Figure 2

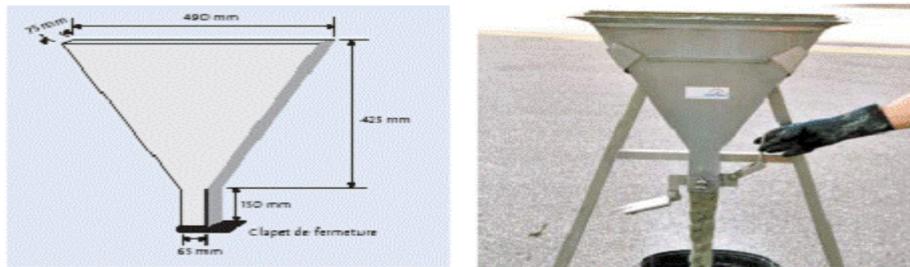


Figure(I.13) : boîte en L

XI-1-3. Essai d'entonnoir :

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant, il caractérise la capacité de passage de béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement de même type que celui imposé entre deux armatures

parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimension 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.



Figure(I.14) : essai d'entonnoir

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante, un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc la ségrégation dans le béton existe. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité de l'essai lors de l'écoulement, pour les bétons de même étalement au cône d'ABRAMS par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue [31].

Le temps de l'écoulement de béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes, quelque recommandation visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [32].

Un essai similaire de celui de l'entonnoir (mais de forme cylindrique) a été développé par Bartos [33] et appelé Orimet, un béton autoplaçant doit avoir un temps d'écoulement inférieure à 5 secondes. Ce dispositif peut être associé à l'essai J-Ring : le béton occupant le dispositif Orimet est directement déversé sur une plaque métallique au centre de l'anneau d'armature.

Résumé de la méthode :

La procédure de l'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir est rempli de béton jusqu'en haut, le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir soit entièrement vidé.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant, plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 5 et 12 secondes est recommandé pour le BAP.

XI-1-4. Essai d'étalement modifié (J-RING) :

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fait développer au Japon et consiste à faire écouler le béton à travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures $\varnothing 16$ à 18mm, espacés régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme à travers cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

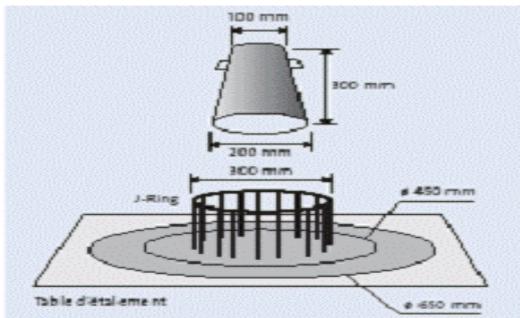
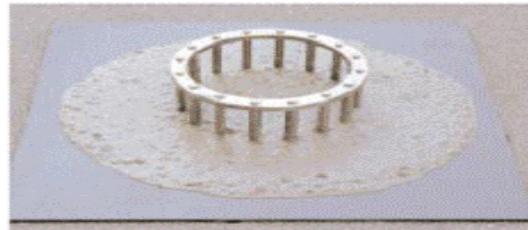


Fig. 4-4-1
Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)



Figure(I.15) : Essai d'étalement modifié.

XI-1-5. Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité.

La méthode consiste à déverser une quantité de béton (2litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité de béton. Ce rapport doit être compris entre 10% et 20%.

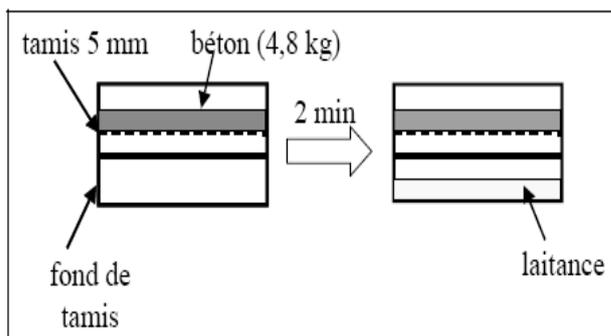


Figure (I.16) - Essai de stabilité au tamis

XI-1-6. Essai d'écoulement au tube en U :

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boîte en L, l'essai de tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le temps de remplissage de béton [34] le dispositif essai est composé de deux compartiments, et espacement existent pour les armatures entre les deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armature est une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements

existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon le type de chantier et les spécifications des différents pays).

Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissent passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint), la hauteur de remplissage est atteinte correspond à la faciliter de béton à se mettre en place dans un milieu confiné.

Pour un béton autoplaçant, la hauteur remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm. [33] [34].

XI-1-7. Essai de l'écoulement au caisson :

Cet essai simule le comportement de béton dans un milieu fortement ferrailé consiste à évaluer le temps de remplissage dans ce milieu. Il est généralement destiné austestes des bétons très fluides, ne contentent pas de gravier de taille supérieure a 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation de comportement autoplaçant du béton.

Ce teste consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h1 des armatures supérieures. Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement de la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage, une caractérisation quantitative de taux de remplissage R(%) est possible par la relation suivante [33] :

$$R(\%) = \frac{h_1 + h_2}{2 \cdot h_1} \cdot 100$$

Ou h1 et h2 sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson. Pour un béton autoplaçant, le temps de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% [36].

XI-1-8. Essai de la colonne :

Cet essai développé par Otsuki et al [37], permet d'évaluer la résistance à la ségrégation d'un béton. Il consiste a classer le béton dans une colonne cylindrique, ou à base carrée (10 cm de coté) et a le laisser jusqu'au début de prise. Des fractions des parties supérieures à 5 mm sont pesées. La ségrégation est négligeable si la distribution des granulats dans les différentes parties est uniforme. La distribution est considérée comme uniforme si la déférence entre les teneurs en graviers des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10 % [38][39], d'autre auteurs concédèrent une valeur de 5 % pour le béton autoplaçant.[40].

XI.2) caractéristique de BAP à t'état durci :

Le comportement à t'état durcis rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance a la compression, résistance a la traction) et le retrait des bétons autoplaçants

X-2-1. Les performances mécaniques de béton autoplaçant :

La résistance mécanique des BAP sont comme la plupart des bétons liée à la qualité de squelette granulaire et au rapport E/C, elles dépendent aussi du type et de la teneur du liant, l'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistance jusqu'à des BAP à haute performance (80a 100 MPA a 28 jours)

L'évolution des résistances des BAP semble être voisine au béton ordinaire en raison d'utilisation fréquente de fillers calcaire connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium.

La formulation des BAP implique un rapport E/C bas , donc de nature à fournir de bonnes résistance mécanique (paultre et al,1996) ont fait des tests comparent les bétons autoplaçants au BHP , ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistances à la compression et le module d'élasticité (sur BAP et un BHP sont comparables par contre les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP , comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais, consignés dans le tableau.

Tableau(I.6) : Principales caractéristiques des bétons testé par (paultre et al-1996).

Résistance visé en MAP	60	60	80	80
Nature de béton	BHP	BAP	BHP	BAP
Ratio E/L	0.5	0.42	0.35	0.37
F _{C28} (MPa)	54.1	60	71.9	80.9
Module d'élasticité (MPa)	38	34.7	40.9	38

En ce qui concerne la résistance à la compression et à la traction des BAP (paultre et al ,1996) on fait des tests comparant les BAP aux bétons de référence sur des éléments standards :

- Cubes de 150mm, pour mesurer la résistance à la compression
- Des cylindres pour la résistance à la traction pour fendage.

Tableau(I.7) : présente les résultats obtenus en compression et en traction à 28 jours pour des éléments standards d'après (Gibbs et al -1999).

Résistance a 28 jours	BAP	Référence (BV)
Résistance a la compression (N/mm ²)	47.2	37.1
Résistance a la traction (N/mm ²)	3.4	2.4
Rapport R traction/R compression	0.072	0.065

Les auteurs ont conclu qu'il ya une légère différence entre la résistance à la traction en compression des BAP et des bétons vibrés.

Les travaux de (Gibbs et al -1999) ont aussi montré que la résistance à la compression à 7 jours est plus élevée pour les BAP que celle des bétons vibrés de référence , d'après l'auteur en raison de la présence de calcaire qui accélère l'hydratation de C₂S et la résistance à la compression à jeune âge , ce résultat est également observé par (cauchet et all1991) qui a travaillé sur des bétons renfermant une quantité importante de fines de calcaire ; il ajoute que plus le filler est fin et plus le ciment contient du C₃A , plus la prise se fera rapidement .

Pour ce qui concerne la traction (Gibbs et al -1999) ont constaté qu'il n'a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence. Par contre (senebi et all, 1999) observent que la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence est conservée dans les mêmes conditions.

X-2-2. Le retrait :

A la vue de volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Plusieurs données montrent que le retrait total de BAP est plus important.

X-2-3. Module d'élasticité statique(en compression) :

Pour G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO, par ailleurs pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieure à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les BAP. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats) [43].

X-2-4. Déformation est fluage :

Les BAP subissent des déformations différées sous charges plus importantes que celle des BO vibrés dans la même gamme de résistance [44]. Les déformations spécifiques propres et totale ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des BAP [43] sauf pour la gamme de résistance relative au béton de bâtiment pour lesquelles ces paramètres sont identiques entre BAP et BO [46].

XI. Ouvrabilité des bétons autoplaçants :

Les bétons autoplaçants ont une ouvrabilité plus importante que l'ouvrabilité des bétons ordinaires vibrés et ça revient à l'existence des particules fines dans le béton autoplaçant et aussi l'existence de superplastifiants.

Donc pour une bonne ouvrabilité des bétons autoplaçants, on injecte des petits grains (fillers) et des adjuvants (superplastifiant).

Au début pour améliorer l'ouvrabilité des bétons ils ont minimisé le diamètre des granulats et l'ajout des adjuvants mais ces adjuvants sont vraiment chers, donc ils ont choisi d'utiliser ou bien d'injecter des fillers.

Donc les fillers ont un rôle très important, améliorer l'ouvrabilité des bétons autoplaçants et aussi les superplastifiants.

XII. Intérêts de béton autoplaçant :

Un BAP entraîne :

- ✓ Gaine de productivité :
 - Rapidité de coulage.
 - Augmentation des cadences.

- Réduction des couts de maintenance.
- ✓ Économie de main d'œuvre.
 - Temps de mise en ouvre réduit.
 - Ragréage limité.
- ✓ Amélioration des conditions de travail.
 - Pénibilité des taches.
 - Sécurité des chantiers.
 - Nuisances sonores réduites.
- ✓ Amélioration de la qualité des paramètres.

XIII.1-intérêts techniques et impacte sociaux-économiques d'un BAP :

L'origine des BAP semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus performants pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place de matériau [61]. La mise en ouvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement des coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir- faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces bétons initialement appelés bétons hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le non de béton autoplaçants, béton autocompactants, ou béton autonivellants, selon les applications [61].

Mise en ouvre :

La principale différence, entre un B.A.P. et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en ouvre. La spécificité d'un B.A.P. est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mise en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale. En terme de mise en ouvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel de fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement de matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

La méthode traditionnelle de remplissage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation due à la chute du béton dans le coffrage [2]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP Permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de l'AFGC [2], quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter le logeur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi,

la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10m. (Dans certain cas, elle peut être limitée à 5m.

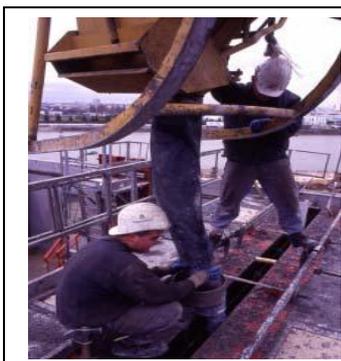
Toujours d'après les recommandations provisoires de l'AFGC [2], les données relative a la poussée exercée par le béton frais sur le coffrage ne sont pas suffisantes pour fixer des règles précises sur se point. D'efférentes études ont été menées depuis sur le sujet. Billberg[3], déclare que lorsque les BAP ont été développés, il était généralement admis qu'ils généreraient une pression hydrostatique. Or différentes études on montré que la pression exercée par les BAP sur ces coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage [3,4]. Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est-à-dire de ca capacité de structuration au repos [5] la pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de vitesse a laquelle il est mise en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau na pas le temps de se structurer [5].

Concernant la préparation des coffrages , notamment vis-à-vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions a prendre sont similaires a celles pratiquées pour les bétons traditionnels [2], les recommandations de la FFB [6] ne précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage essentielle et que la propriété des coffrages est a vérifier tout particulièrement .en effet l'aspect de surface des BAP étant un de leur principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier a préparation de coffrage . Ces temps de préparation supplémentaire n'est suspendant pénalisant pour l'avancement de chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration, l'absence de vibration simplifié par ailleurs le calage des armatures et des réservations.

Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme 5-25°C, des dispositions particulières sont à prendre [6,7]

Un attention particulière doit être portée a la cure des BAP, c'est-à-dire a la protection mise en ouvre pour éviter l'évaporation, et particulièrement dans le cas d'application horizontales, le faible ressuage des BAP les rend en effet plus sensible au retrait plastique [2] d'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premiers après mise en ouvre [2].

APPLICATIONS VERTICALES TROIS TECHNIQUES DE MISE EN OEUVRE



A la benne à manchette traditionnelle

A la pompe en tête de coffrage avec tube plongeur

A la pompe avec injection en pied de coffrage

Facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs

Figure (I.17) ; Application verticale de béton autoplaçant

MISE EN OEUVRE POUR LES OUVRAGES HORIZONTAUX

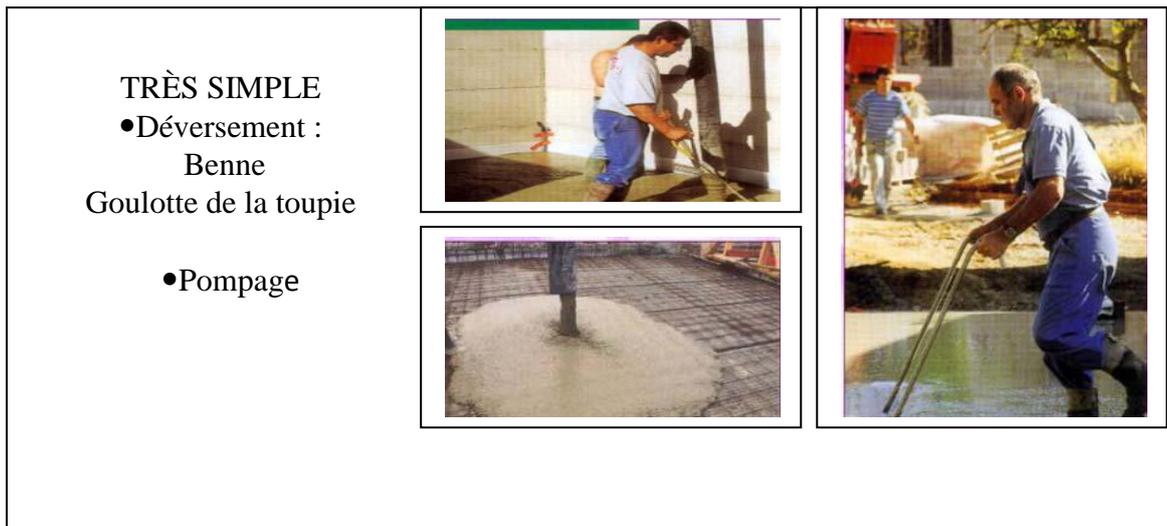


Figure (I.18) ; Application horizontale de béton autoplaçant (beton autonivelantes)

XIII. Fabrication, transport et mise en place des BAP :

XIII.1. Fabrication des BAP :

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celle recommandées pour les bétons vibrés, on les adaptant locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, cette la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité de malaxeur. [40].

XIII.2. Transport des BAP :

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur, comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité de béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment de déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire [42].

XIII.1. mise en place des BAP :

Par rapport au béton vibré la mise en place de BAP est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

1. utilisé pour les BO vibrés, la mise en place ce fait a l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.
2. utilisé un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure de coffrage.il peut aussi se fait par pompage [46].

XIV. CONCLUSION :

Le béton autoplaçant est une technique appelée à se développer, réservé de la prise en compte d'un certain nombre d'exigences :

- ✓ Une réorganisation des méthodes de chantier (cadences, matériels).
- ✓ Une collaboration plus étroite des intervenants (entreprises, béton prêt a l'emploi et cimentaires)
- ✓ Une maîtrise des couts globaux (matériaux, mis en ouvre, productivité, maintenance....)

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution :

- ✓ Des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes,
- ✓ Des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers),
- ✓ Des exigences environnementales liées à la réduction des impacts des chantiers.

Ils contribuent pleinement à l'amélioration des conditions de travail et à la sécurité sur les chantiers.

Chapitre :02

les fillers calcaire

I. Introduction :

Les fillers sont des produits de dimension granulaire inférieures à 80 μ m, obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermique ou pulvérisation de certaines roches (calcaires, silice, etc.).

II. Résumé :

Les fillers permettent d'améliorer les propriétés du béton (meilleure perméabilité et résistance à la ségrégation, augmentation de la résistance en compression, réduction de la porosité, meilleure qualité de surface, ...). Il existe plusieurs types des fillers et les plus fréquemment utilisés en Belgique actuellement sont des cendres volantes et Les fillers calcaires.

III-Définition

Les fillers sont des matériaux de construction granulats composés d'éléments de très petites dimensions utilisés soit comme charge de remplissage pour augmenter la compacité notamment d'un béton, d'un sol, soit comme constituant de certain liant hydraulique (ciment).



Figure(II.1) : Les fillers

IV- Effet des fillers en général :

Les fillers finement moulus constituent un complément du ciment dans le domaine des fines: ils ont un effet stabilisant dans la pâte de ciment, grâce au meilleur remplissage des vides. L'augmentation de la résistance est due principalement à la réaction pouzzolanique, L'adjonction des fillers n'améliore pas l'étanchéité des bétons. S'ils sont suffisamment fins, les fillers ne nuisent pas à la résistance et au gel du béton.

Plusieurs paramètres doivent être pris en considération pour déterminer la quantité de fillers à ajouter dans le béton. Les matières premières (fractions fines!), la composition du mélange et les performances requises du béton sont les paramètres déterminants (On dose généralement les fillers à raison de 5 à 15 % de la teneur en ciment).

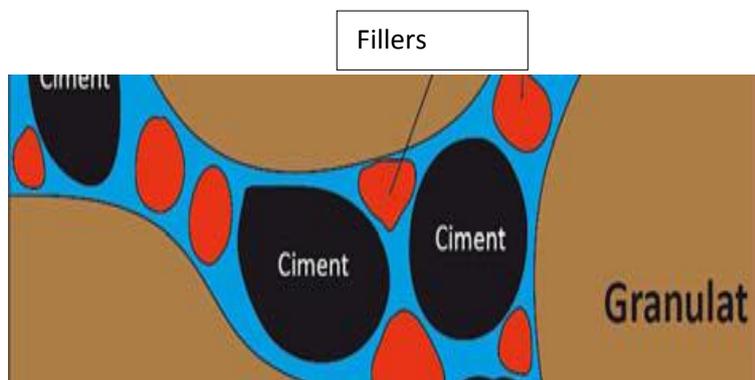
Donc en générale l'effet des fillers c'est :

Ou bien Les avantages que présente l'utilisation de notre filler calcaire dans le béton sont les suivants :

- ✓ Augmentation de la résistance du béton par diminution de la porosité du béton frais.
- ✓ Diminution du dosage en ciment pour une résistance donnée.
- ✓ Facilitation du démoulage immédiat de produits préfabriqués.
- ✓ Limitation du ressuyage.
- ✓ Augmentation de la cohésion.

V-Propriété requise des fillers :

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires. S'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure II-2) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, est appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.



Figure(II.2).Illustration de l'effet filler.

VI- Les différents types des fillers :

Il existe plusieurs types des fillers et ces types se divisent en deux : des fillers inertes et des fillers actifs.

VI.1. Principaux ajouts minéraux inertes (les fillers inertes)

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland: ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs, on distingue les fillers calcaire et les Schistes calcinés.

VI.1.1. Fillers calcaire:

Les fillers calcaire sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (Calcaires, basalte, bentonite, etc.) Présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 Supérieure à 75%.ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcaires finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbe granulométrique utilisés aussi pour augmenter la quantité des fines.

Le fillers calcaire intervient dans la rhéologie des pates de ciment par sa granularité et sa réactivité chimique. Il forme avec la pate de ciment une liaison qui améliore la résistance mécanique par comparaison à l'effet d'un filler inerte comme le quartz. Cette liaison peut être renforcée par l'utilisation des fillers mixtes (calcaire+silice réactive) ou de rapport ciment/eau plus faible.

Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron.

Les fillers se différencient les uns des autres par:

- ✓ Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui' ils contiennent.
- ✓ Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- ✓ Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

➤ *Avantages d'utilisation des fillers calcaire :*

Le principal avantage des fillers calcaire est : de réduire le coût final unitaire du ciment en réduisant son contenu énergétique. De plus, l'addition de fillers calcaire au clinker permet d'augmenter significativement la capacité de mouture des broyeurs, et d'améliorer les propriétés physiques du béton, à savoir l'ouvrabilité du béton frais, tout en permettant de densifier la matrice de mortier en retenant de l'eau.

➤ *Inconvénients d'utilisation des fillers calcaire :*

Les fillers calcaire présentent deux inconvénients majeurs :

- ✓ La diminution légère des résistances en compression à court terme des bétons.
- ✓ La vulnérabilité du béton frais contenant des fillers calcaire au retrait plastique.

➤ **L'influence des fillers calcaire sur la rhéologie :**

L'influence des fillers calcaire sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (perte de maniabilité, baisse de résistances).

Du fait de sa grande utilisation dans l'industrie, de nombreuses études ont montré généralement le rôle important des fillers dans les bétons, les mortiers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur néfaste. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires.

1. (Benachour et col, 2008). [17] et Hilali (2009) [18] a montré que :

- ✓ L'ajout de fillers calcaire de surface spécifique élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné.
- ✓ Les fillers augmentent la compacité du mélange, améliorent la résistance à la ségrégation et la robustesse de la formulation.

2. Esping (2008) [19] a montré que :

- ✓ Pour un dosage en eau constant à l'échelle du béton, le seuil de cisaillement et la viscosité sont augmentés avec l'augmentation de la surface spécifique du filler mesurée par la technique BET (Bureau d'Etude Technique).

3. (El Barrak, 2005)[20] montré que :

- ✓ Les fillers calcaire ont une bonne affinité avec la matrice cimentaire. Par ailleurs, ils confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de limiter le ressuage et la ségrégation.

4. Benachour et col [21] (2008) ont observé que :

- ✓ le mortier qui contient un taux de fillers calcaire supérieur à 15% par substitution au sable est plus ferme.

5. Felekoglu (2007)[22] ont montré que :

- ✓ les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/(ciment+fillers) constants. Le même auteur Felekoglu (2008) a fait une étude comparative entre un sable riche et un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci.

6. Yahia et col. (2005)[23] ont montré que :
- ✓ chaque rapport E/C correspond à un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. Au-delà de ce seuil, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes et donc la viscosité sera plus élevée.
7. Taleb (2009)[24] a constaté que :
- ✓ le besoin en eau est plus important lorsqu'il s'agit d'utiliser des fines minérales en substitution d'une partie de ciment et d'après les résultats obtenus il a souligné que les fillers calcaires diminuent la viscosité du béton jusqu'à un certain taux de substitution, au-delà duquel les frictions entre les particules deviennent plus importantes et augmentent, par conséquent, la viscosité du mélange.
8. A. Ghezal (1999) a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3mm et un ciment portland. L'auteur a constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes (Cité par Bensebti, 2008) [25].
09. Bouhamou et col. (2008) ont souligné que :
- ✓ le ressuage diminue lorsque le dosage en fines est augmenté parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et aussi parce que leur taux de sédimentation est plus faible. Ils ont remarqué aussi que l'augmentation du dosage en fines calcaires engendre une diminution du taux de remplissage à cause de l'augmentation de la viscosité.
10. Zhu et col. (2005)[26] :
- ✓ ont étudié l'influence de différents types de fillers calcaires sur les BAP.
 - ✓ Ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donnée. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvant que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption.
11. Diamantonis et col. (2010) ont montré que :
- ✓ le filler calcaire est le meilleur matériau qui peut être utilisé comme un additif dans les BAP parce qu'il améliore le comportement rhéologique de la pâte de ciment, puisque les mélanges qui contiennent les fillers ont une faible valeur de taux de cisaillement par rapport aux mélanges qui contiennent les fumées de silice, les cendres volantes, ou la pouzzolane.

V.1.2-Sable de dune :

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitation, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

VI.2- Les ajouts minéraux actifs :(les fillers actifs).

VI.2.1 La pouzzolane:

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

A. Pouzzolane naturelle:

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



Figure (II.3): Pouzzolane naturelle

B .Pouzzolane artificielle:

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

VI.2.2. La fumée de silice :

La fumées de silice sont des poudres de silice extrêmement fines (inférieurs au 1 μ m) ce sont des sous produits de fabrication du silicium et de ses alliages. Suivant la composition des alliages des produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux, la méthode de fabrication, les propriétés des fumées de silice sont aussi diverses.

Les fumées de silice, elles fournissent de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité de béton.

➤ **L'influence de la fumée de silice sur la rhéologie**

1- Nanthagopalan et col [26]. (2008) ont remarqué que :

- ✓ la fumée de silice a une influence sur l'écoulement du béton parce que leur demande en eau est importante par rapport au ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité et augmenter la viscosité.

2- Carlsward et col [27]. (2003) ont constaté que :

- ✓ les fumées de silice ne modifient pas la viscosité. Plusieurs autres auteurs Ferraris et col [28]. (2001), Park et col. (2005) ont trouvé que :
- ✓ les fumées de silice augmentent le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges.

3- De Larrard (1999) [29] a montré que :

- ✓ ce type de matériau présenterait une moindre chaleur d'hydratation, ainsi qu'un meilleur maintien de maniabilité.

VI.2.3. Le laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de :

- L'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %,
- de la silice entre 25 à 35%,
- De l'alumine entre 12 à 30%
- La magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Tableau (II.1) : Les différents types de laitier et leur composition.

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier Algérien
SiO ₂	29 à 36	33a42	38a42
Al ₂ O ₃	13a19	10a16	8a12
CaO	40a43	36a45	48a52
Fe ₂ O ₃	4%	0.3a20	2.0
MgO	6%	3a12	4.5
S	1.5%		0.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ✓ Broyage poussé.
- ✓ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ✓ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude).

VII-Rôle de l'addition minérale [15]

VII.1.Les superplastifiants

Les superplastifiants permettent donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées avant : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature. L'activité d'une addition minérale peut avoir trois effets différents :

VII.1.1.Effet filler ou effet de remplissage :

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton, modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet filler.

VII.1.2.Effet chimique ou pouzzolanique

L'activité chimique est le résultat de réactions chimiques entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction pouzzolanique.

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumé de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, hydrate sous produit de la formation du CSH (Calcium Silicate Hydrate) du clinker.

VII.2.Intérêt d'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil :

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

VII.2.1. Intérêt du point de vue technique:

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration.

VII.2.2. Intérêt du point de vue économique:

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland.

VII.2.3. Intérêt du point de vue environnemental:

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂.

VII.3. Les inconvénients d'utilisation des ajoutes minéraux :

- ✓ Retard de prise.
- ✓ Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- ✓ Mûrissement plus long.
- ✓ Résistance à l'écaillage controversée.
- ✓ Le broyage et le transport plus chers

VII.4. Effets des ajoutes minéraux sur les propriétés physiques des bétons :

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment et des additions.

Leur utilisation est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton.

VII.4.1. Amélioration de l'ouvrabilité:

Si nous ajoutons une quantité des fines à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant aussi le volume des vides. L'utilisation des cendres

volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules.

VII.4.2. Chaleur d'hydratation:

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

VII.4.3. Durabilité:

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

VII.4.4. Développement des résistances:

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains.

✓ ***Développement des bétons à haute résistance*** : L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique.

VII.5.L'utilisation des ajouts en Algérie :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf.

VIII-Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplacants :

Les bétons autoplacants sont caractérisés par leur fluidité élevée de sorte qu'ils puissent être mis en application sans vibration. Les effets des fillers sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux. Diverses études suggèrent que l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non pouzzolaniques, au ciment de Portland affecte les propriétés du béton frais et durci. Parmi les fillers non pouzzolaniques, les fines calcaires et de dolomite sont les plus fréquemment utilisées dans des mélanges de BAP [12]. Différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais [13]. D'autre part, on signale que le retrait et le module d'élasticité dépendent non seulement des effets de fillers mais également du volume de la pâte [14]. Zhu[25] et al, 2004 ont montré que la finesse des fillers calcaires a peu d'effet sur la demande en superplastifiant et même de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton vibré avec les mêmes rapports Eau/liant

Si un filler calcaire est essentiellement utilisé comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton, son influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances).

IX-Conclusion :

On peut admettre comme conclusion que l'utilisation des fillers dans les bétons autoplacants à un rôle très important. D'une part : améliore l'ouvrabilité et d'autre part d'augmenter la fluidité pour qu'ils puissent être mis en application sans vibration. Et permettent aussi d'améliorer les propriétés du béton (meilleure perméabilité et résistance à la ségrégation, augmentation de la résistance en compression, réduction de la porosité, meilleure qualité de surface, ...).

Chapitre :03

La Rhéologie

I. Introduction :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement (liquide) ou la déformation (solide) des corps, sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées dans l'espace et dans le temps, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps .

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- ✓ Rhéologie expérimentale : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
- ✓ Rhéologie structurale : explication des comportements à partir de la structure du matériau.
- ✓ Rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

II. Historique

La Rhéologie c'est un mot créé aux États Unis en 1929 par Eugène Cook Bingham (1878-1945). L'émergence de la rhéologie est liée à l'épanouissement des polymères et bien sûr la construction des premiers rhéomètres.

Le vocable 'Rhéologie' vient de grec « rhéin » signifiant « s'écouler » « fluer ». il s'agit de la branche de la physique qui s'occupe de mesurer, de modéliser, de prévoir l'écoulement des différents fluides.

III. Définition :

La rhéologie est une branche de la mécanique qui étudie les rapports entre la viscosité, la plasticité et l'élasticité de la matière, ainsi que le comportement de celle-ci sous l'influence des pressions.

La rhéologie est la science qui étudie les déformations (solide) et l'écoulement (liquide) de la matière. Elle a pour objet d'analyser les comportements mécaniques des substances et d'établir leurs lois de comportement.

La rhéologie englobe de nombreuses disciplines fondamentales telles que la résistance des matériaux, la mécanique des fluides, la plasticité, ...

IV. L'objectif de la Rhéologie :

L'objet de la rhéologie est l'étude de comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de la matière.

V. Les mesures rhéologiques et les rhéomètres :

Pour caractériser le comportement à l'écoulement d'un matériau (et donc d'un béton), on se sert de rhéomètres, ces appareils peuvent fonctionner sur des principes différents, les plus communs visent à induire un écoulement à symétrie cylindrique au béton, confiné dans une cuve, par l'imposition d'une vitesse de rotation sur un mobile, ils mesurent en retour la résistance que le fluide oppose à ce mouvement.

Un rhéomètre : est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide ou une pâte, (étude fondamentale des propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée).

Un rhéomètre permet de connaître les grandeurs fondamentales taux de cisaillement, contrainte de cisaillement $\tau(t)$ et viscosité.



Figure(III.1) : Rhéomètre capillaire à écoulement forcé

- * Les rhéomètres sont surtout utilisés en recherche et développement, par exemple en formulation d'adhésifs, d'huiles, de bitumes, de peintures, de cosmétiques, et aussi pour les mesures de la viscosité minimale, du temps de gel...).

VI. Domaine d'étude de rhéologie :

Dans la pratique, la rhéologie est une extension des disciplines telles que l'élasticité et la mécanique des fluides newtoniens, aux matériaux dont le comportement mécanique ne peut être décrit par ces théories classiques. Elle permet également de déterminer les propriétés mécaniques macroscopiques à partir d'une étude basée sur la structure micro ou nanoscopique du matériau, par exemple la taille moléculaire et l'architecture d'un polymère en solution ou encore la distribution de taille de particules dans une suspension solide.

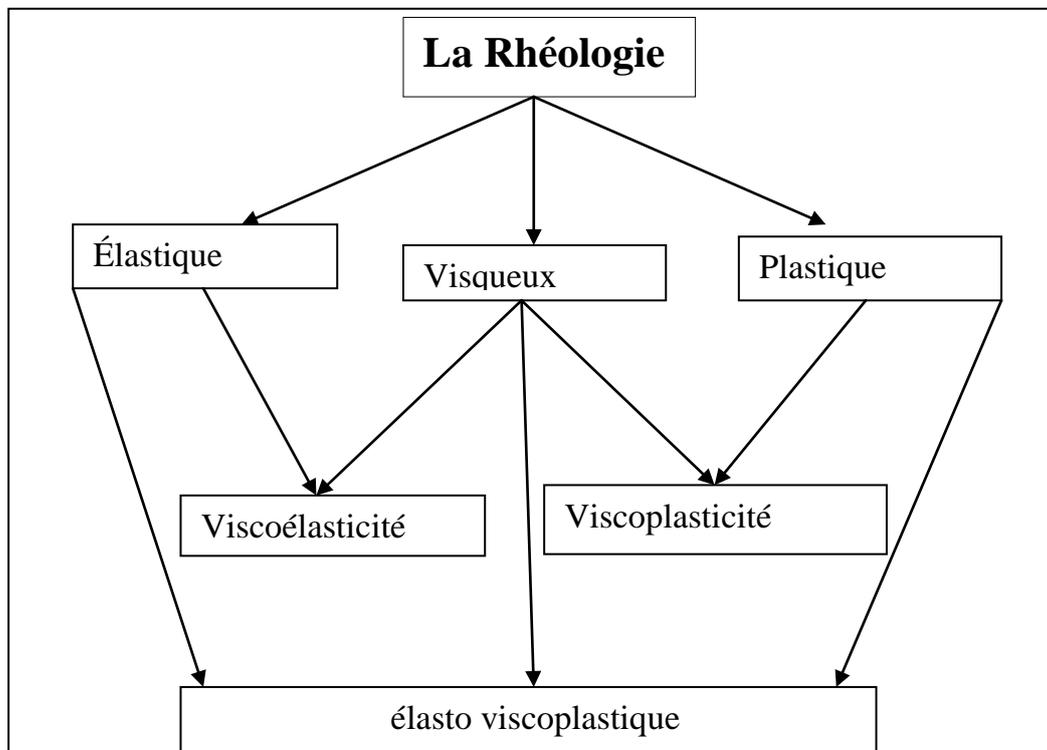
Tableau (III.1) : Les racines de la rhéologie.

Mécanique des milieux continus	Mécanique du solide ou Résistance des matériaux	Élasticité	
		Plasticité	Rhéologie
	Mécanique des fluides	Fluides non-newtoniens	
		Fluides newtoniens	

La rhéologie granulaire s'occupe de la description des matériaux granulaires.

VII. Les diverses applications de la rhéologie :

Les applications de la rhéologie sont diverses et on peut citer ces application dans le schéma suivant



VII.1.L'élasticité : L'élasticité est la tendance d'un matériau solide à retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé. La déformation élastique est une déformation réversible. Un matériau solide se déforme lorsque des forces lui sont appliquées. Un matériau élastique retrouve sa forme et sa taille initiales quand ces forces ne s'exercent plus.

On dit qu'un corps est parfaitement élastique s'il retrouve complètement sa forme originale après suspension de la charge et il est partiellement élastique si la déformation produite par les forces externes ne disparaît pas complètement lorsque celles-ci sont annulées.

L'élasticité linéaire concerne les petites déformations proportionnelles à la sollicitation. Dans cette gamme, l'allongement est proportionnel à la force dans le cas d'un étirement, selon le module de Young, et l'angle est proportionnel au couple dans le cas d'une torsion.

VII.2.La plasticité : Un critère de plasticité, ou critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique

Mesure de la capacité d'un matériau à subir une déformation permanente sans se casser.

VII.3.La viscosité : La viscosité c'est la propriété d'un fluide de résister aux forces extérieures ou bien aux contraintes appliquées dans l'espace et dans le temps.

La viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière.

Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. Pour un liquide (au contraire d'un gaz).

La viscosité d'un fluide définit l'état d'un fluide dont les molécules sont freinées dans leur déplacement par des interactions ou des associations moléculaires plus ou moins intenses.

VII.4.La viscoélasticité linéaire: Tous les matériaux présentent, à des degrés divers, des propriétés viscoélastiques :

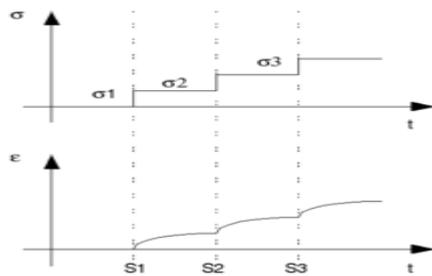
Leur comportement s'apparente à la fois de comportement élastique parfait et de liquide visqueux newtonien, l'étude de ces propriétés et donc tout a fait essentielle.

VII.4.1.Définition générale :

Il convient tout d'abord de donner un certain nombre de définition générale :

Comportement linéaire, fonction de fluage, fonction de relaxation, indispensables à l'étude de la viscoélasticité linéaire.

VII.4.2. Comportement linéaire : principe de superposition de Boltzman :



Figure(III.2) : Principe de superposition de Boltzman

Principe de Boltzman : chaque nouvelle contrainte contribue de façon indépendante à la déformation finale

Selon Ludwig Boltzman, l'état de contrainte ou de déformation d'un corps viscoélastique est fonction de toutes les sollicitations appliquées au matériau.

Chaque nouvelle sollicitation contribue de manière indépendante à l'état final.

- Par définition, on dira qu'un matériau à un comportement linéaire, ou qu'il satisfait au principe de superposition de Boltzman, si, soumis à une contrainte : $\sigma = \sum_i \sigma_i$

Il subit une déformation : $\epsilon = \sum_i \epsilon_i$

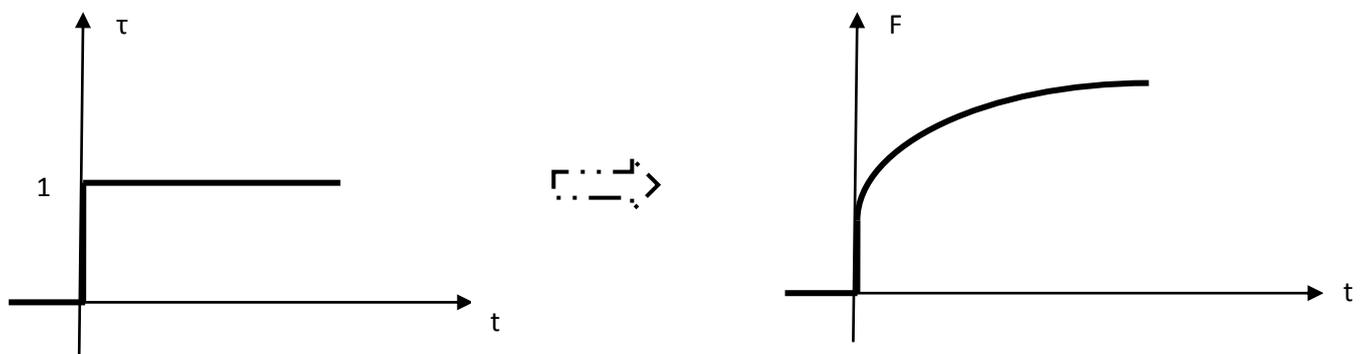
Égale à la somme des déformations ϵ_i qu'il subirait s'il était soumis isolément à la contrainte τ_i .

VII.4.3. Fonction de fluage et fonction de relaxation :

Les fonctions de fluage et relaxation sont les fonctions essentielles en viscoélasticité linéaire.

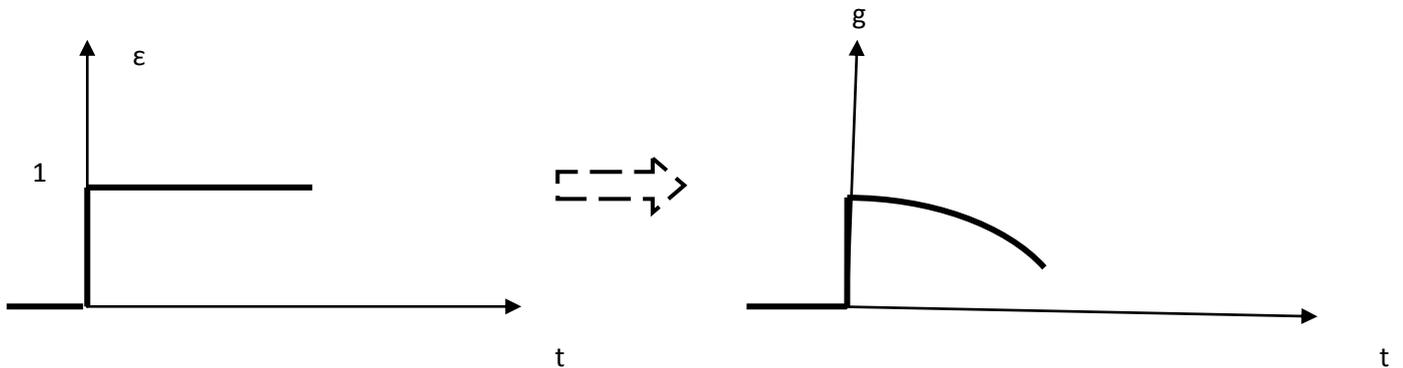
Par définition :

***La fonction de fluage $f(t)$** : est la déformation subit par le matériau , lorsqu'on impose à ce dernier une contrainte d'amplitude unité a l'instant initial $t=0$, contrainte qui maintenue constante au cour de temps.



Figure(III.3) : Principe d'une expérience de fluage.

**La fonction de relaxation $g(t)$* : est la contrainte qui résulte de l'application d'une déformation d'amplitude unité l'instant initial $t=0$, déformation qui est maintenue constante au cours de temps.



Figure(III.4) : Principe d'une expérience de relaxation.

VII-4-4- Matériaux viscoélastique linéaire soumise a des contraintes de déformation sinusoïdales :

En dehors des expériences de fluage et de relaxation, il existe, en viscoélasticité linéaire, un autre type d'expérience qui présente un intérêt fondamental, et qui consiste à étudier le matériau de façon dynamique, en lui imposant une contrainte (déformation) qui varie sinusoïdalement au cours de temps avec la fréquence N , la linéarité des équations entraîne que la déformation (contrainte) est également sinusoïdale et de même fréquence.

On pose :

$$\left. \begin{aligned} \tau(t) &= \tau_0 \cos(Wt + \delta) \\ \epsilon(t) &= \epsilon_0 \cos wt \end{aligned} \right\} \text{ Avec : } \begin{cases} \tau_0, \epsilon_0, \text{ amplitude maximale de la contrainte, de la déformation} \\ w = 2\pi N, \text{ pulsation propre.} \\ \delta, \text{ déphasage de la contrainte par rapport a la déformation} \end{cases}$$

VII.5. La viscoplasticité : La viscoplasticité est la théorie en mécanique des milieux continus qui décrit le comportement inélastique dépendant de la vitesse de déformation des solides. La dépendance à la vitesse de déformation, dans ce contexte signifie que les déformations sont proportionnelles à la vitesse de chargement. Le comportement inélastique dans le cas de la viscoplasticité est un comportement plastique ce qui signifie que le matériau subit des déformations irréversibles quand un certain niveau de chargement est atteint [48].

VII.6. Elasto viscoplasticité : La élasto viscoplasticité c'est la propriété d'un matériau à la fois de retrouver sa forme d'origine après avoir été déformée et subir une déformation permanente sans se casser et de résister au force extérieure au bien au contrainte appliqué dans l'espace et dans le temps.

VIII. liste des modèles rhéologiques :

Les modèles rhéologiques sont utilisés pour modéliser le comportement d'un matériau, c'est-à-dire pour simuler sa réponse à une sollicitation mécanique. Concernant la viscoélasticité linéaire, des modèles analogiques empiriques ont été proposés ; ils sont composés d'une combinaison de connexions en série et/ou parallèle de ressorts (de coefficients d'élasticité E_i) et d'amortisseurs (de coefficients de viscosité η_i) élémentaires, représentant les composantes élastique et visqueuse, respectivement. Il existe des modèles performants pour décrire la viscoélasticité, approchant de façon satisfaisante les courbes de caractérisation mécanique, mais de complexité mathématique élevée. Certaines lois de comportement sont intégrées dans des logiciels de calcul par éléments finis traitant la viscoélasticité.

Les fluides viscoélastiques peuvent aussi être représentés par des modèles analogiques électriques.

VIII.1. Les modèles élémentaires

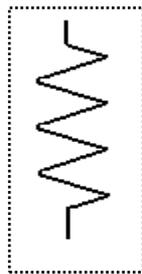
Le comportement d'un corps viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique parfait et d'un liquide visqueux newtonien.

Nous allons donc rappeler les propriétés de ces deux matériaux idéaux et limites, et construire des modèles des comportements intermédiaire.

VIII.1.1. Solide élastique parfait : Ce modèle (analogique) représente le solide hookéen : comportement mécanique purement élastique ; loi de Hooke (modèle mathématique)

$$\sigma = E \varepsilon.$$

Un solide élastique parfait sera symbolisé en rhéologie par un ressort de coefficient de complaisance élastique J :



Figure(III.5) : Modèle d'un solide élastique parfait (ressort)

La réversibilité entre contrainte et déformation est Les relations entre contrainte et déformation sont instantanées et linéaires.

Le matériau peut être modélisé en mécanique par un ressort. Il n'y a aucune dissipation d'énergie. En régime dynamique, l'angle de phase entre la contrainte dynamique et la déformation dynamique du corps soumis à une oscillation sinusoïdale est de 0° .

La fonction de fluage d'un solide élastique parfait a pour expression :

$$F(t)=0 \quad t < 0$$

$$F(t)=J \quad t \geq 0$$



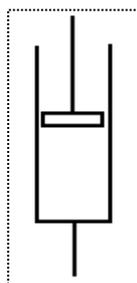
Figure(III.6).La fonction de fluage d'un solide élastique parfait

D'après la fonction de fluage on tire les informations suivantes :

- ✓ Des que une contrainte est appliquée instantanément, une déformation prend naissance, proportionnelle à la contrainte, inversement, si une contrainte est ramenée à zéro, immédiatement la déformation s'annule : on dit que la déformation élastique instantanée est récupérable.
- ✓ Le comportement est bien un comportement solide, soumis à une contrainte constante, le matériau atteint instantanément un état d'équilibre.

VIII.1.2. Liquide visqueux newtonien (amortisseur) : Ce modèle représente le fluide newtonien : comportement visqueux (ou liquide) newtonien ; loi de Newton

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon}$$



Figure(III.7) : Modèle d'un liquide visqueux newtonien (amortisseur)

Où η est la constante de Newton.

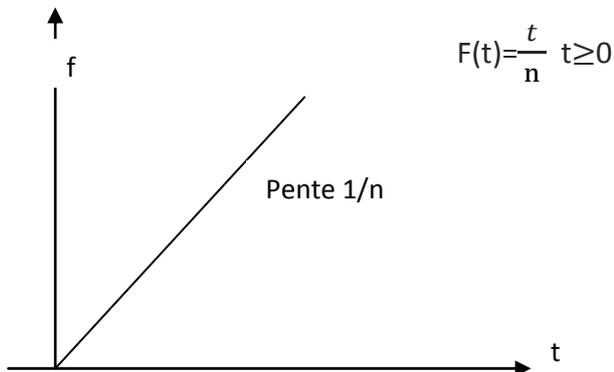
$$\varepsilon = \frac{\tau_0}{\eta} t + \varepsilon_0$$

On a alors, ici ε_0 représente la déformation initiale, donc nulle.

On obtient alors $\varepsilon = \frac{\tau_0}{\eta} t$.

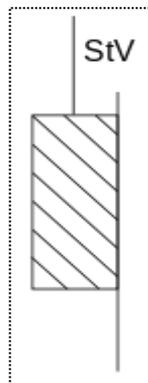
Le modèle équivalent en mécanique est celui d'un amortisseur.

La fonction de fluage s'écrit : $F(t)=0 \quad t < 0$



Figure(III.8) : Fonction de fluage d'un liquide visqueux newtonien

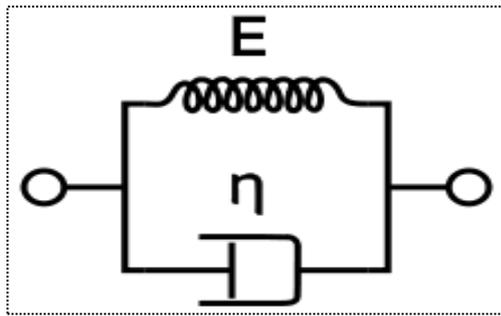
VIII.1.3. Patin : (ou élément de Saint-Venant) : modèle représentant le solide rigide parfaitement plastique , il introduit une non linéarité dans les modèles , il décrit un comportement plastique (déformation irréversible) , utilisé pour les fluides à seuil , la contrainte appliquée doit dépasser un seuil de plasticité (appelé aussi seuil de déformabilité, contrainte d'écoulement) pour obtenir un déplacement.



Figure(III.9) : Modèle de patin

VIII.2. Les modèles viscoélastiques :

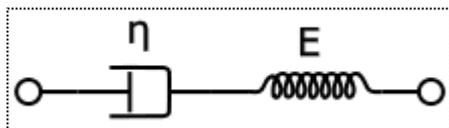
VIII.2.1. Modèle de Kelvin-Voigt (ou modèle de Voigt) : Il est constitué par l'association en parallèle d'un ressort, de complaisance élastique J , et d'un amortisseur de coefficient de viscosité n .



Figure(III.10) : Modèle d'un solide de kelvin-Voigt

Remarque : On voit que le rôle de l'amortisseur couplé en parallèle avec le ressort, et de freiner, de retarder la déformation : on dit qu'un solide de kalving-voigt possède une élasticité retardée ou différée, par opposition à l'élasticité instantanée du solide élastique parfait, on emploie également l'expression post-effet élastique.

VIII.2.2. Modèle de Maxwell : Représente le modèle le plus simple du liquide viscoélastique, il est constitué par l'association en série d'un ressort J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η .



Figure(III.11) : modèle d'un liquide de Maxwell

VIII.2.3.modèle de Zener : ou modèle du solide linéaire standard (**en**) (SLS) : composé d'un modèle de Maxwell et d'un ressort (apportant l'élasticité instantanée) assemblés en parallèle ; le modèle le plus simple prédisant à la fois le fluage et la relaxation de contrainte ; simule de façon satisfaisante un polymère densément réticulé ;

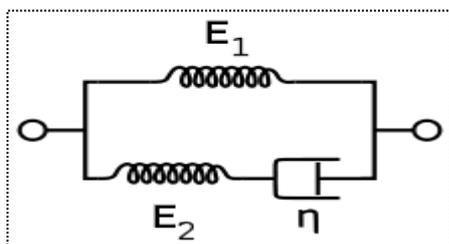
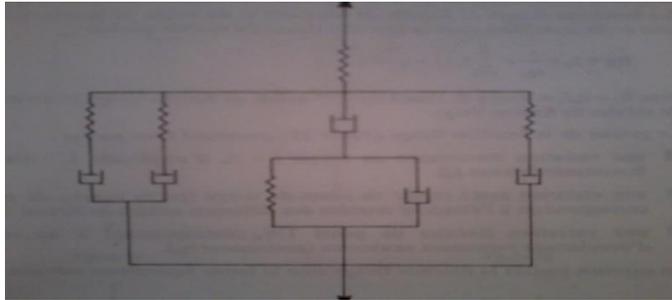


Figure (III.12): Modèle de Zener.

VIII.3. Modèles visqueux élastique générale :

Tout les associations de ressorts et d'amortisseurs, aussi complexes soient-elles, correspondent à un comportement visqueux élastique linéaire, en particulier le modèle de la Figure après représente parmi beaucoup d'autres, un matériau viscoélastique possible

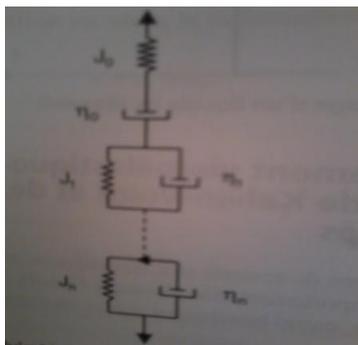


Figure(III.13) : exemple d'un modèle viscoélastique complexe

A partir des lois d'association en série et parallèle, on peut établir l'équation rhéologique de chaque modèle, quelle que soit sa complexité et on déduit les fonctions de fluage et de relaxation dans chaque cas particulier.

Cela ne sera pas nécessaire : on démontre en effet que tout les circuits aussi complexes soient-ils, peuvent être représentés par des modèles de structure bien définis : on distingue le modèle de Kelvin-Voigt généralisé et le modèle de Maxwell généralisé

VIII.3.1. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé : Il est constitué par l'association en série d'un liquide de Maxwell et d'un certain nombre de solides de Kelvin-Voigt.



Figure(III.14) : modèle de Kelvin-Voigt généralisé.

VIII.3.2. Modèle de Maxwell généralisé : modèle de Maxwell généralisé (ou modèle de Maxwell-Wiechert) : composé de n modèles de Maxwell mis en parallèle.

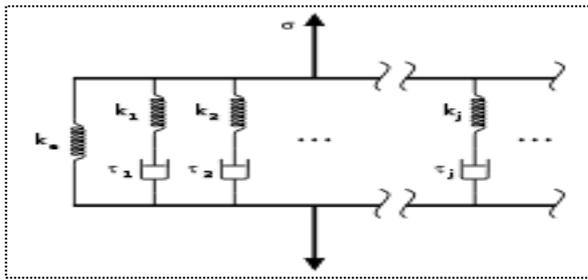
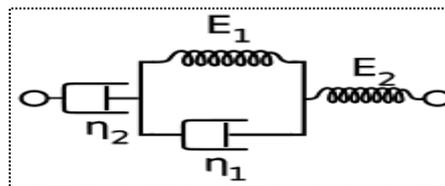


Figure (III-15) : modèle de Maxwell généraliser

VIII.3.3. Modèle de Maxwell convecté supérieur : Généralisation du modèle de Maxwell.

VIII.3.4. Modèle de Burgers (en) : Association en série d'un modèle de Maxwell avec un modèle de Kelvin-Voigt, décrit de façon satisfaisante le comportement en fluage,



Figure(III.16) : Modèle de Burgers.

VIII.3.5. Modèle de Wagner (en) : Développé pour la prédiction des propriétés viscoélastiques des polymères.

VIII.3.6. Modèle de Bernstein-Kearsley-Zapas : Le modèle de Wagner peut être considéré comme une forme pratique simplifiée de ce modèle.

VIII.3.7. Modèle de Arruda-Boyce (en) : Utilisé pour décrire le comportement mécanique des élastomères et polymères.

VIII.3.8. Solide néo-hookéen (en) : Modèle pour matériau hyper élastique (en), similaire à la loi de Hooke.

VIII.3.9. Solide de Mooney-Rivlin (en) : Modèle pour matériau hyper élastique.

VIII.3.10. Modèle de Gent (en) : Modèle pour matériau hyper élastique.

VIII.3.11. Modèle Oldroyd-B (en) : Utilisé pour décrire l'écoulement des fluides viscoélastiques.

VIII.3.12. Modèle hyperélastique polynomial (en) : Modèle phénoménologique de l'élasticité caoutchoutique ;

VIII.4. Les Modèles plastiques :

VIII.4.1. Modèle de Saint-Venant (ou modèle de Prandtl) : Ressort et patin assemblés en série, décrit un comportement solide élastique linéaire parfaitement plastique (élasto-plastique) sans écouissage, les déformations sont élastiques sous faible contrainte (sous le seuil de plasticité).

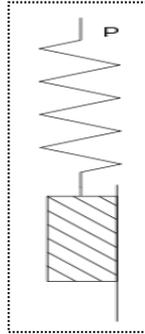
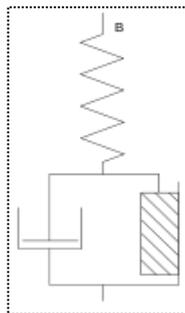


Figure (III.17) : Modèles de Prandtl.

VIII.4.2. Modèle de Saint-Venant généralisé : Des ressorts et des patins sont associés en série ou en parallèle, décrit le solide élasto-plastique écouissable.

VIII.4.3. Modèle de Képis (ou modèle de Prager) : Ressort et patin combinés en parallèle, décrit un comportement élasto-plastique, l'écouissage est linéaire et cinématique.

VIII.4.4. Modèle de Bingham : Ressort en série avec un patin en parallèle avec un amortisseur, modèle d'un corps élasto-viscoplastique.



Figure(III.18) : Modèle de Bingham

Le modèle de Bingham est un modèle théorique de milieu viscoplastique qui correspond à un comportement de solide parfait sous faibles contraintes, et à un comportement de fluide visqueux au-delà d'une contrainte-seuil. Ce modèle porte le nom d'Eugène Bingham qui en a donné l'expression mathématique [49].

Le modèle de Bingham permet de caractériser des fluides dits à seuils, comme les gels par exemple. En dessous d'une contrainte seuil, le fluide va se comporter comme un solide et au delà de cette contrainte, le comportement sera le même que celui d'un fluide Newtonien.

VIII.4.5. Modèle de Bingham généralisé.

VIII.4.6. Modèle de Schvedoff.

VIII.4.7. Modèle de Shofield-Scott Blair.

IX. La Rhéologie des bétons autoplaçants :

La rhéologie est la science des déformations et de l'écoulement de la matière, elle décrit les relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume, compte tenu, le cas échéant, de leurs dérivés par rapport au temps. On dit qu'un élément est en écoulement si le degré de déformation change en fonction du temps (Phan, 2007).

Le comportement rhéologique d'un élément de volume d'un corps est la manière dont ses déformations correspondent aux contraintes imposées sur ce corps. Ce comportement peut être étudié à différents niveaux : le béton, le mortier, la pâte et le fluide (mélange de l'eau et des adjuvants qui contiennent une fraction de molécules).

Le but de l'étude du comportement rhéologique d'un fluide est d'estimer le système de forces nécessaires pour causer une déformation spécifique, ou la prédiction des déformations causées par un système de force spécifiques.

Dans cette partie, on désire rappeler les bases de la science rhéologique. Il s'agit des définitions de bases des paramètres qui interviennent sur le comportement rhéologique (le seuil de cisaillement la viscosité plastique) ou bien des notions fondamentales de rhéologie.

IX.1. Seuil de cisaillement

Par définition, le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas.

IX.2. La viscosité

La viscosité μ est la résistance à l'écoulement de la matière (la propriété d'un fluide de résister aux force extérieure), elle est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

IX.3. Différents types de modèles d'écoulement appliqués aux bétons :

Les bétons ordinaires et les BAP sont caractérisés par les mêmes grandeurs rhéologiques qui sont le seuil de cisaillement et la viscosité, et possèdent pourtant des comportements rhéologiques différents.

On considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham. (Il existe plusieurs modèles mais le plus utilisé c'est celui de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$$

Avec

τ_0 : le seuil de cisaillement exprimé en (Pa).

μ : la viscosité plastique exprimé en (Pa.s).

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse de cisaillement exprimé en (s⁻¹).

X. Conclusion :

Donc on peut admettre comme conclusion que la rhéologie est l'étude de l'écoulement d'un liquide et de déformation d'un solide, et son but principal c'est l'étude de comportement mécanique des matériaux.



partie02:
Etude Experimentale

Caractérisation des matériaux

Avant d'entamer une formulation, il est nécessaire de connaître les matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais normalisés. Dans ce chapitre, nous exposons les caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation de nos bétons.

I. Introduction :

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et la quantité d'eau. L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants, dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques de béton.

Dans ce qui suit, on décrit les différents constituants entrant dans la composition d'un béton ordinaire et d'un béton autoplaçant (granulats, ciment, addition minérales, adjuvants et eau).

Les constituants de base d'un béton ordinaire ou courant sont le ciment, l'eau et les granulats et pour les BAP sont obtenus par ajout d'adjuvant et additions minérales.

II. Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés sont locaux et naturels, tous les bétons sont utilisés avec les mêmes matériaux :

II.1. matériaux de base utilisés :

II.1.1. le ciment :

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CPJ CEM II/42,5 provenant de Lafarge d'Alger.

II.1.2. les granulats :

Les granulats utilisés dans cette étude sont des granulats concassés provenant d'une carrière, ils sont de quatre classes : Sable 0/3, Gravier 3/8, Gravier 8/16, Gravier 16/25.

II.1.3 l'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet de notre laboratoire, qui est une eau potable.

II.1.4. L'adjuvant (super plastifiant) :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui sont incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 2% du poids de ciment. Ils permettent

d'améliorer certaines de ses propriétés. Dans notre étude, on a utilisé le Superplastifiant MEDAPLAST SP 40, permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage à été introduite.

Tableau(IV.1) : Quelques caractéristiques de MEDAPLAST 40 :

caractéristique	forme	couleur	PH	densité	Teneur en chlore	Le dosage recommandé
résultats	liquide	marron	8.2	1.2±0.01	<1g/L	0,5% à 2%

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité.
- d'augmenter la maniabilité.
- de réduire l'eau de gâchage.
- d'éviter la ségrégation.
- de faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait.



Figure(IV.1) : Le superplastifiant MEDAPLAST 40 utilisé

II.1.5. Les fillers calcaire :

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche, sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm. Des fillers calcaires, prévenant de la carrière d'Azzafon.



Figure(IV.2) : Les fillers calcaire qu'on a utilisés.

II.2. Caractéristiques des granulats :

Avant la réalisation d'une formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de chaque matériau par un certain nombre d'essais au laboratoire.

II.2.1. Essai sur granulats :

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et a des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'établir les caractéristiques par différents essais au laboratoire.

- **Echantillonnage (NF P 18-553) :**

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble, l'opération de l'échantillonnage est essentielle et elle s'effectue en générale en deux étapes :

- ✓ prélèvement de l'échantillon global du matériau, soit dans une carrière ou dans une usine.
- ✓ Au laboratoire, prélèvement d'un échantillon par quartage pour les essais prévus. Cet échantillon du prélèvement de départ (voire annexe 1 pour les détails de la méthode d'échantillonnage).

- **Analyse granulométrique (EN 933-1 et 993-2)**

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

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis (voire annexe 1).

- **Masse volumique apparente est absolue (NF P 18-554 et NF P 18-555) :**

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue le volume absolu et le volume apparent.

Nos résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau(IV.2) : Masse volumique absolu est apparentes des granulats.

granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3	2.72	2.5	2.08
Masse volumique apparente (kg/l)	1.43	1.46	1.33	1.23

La méthode de calcul de la masse volumique apparente et absolue se trouve dans l'annexe 3.

- **Module de finesse du sable (NF P18-304) :**

Le module de finesse est défini comme étant la somme des refus cumulés (exprimés en pourcentage) sur les tamis de modules suivants : 23, 26, 29, 32, 35,38.

Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs de la composition des bétons.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur de sable,

-un module de finesse faible correspond à un sable fin

-un module de finesse élevé correspond à un sable grossier.

La valeur de module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Nos résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

$$M_f = \frac{95.36+80.63+53.3+23.93+0.6+0}{100} = 2.538$$

Tableau(IV.3) : Module de finesse de sable :

granulats	Sable (0/3)	spécifications
Module de finesse M _f	2.538	2,8<M _f <3,2 sable grossier 2,2<M _f <2,8 sable moyen 1,8<M _f <2,2 sable fin

M_f =2.538, on déduit que notre sable moyen.

- **Equivalent de sable :**

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'ES exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable.

- L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact.

- L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C donne une faible valeur de la résistance.

L'essai a donné les résultats présentés dans le tableau suivant.

Tableaux(IV.4) : Valeur de l'équivalent de sable.

granulats	Sable (0/3)	spécification
Equivalent de sable visuel (ESV) (%)	90	70a 80 pour un sable roulé
Equivalent de sable sous le poids d'un piston (ES) (%)	95	>65 pour un sable concassé

On a donc un sable propre.

II.3.Elaboration des bétons :

Les bétons soumis aux essais dans la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux.

Notre objectif est de vérifier expérimentalement la validité de ce que dit la bibliographie et de trouver le béton qui est caractérisé par une ouvrabilité plus élevée (BO ou bien BAP). Quelques essais préliminaires ont effectivement montrés que l'ouvrabilité (affaissement, étalement, écoulement) des différents bétons est fortement influencée par la teneur des fines, l'introduction d'un super plastifiant et la présence des fillers. Ainsi, différentes méthodes de formulation des mélanges sont comparées :

- béton ordinaire : méthode Dreux-Gorisse(11).
- bétons autoplaçants BAP : méthode adéquate.

II.3.1.Formulation de béton ordinaire :

Pour la formulation de béton ordinaire vibré, nous avons choisi la méthode de DREUX-GORISSE qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux pour 1m^3 de béton. Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle nous demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats. Les étapes de la méthode soient récapitulées dans les paragraphes suivants :

* *La résistance visée :*

Par sécurité, la résistance visée doit être majorée de 15 % par rapport à la résistance que l'on souhaite obtenir. Ainsi la résistance visée doit être obtenue comme suit :

$$\sigma'_{28J} = \sigma_{28J} + 0.15 \sigma_{28J} \quad \text{soit :} \quad \sigma'_{28J} = 1,15 \sigma_{28J}$$

La résistance désirée pour un béton témoin à 28 jours est telle que :

$$\sigma_{28J} = 26\text{MPa}$$

La résistance visée pour un béton témoin à 28 jours est telle que :

$$\begin{aligned} \sigma'_{28J} &= 1.15 \sigma_{28J} \\ \sigma'_{28J} &= 1.15 \times 26 \\ \sigma'_{28J} &= 30\text{MPa} \end{aligned}$$

*** Dosage en ciment et en eau :**

Le dosage en ciment et en eau est évalué par la formule de Bolomey(30)

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

D'où :

- R'28 résistance moyenne désirée
- G coefficient granulaire
- σ'_c classe de résistance vraie du ciment
- C dosage en ciment (kg/m3)
- E dosage en eau (l/m3)

• Choix approprié du coefficient granulaire :

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau suivant établi par George Dreux (35).

Tableau(IV.5) : Les valeurs approximatives du coefficient granulaire.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 16mm	25 ≤ D ≤ 40mm	D ≥ 63mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, Courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Les granulats utilisés ont un diamètre de 25 mm, ce qui donne un coefficient granulaire **G=0,50** avec une bonne qualité.

• Choix de la classe varié de ciment :

Parmi la liste des ciments disponibles sur le marché des matériaux de construction, nous avons retenu le ciment CPJ CEMII42,5.

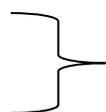
Le rapport $\frac{C}{E}$ est donnée par : $\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G \times 42,5} + 0,5 = \frac{30}{0,50 \times 42,5} + 0,5 = 1,91$

$\frac{C}{E} = 1,91.$

• Dosage en ciment pour 1m³ de béton :

Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on déduit, grâce a l'abaque $\frac{C}{E}$ en fonction de A le dosage en ciment correspond.

$\frac{C}{E} = 1,91$
A=8cm



l'abaque donne la valeur du dosage en ciment :
C=350kg (voire figure ci après).

$$\frac{C}{E} = 1.91$$

$$C = 350 \text{ kg}$$

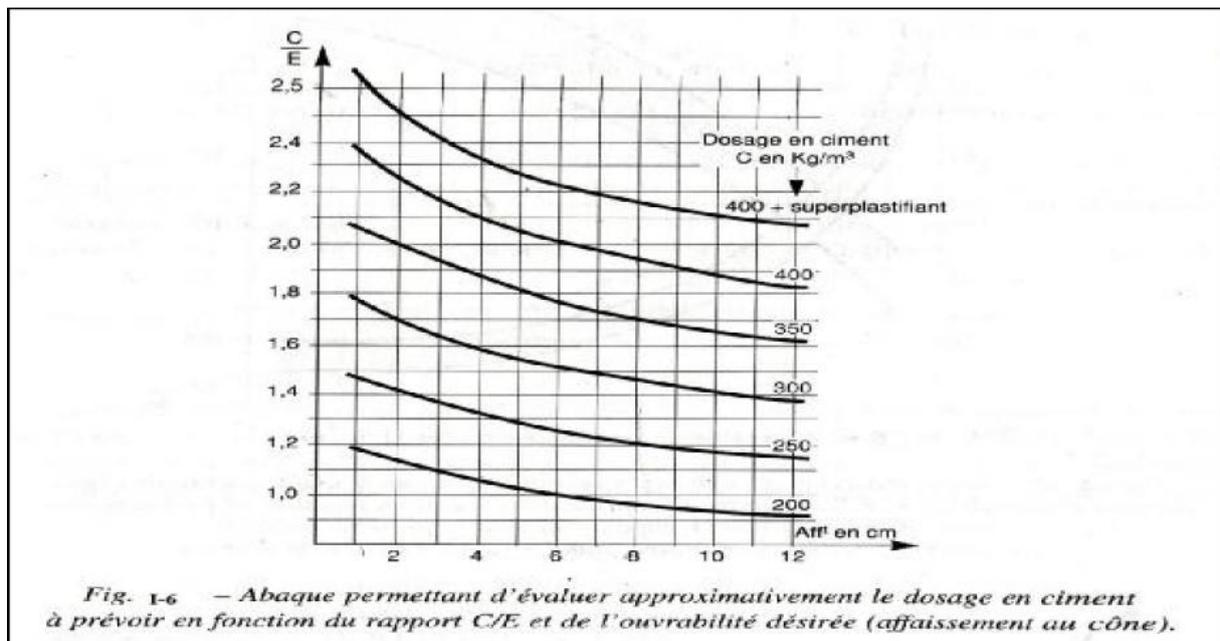
on déduit la valeur de E qui est :
 $E = 183.25 \text{ kg}$

On a déduit le coefficient d'affaissement comme suit :

Tableau(IV.6) : Le coefficient d'affaissement.

Affaissement en cm	plastique	désignation	Vibration conseillé	Usage fréquents
0a4	ferme	F	puissante	Béton extrudés Béton de VRD
5a9	plastique	P	normale	Génie civil Ouvrage d'art Bétons de masse
10a 15	très plastique	TP	faible	Ouvrages courants
≥16	fluide	FL	Léger piquage	Fondation profondes Dalle et voile minces

Donc dans notre cas on a un béton plastique donc on prend $A=8\text{cm}$.



Figure(IV.3) Abaque permettant la détermination de dosage en ciment. [48]

✱ **Tracé la courbe granulair de référence :**

Cette courbe correspond au mélange des granulats (sable+gravier, ciment non compris) Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction des modules ou diamètre des tamis) déjà obtenue, on trace une courbe granulométrique de référence OAB avec :

- Le point O est repéré par ces coordonnées : (0.080 ; 0)
- Le point B est repéré par ces coordonnées (D ; 100) D le diamètre de plus grand granulats. (25.100)

- Les coordonnées de point de brisure A :

En abscisse :

-si $D \leq 20\text{mm}$, l'abscisse est a $D/2$

-si $> 20\text{mm}$, l'abscisse est situé au milieu du « segment gravier » limité par le module 38(5mm) et le module correspond a D.

On a donc dans le deuxième cas : 12.5mm

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + k + k_s + k_p$$

Avec :

K : coefficient qui dépend du dosage en ciment, de l'intensité de vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés.

Comme on a : le dosage en ciment qui vaut 350kg/m^3 .

Une vibration normale

Granulats de forme concassés

La valeur de coefficient $K=0$ (tableau 10-12 de (56)).

K_s : coefficient qui tient compte du module de finesse du sable M_f .

Comme le module de finesse de sable vaut 2.538, la valeur de K_s est calculé par la formule suivant : $K_s = 6M_f - 15 = 6 \times 2.538 - 15 = 0.228$

$$K_s = 0.228.$$

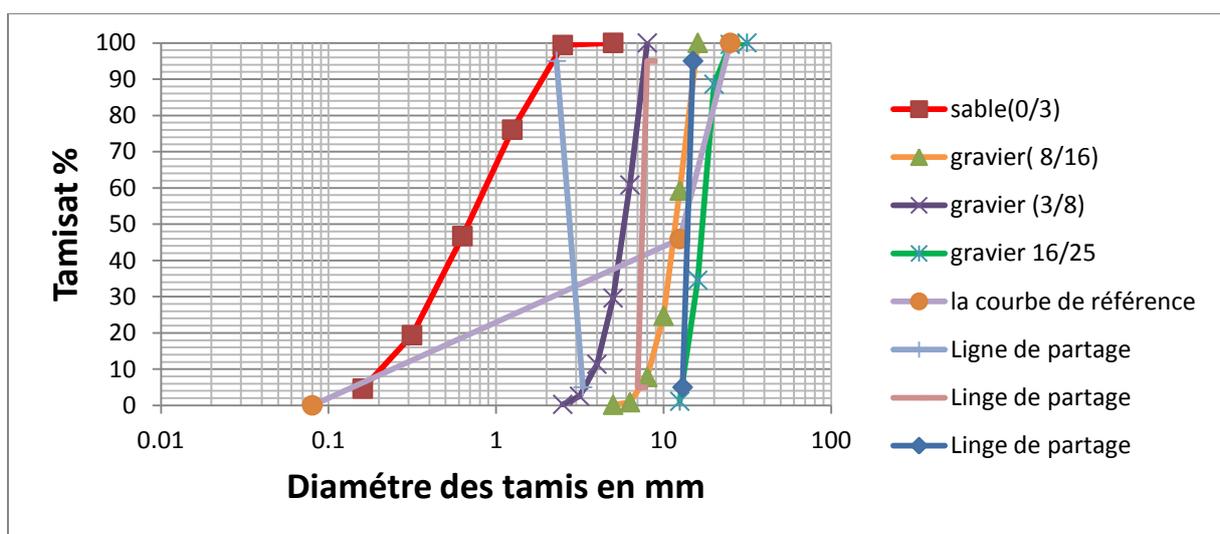
K_p coefficient de pompabilité, on peut prendre en générale $K_p = +5\%$ a 10% .

Notre béton n'est pas de qualité pompable d'où ;

$$K_p = 0$$

$$D'où ; Y = 50 - \sqrt{25} + 0 + 0.228 + 0 = 45.288$$

Ainsi, les coordonnées de point de brisure A sont (8 ; 45.288).



Figure(IV.4) : Courbe granulatoire des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partages.

✱ **Les lignes de partage :**

Les droites jointant la point à 95% (tamisat) d'un granulat au point a 5 % au granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées lignes de partage, les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulé les pourcentages correspondant aux différents granulats successives, il s'agit de pourcentages en volume absolus.

Sur la courbe granulométrique, les points d'intersections entre les lignes de partage et la courbe de référence OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Sable (0/3) : 31.5%

Gravier (3/8) : $40.6 - 31.5 = 9.1\%$

Gravier (8/16) : $52 - 40.6 = 11.9\%$

Gravier (16/25) : $100 - 11.9 - 9.1 - 31.5 = 47.5\%$

✱ **Coefficient de compacité :**

Il est défini comme le rapport des volumes absolus en litres des matières solides :

$$V_M = V_g + V_c$$

Au volume totale de béton frais soit un mètre cube : $\delta = \frac{V_M}{1000}$

On utilise le tableau (10.13) des valeurs de coefficient de compacité (51) et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats à 25 mm, un béton plastique, et vibration normale, on trouve une valeur de $\delta = 0.830$.

D'où $V_M = V_g + V_c = 0.830 \times 1000 = 830$

✱ **Dosage des granulats :**

Les dosages en volume de chaque constituant de béton sont donnés par les relations suivantes :

- **volume absolu de ciment :** $V_c = \frac{m_c}{\gamma} = \frac{350}{3.1} = 112.90 \text{ l}$

Avec : m_c : Dosage en ciment (en masse).

γ : masse volumique de ciment

- **volume absolu des granulats (l'ensemble):** $V_g = V_m - V_c$

$$V_g = 1000\delta - V_c = 830 - 112.90 = 717.1 \text{ litre.}$$

- **Volume absolu de sable :**

$$V_s = \frac{V_g \times 31.5}{100} = \frac{717.1 \times 31.5}{100} = 225.89 \text{ l}$$

- **Volume absolu de gravier 3/8 :**

$$V_{G\ 3/8} = \frac{V_g \times 9.1}{100} = \frac{717.1 \times 9.1}{100} = 65.26 \text{ l}$$

- **Volume absolu de gravier 8/16 :**

$$V_{G\ 8/16} = \frac{V_g \times 11.9}{100} = \frac{717.1 \times 11.9}{100} = 85.33 \text{ l}$$

- **Volume absolu de gravier 16/25 :**

- gravier 16/25 :21.25kg
- ciment 10.5kg
- l'eau : 5

II.3.1. Formulation de béton auto plaçant :

Pour la formulation d'un BAP, il faut satisfaire deux propriétés qui sont opposées ; une bonne fluidité contre une bonne viscosité, soit une bonne capacité d'écoulement sans ségrégation des différentes phases de béton. Ceci rend la phase de formulation plus complexe et plus pointue que les bétons ordinaires vibrés. Les meilleures caractéristiques rhéologiques de béton sont obtenues par le choix des proportions optimales des différents constituants [50] Pour la formulation des bétons autoplaçants, on utilise les mêmes matériaux que le béton vibré mais la dimension des granulats change, car dans les BAP la dimension maximum des granulats est de 16mm (peut atteindre 20mm) ce qui permet d'éviter tout risque de ségrégation et blocage des granulats ce qui garantie l'obtention d'une bonne fluidité.

La méthode à suivre est la suivante :

Pour ces formulations on va passer d'abord des formulations des BO en termes de résistance et fraction volumique d'un volume de 1m^3 de béton. Nous avons donc utilisé la méthode de DREUX GORISSE.

Pour la formulation du squelette granulaire de notre BAP, nous avons utilisé les courbes des granulats naturelles (sable 0/3 et gravier 3/8 8/16) pour tracer une première courbe granulaire du béton prescrite par la méthode de DREUX GORISSE, nous avons donc défini les proportions granulaires de ces trois granulats.

Une fois, tous les composants d'un béton, sans les additions de fillers, sont obtenus, nous avons alors refaire cette formule, nous avons substitué une partie de phase solide prévu pour les granulats (sable 0/3) et nous l'avons remplacé par des fines de fillers.

Donc pour la formulation de BAP on a quatre possibilités :

La première possibilité consiste à éliminer le pourcentage de gravier 16/25 et de le remplacer par le pourcentage des fillers. Ou bien de le remplacer par du sable ou par du gravier 3/8 ou 8/16.

La deuxième possibilité est de diviser le pourcentage de 16/25 sur 4 et d'ajouter à chaque constituant cette quantité.

On a : gravier $16/25 = 47.5\% / 4 = 11.875\%$ on va ajouter ce pourcentage sur les 4 constituants, on aura donc :

Sable 0/3 = 43.375%

Gravier 3/8 = 20.97%

Gravier 8/16 = 23.77%

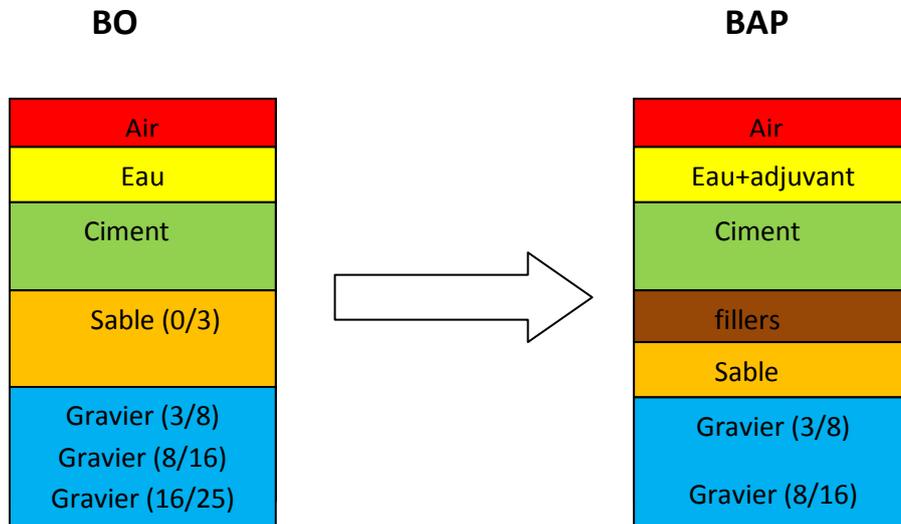
Pour la quantité des fillers on a choisi de remplacer 50% de la quantité de sable par des fillers donc : on aura $43.375/2 = 21$.

Sable 0/3=12.69kg

Fillers = 12.65kg

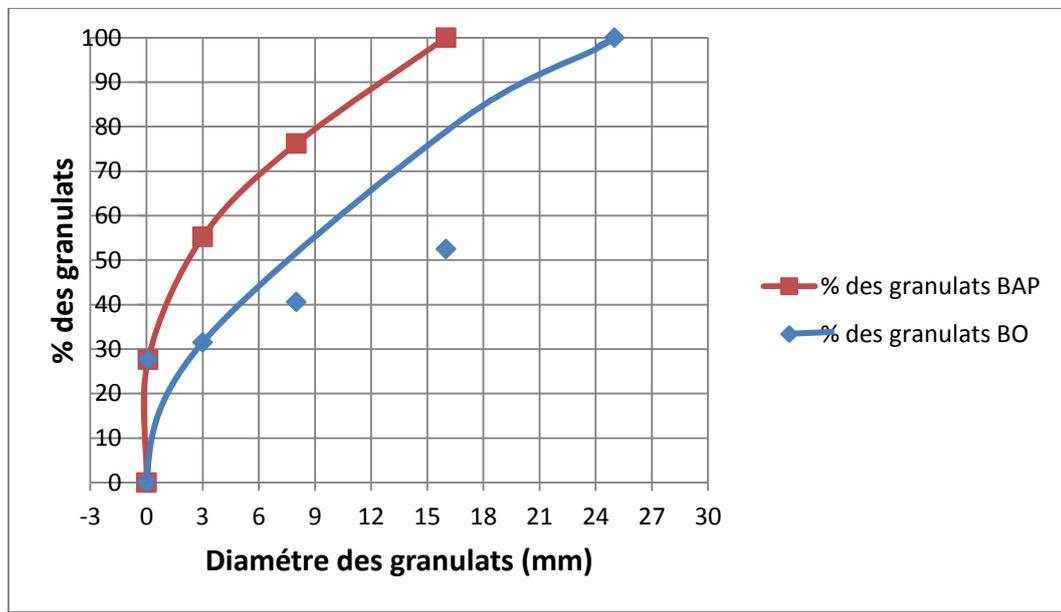
Ciment=12kg

Eau=5.82



Figure(IV.5) : Schématisation de la mise en place du BO et BAP

III. La courbe granulométrique des deux types de béton (BO et BAP) :



Figure(IV.6) : La courbe granulométrique obtenus des BO et BAP

NB : Une fois la formulation est connue on peut passer à l'étape de la préparation de gâchage et son utilisation dans le maniabilimètre.

Chapitre :V
Expérimentation & Exploitation
Expérimentation & Exploitation
Analyse de résultats

Mesure et contrôle d'ouvrabilité et de résistance maniabilimètre

I-Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons confectionner notre béton telle que sa composition à été déjà faite (pour les deux bétons ordinaire et autoplaçant). Nous allons utiliser le maniabilimètre pour mesurer le temps d'écoulement, et ensuite déterminer le béton qui est caractérisé par un temps d'écoulement élevé, donc un béton plus maniable ou bien plus ouvrable.

II-Méthode d'évaluation d'ouvrabilité du béton :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage. La mesure de l'ouvrabilité du béton ordinaire et du BAP peut être faite soit, avec des méthodes dues à base d'écoulement statique comme le cône d'Abrams, ou par des méthodes à base d'écoulement dynamique comme la méthode de maniabilimètre du LCPC, L box,....etc. [52].

III-Description de l'appareil Maniabilimètre du LCPC :

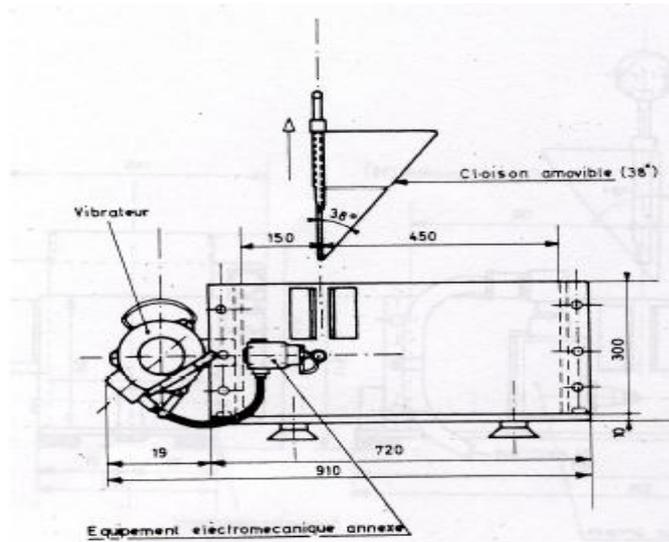
Il est constitué de plaques d'acier formant un parallépipède rectangulaire de dimension 30x30x60 cm, une plaque inclinée de 38° par rapport à la verticale qui divise le moule en deux compartiments de volume différent, trois traits horizontales sont gravées à l'intérieure de moule sur la plaque d'extrémité et un vibreur.

Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le béton sous vibration pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure de maniabilimètre.



Figure(V.I) : Le Maniabilimètre de LCPC (disponible dans notre laboratoire)

Figure(V.II) : La phase inclinée



Figure(V.3) : Schéma représentatif de Maniabilimètre

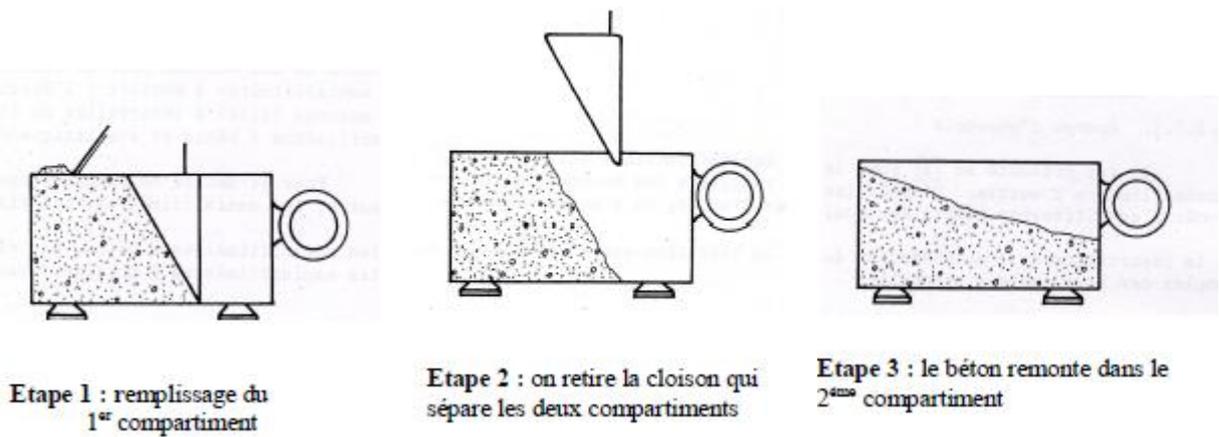


Figure (V-4) : Phases successive de l'essai de Maniabilimètre



Figure(V.5) : Les trois traits (niveau) de Maniabilimètre.

IV-Confection des bétons :

IV.1.Préparation de gâchage :

Pour la confection des bétons, il y'a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériel et matériaux.

Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec les granulats secs.

Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à la température ambiante et les mettre à sec pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les pesées des matériaux à utiliser (gravillons, ciment, fillers...). Séparer l'eau en deux quantités ($\approx 10\%$ pour l'humidification des granulats et $\approx 90\%$ le reste d'eau prévue pour le béton). Tout l'appareillage expérimental nécessaire est mis en place (balances, récipient, maniabilimètre, le malaxeur)

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

1. Béton ordinaire :

- préparer tout le matériel à utiliser.
- Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur.



Figure(V.6) : Préparation de gâchage.

- Mettre le malaxeur à marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30s.



Figure(V.7) : Mettre le malaxeur en marche

Figure(V.8) : Homogénéisation du mélange (après le malaxage)

Laisser le malaxeur en marche et ajouter l'eau de pré-humidification et mélanger pendant 30s.

- Laisser reposer 1mn 30s.
- Effectuer immédiatement les essais au Maniabilimètre, on fait remplir ce dernier de béton, en élevant la phase inclinée, et on mesure le temps d'écoulement du béton avec un chronomètre. (ou bien le temps de déplacement de béton dans le premier compartiment a l'autre)



Figure(V.9) : Remplit le Maniabilimetre du béton.

Les résultats obtenus à l'aide de Maniabilimètre :

Tableau (V.1) : les résultats de maniabilimètre pour le BO

/	Le temps d'écoulement (s)
fond	0
niveau1	6.2
niveau 2	7.9
niveau 3	9.6



Figure(V.10) : Les différents niveaux de maniabilimètre.

- Remplir les éprouvettes cylindriques pour déterminer la résistance de ce béton



Figure (V.11) : Préparation des éprouvettes.

- Faire vibrer l'éprouvette pour homogénéiser le béton



Figure(V.12) : Vibration des éprouvettes.

- Décoffrage après 24h.



Figure(V.13) : Décoffrage des éprouvettes.

- Mettre dans l'eau pendant 6 jours et laisser sécher pendant une journée.



Figure(V.14) : Mettre les éprouvettes dans l'eau.

- Mesure de la résistance après septième jour (en utilisant la presse hydraulique).



Figure(V.15) : Machine de compression.

Tableau (V.2) : Les résultats de résistance de BO.

N° d'éprouvette	La résistance a 7 j (MPA)	/0.69(MPA)	Avant déformation	Après déformation
01	19.23	27.87		
02	20.04	29.04		
03	19.87	28.80		

2. Béton autoplaçant :

- Préparer tout le matériel à utiliser.
- . Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur.



Figure(V.16) : Préparation de gâchage.

- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30s.
- Ajouter le ciment et les fillers calcaires.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter l'eau et le superplastifiant de pré-humidification et mélanger pendant 30s.
- Laisser reposer 1mn 30s.

- Effectuer immédiatement les essais au Maniabilimètre, de façon à remplir le Maniabilimètre du béton en élevant la phase inclinée et on mesure le temps d'écoulement du béton.



Figure(V.17) : Mise de béton dans le Maniabilimètre.

Le Maniabilimètre nous donne un temps de :

Tableau(V.3) : Les résultats de Maniabilimètre pour le BAP.

/	Le temps d'écoulement (s)
Fond	0
niveau1	2.6
niveau 2	3.4
niveau 3	4.6

- Remplir les éprouvettes cylindriques sans vibration car le BAP est très fluide il se déplace tout seul sans l'effet de vibration.



Figure (V.18) : Remplir les éprouvettes de BAP.

- Décoffrage après 24h et calcule de résistance après 7jour (toujours en utilisant la presse hydraulique).

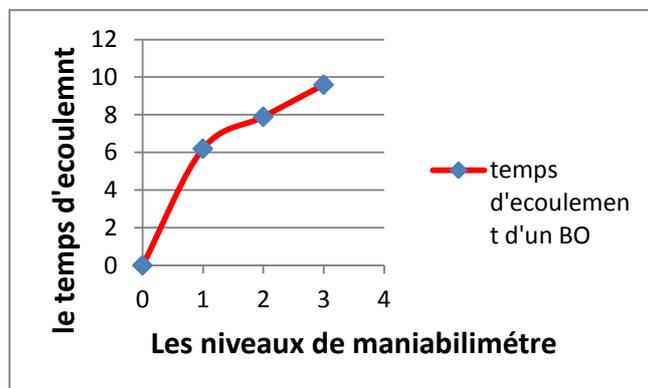
Tableau (V.4) : Les résultats de résistance pour le BAP.

N° d'éprouvette	La résistance a 7 (MPA)	/0.69	Avant déformation	Après déformation
01	16.56	24		
02	17.83	25.84		
03	16.56	24		

V-Interprétation des résultats d'écoulement entre les deux bétons BO et BAP :

BO

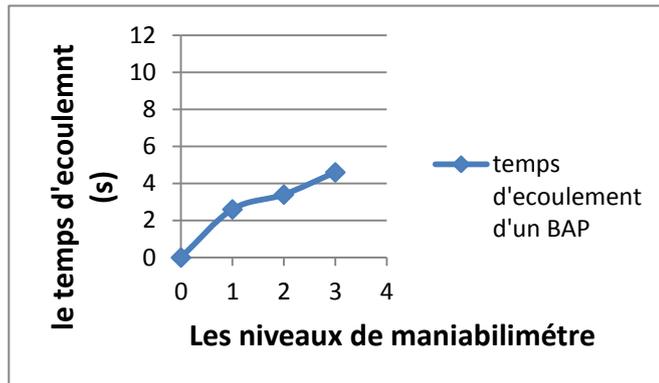
/	Le temps d'écoulement (s)
Fond	0
niveau1	6.2
niveau 2	7.9
niveau 3	9.6



Figure(V.19) : Le temps d'écoulement d'un BO.

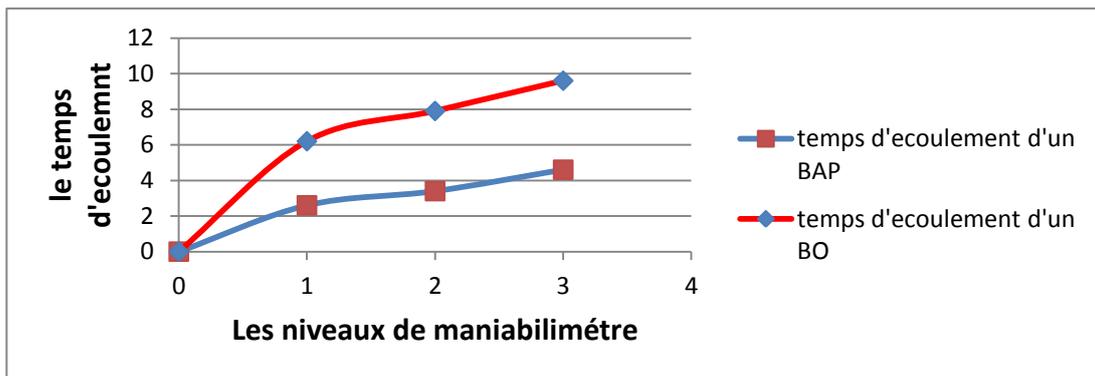
BAP

/	Le temps d'écoulement (s)
Fond	0
niveau1	2.6
niveau 2	3.4
niveau 3	4.6



Figure(V.20) : Le temps d'écoulement d'un BAP.

Assemblage des deux courbes :



Figure(V.21) : Le temps d'écoulement d'un BO et d'un BAP.

V-1-Commentaire :

Le temps d'écoulement d'un BO est plus élevé qu'un BAP.

Le BO est moins fluide qu'un BAP est cela s'explique par l'incorporation de superplastifiant et l'utilisation des particules fines (les fillers calcaires) dans sa composition. Le BAP se caractérise par une ouvrabilité plus élevée.

V-2 Conclusion :

L'ajout des fillers calcaires ont une influence sur l'ouvrabilité du béton de manière à augmenter le temps d'écoulement, donc d'augmenter l'ouvrabilité du BAP.

VI-Interprétation des résultats de résistance entre le BO et le BAP :

Dans cette partie notre but est de comparer les performances mécaniques en terme de résistance de trois éprouvettes cylindriques de BO et BAP, et on déduit quel type de béton est caractérisé par une bonne résistance (BO ou bien BAP).

Est ce que la déférence d'ouvrabilité conduit à une déférence de résistance ?

BO : Pour le BO, les résultats des écrasements des éprouvettes nous donnent :



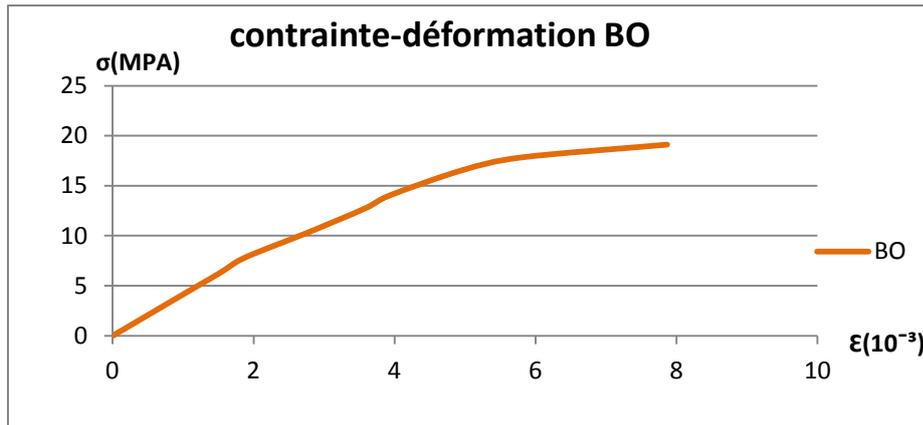
Figure(V.22) : Les éprouvettes cylindriques de BO avant écrasement



Figure(V.23) : Les éprouvettes cylindriques du BO après écrasement.

Tableau(V.6) : Le mayen des trois éprouvettes cylindrique de BO

F	DL1	DL2	DL3	dl	$\epsilon=dl/l$	$\sigma=F/S$
0	0	0	0	0	0	0
10	5	5	20	10	0,05	1,27388535
20	20	150	160	110	0,55	2,5477707
30	79	225	250	184,666667	0,92333333	3,82165605
40	150	295	295	246,666667	1,23333333	5,0955414
50	215	350	360	308,333333	1,54166667	6,36942675
60	255	425	415	365	1,825	7,6433121
70	320	535	500	451,666667	2,25833333	8,91719745
80	450	595	590	545	2,725	10,1910828
90	515	680	630	608,333333	3,04166667	11,4649682
100	610	760	780	716,666667	3,58333333	12,7388535
110	680	825	850	785	3,925	14,0127389
120	990	905	900	931,666667	4,65833333	15,2866242
130	1040	960	980	993,333333	4,96666667	16,5605096
140	1240	1130	1115	1161,66667	5,80833333	17,8343949
150	2040	1450	1230	1573,33333	7,86666667	19,1082803



Figure(V.24) : La contrainte et déformation du BO

BAP :



Figure(V.25) : Les éprouvettes cylindriques du BAP avant



Figure (V.26) : Les éprouvettes cylindriques après déformation.

Tableau(V.7) : Les moyens des trois éprouvettes cylindriques du BAP.

F	DL1	DL2	DL3	dl	$\epsilon=dl/l$	$\sigma=F/S$
0	0	0	0	0	0	0
10	5	40	15	20	0,1	1,27388535
30	150	210	190	183,333333	0,91666667	3,82165605
40	370	355	225	316,666667	1,58333333	5,0955414
50	535	480	292	435,666667	2,17833333	6,36942675
60	630	570	395	531,666667	2,65833333	7,6433121
70	720	750	465	645	3,225	8,91719745
80	910	840	520	756,666667	3,78333333	10,1910828
90	998	940	630	856	4,28	11,4649682
110	1140	1120	960	1073,33333	5,36666667	14,0127389
120	1225	1190	1020	1145	5,725	15,2866242
130	1530	1200	1130	1286,66667	6,43333333	16,5605096

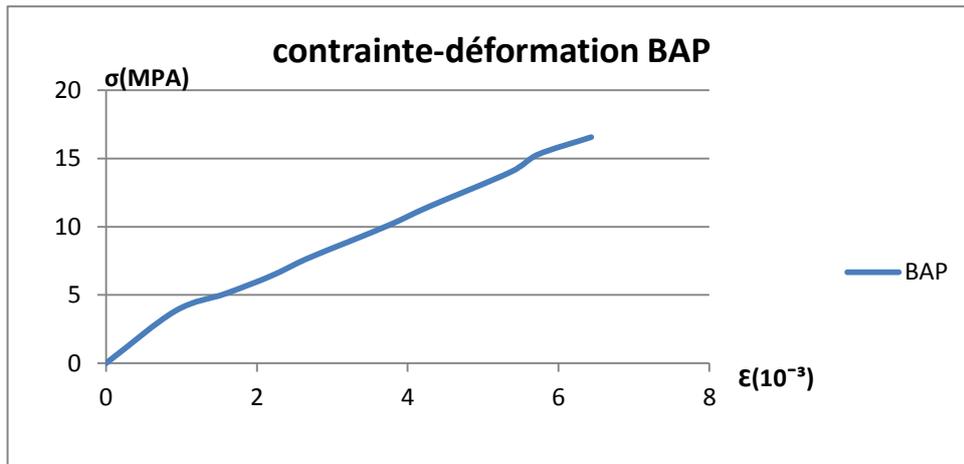


Figure (V.27) : Contrainte déformation de BAP.

Assemblage des deux courbes de BO et de BAP

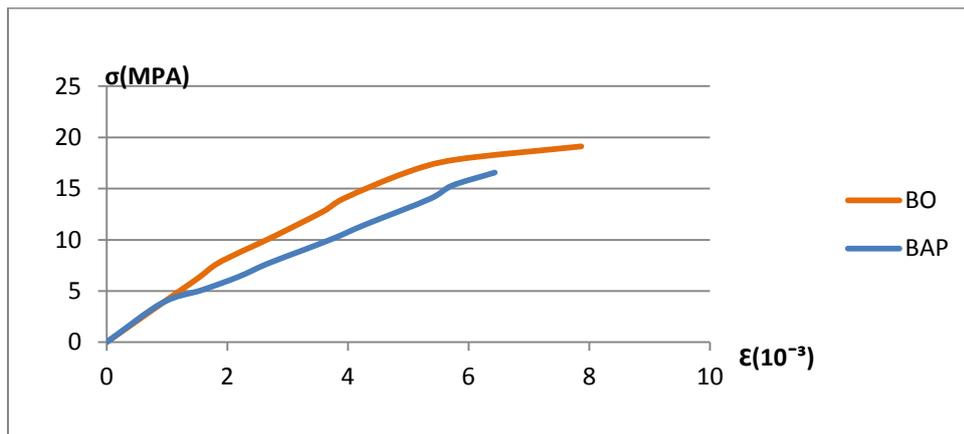


Figure (V.28) Contrainte déformation du BO et du BAP.

VI-1-Commentaire :

Entre le BO et le BAP on a :

- ✓ Le même module élastique.
- ✓ Une même phase d'élasticité
- ✓ Le BAP se caractérise par une résistance à une rupture plus élevée que celle de BO.
- ✓ La déformation de rupture est plus élevée pour le BO que le BAP.
- ✓ Le cheminement est différent

VI-2-Conclusion :

La résistance du BO est plus élevée que celle du BAP, cela est dû à l'existence des grands grains dans le BO.

VII- CONCLUSION :

A la fin de ce chapitre on peut conclure que les BAP sont caractérisés par une ouvrabilité plus élevée par rapport aux BO, par contre les BO sont caractérisés par une résistance presque identique à celle du BAP.

Conclusion

Conclusion
Générale

conclusion générale

Les bétons ordinaires présentent des difficultés à se mettre en place dans certaines zones (certains éléments de construction) fortement ferrillées (exemple : voile de bâtiment en zone de forte sismicité).

Devant cette difficulté, il est nécessaire de trouver d'autres types de béton avec lesquels nous pourrions construire ces éléments fortement ferrillés.

Les chercheurs ont trouvé la solution qui consiste à fabriquer des bétons très fluides qui s'appellent les BAP (bétons autoplacant).

Ces bétons autoplacants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car ils offrent de nombreux avantages d'un point de vue économique et technique. L'absence de vibration aide à la réduction des coûts de production, permet de fabriquer des éléments de géométrie complexes et fortement ferrillées, l'utilisation de BAP entraîne la réduction des nuisances sonores.

Ces BAP sont composés essentiellement, en plus de l'eau et de ciment, de squelettes granulométrique dont les granulats sont de dimensions maximales de 16 mm et composés d'une granulométrie étalée de 0 à 16mm avec une incorporation de fillers en grande proportion et des adjuvants.

Une application au laboratoire qui consiste à confectionner deux types de béton, l'un ordinaire et l'autre dit BAP a été réalisée.

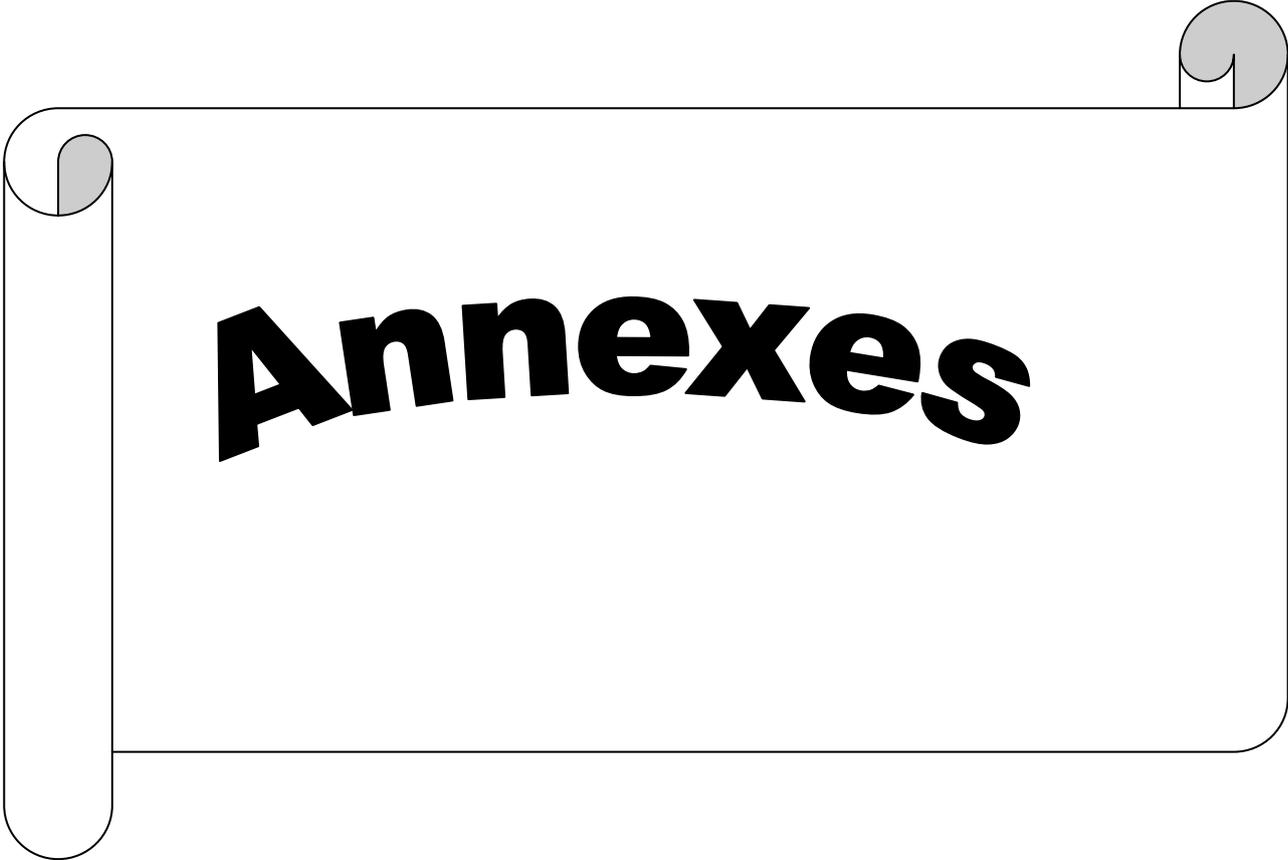
Le béton ordinaire est confectionné sur la base de la méthode de Dreux Gorisse, quant au BAP a été confectionné selon une formulation adéquate et originale telle que présentée au chapitre 4.

Les résultats obtenus au maniabilimètre montrent que les BAP sont plus fluides (comportement rhéologique à l'état frais).

Les résultats obtenus à la presse montrent que les BAP et les BO sont sensiblement d'égale résistance (comportement rhéologique à l'état durci).

L'objectif fixé au départ et donc atteint à savoir obtenir des BAP avec des matériaux locaux et des formulations originales (inédites).

On peut donc dire à la fin que : il est préférable de choisir et d'utiliser le BAP dans les domaines de construction surtout dans les zones fortement ferrillées.

A decorative scroll graphic with the word "Annexes" written on it. The scroll is white with a black outline and is partially unrolled, showing a grey interior. The word "Annexes" is written in a bold, black, sans-serif font, slightly curved to follow the shape of the scroll. The scroll is positioned in the center of the page, with its top edge slightly above the horizontal center and its bottom edge slightly below it. The scroll is oriented horizontally, with the unrolled part on the left and the rolled part on the right.

Annexes

1. Echantillonnage (NF P 18-557)

1.2. But et principe de l'échantillonnage :

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble des matériaux dans lequel on fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

En générale le prélèvement de l'échantillon se fait en deux étapes :

1. prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle utilisé pour l'essai.
2. au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire a l'essai et qui soit également représentatif de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de réduire, on procède à un prélèvement local.

1 .prélèvement sur tas normaux :

a) a la main a l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.

b) a la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient.

c) au moyen d'une sende, ouverture de 4~6 cm, longueur 60~100cm, extrémité taillé en sifflet.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et a l'intérieur du tas de granulats.

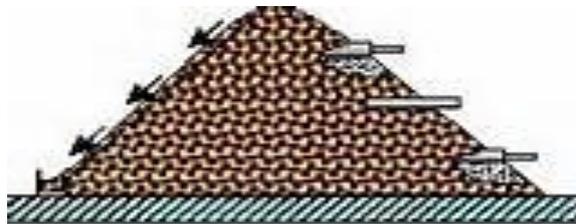


Fig. 3.1: le matériau en stock

Figure : le matériau en stock

2. prélèvement au laboratoire (échantillonnage en laboratoire) :

Le passage de l'échantillon totale prélevé sur le tas a l'échantillon réduit, nécessaire a l'essai peut ce faire par quartage ou a l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché a l'étuve a 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui rare, ou a 60°C dans le cas contraire.

-Quartage : il s'agit d'une méthode manuelle qui nous demande que peu de matériel, a l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moites de quelque centimètre, scinder ensuite les deux moitié par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de

sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identique, prélever l'ensemble les quarts 1 et 3 avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

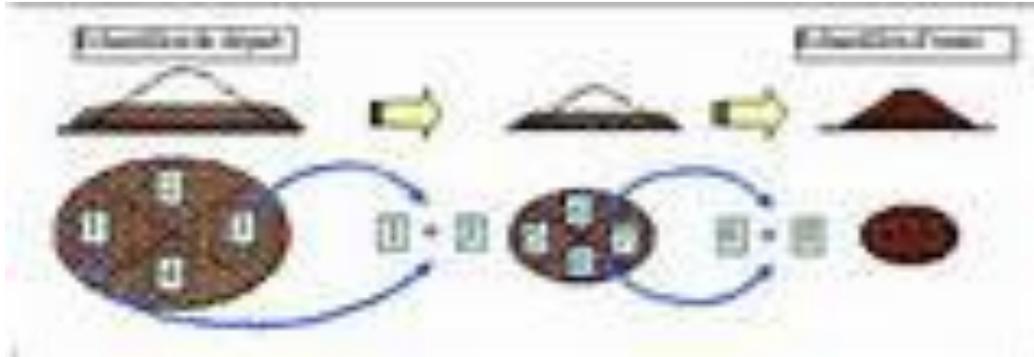


Figure : opération de quartage

-échantillonneur (quarter) :

Un échantillonneur ou diseur d'échantillons comme but de diviser une certaine quantité de matière meuble (exp : un gravier, un sable, ou tout mélange de fragments résultant d'un concassage) en deux portions de poids égaux. L'une des portions peut à son tour être passé dans le quarter (et ainsi de suite), jusqu'à l'obtention de la quantité réduite désirée, qui sera toujours représentative de l'échantillon de départ.



Figure : échantillonneur pour gravier

Aspect pratiques :

Les pièces typiques d'un système de quartage sont :

-le quarter lui-même, caractérise par un dispositif de rainures (fentes) parallèles de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon, la largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.

-trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bac 2 et 3).

Le procédé peut être résumé par la figure suivante, celle-ci permet de sélectionner une masse(m) à partir d'un prélèvement de masse 3m.

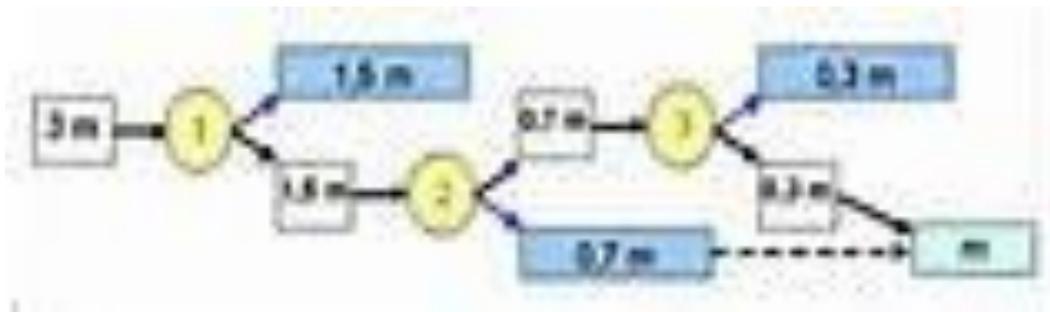


Figure : opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur

2. Analyse granulométrique :

2.1. But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux réceptifs de différentes familles de grains constituant. Elle s'applique à tous les granulats de dimension normale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

2.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont la dimension des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavée au dessus d'un tamis de 0.063 mm a fin d'éliminer les fines est éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduit sur la fraction refusés par le tamis de 0,063 mm jusqu'au tamis 125mm.

Tableau.1.1 : dimension minimales des tamis selon norme EN933-2.

Tamis (mm)	0	0,063	0.8	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0	0.63
Tamis (mm)	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
Tamis (mm)	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125		

2.3. Conduit de l'essai :

Le prise d'essai est séchée a (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante puis pesée (masse M1) on réalise ensuite le tamisage par lavage a fin de séparer les éléments de dimension inférieur a 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063mm soit clair.

L'échantillon ainsi préparé est alors séché a (110 ± 5) °C .après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (masse M2). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

- Dimensions des tamis utilisés :
En fonction des dimensions d/D des matériaux analysés, on utilisera la série des tamis préconisée par la norme EN 933-2 (tableu1.1).

- **Préparation de l'échantillon :**

La quantité a utilisé doit reprendre a déférentes impératives qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon doit représentatif ;
- il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soit as saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisé sera telle que : $M \geq 0,2 D$ avec :

M : masse de l'échantillon en Kg.

D : diamètre de plus grand granulats en mm.

- **Description de l'essai :**

Le matériau séché, de masse M2, est versée sur une série de tamis choisis de telles manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un faon étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire tout perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera tamisât le poids de matériaux passant a travers un tamis donnée et refus le poids de matériaux retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis est celle-ci vibrée a l'aide de la tamiseuse électrique, le temps de tamisage varie avec le type de la machine utilisé mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

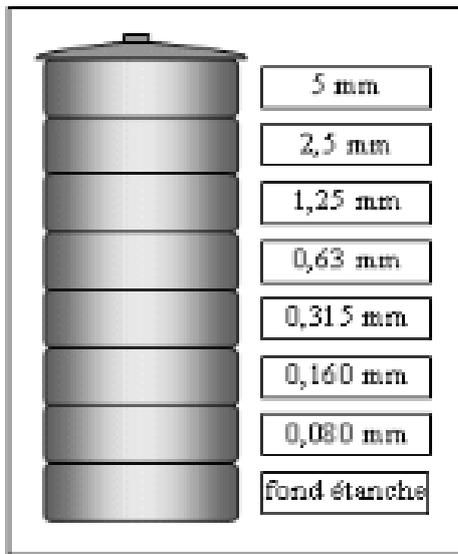


Figure : colonne de tamis

Résultats de caractérisation expérimentale des granulats :

Dans cette annexe sont présentés les résultats bruts de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

Analyse granulométrique :

Matériaux : sable 0/3				
Analyse granulométrique.				
Masse sèche totale			M=1500g	
Tamis en mm	Refus en (gr)	Refus (%)	Refus c (%)	Tamisât c (%)
5	0	0	0	100
2,5	9	0,6	0.6	99.4
1,25	350	23..33	23.93	76.06
0,63	440,5	29.36	53.3	46.7
0,135	410	27.33	80.63	19.366
0,16	221	14.73	95.36	4.63
fond	68	4.53	99.9	0.1

Masse sèche après tamisage : M=1498g

Matériaux : gravier 3/8				
Analyse granulométrique				
Masse sèche totale			M=1500g	
Tamis en mm	Refus en (gr)	Refus cumulé (gr)	Refus c (%)	Tamisât c (%)
8	0	0	0	100
6.3	517.5	517.5	39.21	60.79
5	411.5	929	70.40	29.6
4	240.5	1169.5	88.63	11.37
3.15	116.5	1286	97.46	2.54
2.5	30	1316	99.73	0.27
fond	3.5	1319.5	100	0

Masse sèche après tamisage : M=1319.5g

Matériaux : sable 8/16				
Analyse granulométrique				
Masse sèche totale			M=1500	
Tamis en mm	Refus en (gr)	Refus cumulé (gr)	Refus c (%)	Tamisât c (%)
16	0	0	0	100
12.5	608.00	608.00	40.73	59.27
10	516.00	1124	75.30	24.7
8	251.50	1375.5	92.16	7.84
6.3	104.00	1479.5	99.12	0.88
5	10.50	1490	99.83	0.17
fond	2.50	1492.5	100	0

Masse sèche après tamisage : M=1492.5g

Matériaux : sable 16/25				
Analyse granulométrique				
Masse sèche totale			M=3000g	
Tamis en mm	Refus en (gr)	Refus cumulé (gr)	Refus c (%)	Tamisât c (%)
31.5	0	0	0	100
25	13	13	0.43	99.57
20	358	371	11.39	8.61
16	1587.5	1958.5	65.45	34.55
12.5	1000	2958.1	98.88	1.12
fond	33.5	2992	100	0

Masse sèche après tamisage : M=2992g

La masse volumique absolue :

Définition : c'est le rapport entre la mass et le volume absolu.

$$\rho \text{ abs} = M/V \text{ abs}$$

On choisi un volume d'eau : $V_1=400l$, on le met dans un piston, on ajoute une masse M de 300g de granulats, puis on mesure le volume totale. Après l'ajout des granulats dans l'eau on aura V_2 .

$$\left. \begin{array}{l} V_1=400l \\ M=300g \\ V_2=? \end{array} \right\} \rho = \frac{M}{V_2-V_1}$$

Exemple :

sable0/3 :

$$\rho = \frac{300}{500-400} = 3 \quad \rho = 3g/cm^2$$

- gravier 3/8 :

$$\rho = \frac{300}{510-400} = 2.72 \quad \rho = 2.72g/cm^2$$

(On suit les mêmes étapes pour tous les graviers, 8/16,16/25)

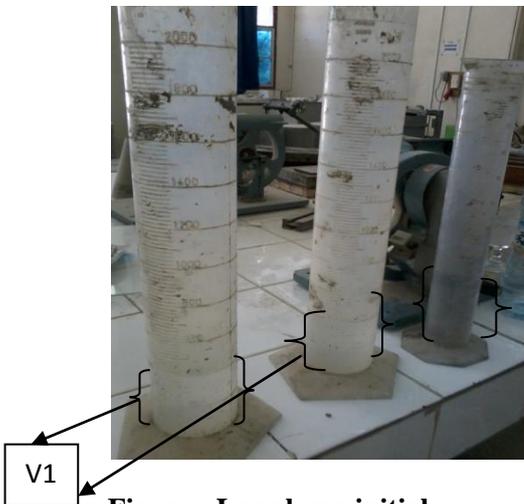


Figure : Le volume initial

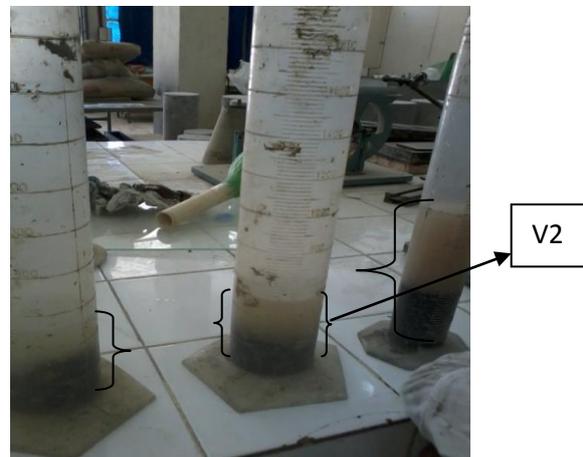


Figure : Le volume total après l'ajout des granulats

La masse volumique apparente :

Définition : c'est le rapport entre la mass et le volume apparent

$$\rho \text{ app} = M/V \text{ app} \left\{ \begin{array}{l} M : \text{c'est la masse de type de granulat} \\ V_{\text{app}} : \text{le volume de la boîte cylindrique.} \end{array} \right.$$



Figure : Méthode de mesure de la masse apparente

Mode opératoire des essais concernant les BAP à l'état frais

« Maniabilimètre »

1) Caractéristique de maniabilimètre :

- Volume de béton : environ 30 litres.
- Alimentation: 230 V - 50 Hz - mono.
- Puissance: 300 W.
- Poids : 80 kg.

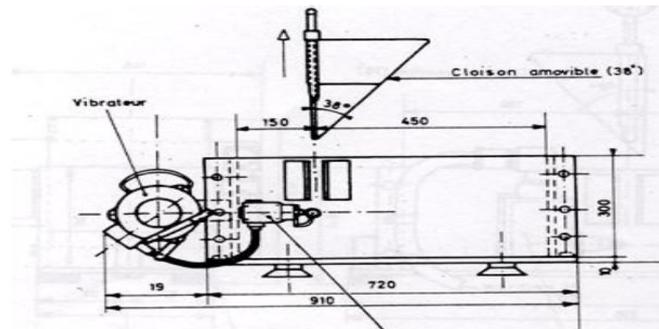


Figure : Maniabilimètre disponible dans notre laboratoire et le schéma de Maniabilimètre.

2) Définition et bute de l'essai :

A travers le Maniabilimètre, la maniabilité des bétons, définit comme le temps d'écoulement dans un couloir vibrant sous l'action d'une vibration donnée, est une caractéristique importante du matériau.

Cette mesure permet d'une part d'apprécier la facilité de mise en place dans les ouvrages et, de ce fait de déterminer les quantités d'eau nécessaire, et d'autre part d'affiner les compositions des bétons en recherchant la maniabilité maximale pour des teneurs en eau et ciment. En plus, elle nous donne la possibilité d'évaluer l'efficacité de certains adjuvants, plastifiants réducteurs d'eau en particulier.

Beaucoup plus sensible aux variations de dosages des constituants solides que la mesure de l'affaissement au cône, la mesure de la maniabilité s'applique aussi bien aux mortiers qu'aux bétons contenant des éléments pouvant atteindre 50 mm.

3) principe de la méthode :

On mesure le temps d'écoulement d'un béton (autoplaçant et ordinaire). Entre deux étapes bien définies d'un processus de mise en oeuvre, cette mise en oeuvre consiste en une succession d'opérations élémentaires de trois sortes : malaxage, transport et mise en place.

Si l'essai proprement dit est la mesure d'un temps d'écoulement dans les conditions données, il est cependant nécessaire de préciser l'ensemble des opérations qui précèdent cette mesure.

Le passage d'une étape du processus de mise en oeuvre à l'autre s'effectue dans le maniabilimètre .

La première étape se termine à la fin de la mise en place du béton dans l'appareil, la seconde lorsque, après écoulé sous l'action d'une vibration de caractéristiques fixes, le béton atteint un repère géométrique.

✓ Description de l'appareil :

Moule :

Il repose sur le sol par quatre amortisseurs en caoutchouc. Trois repères horizontaux sont gravés sur la face interne d'une des plaques d'extrémités.



Figure : Traits repères de maniabilimètre

Cloison amovible :

Elle sépare le moule en deux parties ; elle coulisse verticalement dans les glissières fixées sur la face externe des plaques latérales du moule.



Figure : Cloison amovible du maniabilimètre

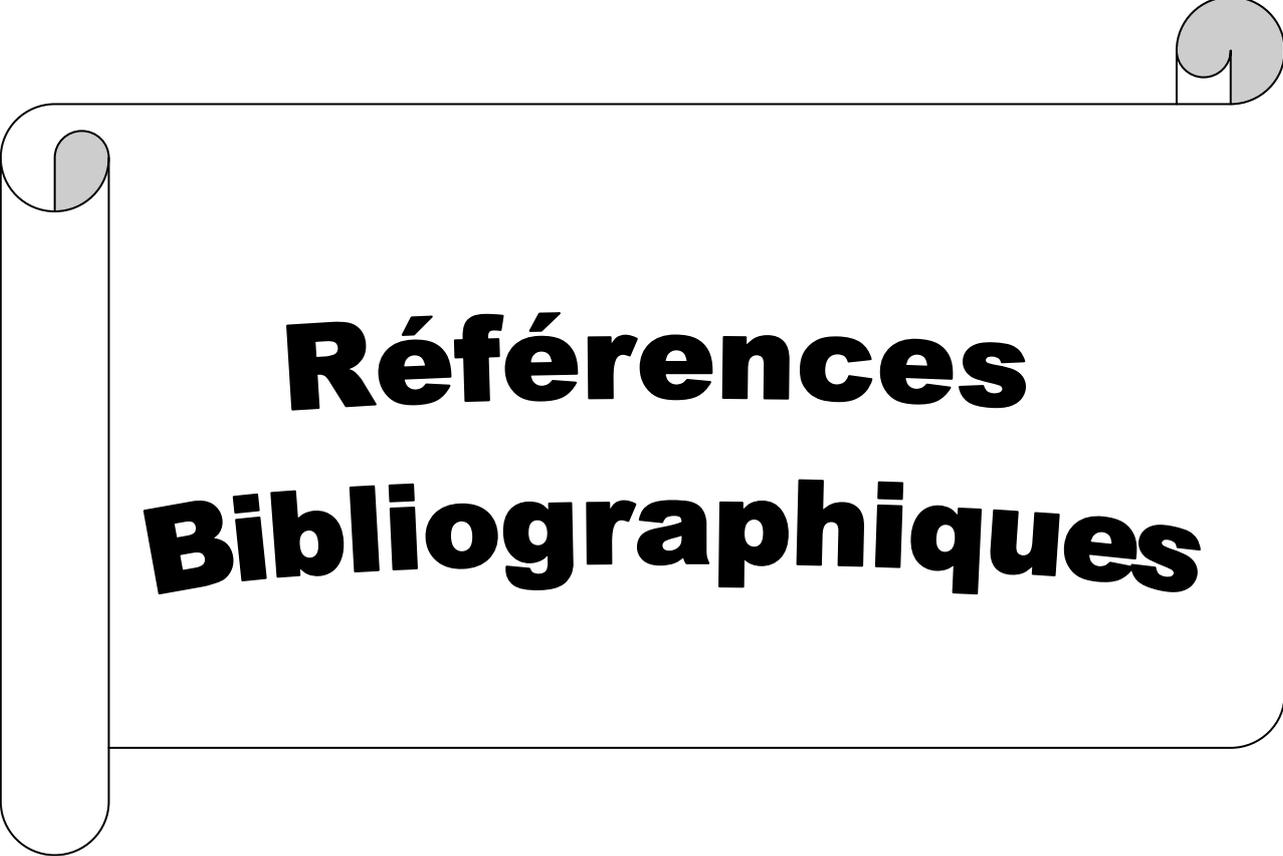
Figure : Une cloison latérale étant en levée de moule, la position de cloison latérale est tracée en pointillé

Vibrateur :

Il est fixé par une broche sur la face extérieure de la plaque d'extrémité gravée.



Figure : Vibrateur de maniabilimètre

A decorative graphic of a scroll with a white body and a grey shadow, positioned horizontally across the upper middle of the page. The scroll is unrolled, with its ends curling upwards. The text is centered on the white surface of the scroll.

Références Bibliographiques

- [1] Ovarlez et roussel , Aphysical model fo the prediction of lateral stress exeryed by self-compacting concrete on formwork , materials and structures 2nd international RILEM Symposium on Advances in concrete through science and enginnering 2006
- [2] Association francaise de genie civil (AFGC) , béton autoplaçants recommandations provisoires, juilllet 2002,63pages.
- [3] Projet national BAP, aide a la rédaction de cahier des charges techniques pour les bétons auroplaçantes (BAP) ,Mars 2005.
- [4] Tucry, « retrait et fissuration des bétons BAP-influence de la formulation », thèse de doctorat de l'école centrale de Nates, 2004,213pages.
- [5] Walraven, structurel aspect of self-compacting concrete, proceedings of third international RILEM conference on SCC, Aout 2003, Reykjavik, islande,pp15-22.
- [6] Federation francaise de béton (FFB), recommandation de mise en ouvres des BAP et des BAN, SEBTP, Edition 2003
- [7] Ferraris C.F, Karthik O.H, and Hill R (2001) “the influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete” Cement and Concrete Research, 31 (2), pp.245-255.
- [8] Benakli Sarah « caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajouts des déches de construction » mémoire de magister, UMMTO, page17
- [9] Benakli Sarah « caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajouts des déches de construction » mémoire de magister, UMMTO, page18.
- [10] Ovarlez et roussel , Aphysical model fo the prediction of lateral stress exeryed by self-compacting concrete on formwork , materials and structures 2nd international RILEM Symposium on Advances in concrete through science and enginnering 2006.
- [11] Boukni Bariza “, tenu en feu des betons autoplaçant”,these de magister, Universite mentouri constantine,2007,page80.
- [12] Billberg P,” Fine mortar rheology in mix design of SCC”, *Proccedings of the first international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM, Cachan cedex, 1999, pp. 47-58
- [13] Ghezal.A, Khayat.KH.,”Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods”,*ACI Mater*,J.99(3) pp. 264-272

[14]: Bui VK, Montgomery.D, Hinczak.I, Turner.K,” Dryingshrinkage of self compacting concrete containing milled limestone”, Proceedings of the first international RILEM Symposium o Self-Compacting Concrete, RILEM, Cachan cedex, 1999, pp. 227-238

[15]: Cours structuration et hydratation des ciments post-graduation 2006 M BEHIM université d’Annaba.

[17]: EL Hilali A., 2009 : "Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales". These de doctorate, l’université Cergy Pontoise, France.

[18] Esping O., 2008: Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.38, page 938- 944.

[19]: El Barrak M., 2005 : "Contribution à l’étude de l’aptitude a l’écoulement des bétons autoplaçants à l’état frais". These de doctorate, l’université Toulouse III –Paul Sabatier, France.

[20]: Benachour Y., Davy C.A., Skoczylas F., Houari H., 2008: Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, Cement and Concrete Research, vol.38, page 727–736.

[21]: Felekoglu B., 2007: Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources Conservation & Recycling, vol.51, page 770–791.

[22]: Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005: Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio , Cement and Concrete Research, vol. 35, page 532– 539.

[23]: Taleb O., 2009 : Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l’université de Tlemcen, Algérie

[24]: Bensebti S.E., 2008 : "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux". These de doctorates, Université Mentouri-Constantine, Algérie.

[25]: Zhu W. & Gibbs J.C., 2005: Use of different limestone and chalk powders in selfcompacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.35, page 1457-1462.

[26]: Nanthagopalan P., Haist M., Santhanam M., Müller H.S., 2008: Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions ,Cement and Concrete Composites, vol.30, page 763–768

[27]: Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., 2003: Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, proceeding of the 3rd

- [28] : Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., 2001: Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and concrete research, vol.31, page 245-255
- [29] : de Larrard F., 1999 : Structures granulaires et formulation des bétons – Ouvrage original : «Concrete Mixture Proportioning– A scientific Approach» , Modern Concrete Technology Series N° 9, Londres, Traduit par : André Lecomte, p 414.
- [30] Haddad Kahina, ‘les BAP a base de granulats de béton de démolition, résistance et approche de la durabilité »UMMTO, 2001, page51 52.
- [31] : Rols S, Ambroise j. Péraj. « Effect of deffrente viscosity agents on the properties of self-levling concrete”, cements and concrete Research, 29, 2, p.261-266, 1999.
- [32] : Arbelaez Jaramillo C A, Riguera Victor J.W Mati Vargas J.R, Serna Ros P, Pinto Barbosa M, “Reduced models test for the characterization of the rhéologie properties of self compating concrete (SCC) , Proceedings of the Third Internation al Symposium on Self-compating-concrete, Reykjavik, Islande, pp 240-250,2003
- [33] : Bartos P.J.M, Assessment of properties of underwater concrete by the Orimet test, Proceedings of the international RILLEM xorkshop on special concretes Workability and Mixing, Paisley, Ecosse,pp.1191-200,1993.
- [34] : Hayakawa M., Matsuoka Y, Shindoh T. ‘devloperment and application of super-workable concrete” , proceedings of the international RILEM W orkshop on special concretes: Workability and Mixing , Paisley, Ecosse, pp.183-190.1993
- [35] George Dreux et jean fista, « Nouveau guide de béton et de ces constituants », édition Eyrolles 2002.
- [36] : Ozawa K, Maekawa K, Okamura. (1990) : the higt performance concrete with high filling capacity. Proceeding of the international symposium on admixture of concrete, RILEM Barcelone, P. 51-61.
- [37] Otsuki N , Hisada M, Nagataki S, Kamada T, “An exprimntale study on fluidity of antiwashout underwater concrete” , ACI Materials Journal, 93, 1,20-25,1996.
- [38] : Van B.K, Montgomery D.G , Hinczak I , Turner K , “Rapid testing methods for segregation resistance and filling ability of self-copacting concrete”, proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI I nternational Symposium: Advances in Concrete technology, Tokushima, japon, pp. 85-104,1998.
- [39]: Ambroise J, Rols S Péra J “Sealf-levling concrete- Design and properties”, concrete Science and Engineering, 1 pp.140-147,septembre 1999.

- [40]: Abib zinnedine, ‘formulation et caractérisation des bétons autoplaçants ‘ thèse magister USTHB, ALGER, 2004
- [41] : haddad kahina « les BAP a la base des granulats de béton de démolition, résistance et approche de la durabilité ‘ thèse master, UMMTO, TO, 2011.
- [42] : CIM béton, le béton » les techniques de mise en place du béton évoluent » CSTB magazine, N°109 Novembre 1997.
- [43] : Assié S ; « Durabilité des BAP » thèse de doctorat de l’INSA de Toulouse, 2004.
- [44] : Proust E, « retrait et fluage des BAP : vers une meilleurs compression des comportements différés, Thèse de doctorat de l’INSA de Toulouse ,2002.
- [45] : Meftah kahina « caractérisation expérimentale des BAP en compression » thèse de master, UMMTO, GC, 2011, page 40.
- [46] : Meftah Kahina « caractérisation expérimentale des BAP » thèse master UMMTO, GC 2011/2012, page42
- [47] : influence des fillers sur l’ouvrabilité des BAP », thèse master, boumerdes, 2011.
- [48] George Dreux et Jean Festa, Nouveau guide de béton et ces constituants » ; edition Eyrolles 2002, page241.
- [49] : E.C. Bingham, (1916) *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 13, 309-353 "An Investigation of the Laws of Plastic Flow"
- [50] Boukni Bariza “, tenu en feu des betons autoplaçant”, these de magister, Université mentouri Constantine, 2007, page82.
- [51] George Dreux et Jean Festa, Nouveau guide de béton et ces constituants » ; edition Eyrolles 2002.
- [52] Le maniabilimètre LCL (laboratoire central-lesage) est breveté : brevet le 27 mai 1968 sous le N°1.531.527