

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie de la construction

Département de Génie Civil

Mémoire de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et Matériaux

THEME

***Caractérisation expérimentale en traction directe des Bétons
Autoplaçants***

- Influence des ajouts de déchets de brique, de poudre de marbre et de tuf

Réalisé par :

Mlle Belhadj Naima

Proposé et dirigé par :

Pr. Y. Bouafia

Année universitaire : 2011 / 2012

Remerciements

Je remercie Monsieur Y. BOUAFIA, mon promoteur, pour l'aide qu'il a apporté à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils.

Je remercie très vivement Mr S.DJEBALI, pour son aide et les moyens qu'il a mis à notre disposition pour pouvoir réaliser ce travail.

Mes remerciements vont également aux responsables et Personnels du Laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures, Université Mouloud MAMMERI, en Génie Civil de TIZI OUZOU, en particulier à Monsieur BOUHERRAOUA. Rachid, pour sa précieuse aide dans la réalisation de la partie expérimentale et ainsi à Monsieur MAMMOU Mohand.

Mes remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.

Je tiens aussi à remercier ma famille surtout à mes très chers Parents et à tous mes ami(e)s, et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce Projet de Fin d'études.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I : Généralités sur le béton

I-1 Introduction.....	4
I-2 Définition.....	4
I-3 Composants d'un béton	5
I-3-1 Le ciment	5
I-3-2 Les granulats (sables, gravillons).....	8
I-3-3 L'eau.....	9
I-3-4 Les adjuvants.....	9
I-3-5 Les additions minérales.....	10
I-4 Les déchets de construction.....	11
I-5 Composition des bétons.....	12
I-5-1 Critères en fonction de la destination des bétons	12
I-5-1-1 Dimension maximale D des granulats	13
I-5-1-2 Résistances souhaitées	14
I-5-1-3 Ouvrabilité.....	15
I-5-1-4 Agressivité du milieu ambiant.....	15
I-5-2 Formulation des bétons.....	16

II : Les bétons autoplaçants

II-1 Introduction.....	19
II-2 Définition du béton autoplaçant.....	19
II-3 Domaine d'utilisation des BAP.....	20
II-4: Les critères de composition des BAP	21
II-4-1 Un volume de pâte élevé	22

II-4-2 Une quantité de fines (<80 µm) élevée	22
II-4-3 L'utilisation des superplastifiants	22
II-4-4 L'utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau	24
II-5 Constituants d'un BAP	24
II-5-1 Les liants et les granulats	24
• Le ciment	24
• Les ajouts minéraux	25
• Les granulats.....	25
II-5-2 Les adjuvants.....	25
II-6 Caractérisation d'un béton autoplaçant.....	26
II-6-1 Propriétés des BAP à l'état frais.....	26
II-6-1-1 Le remplissage	27
II-6-1-2 La résistance à la ségrégation.....	27
II-6-1-3 La capacité de passage.....	28
II-6-2 Caractérisation des BAP	29
II-6-2-1 Essais de la fluidité	30
II-6-2-2 Essais de ségrégation dynamique	31
II-6-2-3 Essais de ségrégation statique.....	32
II-6-2-4 Ressuage.....	33
II-7 Les approches de formulation	34
II-7-1 Méthode de formulation pratique des BAP.....	34
II-7-2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie	34
II-8 Propriétés des BAP à l'état durci	38
II-8-1 Propriétés mécanique	38
II-8-2 Propriétés physico-chimiques.....	40
II-9 : Fabrication, transport et mise en place des BAP.....	41
II-9-1 Fabrication des BAP	41
II-9-2 Transport des BAP	41
II-9-3 Mise en place des BAP.....	42

III- Quelques modèles de comportement du béton

III-1 Introduction	43
III-2 Comportement du béton en traction uni axiale	44
III-3 La résistance à la traction du béton.....	45
III-4 Les causes de la fissuration	45
III-5 Quelques modèles de comportement.....	46
III-5-1 Comportement local du béton en traction (Béton seul).....	46
III-5-2 Lois de Comportement uni axiales fictives du béton tendu.....	50
IV- Conclusion.....	55

PARTIE2 : ETUDE EXPERIMENTALE

I : Matériaux et formulation

I-1 Introduction	57
I-2 Matériaux à utilisés	57
I-2-1 Ciment	57
I-2-2 Granulats	58
I-2-3 l'eau de gâchage	58
I-2-4 Adjuvant (Superplastifiant)	58
I-2-5 Ajout minérale	59
I-3 Caractérisation des matériaux	62
I-3-1 Essais sur granulats.....	62
• Echantillonnage (NF P 18-553)	62
• Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)	62
• Masse volumique apparente et absolue.....	63

• Coefficient d'absorption (NF P18-554)	63
• Module de finesse du sable (NF P18-304)	64
• Equivalent de sable (NF P18-598).....	64
I-3-2 Essais sur le ciment.....	65
• Essai de consistance EN (196-3).....	65
• Temps de prise à 20 °C.....	65
I-4 Elaboration des bétons :.....	66
I-4-1 formulation de béton ordinaire	66
I-4-2 Formulation des bétons autoplaçants.....	72

II : Expérimentation et Exploitation

II-1 Introduction	77
II-2 Confection des bétons	79
II-2 -1 Préparation de la gâchée	79
II-2 -2 Conservation des éprouvettes	81
II-3 Essais expérimentaux	81
II-3-1 Essais sur béton frais	81
II-3-2 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et discussions....	83
II-3-3 Essais sur béton durci.....	87
II-3-4 Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci et discussions....	91
III-Conclusion.....	100
Conclusion générale.....	102
Annexes.....	104
Références bibliographiques.....	132

Liste des tableaux

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I : Généralités sur les bétons

Tableau I-1	Ordre de grandeur en proportions.....	5
Tableau I-2	Classification des ciments selon leurs résistances.....	7
Tableau I.3	Dimension admissible D pour les plus gros granulats.....	13
Tableau I-4	Enrobage minimal c des armatures.....	14
Tableau I.5	Consistance du béton.....	15

II- Les bétons autoplaçants

Tableau II-1	Propriétés d'ouvrabilité des BAP.....	29
--------------	---------------------------------------	----

PARTIE2 : ETUDE EXPERIMENTALE

I : Matériaux et formulation

Tableau I-1	: Composition minéralogique du ciment.....	58
Tableau I-2	: Quelques caractéristiques de MEDAPLAST 40.....	59
Tableau I-3	: Composition chimique du déchet de brique broyé	60
Tableau I-4	: Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé.....	60
Tableau I-5	: Quelques caractéristiques de déchet de marbre.....	61
Tableau I-6	: Quelques caractéristiques de Tuf.....	61
Tableau I-7	: Masse volumique apparente et absolue des granulats.....	63
Tableau I-8:	Résultats de l'absorption	64

Tableau I.9: module de finesse du sable.....	64
Tableau I.10: valeur de l'équivalent de sable.....	65
Tableau I-11 : Le début et la fin de prise.....	66
Tableau I-12 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	67
Tableau I-13 : Composition volumique et pondéral du béton vibré	72
Tableau I-14 :Composition du BAP avec ajout de la poudre de marbre.....	74
Tableau I-16 Composition du béton autoplacant avec ajout de Tuf.....	75
Tableau I-15 Composition du BAP avec ajout de déchet de brique.....	76
Tableau I-17 Composition des différents bétons pour 1 m ³	76

II : Expérimentation et Exploitation

Tableau II- 1 : Résultats des propriétés à l'état frais pour les BAP.....	84
Tableau II- 2 : Résultats des propriétés à l'état frais pour le béton vibré.....	84
Tableau II- 3 : Valeurs des résistances pour l'essai de traction.....	93

Liste des figures

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I : Généralités sur les bétons

Figure I-1: Composition d'un béton4

II : Les bétons autoplaçants

Figure II-1 : dispersion des granulats par excès de pâte.....22

Figure II-2: Mode d'action des super-plastifiants.....23

Figure II-3:Étalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant....23

Figure II-4 composition s'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP).....26

Figure II-5 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux
armatures28

Figure II-6 : essai d'étalement.....30

Figure II-7: boîte en L.....32

Figure II-8 : Essai de la stabilité au tamis.....33

Figure II-9 : Essai de ressuage à l'aéromètre33

III- Quelques modèles de comportement du béton

Figure III-1 : courbe contrainte-déformation du béton en traction.....44

Figure III-2 : Courbes expérimentales du béton en traction selon
PETERSON.....47

Figure III-3 : Courbe de traction d'éprouvettes en béton selon HUGHES et
CHAPMAN.....47

Figure III-4 : Comportement local du béton en traction selon MAZARS	48
Figure III-5 : Relation de ZHEN-HAI et XIU-QIN.....	49
Figure III-6 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d'après SCANLON.....	51
Figure III-7 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d'après GILBERT et WARNER	51
Figure III-8 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d'après LIN ...	52
Figure III-9 : Comportement de béton avant fissuration.....	52
Figure III-10 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat.....	54

PARTIE2 : ETUDE EXPERIMENTALE

I : Matériaux et formulation

Figure I-1 : Le Super plastifiant MEDAPLAST 40 utilisé.....	59
Figure I-2 : Déchets de brique récupérés puis broyé.....	59
Figure I-3 : La poudre de marbre utilisé.....	60
Figure I-4 : Le tuf utilisé.....	61
Figure I-5 : Courbes granulaires des trois granulats.....	63
Figure I-6 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.....	68
Figure I-7 : Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage.....	70

II : Expérimentation et résultats

Figure II-1 : Malaxeur utilisé.....	79
Figure II-2: Moules graissés à l'aide d'une huile, remplissage des moules, apparence des éprouvettes après le décoffrage.....	81
Figure II-3 : étalement d'un BAP.....	82
Figure II.4: boîte en L.....	82
Figure II.5 : essai de stabilité au tamis.....	83
Figure II.6 : Presse hydraulique Ibertest pilotée par un micro-ordinateur ...	88
Figure II.7 : Dispositif d'ancrage.....	88
Figure II.8 : essai de traction.....	88
Figure II.9 Forme et dimensions de l'éprouvette de traction directe.....	89
Figure II.10 : Courbe contrainte –déformation pour le béton témoin.....	91
Figure II.11 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP1.....	91
Figure II.12 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP2.....	92
Figure II.13 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP3.....	92
Figure II.14 : Essai de traction par flexion.....	95
Figure II.15 : Essai de traction par fendage.....	96
Figure II- 16 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 1.....	96
Figure II- 17 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 2.....	97
Figure II- 18 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 3.....	97
Figure III- 19 : Résistances à la traction directe du BAP1, 2,3	98



Introduction

Générale

Introduction générale

Suite au développement des ciments et bétons à la fin du 19^e siècle, il y a eu une révolution fondamentale dans « l'art de construire ». Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Les recherches continues ont permis de mettre au point plusieurs types de bétons selon les domaines d'utilisation et les objectifs souhaités : les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Le béton autoplaçant (BAP), « *self compacting concrete (SCC) en anglais* », constitue une nouvelle génération de béton. Il se distingue par sa fluidité, sa déformabilité et sa facilité de mise en place sans vibration. Il trouve tout son intérêt de coulage et de mise en œuvre dans des structures à géométrie complexe et en particulier, dans les éléments de structures peu épais ou fortement ferrailés (plaques, coques, nœuds poteaux – poutres,...). En évitant « les nids de poules » ou les vides souvent détectés après décoffrage (trop tard), ce matériau offre plusieurs avantages : meilleur parement - environnemental (surface pouvant être laissée brute), économie dans la réalisation (moins de main d'œuvre).

Le béton est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences : propriétés homogènes (sans ségrégation), formulation adaptée par ajout en proportions bien précises d'au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les exigences de maniabilité et de stabilité.

Les différents avantages qu'offre ce matériau peuvent être résumés ci-après :

Avantages techniques :

- facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton ;

- bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- réalisation d'éléments de forme complexe.

Avantages économiques :

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

Avantages écologiques :

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

Toutefois, il est à signaler une augmentation du coût des matières premières suite à l'incorporation d'adjuvants et différentes additions minérales. Certaines précautions sont aussi à prendre lors de la réalisation :

- Compatibilité des matériaux ;
- Etanchéité des coffrages.

L'objectif de ce travail, est d'aboutir à une méthode de formulation d'un béton autoplaçant et de comparer les performances, en termes de résistance mécanique, par rapport à un béton ordinaire. L'influence des ajouts minéraux et en particuliers ; la poudre de marbre, le tuf et les déchets de brique broyés, sur le comportement à l'état frais et à l'état durci est mise en évidence.

Après une introduction générale, le mémoire est organisé en deux parties. Une conclusion générale comprenant aussi des perspectives est proposée.

La première partie est un rappel des définitions fondamentales sur les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants (BAP). Nous nous sommes intéressés aux méthodes de formulation, aux composants utilisés et aux propriétés recherchées.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude. La méthode de formulation ainsi que les compositions retenues pour le béton ordinaire et le BAP sont données.

Puis, nous avons décrit les différentes étapes de confection des éprouvettes, les essais effectués et nous avons présenté les résultats et leurs interprétations. Une comparaison des résultats par rapport au béton ordinaire et entre les différents BAP est effectuée.



Partie 1 :
Etude bibliographiques

I- Généralités sur le béton

I-1 Introduction :

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiment, ouvrages d'arts, monuments et parfois dans les éléments de décoration... Il est très utilisé dans la préfabrication d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers...

I-2 Définition :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [1] (voir tableau I-1). Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- d'une pâte pure (ciment+eau),
- d'un mélange granulaire,
- de produits additionnels (adjuvants, 1. additions minérales).

On désigne habituellement sous le nom :

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

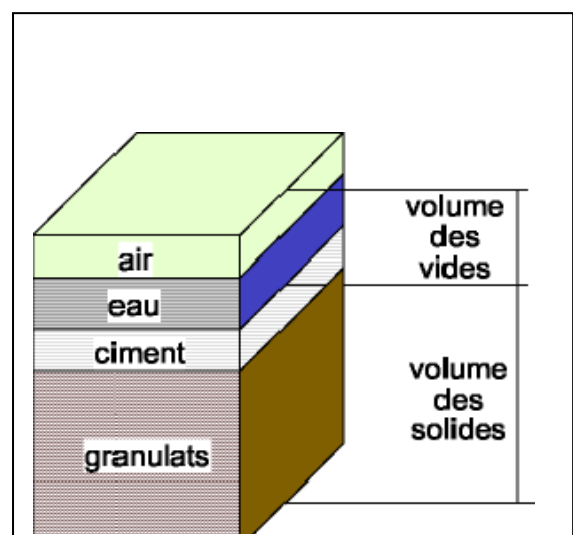


Figure I-1: Composition d'un béton

	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume	14%- 22%	1%- 6%	7%- 14%	60%- 75%
Poids	5%- 9%	9%- 18%	63%- 85%

Tableau I-1: Ordre de grandeur en proportions

I-3 Composants d'un béton :

I-3-1 Le ciment [2]:

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

I-3-1-1 Constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle.....

Dans le but de modifier certaines de leur propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement.

- **Clinker portland (K) :**

C'est un produit obtenu par cuisson 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 de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne, ...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de gypse jouant le rôle de régulateur, donne les ciments « Portland ». Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- le silicate tricalcique : $SiO_2, 3CaO$ (ou C_3S),
- le silicate bicalcique : $SiO_2, 2CaO$ (ou C_2S),
- l'aluminate tricalcique : $Al_2O_3, 3CaO$ (ou C_3A),
- l'aluminate-ferrite tétracalcique : $Al_2O_3, 4CaO$ (ou C_4AF).

- **Laitier de haut fourneau (S) :**

Le laitier, sous produit de fabrication de la fonte (brusquement refroidi par aspersion d'eau), 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.

- **Cendres volantes (V et W) :**

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être :

- siliceuses (V), constituées de silice réactive (40 à 55 %) et d'alumine (20 à 30 %),
- ou calciques (W) avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %.

- **Pouzzolanes naturelles (Z) :**

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

I-3-1-2 Constituants secondaires :

Ils peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$, (exception faite du clinker) ;

- Soit des fillers (F), leur nature exacte 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 hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment ; ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

I-3-1- 3 Classification des ciments :

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression ; exprimées en MPa à 28 jours.

La norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes (tableau I-2) :

Classe des ciments	Résistance à 2 jours(MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Tableau I-2: classification des ciments selon leurs résistances

Les classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que le bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication ...

I-3-1-4 Principales catégories de ciments:

La norme P 15. 301 [3] distingue 4 catégories ; à savoir :

- le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97 % de clinker, le reste est du filler ;
- le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65 % de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des autres constituants définis précédemment ;
- Le ciment de haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 et 75 % de laitier, le reste des constituants est du clinker ou un filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants ;
- Le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80 % de laitier, le reste est du clinker ou un filler dans la limite de 3% également.

I-3-2 Les granulats (sables, gravillons) :

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

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [4].

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70 % de volume). De plus en raison de leur porosité ouverte,

ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). 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 de plusieurs manières :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte liante ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal des granulats ;

I-3-3 L'eau:

L'eau est un constituant nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. La qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, les eaux ne doivent pas contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. Il convient donc d'y apporter une grande attention surtout lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage.

I-3-4 Les adjuvants:

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton. Les principaux adjuvants [5], [6] sont :

- **Les fluidifiants (ou réducteur d'eau) :** Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C (Eau/Ciment) constant (fixé pour une résistance souhaitée). Ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [7]. Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même

classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant. Dans le cas des bétons auto-plaçants, on utilise des superplastifiants qui sont des fluidifiants très puissants.

- **Les retardateurs de prise du ciment** : dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.
- **Les accélérateurs de prise du ciment**: pour le bétonnage en temps froid, il est conseillé d'utiliser les accélérateurs de prise pour, dans ce cas, provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement du béton freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés.
- **Les entraîneurs d'air** : ils permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies.

I-3-5 Les additions minérales :

Il existe deux catégories de fines minérales :

- Les fines actives à caractère pouzzolanique ; ce sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment,

améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier...) [8], [9].

- Les fines inertes comme les fillers calcaires ; l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessite une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I-4 Les déchets :

Un déchet est, selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code de l'environnement Français : *“tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon”*.

Selon les critères liés à : la nature, l'origine, le type de collecte, la composition, la consistance, l'hétérogénéité, etc..., on considère 3 grandes catégories de déchets :

- Déchets dangereux : ils sont potentiellement le plus polluant pour l'environnement et créant le plus de dangers pour la santé humaine. Ce déchet nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement.
- Déchets non dangereux : Ce sont les déchets industriels ordinaires qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères.

- Déchets inertes : Ils sont souvent solides (minéraux) ne subissant aucune transformation physique ou chimique importante : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, carrelage. Ils ne sont pas biodégradables et n'affectent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent des chantiers de construction, mais aussi des mines et des carrières.

Les principaux objectifs d'utilisation des déchets sont :

- Réduire la production des déchets ;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique.

I-5 Composition des bétons:

L'étude d'une composition de béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [10].

Il existe de nombreuses méthodes dont on retiendra **2 archétypes** :

- Celle qui consiste à obtenir une granularité « continue »,
- Celle qui consiste à obtenir une granularité « discontinue ».

I-5-1 Critères en fonction de la destination des bétons :

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

que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné. Quatre critères principaux doivent être retenus [10] :

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

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans la méthode de Dreux et Gorisse [10].

I-5-1-1 Dimension maximale D des granulats :

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc. ...), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage). Une valeur admissible de D est préconisée par Georges Dreux [10] (tableau I.3).

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de D
e espacement entre les armatures principales	e
r rayon moyen des mailles de ferrailage	0,8 r
R rayon moyen de moule	R
h_m épaisseur minimale de la pièce	$h_m/5$

Tableau I.3- Dimension admissible D pour les plus gros granulats

Le rayon moyen r d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre. Le rayon moyen R du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton.

Pour l'épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage (c), des recommandations sont faites par le Comité euro-international du béton (CEB) [10] et le règlement BAEL [2] - article A.7.1 (tableau. I.4).

Milieu ambiant	c minimal (CEB)	D maximal (CEB)	c minimal (BAEL 99)
Locaux couverts et clos	1 cm	2 c	1 cm
Exposition aux intempéries	2 cm	1,5 c	3 cm
Milieu agressif	3 cm	C	3 cm
Milieu très agressif	4 cm	c-5 mm	5 cm
Nota : c doit, par ailleurs être supérieur ou égal au diamètre des armatures (ou à la largeur du paquet d'armatures).			

Tableau I-4-Enrobage minimal c des armatures

I-5-1-2 Résistance souhaitée :

D'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé. Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur éprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne k fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour k la valeur de 0,85 à 1,2 en général et selon les cas, il convient de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20 % supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier /sable).

I-5-1-3 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en place pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et 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 I.5.

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

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	> 16	Léger piquage

Tableau I.5- Consistance du béton

I-5-1-4 Agressivité du milieu ambiant :

Le milieu ambiant dans le quel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton. La présence d'eaux agressives (eaux de mer, gypseuse, acides, très purs, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtements de fours ou ouvrage à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant.

I-5-2 Formulation des bétons :

Les méthodes proposées sont nombreuses ; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence pondéraux. Le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac, on citera [2] :

- Méthode de BOLOMEY ;
- Méthode d'ABRAMS ;
- Méthode de FAURY ;
- Méthode de VALETTE ;
- Méthode de BARON-LESAGE ;
- Méthode de DREUX et GORISSE....

I-5-2-1 Méthode de BOLOMEY :

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

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec :

P pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D diamètre du plus gros grain,

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

I-5-2-2 Méthode d'ABRAMS :

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global 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 modules de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange.

I-5-2-3 Méthode de FAURY :

FAURY a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites. L'abscisse du point de rencontre des deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[3]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

Le paramètre A est choisit dans un tableau et D est exprimée en dimension passoire.

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

R est le rayon du moule.

I-5-2-4 Méthode de VALLETTE :

Dans les cas les plus courants on partira, en général, de deux granulats : un sable 0/5 mm et un gravier présentant une certaine discontinuité avec le sable 16/25mm ; par exemple. On calcule le dosage de sable qui s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pate pure de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible

avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors un béton plein avec un maximum de sable et le moins dosé (en ciment).

I-5-2-5 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 mesures de compacité, soit à partir de mesures 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 quelles que soient les conditions de mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que **ladite** fonction soit maximale.

I-5-2-6 Méthode 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 ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du 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 pondéral pour le béton désiré. Il s'agit ensuite d'exécuter quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

II : Les bétons autoplaçants

II-1 Introduction :

Les maitres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton ont toujours recherché un béton permettant :

- une mise en place aisée,
- un bon remplissage des coffrages,
- un parfait enrobage des armatures.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complicité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « superplastifiants ». Le béton autoplaçant était alors né ...

Le JAPON a été dans les années 80 le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandu dans le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons :

- Béton auto-compactant (BAC).
- Self-compacting concrete (SCC, en Anglais).
- Béton hyperfluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP).

II-2 Définition du béton autoplaçant :

Par béton auto-plaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au

moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité [11]. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, plancher, etc.).

II-3 Domaine d'utilisation des BAP :

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [12]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

- densités de ferrailage importantes ;
- formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
- voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;
- voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- exigences architecturales et qualité de parement particulière.

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

- Le pont Akashi Kaikyo (photo01), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994)[13].



Photo 01 : Le pont Akashi Kaikyo

- Le tour Landmark Tower (photo02), où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll.1995) [14].



Photo 02 : La tour Landmark Tower

II-4: Les critères de composition des BAP [11]:

Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants :

II-4-1 Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres (figure II-1).

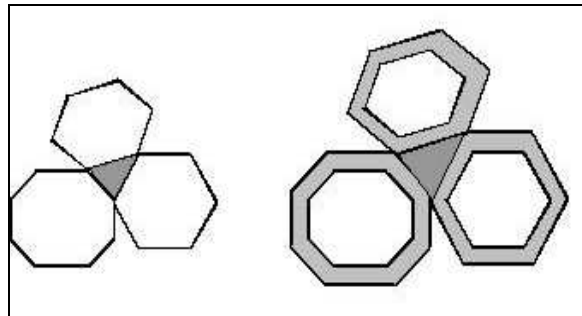


Figure II-1 : dispersion des granulats par excès de pâte

II-4-2 Une quantité de fines (<80 µm) élevée :

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire,... Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P 18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

II-4-3 L'utilisation des superplastifiants :

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de

saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

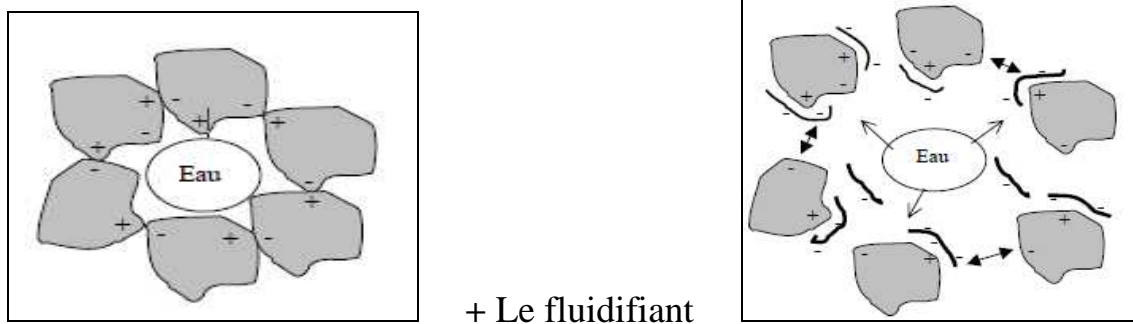


Figure II-2: Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment

La Figure II.3 illustre l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton ; plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

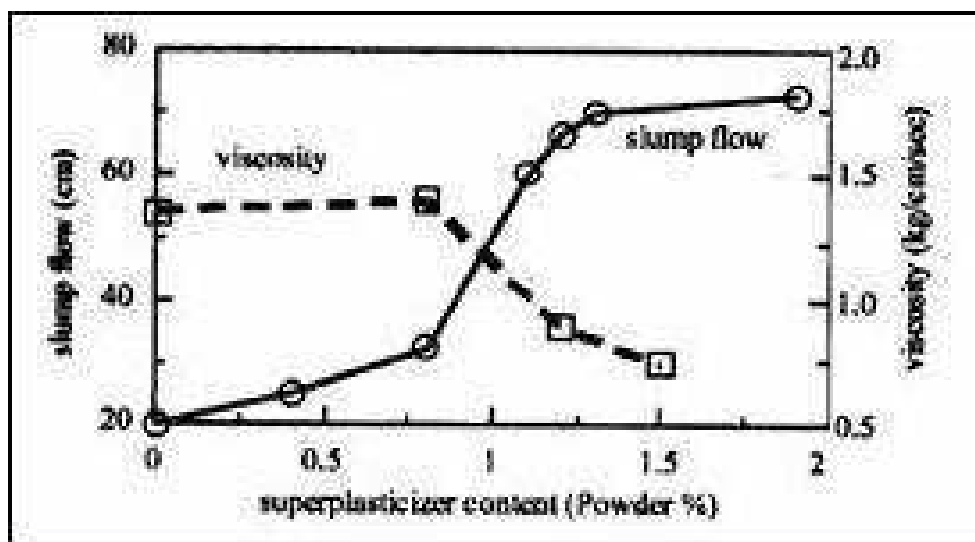


Figure II-3 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [15]

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

Ce sont généralement des dérivés celluloses, 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 épaisse.

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.

II-4-5 Un faible volume de gravillon :

Il est possible d'utiliser des 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 du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

II-5 Constituants d'un BAP

II-5-1 Les liants et les granulats [16]:

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non.

- **Le ciment :**

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments, mais compte tenu des exigences de démoulage au jeune âge, le ciment le plus employé est le CPJ CEM 1 52,5 ou 42.5.

- **Les ajouts minéraux :**

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite,...), des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice, des déchets de brique. Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP. Les cendres volantes ou les laitiers permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un BAP donc des résistances mécaniques plus élevées. Les déchets de brique qu'on utilisera comme un ajout constituera une poudre à réactivité pouzzolanique et son incorporation au béton pourrait donner des caractéristiques mécaniques très intéressantes.

- **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 [17], [18] ;
- Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm ;
- La proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de **permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées** ;
- Le rapport G/S est de l'ordre 1.

II-5-2 Les adjuvants :

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

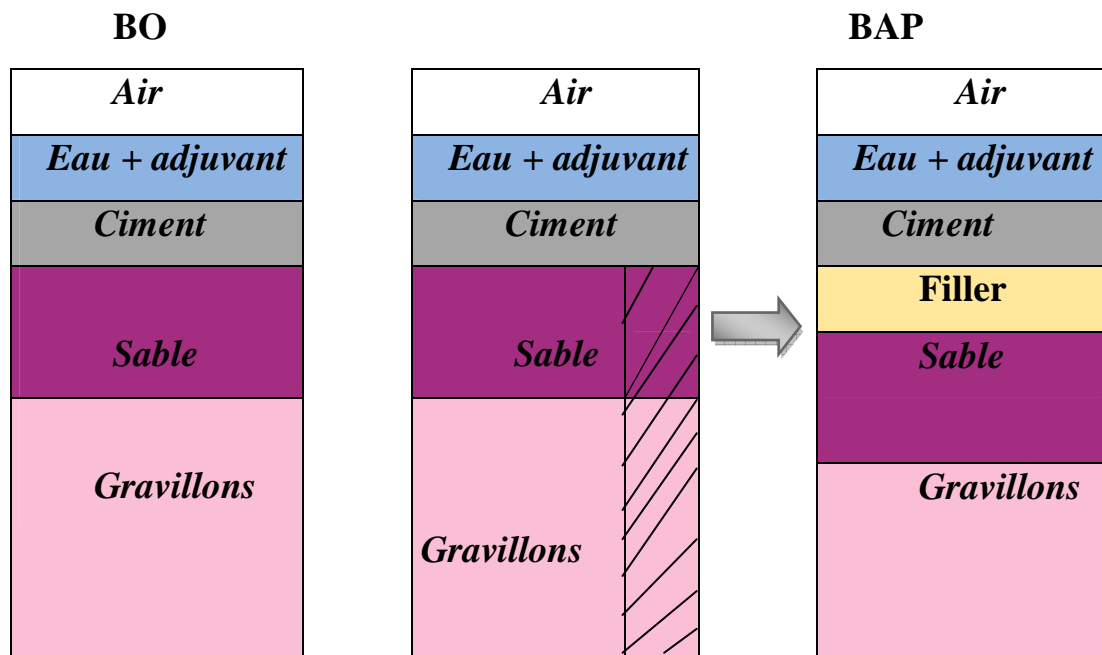


Figure II-4 composition s'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP)

Aspect à l'état frais d'un (BO) et d'un (BAP) [19]

En résumé, les composants de base d'un BAP sont identiques à ceux d'un béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure II-4). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

II-6 : Caractérisation d'un béton auto-plaçant

II-6-1 Propriétés des BAP à l'état frais:

Les propriétés générales d'un béton auto-plaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : **le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage** [11], [20].

II-6-1-1 Le remplissage :

Le remplissage du 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, en 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 test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [11].

II-6-1-2 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 phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [20],[21].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

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

II-6-1-3 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 importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [11]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure II-5 ci dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

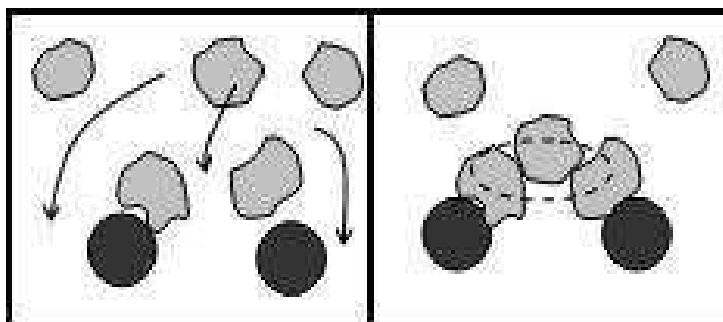


Figure II-5 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures

➤ Bilan :

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité, résistance à la ségrégation). Pour résumer, nous présentons les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau II-1.

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité
	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

Tableau II-1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP

II-6-2 Caractérisation des BAP :

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement.

Les principaux tests présentés ci dessous sont les mieux adaptés pour les BAP, car ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci dessus. Ils sont destinés à caractériser **le béton autoplaçant avec les termes qualitatifs de fluidité, stabilité, et absence de blocage.**

II-6-2-1 Essais de La fluidité

- **Mesure de l'étalement (Essais au cône d'Abrams) :**

La fluidité d'un BAP est estimée en mesurant l'étalement du matériau à l'aide d'un cône (cône d'Abrams). Le principe de cet essai est mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (Figure II-6) [11].

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm [22], [23].

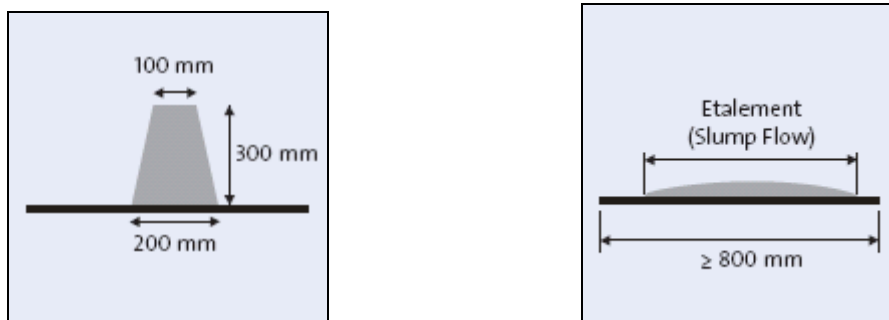


Figure II-6 : essai d'étalement

- **Mesure de la vitesse d'étalement (Essais au cône d'Abrams) :**

La vitesse d'étalement peut aussi nous renseigner sur la viscosité, l'ouvrabilité du béton est d'autant plus grande que la vitesse d'étalement est élevée. Après soulèvement du cône, on chronomètre le temps nécessaire, pour que le béton forme un cercle de 50cm de diamètre on le note T50. En général, des valeurs élevées de T50 traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [24], [25]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [26], [27].

II-6-2-2 Ségrégation dynamique :

- **Essai de la boîte en L :**

La résistance à la ségrégation dynamique se traduit par la capacité qu'a un BAP à traverser, sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures. Cette propriété est aussi appelée la déformabilité restreinte.

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures (figure II-5) bloquant alors l'écoulement du béton.

Parmi les essais développés pour caractériser la déformabilité restreinte des BAP, il y a la boîte en L décrit au paragraphe suivant.

Le principe de cet essai (figure II.7), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 mn puis enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage, On mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le taux de remplissage $H2/H1$.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [11], le taux de remplissage doit être supérieur à **0,8**.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant.

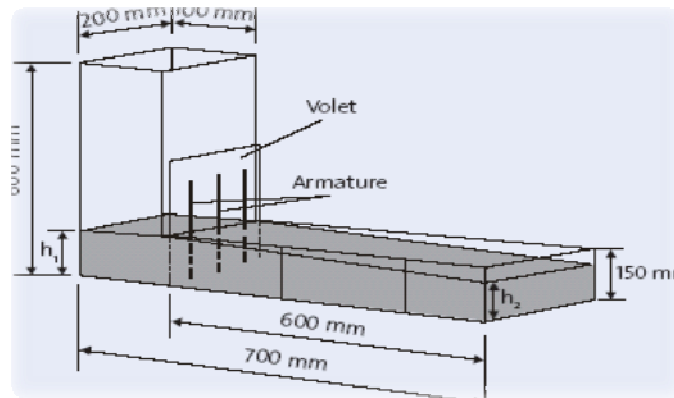


Figure II-7: boîte en L

II-6-2-3 Essais de ségrégation statique :

- **Essai de la stabilité au tamis:**

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps, en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface de l'échantillon de béton frais (ressuage), créant ainsi une ségrégation des phases entre la partie supérieure et la partie inférieure du béton.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis. L'essai de la stabilité au tamis (figure II-8) permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [11].

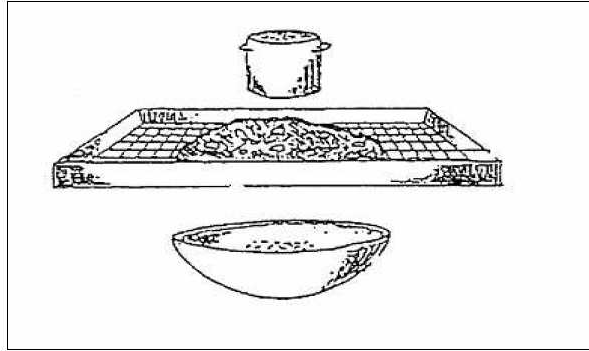


Figure II-8 : Essai de la stabilité au tamis

Critères d'acceptabilité :

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplacants de la façon suivante :

$0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\% \rightarrow$ stabilité satisfaisante.

$15\% < \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$ stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ).

$\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

II-6-2-4 Ressuage [11] :

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure II-9) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer.

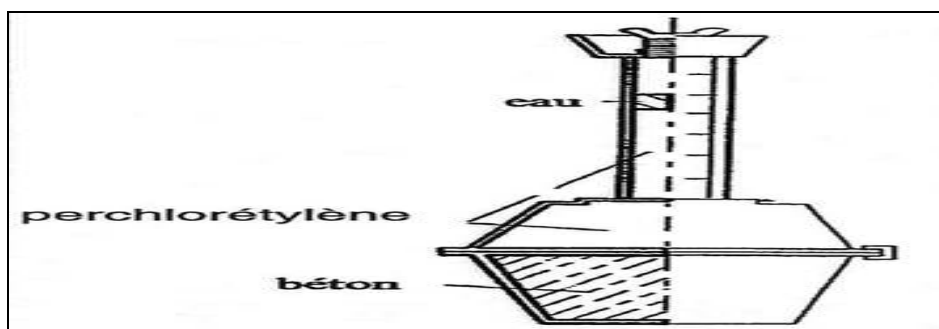


Figure II-9 : Essai de ressuage à l'aéromètre

II-7 Les approches de formulation :

II-7-1 Méthode de formulation pratique des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée [28], [29], [30], car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 700 l/m³.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

II-7-2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie :

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales.

II-7-2-1 Approche japonaise :

L'approche japonaise a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, Ozawa et al [13],[31], [32], [33], [34] (documents pour la plupart en japonais, ceux-ci sont rapportés par [20]).

En général, cette approche consiste d'abord à **fixer** le **dosage de gravier dans le béton** et celui du **sable dans le mortier**, ensuite de procéder à **l'optimisation de la pâte de ciment** afin de donner au béton résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité.

Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier.

Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet, Edamatsu et al [29] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

Travaillant avec des matériaux locaux, d'autres auteurs (Pelova et al[20]) ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

II-7-2-2 Approche CBI (suédoise) :

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) [35], [36],[37] et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est **basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés**. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton.

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs ([38], [39], [40] - cités par [20]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par Bui et al [27], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

II-7-2-3 Approche LCPC :

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement [41],[42] qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un

arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlabPro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [42], et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).

Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [42] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

- **Bilan**

Nous avons présenté le principe des trois méthodes de formulations de BAP les plus répandues, ainsi que leurs modifications. Des auteurs comme Turcry et al [43] ont testé les trois approches et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants [43].

Toutefois, les trois méthodes décrites, ne sont pas adaptées pour la formulation de bétons autoplaçants contenant des agents de viscosité. L'apport d'un adjuvant de telle nature augmente significativement la viscosité du mélange, ce qui

nécessite probablement des ajustements et des modifications importantes sur les méthodes de formulation des BAP.

II-8 Propriétés des BAP à l'état durci :

Dans cette partie, nous résumons rapidement les différences qui existent entre les propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci et celles des bétons ordinaires. Elles sont étudiées sous deux aspects, les propriétés mécaniques d'une part et physico-chimiques (durabilité) d'autre part.

Les principaux résultats présentés proviennent de la recherche effectuée au sein du LMDC [44], [45]. Des résultats expérimentaux ont été obtenus sur plusieurs séries d'échantillons, constitués des mêmes matériaux, même squelette granulaire (sauf les BHP), et de classes de résistance relatives à des bétons de bâtiment (20 MPa), des bétons d'ouvrage (40 MPa) et des bétons à hautes performances BHP (60 MPa).

II-8-1 Propriétés mécaniques

II-8-1-1 Résistance mécanique :

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (phases solide et liquide), le béton autoplaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique.

Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [45], [46].

L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [47], [48]. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure

plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

II-8-1-2 Module d'élasticité statique (en compression) :

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par. Pour des rapports gravier sur sable 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 inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants.

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) [45].

II-8-1-3 Retrait au jeune âge (0-24 heures) :

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [45]. Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

II-8-1-4 Retrait à l'état durci :

En dessiccation, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées (pour les BHP), où le retrait des BAP est supérieur. En mode endogène, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours. Au delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui

des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton est dû au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants [45].

II-8-1-5 Déformations et fluage :

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [45]. Les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des bétons autoplaçants [44], sauf pour la gamme de résistance relative aux bétons de bâtiment pour lesquels ces paramètres sont identiques entre BAP et BO.

II-8-2 Propriétés physico-chimiques:

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [45].

II-9 Fabrication, transport et mise en place des BAP

II-9-1 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 celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions 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, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [16].

II-9-2 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 du 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 du 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 [49].

II-9-3 Mise en place des BAP :

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

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à 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.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [50].

III- Quelques modèles de comportement du béton en Traction

III-1 Introduction :

Les essais effectués par différents chercheurs pour déterminer la résistance à la traction du béton, ont montré une certaine dispersion des résultats. Ceci est dû au comportement relatif fragile du matériau béton et aux modes d'essais.

Afin d'apprécier, lors d'un essai, le comportement d'un élément soumis à une traction directe, il est nécessaire de réaliser l'essai avec asservissement (en déformations contrôlées).

Avec l'évolution de la technologie (nouvelles machines plus performantes), on ne se contente plus de mesure simple de résistance puisque ces appareils nous permettent de déterminer les courbes contrainte-déformations ($\sigma - \varepsilon$) dans le domaine linéaire jusqu'à atteinte du maximum et même au-delà du pic de contrainte. Ce qui permet de mettre en évidence le comportement post-pic et la ductilité relative du matériau, jusqu'à rupture totale.

Le comportement réel d'un élément soumis à la traction directe est très complexe alors plusieurs recherches ont été réalisées afin d'étudier les différents phénomènes (élasticité, plasticité, fragilité, endommagement,..) selon les conditions de chargement (mono-axiale, bi-axiale, triaxial, température..).

On représente dans cette partie quelques modèles de comportement du béton en traction uni axiale.

III-2 Comportement du béton en traction uni axiale :

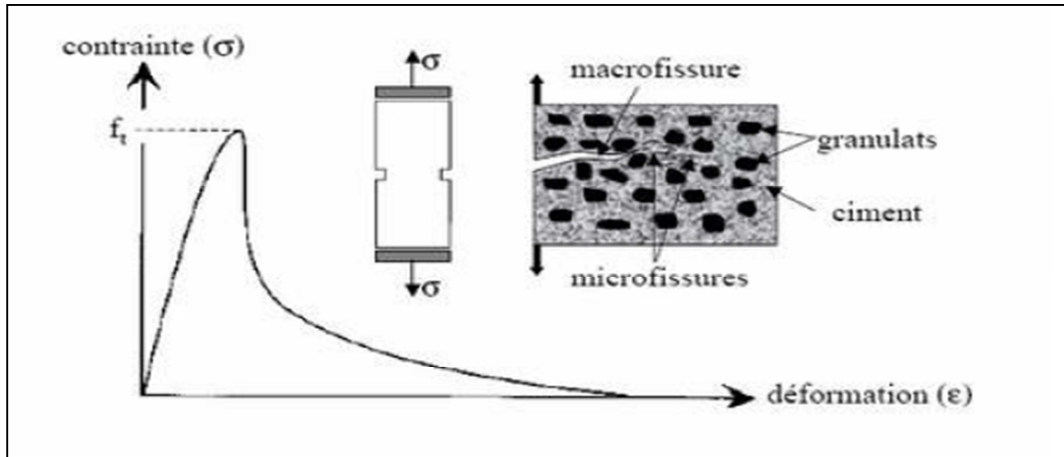


Figure III-1 : courbe contrainte-déformation du béton en traction.

La courbe contrainte-déformation du béton obtenue en traction uni axiale (Figure III-1) est similaire à celle de la compression, mis à part le fait que la résistance limite en traction f_t est nettement plus faible que celle en compression ($f_t=0.1f_c$).

La courbe est linéaire jusqu'à environ 75% de sa résistance limite de traction, f_t . Les microfissures s'initient à se développer dans la région qui précède la résistance au pic et qu'elles s'agrandissent plus rapidement que lors du test de compression et par conséquent la rupture survient plus tôt.

Des tests expérimentaux de traction directe effectués sur des éprouvettes en béton ont montré que, juste avant le pic, une décohésion des granulats les plus importants apparaissait et que les fissures nées de cette décohésion coalescente ensuite avec les microfissures existantes pour former une macro fissure continue. De plus, les résultats révèlent la présence de nombreux grains reliant les surfaces de la fissure,

ce qui explique la branche d'adoucissement de la courbe contrainte-déformation. La ruine des éprouvettes apparaît lors de la rupture de ces grains.

III-3 La résistance à la traction du béton:

La fissuration du béton, essentiellement due à son comportement en traction, est un phénomène critique dans le calcul des constructions en béton armé. Depuis le début des années quatre-vingts, des chercheurs ont tenté de modéliser le comportement du béton sous charges **cycliques** en traction. Nous citons les modèles de **Rots (1985)**, de **Gylltoft (1984)**, de **Reinhardt (1986)** et de **Yankelevski (1989)**.

La résistance à la traction du béton est d'une part influencée par l'état de contraintes, la géométrie de l'élément de structure, les conditions d'essai (vitesse de chargement, contrôle en déformation,....).

La détermination de la résistance à la traction par d'autres types d'essais donne des résultats différents, car cette résistance dépend de la façon dont elle est déterminée. On a une résistance à la traction différente pour chaque sorte de béton. L'évolution dans le temps de la résistance à la traction dépend de nombreux facteurs, comme la composition du béton, le type et la classe du ciment, les adjuvants et les ajouts, les conditions de production et de durcissement du béton ainsi que le type de cure.

III-4 Les causes de la fissuration :

L'hétérogénéité de composition du béton vient s'ajouter une hétérogénéité dite structurelle. Elle consiste en l'existence de défauts initiaux (microfissures) au sein de la microstructure. La plupart de ces défauts se situent à l'interface entre les

granulats et la pâte de ciment, cette interface constituant le lien le plus faible du matériau.

Des microfissures peuvent également être générées dans le ciment par différents facteurs, tels que : le retrait (diminution du volume apparent de la matière) hydraulique engendré par une évaporation d'eau, le retrait thermique engendré par une variation de température. Lorsque cette structure est soumise à une sollicitation, des microfissures supplémentaires peuvent se former suite à des concentrations de contrainte.

Les fissures qui se naissent dans les éléments en béton armé peuvent être classifiées en deux catégories principales, à savoir les fissures provoquées par les charges extérieurement appliquées, et ceux qui se **produisent indépendamment des charges** [51].

En résumé :

- dessiccation trop rapide du béton
- variations de température dues, par exemple à la chaleur d'hydratation
- retrait
- charges
- déformations imposées ou entravées
- gel.

III-5 Quelques modèles de comportement du béton et du béton armé en traction :

III-5-1 Comportement local du béton en traction (Béton seul)

- **Comportement du béton selon PETERSON et HUGHES et CHAPMAN :**

Les diagrammes obtenus lors des essais, réalisés par PETERSON [52], montrent l'existence de deux phases très distinctes (Figure III-2) :

-une branche ascendante (élastique linéaire) rectiligne jusqu'au maximum de résistance.

-au delà du pic, la courbe décroît progressivement jusqu'à s'annuler pour un déplacement nettement supérieur a celui du pic, d'où un comportement assez ductile.

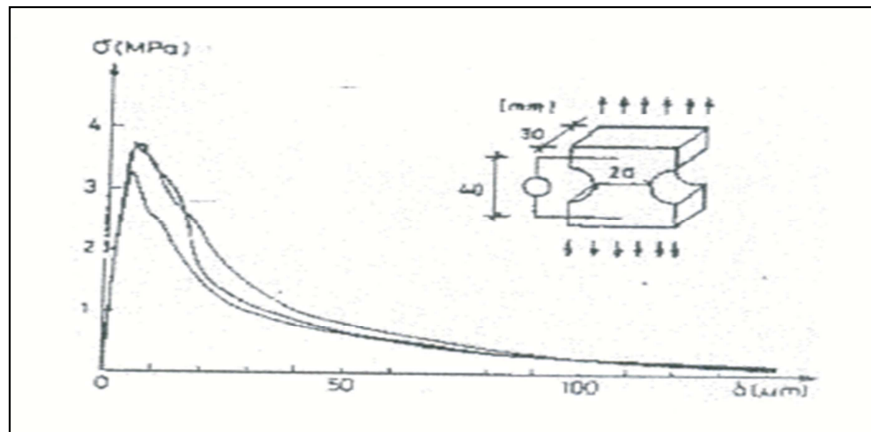


Figure III-2 : Courbes expérimentales du béton en traction selon PETERSON.

D'autres essais du même type, (Figure III-3) ont été réalisés par HUGHES et CHAPMAN [53].

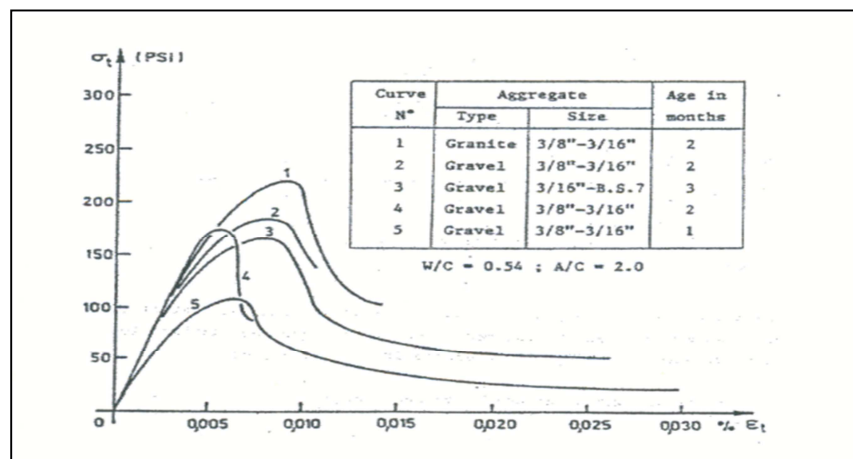


Figure III-3 : Courbe de traction d'éprouvettes en béton selon HUGHES et CHAPMAN.

- **Comportement du béton selon MAZARS :**

Une loi théorique a été développée par MAZARS [54]. Elle présente l'avantage d'ajuster la courbe décroissante avec deux paramètres A_t et B_t (Figure III-4).

$$\sigma = E_{c0} \left\{ \varepsilon_{ct} (1 - A_t) + \frac{A_t \varepsilon}{e^{B_t (\varepsilon - \varepsilon_{ct})}} \right\} \quad \text{si } \varepsilon > \varepsilon_{ct}$$

Avec :

$$0.7 < A_t < 1 \quad \text{en moyenne ; } A_t = 0.8$$

$$10^4 < B_t < 10^5 \quad \text{en moyenne ; } B_t = 2 * 10^4$$

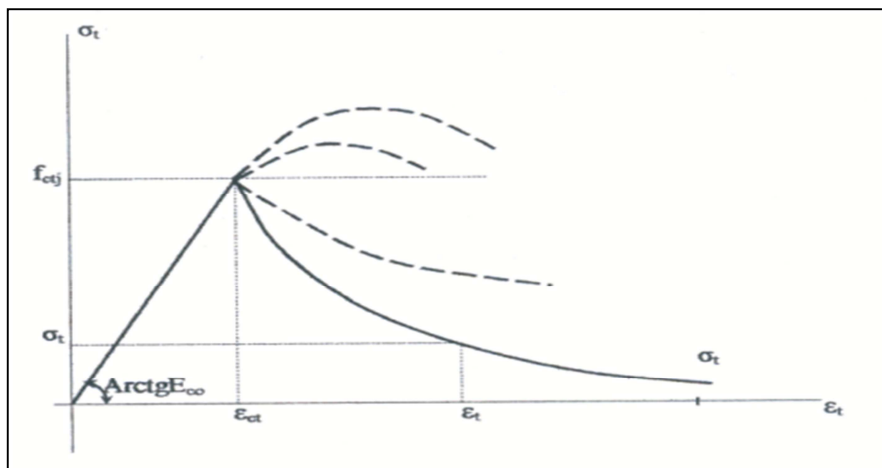


Figure III-4 : Comportement local du béton en traction selon MAZARS.

- **Comportement du béton selon ZHEN-HAI et XIU-QIN:**

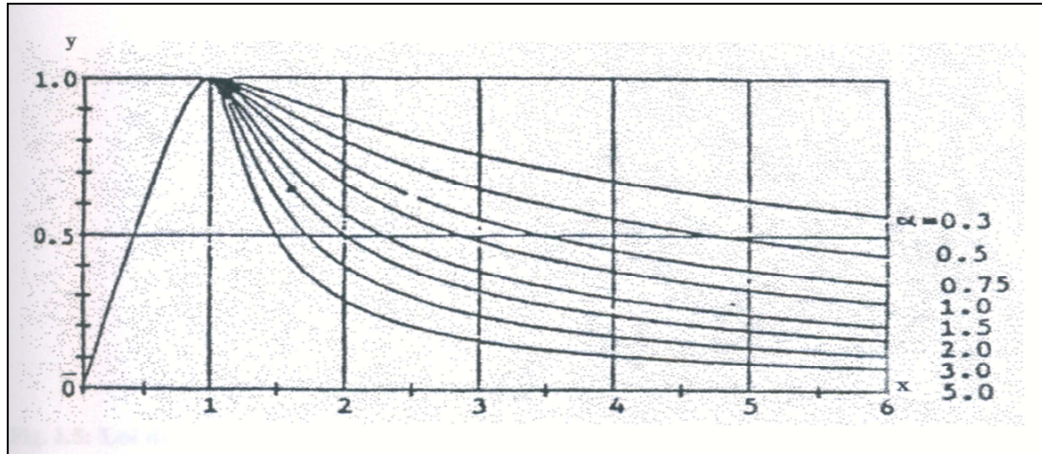
Une autre approche est celle de ZHEN-HAI et XIU-QIN [55]. En prenant certaines précautions (la rigidité de la machine d'essai, centrage des éprouvettes), les auteurs présentent une loi théorique décrivant la courbe ascendante et la courbe

décroissante avec un comportement ductile non négligeable du béton tendu (Figure III-5). Ils proposent les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 x \leq 1 : y &= 1,2x - 0,2x^6 \\
 x \geq 1 : y &= \frac{x}{\alpha(x-1)^\beta + x}
 \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 \beta &= 1,7 \\
 y &= \frac{\sigma}{f_t} \\
 x &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \\
 \alpha &= 0,312f_t^2
 \end{aligned}$$



$$\frac{\sigma}{f_t} = f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)$$

Figure III-5 : Relation de ZHEN-HAI et XIU-QIN.

III-5-2 Lois de Comportement uni axiales fictives du béton tendu

Pour approcher correctement le comportement d'une structure (surtout pour les courbes charge-flèche), les lois définies au paragraphe III-5 ne sont pas adéquates.

En effet, plusieurs facteurs rentrent en jeu quand le béton est mélangé à des aciers, à savoir ;

- le diamètre des armatures et leur disposition,
- la fissuration,
- le mode de mise en charge,
- et l'interaction acier-béton, etc.....

- **Modèles de tension stiffening**

L'ensemble de ces phénomènes physiques et la manière de les modéliser afin d'exprimer la participation du béton fissuré à la rigidité de la structure est appelé « tension stiffening ».

Pour rendre compte d'une manière plus détaillée du « tension stiffening », Aldsted [56] a été parmi les premiers à faire des études par éléments fini, en modélisant la contrainte d'adhérence et le glissement entre l'acier et le béton pour les introduire dans des éléments de poutres. Mang [57] et flogl [58] ont utilisés ces notions pour les cas de structures plans ou spatiales.

Au début des années 1980, de nombreux essais dans ce domaine ont été entrepris pour approfondir les connaissances sur le béton armé du point de vue mécanique de

détail, on peut citer les travaux de Walraven et Reinhardt [59], Groot et Kusters [60] et Rots et al [61].

- **Comportement du béton selon SCANLON**

La première loi fictive uni axiale du béton a été attribuée à SCANLON [62], [63], [64] avec décroissance discontinue après fissuration (figure III-6), et elle a été étendue par GILBERT et WARNER [68] (Figure III-7).

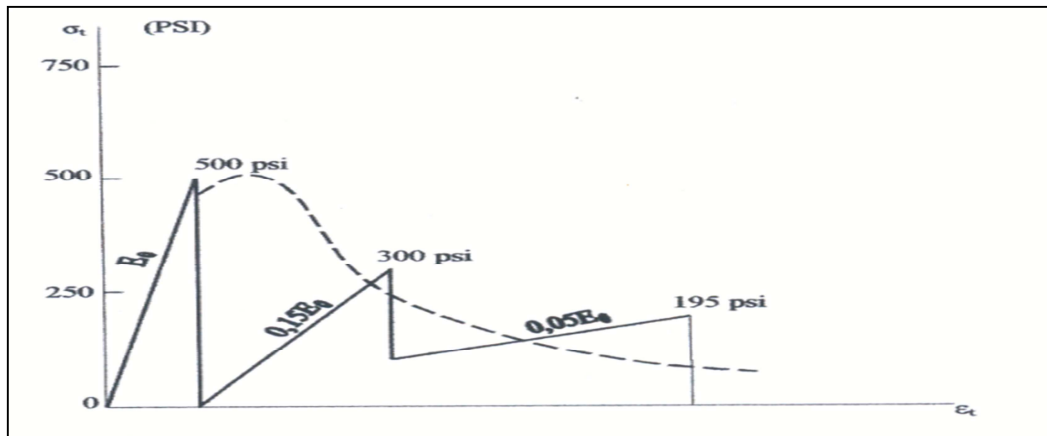


Figure III-6 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d’après SCANLON.

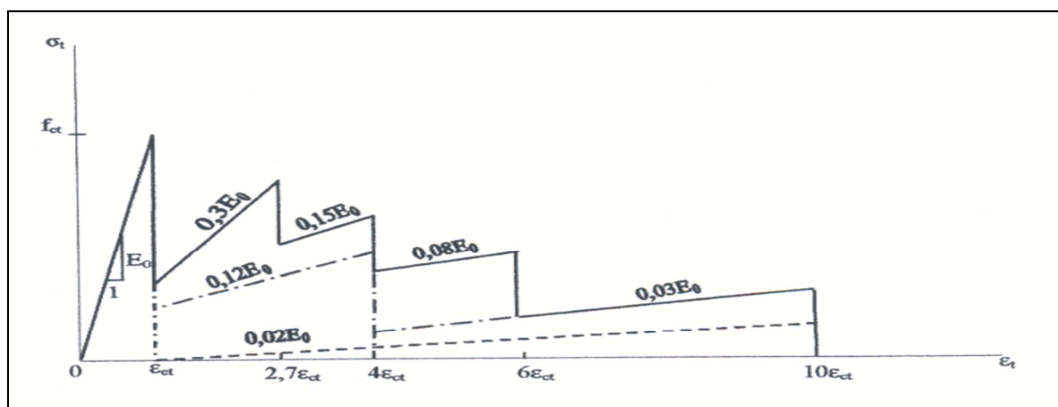


Figure III-7 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d’après GILBERT et WARNER.

- **Comportement du béton selon LIN :**

LIN [65] est l'un des premiers auteurs à proposer une réponse décroissante continue juste après le début de la fissuration (figure III-8).

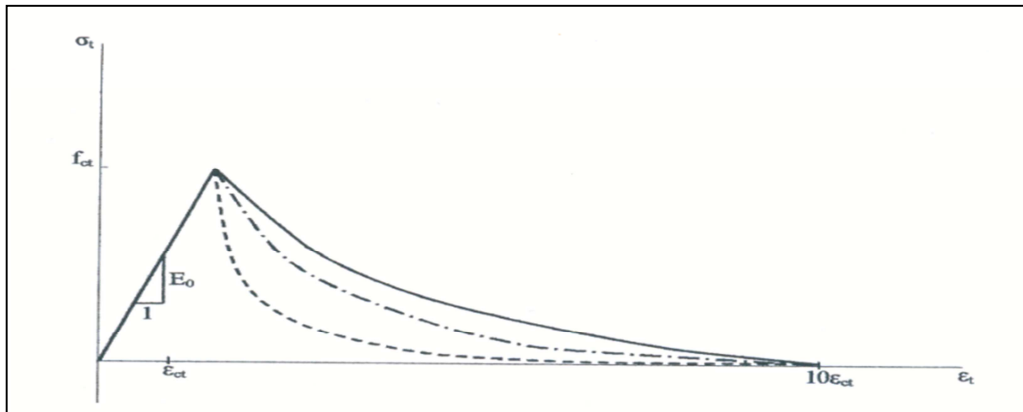


Figure III-8 : Loi de comportement fictive pour le béton tendu d’après LIN.

- **Comportement du béton en traction selon Grelat :**

La formulation de Grelat [66] tient compte d’une répartition linéaire des contraintes, elle attribue au béton tendu fissuré un diagramme fictif triangulaire à partir de l’axe neutre (Figure III-9), dont la contribution du béton s’annule à la plastification des aciers.

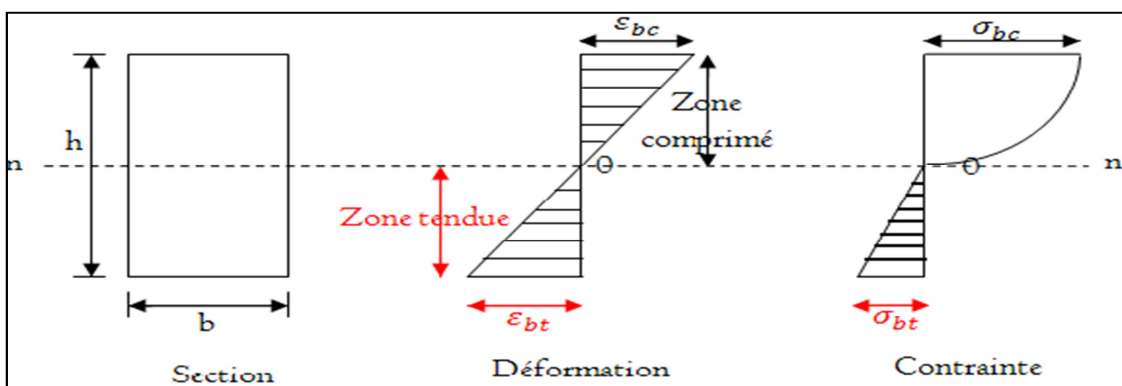


Figure III-9 : Comportement de béton avant fissuration.

Les fibres du béton tendu d'un module de déformation E_{bt} est défini par la contrainte et la déformation instantanée du bord tendu :

$$E_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{\varepsilon_{bt}}$$

Au-delà de la fissuration en traction on tient compte d'une participation du béton tendu situé entre deux fissures successives.

La contrainte ne s'annule pas brusquement, elle décroît selon une loi parabolique progressivement jusqu'à plastification et rupture des aciers tendus (Figure III-10). Dans ce cas, l'étude concerne le comportement moyen d'une section situé entre deux fissures donne les relations suivantes :

- Domaine élastique linéaire :

$$\sigma_{bt} = E_{b0} \cdot \varepsilon_{bt} \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{ft}$$

- Fissuration avec participation du béton tendu :

$$\sigma_{bt} = -f_{tj} \frac{(\varepsilon_{bt} - \varepsilon_{rt})^2}{(\varepsilon_{rt} - \varepsilon_{ft})^2} \quad \text{si} \quad \varepsilon_{ft} < |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{rt}$$

- Fissuration sans participation du béton tendu

$$\sigma_{bt} = 0 \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| > \varepsilon_{rt}$$

Avec :

E_{b0} : Module d'élasticité longitudinale du béton,

f_{tj} : Résistance de béton a la traction,

ε_{ft} : Déformation de traction correspondant à f_{tj} ,

ε_{rt} : Déformation correspondant à plastification de l'acier le plus tendu,

ε_{bt} : Déformation de la fibre de béton la plus tendue,

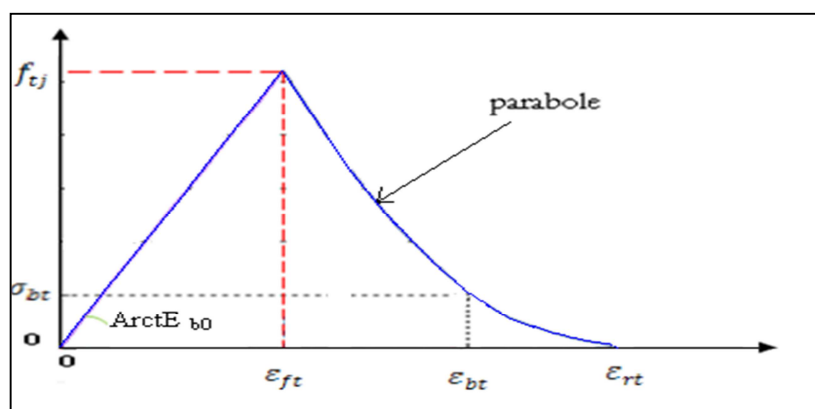


Figure III-10 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat.

IV- Conclusion :

Dans cette revue bibliographique, notre objectif était de définir le béton autoplaçant, ses multiples propriétés, sa caractérisation, et les méthodes principales de sa formulation.

Les principales propriétés d'ouvrabilité d'un BAP sont le remplissage (taux de remplissage et la vitesse de déformation), la résistance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés et fortement ferrailés. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

Le béton autoplaçant à l'état durci peut être caractérisé par ces propriétés mécaniques.

Les propriétés d'un BAP dépendent des composants intervenant dans le béton et de sa formulation. Celle-ci est obtenue grâce à une optimisation spécifique composée d'une teneur en liants suffisante, d'une composition des granulats équilibrée avec une teneur en fines (tels que la poudre de marbre, la brique broyée, le tuf qui feront l'objet de notre travail) et d'un superplastifiant.

A l'heure actuelle, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires. Toutes les méthodes trouvés dans la littérature découlent des trois approches (japonaise, minimisation de pâte de ciment, demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.

Il convient de faire très attention à la fabrication, à la mise en œuvre du béton frais et à la technique de coffrage.

Concernant les modèles de comportement des bétons en traction, il n'y a pas une loi "miracle" simple et efficace pour le béton.

Chaque pas que nous faisons vers les modèles plus compliqués est payé -parfois cher- par un alourdissement du calcul et par l'introduction de paramètres dont le sens physique n'est pas toujours évident.

Le choix du modèle doit être dicté par un compromis d'économie et d'efficacité suivant les caractéristiques du problème à résoudre.



Partie 2 :
Etude expérimentale

I : Matériaux et formulation

I-1 Introduction :

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique et chimique. Ainsi, nous allons décrire dans ce chapitre les différents constituants entrant dans la composition d'un béton courant « vibré » et d'un béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau).

Les constituants de base d'un béton ordinaire (ou courant) sont le ciment, l'eau et les granulats. Les bétons autoplaçants sont obtenus par ajouts d'adjuvants et d'additions minérales.

Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais, ces essais sont pour la plupart normalisés [67], [68].

I-2 Matériaux à utilisés :

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux.

II-2-1 Ciment :

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

Les différentes caractéristiques que se soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont données sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément aux normes NA 442 et EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194.

Certaines caractéristiques sont présentées dans ce tableau I.1 :

Composition minéralogique(%)			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
58-64	12-18	6-8	10-12

Tableau I-1 : Composition minéralogique du ciment.

Quelques propriétés physiques du ciment :

- **Surface spécifique** 4150 - 5250 cm^2/g
- **Masse spécifique** $\rho = 3.1g/cm^3$
- **Retrait à 28j** $< 1000 \mu m/m$
- **Résistances caractéristique en compression du ciment :**
 - A 2 jours $\geq 10MPa$
 - A 28 jours $\geq 42.5 MPa$

Voir la fiche technique en **annexe 3** pour plus de détails sur ce ciment.

I-2-2 Granulats :

Les granulats utilisés dans cette étude sont concassés provient d'une carrière. Ces granulats sont de trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravier 3/8 et Gravier 8/16.

I-2-3 l'eau de gâchage :

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

I-2-4 Adjuvant (Superplastifiant) :

- Le Super plastifiant MEDAPLAST 40 utilisé, produit par Granitex.

Ce super-plastifiant est aussi un haut réducteur d'eau. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de Super-plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.



Figure I-1 : Le Super plastifiant MEDAPLAST 40 utilisé.

Caractéristique	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Le dosage recommandé
Résultats	liquide	marron	8.2	1.20±0.01	<1g /L	0,5% à 2%

Tableau I-2 : Quelques caractéristiques de MEDAPLAST 40.

Voir la fiche technique en **annexe 3** pour plus d'indications sur ce produit.

I-2-5 Ajout minérale :

Les trois types d'additions utilisés dans cette étude sont:

➤ **Les déchets de brique** : Ces déchets sont récupérés de la briqueterie de Tizi-Ouzou, puis concassés manuellement au niveau de notre laboratoire, puis broyé jusqu'à la fraction granulaire inférieure à 80µm.



Figure I-2 : Déchets de brique récupérés puis broyé.

Ces caractéristiques et analyse chimiques sont données dans les tableaux suivants :

Composition chimique (%)													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	FeS ₂	PF	k ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	F	SO ₃ Total
48.09	16.85	5.64	10.24	1.51	0.15	0.28	13.82	1.85	0.76	0.1	0.116	0.1	0.49

Tableau I-3 : Composition chimique du déchet de brique broyé.

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolu	Le dosage recommandé	Absorption
résultats	poudre	Rouge brique	2.51	5% à 10%	10%

Tableau I-4 : Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé.

➤ **Les déchets de marbre :** Ce déchet est récupéré d'une marbrerie de Meklaa de la wilaya de Tizi-Ouzou. Le marbre est fourni sous forme d'une poudre mouillée. La pâte est dans un premier temps séchée à une température 105 °C. Les mottes de marbre obtenues sont par la suite broyées pour disperser la poudre. La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à 80mm.



Figure I-3 : La poudre de marbre utilisé.

Ces caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolu	Absorption(%)
Résultats	Poudre	Beige	2.64	3.31

Tableau I-5 : Quelques caractéristiques de déchet de marbre.

Voir la fiche technique en **annexe 3** pour plus d'indications sur ce produit.

➤ **Le Tuf** : Récupéré à Meklaa de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le Tuf est fourni sous forme d'une poudre mouillée, puis séchée à une température 105 °C. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à 80mm.



Figure I-4 : Le Tuf utilisé.

Quelques caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Caractéristique	Forme	Couleur	Densité absolu	Absorption (%)
Résultats	poudre	jaunâtre	2.53	1.86

Tableau I-6 : Quelques caractéristiques de Tuf.

Voir la fiche technique en **annexe 3** pour plus d'indications sur ce produit.

I-3 Caractérisation des matériaux :

Avant la réalisation d'une formulation il est nécessaire de savoir les caractéristiques de chaque matériaux par un certains nombres d'essais au laboratoire.

I-3-1 Essais sur granulats

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

Au laboratoire, on fait un prélèvement d'un échantillon par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur pour les essais prévus. Cet échantillon doit être représentatif de l'échantillon du prélèvement de départ (**voir annexe1 pour les détails de la méthode d'échantillonnage**).

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

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 (**Voir annexe1**).

Quant à la courbe granulaire, il est bien de la connaître, car plus une courbe est régulière plus le squelette granulaire formé est compacte (meilleure compacité du squelette du béton). Par ailleurs, la courbe granulaire a aussi un effet sur l'ouvrabilité du béton.

Dans ce qui suit nous avons présenté les résultats de l'essai pour les granulats utilisés (**Voir annexe2**). Sur la figure I-5 sont représentées les courbes des granulats utilisés (Sable 0/3 ; gravillons 3/8 et gravillons 8/16).

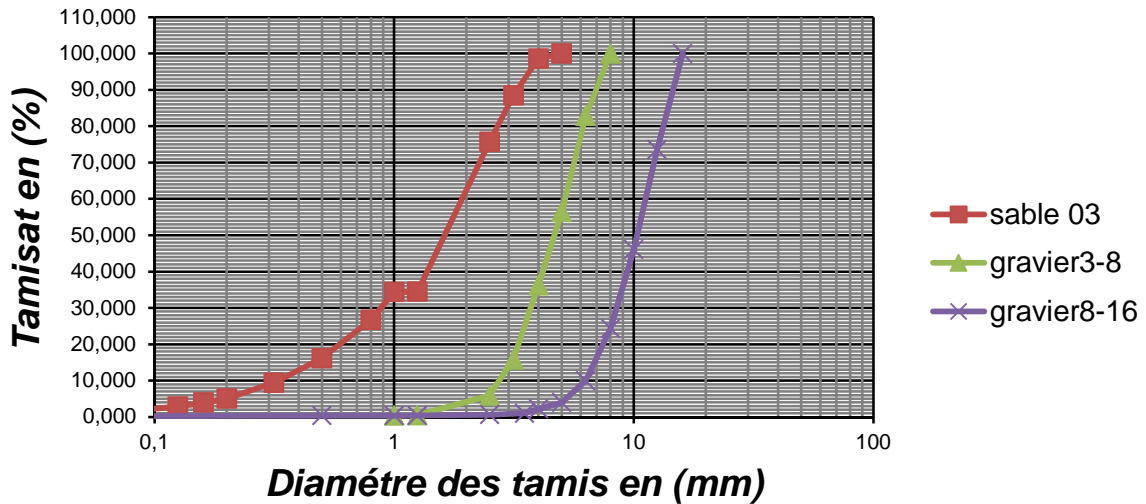


Figure I-5 : Courbes granulaires des trois granulats.

- **Masse volumique apparente et 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. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent.

Nos résultats sont indiqués dans le tableau I.7 suivant.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /16)
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,6	2,5	2,5
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,6	1,49	1,38

Tableau I-7 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.

- **Coefficient d'absorption (NF P18-554) :**

La porosité est le rapport du volume des vides au volume réel (apparent) de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est le rapport de la masse d'eau absorbée par le matériau jusqu'à saturation à la masse de l'échantillon sèche.

Les résultats de caractérisation de l'absorption des différents granulats sont récapitulés dans le tableau I.8 ci-dessous:

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8 /16)
Absorption(%)	3,2	2,43	1,31

Tableau I-8:Résultats de l'absorption.

- **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 composition des bétons.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable

- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier
- Un module de finesse faible correspond à un sable fin

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Nos résultats sont indiqués dans le tableau I.9 suivant.

Granulats	Sable (0/3)	Spécifications
Module de finesse M_f	3,19	$2,8 < M_f < 3,2$ sable grossier $2,2 < M_f < 2,8$ sable moyen $1,8 < M_f < 2,2$ sable fin

Tableau I.9: module de finesse du sable.

Donc on a un sable grossier.

- **Equivalent de sable (NF P18-598):**

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S. 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 donc une faible valeur de la résistance.

L'essai a donné les résultats présentés dans le tableau I-10.

Granulats	Sable (0/3)	spécification
Equivalent de sable visuel (ESV) (%)	93,62	70 à 80 pour un sable roulé
Equivalent de sable sous le poids d'un piston(ES) (%)	91,49	> 65 pour un sable concassé

Tableau I.10: valeur de l'équivalent de sable.

Donc on a un sable propre.

I-3-2 Essais sur le ciment :

- **Essai de consistance EN (196-3) :**

La consistance de la pâte caractérise sa plus au moins grande fluidité.

Cet essai est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3 (**voir annexe1 pour les détails de la méthode**).

On a eu $d=6\text{mm}$ donc notre pate de ciment est de consistance normale.

- **Temps de prise à 20 °C:**

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat conformément à la norme EN 196-3. qui donne deux repérés pratiques : le début de prise et la fin de prise.

Début	Fin
150 min	220min

Tableau I-11 : Le début et la fin de prise.

I-4 Elaboration des bétons :

I-4-1 formulation de béton ordinaire :

Pour la formulation du béton ordinaire vibré (témoin) 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 ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [2]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

- **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 :

$$\sigma'_{28J} = \sigma_{28J} + 0,15\sigma_{28J} \text{ Soit : } \sigma'_{28J} = 1,15\sigma_{28J}$$

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

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

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

$$\sigma'_{28J} = 1,15\sigma_{28J}$$

$$\sigma'_{28J} = 1,15 \times 26$$

$$\sigma'_{28J} = 30 MPa$$

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

La formule ci-dessous permet le calcul de la résistance à la compression visée à 28 jours.

$$\text{Soit : } R'_{28} = G\sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

$$\text{Avec : } \frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{G\sigma'_c} + 0.5$$

R'_{28} : Résistance visée à 28 jours.

σ'_c : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment /m³ de béton).

E : Dosage en eau (Kg d'eau /m³ de béton ou litre d'eau/m³ de béton).

-Choix approprié du coefficient granulaire :

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau I-12 ci-après établi par George Dreux [2].

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

Tableau I-12 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Les granulats utilisés ont un diamètre de 16 mm, ce qui donne un coefficient granulaire **G=0,45** avec une bonne qualité.

-Choix de la classe vraie de ciment :

Parmi la liste des ciments disponibles sur le marché des matériaux de construction, nous avons retenu le ciment CPJ CEM II / 42,5 R.

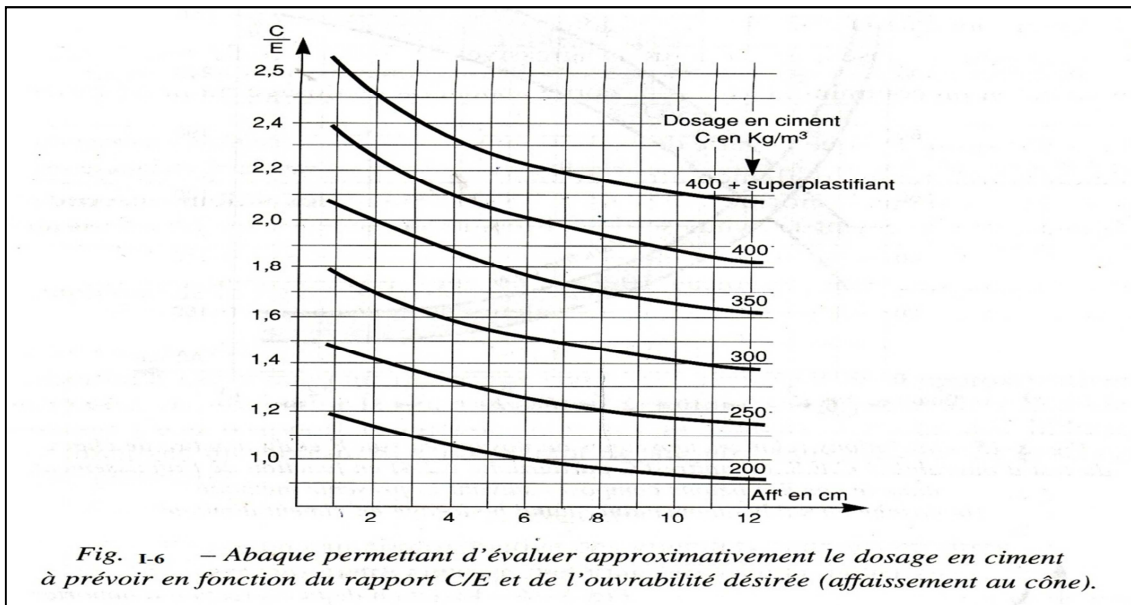
$$\text{Le rapport } \frac{C}{E} \text{ est donné par : } \frac{C}{E} = \frac{30}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2,07.$$

-Dosage en ciment par 1m³ de béton :

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

$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,07 \\ A = 8cm \end{array} \right\} \Rightarrow$ L'abaque donne la valeur du dosage en ciment :
 $C = 400Kg$ (Voir la figure I-6)

$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,07 \\ C = 400Kg \end{array} \right\} \Rightarrow$ On déduit la valeur de E qui est :
 $E = 194Kg$



-Tracé de la courbe granulaire de référence :

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable+gravier mais ciment non compris).

Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis), déjà obtenu (voir figure I-2), on trace une courbe granulaire de référence OAB avec :

Le point **O** est repéré par ses coordonnées : [0,080 ; 0].

Le point **B** est repéré par ses coordonnées : [D ; 100], (D : le diamètre du plus gros granulat).

Le point de **brisure A** à les coordonnées suivantes :

En abscisse :

-Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est a $D/2$.

-Si $D > 20$ mm, l'abscisse est située au milieu limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D.

Le plus gros granulat est $D=16$ mm, donc le point de brisure a pour abscisse : $D/2=8$ mm.

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 vaut 400Kg/m^3

Une vibration normale.

Granulats de forme concassés.

La valeur du coefficient $K=0$ (tableau 10-12 de [2]).

K_s : Coefficient tenant compte du module de finesse du sable M_f .

Comme le module de finesse du sable vaut 3,19, la valeur de K_s est calculée par la formule suivant : $K_s = 6M_f - 15 = 4,14$.

K_p : Coefficient de pompabilité, en peut prendre en générale $K_p = + 5\%$ à 10% .

Notre béton n'est pas de qualité pompable d'où $K_p = 0$.

D'où $Y = 50 - \sqrt{16} + 0 + 4,14 + 0 = 50,14$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure **A** sont : [8 ; 50,14].

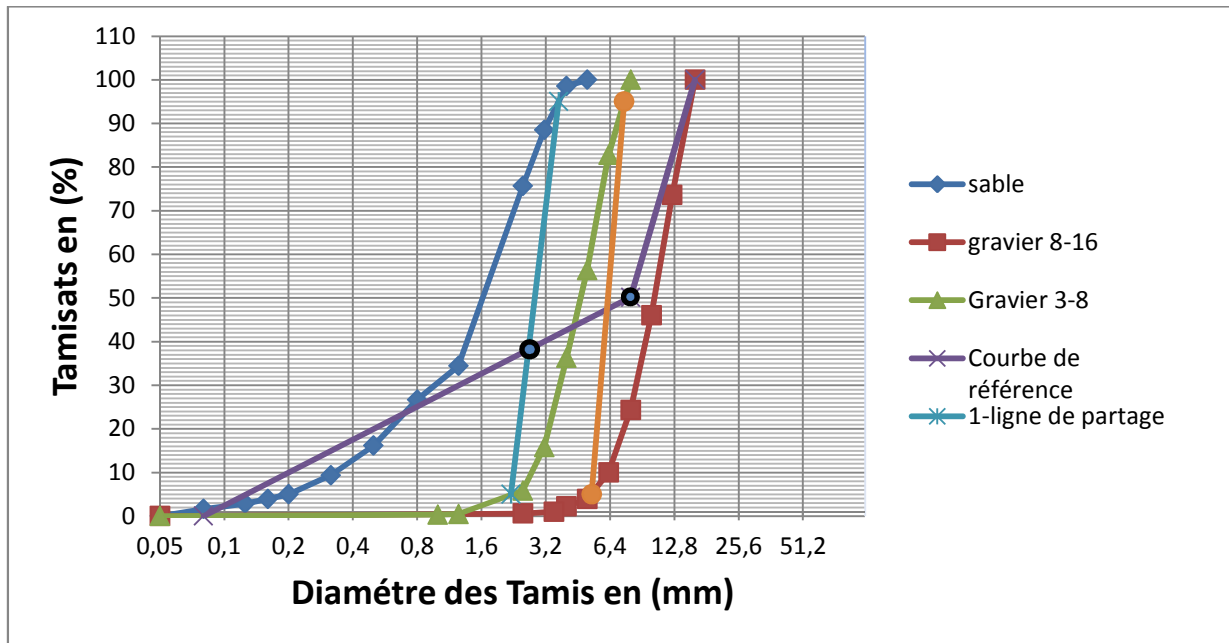


Figure I-7 : Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les lignes de partage.

-Les lignes de partage :

Les droites jointant la point à 95% (tamisât) d'un granulat au point à 5% du granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées **lignes de partage**. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successives. Il s'agit de pourcentages en volumes 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) : 38.5%

Gravier (3/8) : 47% - 38.5% = 8.5%

Gravier (8/16) : 53%

-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 total du béton frais soit un mètre cube : $\delta = \frac{V_M}{1000}$

En utilisant le tableau 10 des valeurs du coefficient de compacité [2], et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats à 16 mm, on trouve une valeur de $\delta = 0,820$.

D'où $V_M = V_g + V_c = 0,820 \times 1000 = 820\text{l}$.

- **Dosage des granulats :**

Les dosages en volumes de chacun constituant du béton sont donnés par les relations ci-dessous :

✚ **Volume absolu du ciment :** $V_c = \frac{m_c}{\gamma} = \frac{400}{3,1} = 129,03 \text{ l}$.

Avec m_c : Dosage en ciment (en masse).

γ : Masse volumique du ciment.

✚ **Volume absolu des granulats (l'ensemble) :**

$$V_g = 1000 \delta - V_c = 820 - 129,03 = 691.$$

✚ **Volume absolu du sable :**

$$V_s = \frac{V_g \times 38,5}{100} = \frac{691 \times 38,5}{100} = 266,035 \text{ l}$$

✚ **Volume absolu du gravier 3/8 :**

$$V_{G\ 3/8} = \frac{V_g \times 8.5}{100} = \frac{691 \times 8.5}{100} = 58,74 \text{ l}$$

✚ **Volume absolu du gravier 8/16 :**

$$V_{G\ 8/16} = \frac{V_g \times 53}{100} = \frac{691 \times 53}{100} = 366,23 \text{ l}$$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1m³ de béton sont donnés par :

✚ **Masse de sable :** $M_S = V_S \times \gamma_S = 692 \text{ kg}$

✚ **Masse de gravier 3/8 :** $M_{G\ 3/8} = V_{G\ 3/8} \times \gamma_{G\ 3/8} = 147 \text{ kg}$

✚ **Masse de gravier 8/16 :** $M_{G\ 8/16} = V_{G\ 8/16} \times \gamma_{G\ 8/16} = 916 \text{ kg}$

Le tableau I.13 suivant résume le calcul des proportions de chaque constituant pour le béton vibré (témoin).

	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	Ciment	E/C
Volume (l/m ³)	266,035	58,74	366,23	194	129,03	1,504
Poids (Kg/m ³)	692	147	916	194	400	0,485

Tableau I-13 : Composition volumique et pondéral du béton vibré pour 1m³.

I-4-2 Formulation des bétons autoplaçants :

Contrairement à la formulation du béton ordinaire témoin, pour la formulation du béton autoplaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée [13], [41].

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m^3 de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- Un rapport G/S = 1.
- Un rapport E/C = 0.485.
- Un dosage en ciment de $400\text{kg}/\text{m}^3$.
- Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 5%.
- Un pourcentage déterminé en ajouts (superplastifiant, poudre de marbre, déchet de brique, tuf).

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à $400\text{ kg}/\text{m}^3$, ainsi le rapport E/C à 0,485 pour tous les bétons testés.

On a fixé le rapport G/S = 1 pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier, ainsi pour diminuer la quantité des gros granulats dans le but d'éviter le risque de blocage, se qui explique la diminution du rapport G/S de 1,5 à 1 par rapport au béton vibré.

I-4-2-1 Formulation du béton autoplaçant (BAP1) avec la poudre de marbre:

Dans 1m^3 de béton on a les constituants suivants :

Si on prend un dosage en poudre de marbre de 50 % C on a :

$$\text{PM} = 50\% \text{ C} = 200 \text{ kg} / \text{m}^3 = (200 / 2.64) = 75.75 \text{ l} / \text{m}^3 .$$

$$\text{Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (PM) = 1000\text{l}}$$

Avec:

- $A = 5 \text{ l}/\text{m}^3$.
- $E/C = 0,485$ avec $C = 400 \text{ kg} / \text{m}^3 = (400/3,1) = 129.03 \text{ l}/\text{m}^3$.

On a donc $E = 194 \text{ l}/\text{m}^3$.

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 194 - 5 - 75.75$

$$G + S = 596.22 \text{ l}/\text{m}^3$$

Puisque on a fixé $G/S=1$ donc $G=S$
 $G=S=596.22/2=298.11 \text{ l/m}^3$.

On utilise $1/3$ de gravier $(3/8) = 99.37 \text{ l/m}^3$
 $2/3$ de gravier $(8/16) = 198.74 \text{ l/m}^3$

Le dosage en super plastifiant est de 1.4 % de C.

Le tableau I.14 suivant résume le calcul pour le BAP 1.

Composants	Composants(l/m^3)	Densité absolue	Composants (kg/m^3)
Ciment	129.03	3.1	400
Poudre de marbre	75.75	2.64	200
Sable (0/3)	298.11	2.6	775.09
Gravier (3/8)	99.37	2.5	248.42
Gravier (8/16)	198.74	2.5	496.85
Eau	194	1	194
Super plastifiant	4.67	1.2	5.6

Tableau I-14 : Composition du béton autoplaçant avec ajout de la poudre de marbre.

I-4-2-2 Formulation du béton autoplaçant (BAP2) avec le Tuf:

Dans 1m^3 de béton on a les constituants suivants :

Si on prend un dosage en Tuf de 50 % C on a :

$$\text{Tuffe} = 50\% \text{ C} = 200 \text{ kg /m}^3 = (200 /2.53) = 79.05 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) +ajout (Tuf) = 1000l}$$

Avec:

- $A = 5 \text{ l/m}^3$.
- $E/C = 0,485$ avec $C = 400 \text{ kg /m}^3 = (400/3,1) = 129.03 \text{ l/m}^3$.

On a donc $E = 194 \text{ l/m}^3$.

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 129.03 - 194 - 5 - 79.05$$

$$G + S = 592.92 \text{ l/m}^3$$

Puisque on a fixé $G/S=1$ donc $G=S$

$$G=S=592.92/2=296.46 \text{ l/m}^3$$

On utilise 1/3 de gravier (3/8) = 98.82 l/m³

$$2/3 \text{ de gravier (8/16) } = 197.64 \text{ l/m}^3$$

Le dosage en super plastifiant est de 1.4 % de C.

Le tableau I.15 suivant résume le calcul pour le BAP 2.

Composants	Composants(l/m ³)	Densité absolue	Composants (kg/m ³)
Ciment	129.03	3.1	400
Tuf	79.05	2.53	200
Sable (0/3)	296.46	2.6	770.8
Gravier (3/8)	98.82	2.5	247.05
Gravier (8/16)	197.64	2.5	494.1
Eau	194	1	194
Super plastifiant	4.67	1.2	5.6

Tableau I-15 : Composition du béton autoplaçant avec ajout de Tuf.

I-4-2-3 Formulation du béton autoplaçant (BAP3) avec le déchet de brique:

Dans 1m³ de béton on a les constituants suivants :

Si on prend un dosage en poudre de marbre de 10 % C on a :

$$DB = 10\% C = 40 \text{ kg /m}^3 = (40 / 2.51) = 15.94 \text{ l/m}^3 .$$

$$\text{Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) + ajout (DB) = 1000l}$$

Avec:

- $A = 5 \text{ l/m}^3$.
- $E/C = 0,485$ avec $C = 400 \text{ kg /m}^3 = (400/3,1) = 129.03 \text{ l/m}^3$.

On a donc $E = 194 \text{ l/m}^3$.

On obtient alors $G + S = 1000 - 129.03 - 194 - 5 - 15.94$

$$G + S = 656.03 \text{ l/m}^3$$

Puisque on a fixé $G/S=1$ donc $G=S$

$$G=S= 656.03/2=328.015 \text{ l/m}^3.$$

On utilise 2/3 de gravier (3/8) = 218.68 l/m³

1/3de gravier (8/16) = 109.34 l/m³

Le dosage en super plastifiant est de 1.4 % de C.

Le tableau I.16 suivant résume le calcul pour le BAP 3.

Composants	Composants(l/m ³)	Densité absolue	Composants (kg/m ³)
Ciment	129.03	3.1	400
Déchets de brique	15.94	2.51	40
Sable (0/3)	328.015	2.6	852.84
Gravier (3/8)	218.68	2.5	546.7
Gravier (8/16)	109.34	2.5	273.35
Eau	194	1	194
Super plastifiant	4.67	1.2	5.6

Tableau I-16 : Composition du béton autoplacant avec ajout de déchet de brique.

- Les compositions des différents bétons sont résumées dans le tableau ci dessous :

Composants (Kg/m ³)	BV	BAP 1	BAP2	BAP3
Ciment	400	400	400	400
Sable (0/3)	692	775.09	770.8	852.84
Gravier (3/8)	147	248.42	247.05	546.7
Gravier (8/16)	916	496.85	494.1	273.35
Eau	194	194	194	194
Superplastifiant	/	5.6	5.6	5.6
Poudre de marbre	/	200	/	/
Déchets de brique	/	/	/	40
Tuf	/	/	200	/

Tableau I-17 : Composition des différents bétons pour 1 m³.

II : Expérimentation et Exploitation

II-1 Introduction :

Les objectifs de cette étude expérimentale ont été d'une part de développer une formulation pour les bétons autoplaçants, et d'autre part de caractériser leurs performances mécaniques à partir d'essais sur éprouvettes, ceci permet de les valider en tant que BAP et d'évaluer leur aptitude à remplacer les bétons traditionnels vibrés.

Pour notre étude on s'intéresse seulement à l'essai de traction directe car il est le plus préconisé pour caractériser le comportement d'un matériau sous un effort longitudinal de traction. Cependant, la complexité de la réalisation d'un essai de traction directe sur des éprouvettes en béton fait que cet essai est souvent remplacé par un essai de fendage ou de traction par flexion.

Pour cela nous avons choisi de faire varier quelques paramètres tels que la nature des fines (fillers de marbre, déchets de brique, tuf) pour un même type de matériau et un dosage en ciment constant. Le dosage en eau n'a pas été modifié lors de l'élaboration des BAP.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton ordinaire élaboré avec les mêmes constituants. Les essais ont été réalisés au laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures en Génie Civil de TIZI OUZOU.

Les bétons ont été élaborés avec les mêmes granulats :

- Gravier concassé (lavé) de classe : 3/8 et 8/16
- Sable concassé (lavé) de classe : 0/3
- Ciment CPJ 42.5 R

- **Les ajouts utilisés :**

- Les fillers de marbre ;
- Les déchets de brique ;
- Le tuf ;
- MEDAPLAST, fourni par l'entreprise GRANITEX.

- **Paramètres à varier :**

- Ajout minéral (fillers de marbre, déchets de brique, tuf).

- **Bétons élaborés :**

- Béton vibré (témoin).
- Un BAP1 avec ajout de la poudre de marbre avec un dosage en super plastifiant de 1,4 %C, avec E/C = 0,485.
- Un BAP2 avec ajout de tuf avec un dosage en super plastifiant de 1,4 %C, avec E/C = 0,485.
- Un BAP3 avec ajout des déchets de brique avec un dosage en super plastifiant de 1,4 %C, avec E/C = 0,485.

Les essais effectués sur chacun de ces bétons à l'état frais et à l'état durci ont permis de montrer l'influence de :

- La présence d'un ajout minéral.
- La nature de l'ajout minéral.

Chaque composition est mesurée sur :

- **béton frais :**

- Essai de l'étalement et de l'affaissement ;
- Essai de la boîte en L ;

-Essai de la stabilité.

- **béton durci :**

-12 éprouvettes de dimension $(15 \times 15 \times 30) \text{cm}^3$, soit 3 pour chaque type de béton, pour l'essai de traction directe à 28 jours.

II-2 Confection des bétons

II-2 -1 Préparation de la gâchée :

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 60 litres (voir figure II-1).



Figure II-1 : Malaxeur utilisé

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour l'essai de la traction. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, filler) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais à l'état frais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes avec délicatesse afin d'homogénéiser le béton, en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplçant (Voir figure II- 2). et les vibrer à l'aide de la table vibrante pour le béton ordinaire (à faible amplitude) pour évacuer les bulles d'air et d'éviter les cavités dans le béton frais.

Le temps de malaxage suivant la norme NFP18-404 est :

- mélange à sec lors de l'introduction du ciment, granulat, filler pendant 120 secondes. Ensuite la solution de l'eau + super plastifiant, le tout malaxé encore pour 120s.

II-2 -2 Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h.

Une fois démoulées, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau sous chiffons maintenus humidifiés pour garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment à une température de 20°C.



Figure II-2: Moules graissés à l'aide d'une huile, remplissage des moules, apparence des éprouvettes après le décoffrage.

II-3 Essais expérimentaux :

II-3-1 Essais sur béton frais

La caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [11], à savoir l'étalement au cône, l'écoulement à la boîte en \square L \square et la stabilité au tamis.

II-3-1-1 L'étalement/l'affaissement :

Cet essai est habituellement effectué pour le béton vibré dans le but de déterminer sa consistance par mesure de l'affaissement, c'est ce qui a été fait pour le béton témoin. Pour un BAP cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton (figure II.3) après soulèvement du cône (**mode opératoire en annexe 4**).

Les valeurs cibles de l'étalement sont typiquement dans une fourchette de 60 à 75cm [11].



Figure II-3 : étalement d'un BAP.

II-3-1-2 L'essai de la boîte en □ L □ :

Pour la boîte en □ L □ dont le mode opératoire figure en annexe 4 permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage (Voir figure II- 4).



Figure II.4: boîte en L.

II-3-1-3 L'essai de stabilité au tamis :

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité être monté de la pâte qui est légère (voir figure II- 5). De

plus par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire, soit dans les 15 minutes après la gâchée (l'essai est détaillé en annexe 4).



Figure II.5 : essai de stabilité au tamis

II-3-2 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et discussions :

II-3-2-1 Résultats de caractérisation à l'état frais

La principale différence, entre un BAP et un béton vibré, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre.

Dans cette partie, on présente les différents résultats obtenus de la caractérisation des quatre bétons testés.

Les résultats obtenus peuvent être sensibles à trois niveaux :

- la variabilité dans les matériaux ;
- La variabilité dans la fabrication des éprouvettes ;
- La variation dans le dispositif.

- **RESULTATS DE CARACTERISATION : Pour les BAP**

Type	Etalement (mm)	La boîte en L dénivelée (%)	Stabilité au tamis (%)	Appréciation visuelle du la galette d'étalement
BAP1 (Poudre de marbre)	640	51	2	Bon
BAP2 (Tuf)	670	78	8	Bon
BAP3 (Déchets de brique)	610	25	5	Bon

Tableau II- 1 : Résultats des propriétés à l'état frais pour les BAP.

- **Pour le béton vibré :**

Type	Affaissement au cône (mm)	Consistance du béton
Béton vibré (témoin)	80	plastique

Tableau II- 2 : Résultats des propriétés à l'état frais pour le béton vibré

II-3-2-2 Discussions des résultats de caractérisation à l'état frais

- **L'étalement des BAP :**

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre 600 et 750 mm selon l'association Française du génie civil [AFGC, 2000].

Les résultats obtenus présentés sur le tableau II-1, montrent que tous nos bétons ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 1 à 2 mm).

De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la pâte cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Nos bétons présentent un bon étalement sans ségrégation, donc ces compositions respectent le critère d'étalement d'un BAP.

Sur la consistance du béton vibré: aucune condition n'avait été fixée au préalable. La classe d'affaissement obtenue est la classe S2 (béton plastique : de 5 à 9 cm d'après la norme NF EN 206-1).

L'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est en fonction de leur dosage et de leur état (inerte ou actif). Les particules fines de l'addition remplissent les vides disponibles entre les particules du béton, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice. Par conséquent la quantité d'eau qui occupe ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité.

Ainsi la poudre de marbre et le tuf améliorent l'étalement (64 cm pour le BAP 1 et 67 cm pour le BAP 2) pour un dosage en superplastifiant de 1.4%C. En effet, certaines additions comme les déchets de brique ont une demande en eau importante, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité (61 cm pour le BAP3) pour un même dosage en superplastifiant.

- **Essai de la boîte en L :**

Les résultats obtenus par l'essai L sont présentés sur le tableau II- 1. Les résultats mesurés donnent des taux de remplissage qui ne s'inscrivent pas dans le

domaine des BAP, alors qu'elle doit être supérieure ou égale à 80 % [AFGC, 2000].

On tient toute fois à signaler que ces résultats restent discutables. La boîte en L utilisée étant métallique, elle présente un état de rouille assez avancé, ce qui a rendu l'écoulement du BAP à l'intérieur assez difficile. En effet, nous avons constaté que une grande partie du béton s'adhérée aux parois intérieures du L-box, alors que, le BAP est sensé avoir un comportement plus de glissement que d'écoulement. Cela se traduirait par des surfaces du L-box plus lisses.

Ce constat nous l'avons déduit de l'incompatibilité étalement et essai du L-box. En effet, les BAP présentent globalement des étalements corrects soit plus de 600 mm, donc écoulement horizontal correcte, alors qu'ils s'écoulent mal au niveau du L box.

- **Essai de la stabilité au tamis**

Tous nos bétons ont présentés une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP (voir tableau II- 1), soit inférieure à 15 % pour tous les BAP validés.

On tient toute fois à signaler que pour les BAP 1, on a relevé une laitance $P < 5$ %, la résistance à la ségrégation est dite « importante ». Lorsque la stabilité au tamis est inférieure à 5 %, il y a lieu d'accorder plus d'attention quand à l'écoulement des bétons dans les éléments fortement ferrailé.

Pour les BAP 2 et 3, une laitance $P < 15\%$, stabilité satisfaisante, béton homogène et stable.

Cette stabilité est assurée d'une part, par l'importante quantité de mortier (sable+ciment) que contient le béton autoplaçant et d'autre part, par la nature de l'addition.

II-3-3 Essais sur béton durci :

- **Essai de traction directe :**

L'essai de traction directe est l'essai le plus représentatif du phénomène de la traction mais, il est entre autre, très délicat à réaliser. L'application directe d'un effort de traction pure, en dehors de toute excentricité, est très difficile car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite. Cet essai, satisfaisant sur le plan théorique, a deux défauts principaux :

Il est assez dispersé dans ces résultats, ceci en raison du sciage des extrémités qui crée un affaiblissement dans ces zones, les ruptures se produisent assez souvent dans la zone du collage.

En dépit du succès de l'emploi de fixations spéciales, il est difficile d'éviter des contraintes secondaires telles que celles induites par les mâchoires ou par des ancrages noyés. La rupture se fait toujours au niveau des extrémités de l'éprouvette.

Les essais de traction directe ont été réalisés au laboratoire sur une presse hydraulique de marque **Ibertest** pilotée par un micro-ordinateur (Figure II.6). Sa capacité maximale est de 200KN, elle est programmée pour les essais de compression et les essais de flexion pour des éprouvettes en béton. Afin de réaliser des essais de traction directe sur des éprouvettes en béton, il fallu mettre en œuvre un dispositif de fixation des éprouvettes sur les mores de la machine. Ce dispositif (figure II.7) et les moules d'éprouvettes pour l'essai de traction, sont confectionnées au sein de l'atelier (Hall industriel) à « OUED AISSI », de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Les dimensions de ce dispositif ont été choisies en fonction de l'appareillage de la machine Ibertest.



Figure II.6 : Presse hydraulique Ibertest pilotée par un micro-ordinateur



Figure II.7 : Dispositif d'ancrage

- **But de l'essai:**

Le résultat que l'on cherche à tirer de cet essai est l'identification de la résistance à la traction f_t , ainsi trouver les relations entre la traction directe, traction par flexion et par fendage pour le béton vibré et les bétons autoplaçants.

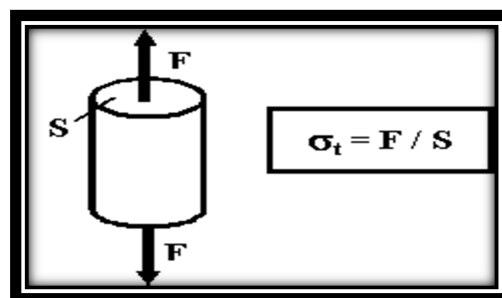


Figure II.8 : essai de traction

- **Principe de l'essai:**

Les éprouvettes à tester sont de forme géométrique prismatique. Le coffrage est en métallique (Figure I.9) de dimension $(15 \times 15 \times 30) \text{cm}^3$. Les éprouvettes réalisées sont soumises à l'essai, vingt huit jours après le coulage.

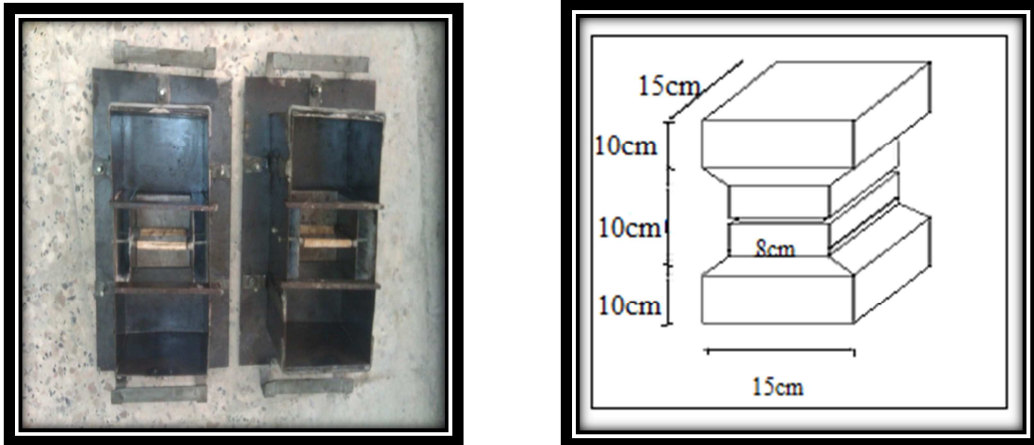
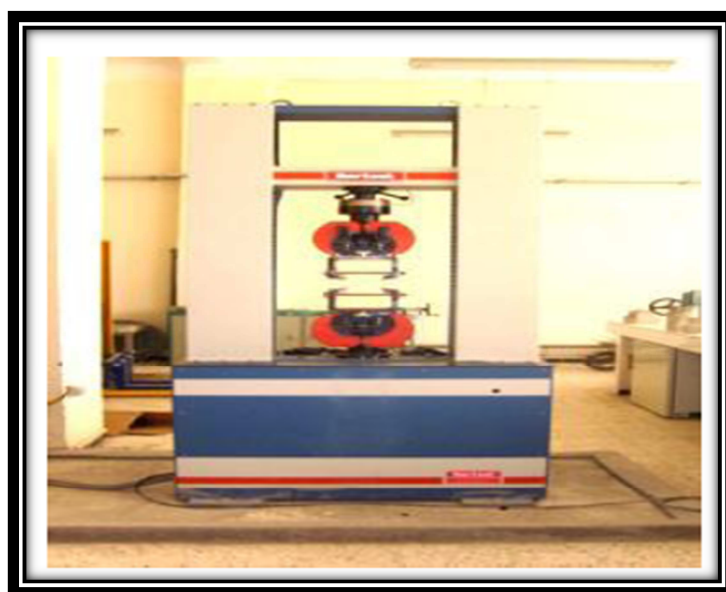


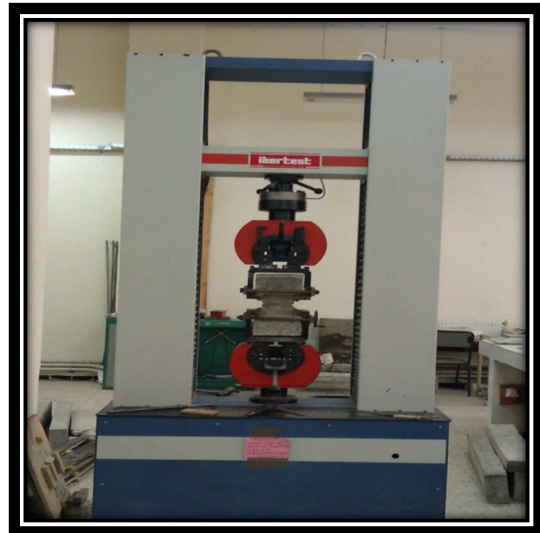
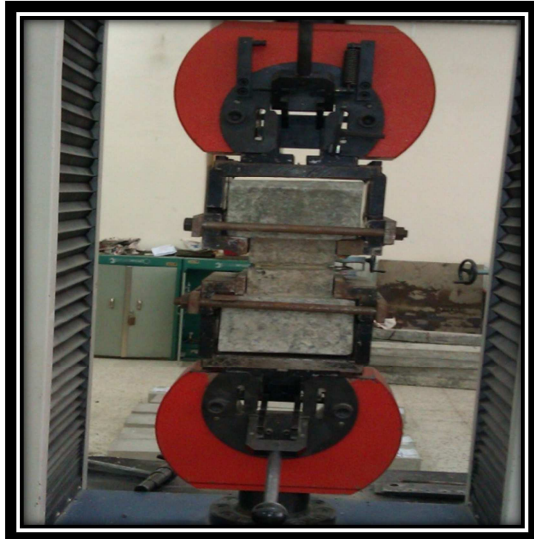
Figure II.9 Forme et dimensions de l'éprouvette de traction directe

L'essai de traction consiste d'abord à caler celle-ci entre deux mores de la presse hydraulique. Le plateau supérieur est mobile ; par contre le plateau inférieur reste fixe.

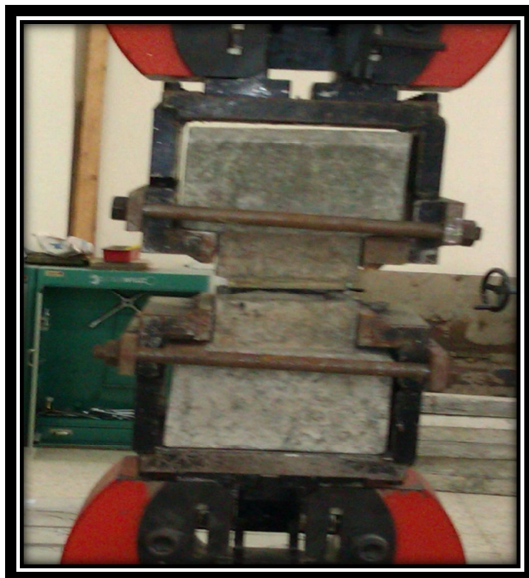
L'effort verticale de traction est appliqué progressivement à vitesse de chargement très lente contrôlée (0.05MPa /seconde) jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Le logiciel Wintest 32 programmé pour cette presse enregistre, pour chaque étape de chargement la valeur de l'effort vertical, ainsi que la déformation correspondante qui sont présentées directement sous forme de graphe et de tableaux force-déformation.



Etape 1 : Calage du dispositif entre les mores de machine Ibertest



Etape 2 : Epreuve soumise en Traction directe.



Etape 2 : Rupture brutale de l'éprouvette.



**Etape 3 : Les surfaces de l'éprouvette après la rupture totale.
« Etapes de l'essai de traction directe »**

II-3-4 Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci et discussions :

II-3-4-1 Résultats de caractérisation à l'état durci :

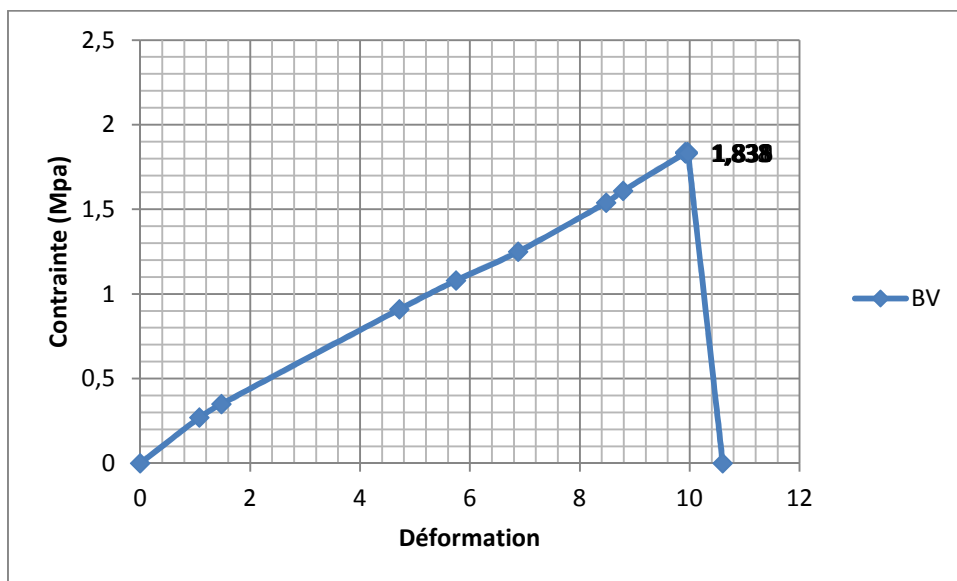


Figure II.10 : Courbe contrainte –déformation pour le béton témoin

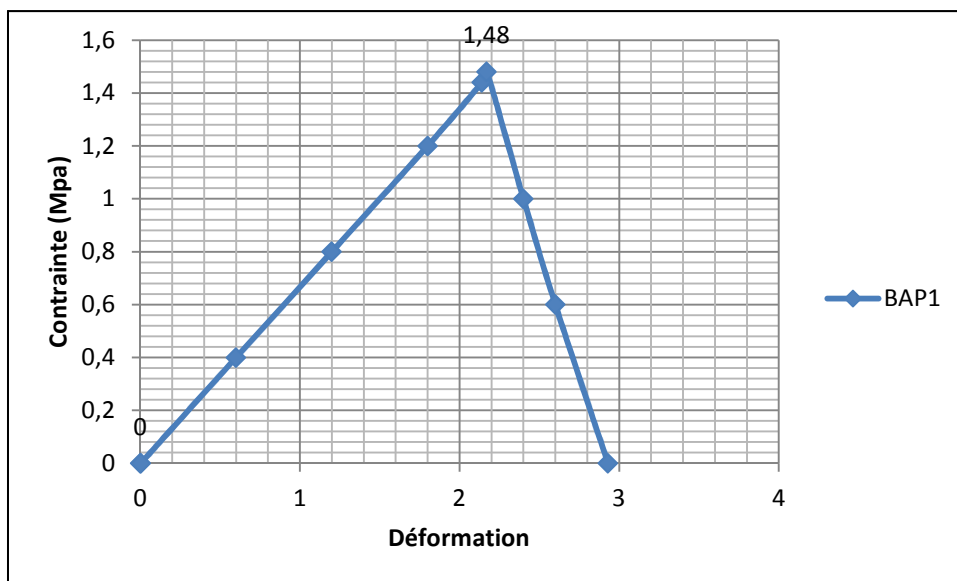


Figure II.11 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP1

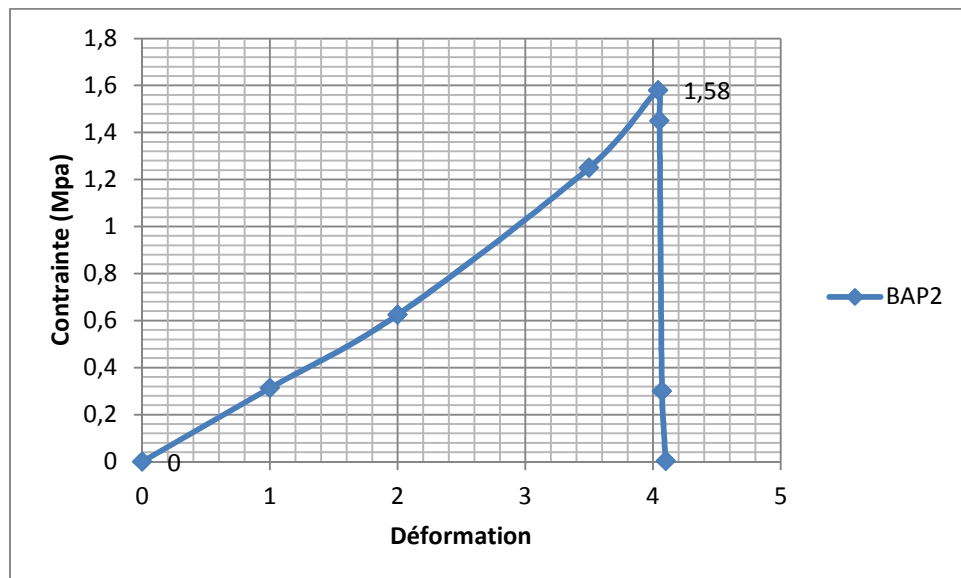


Figure II.12 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP2

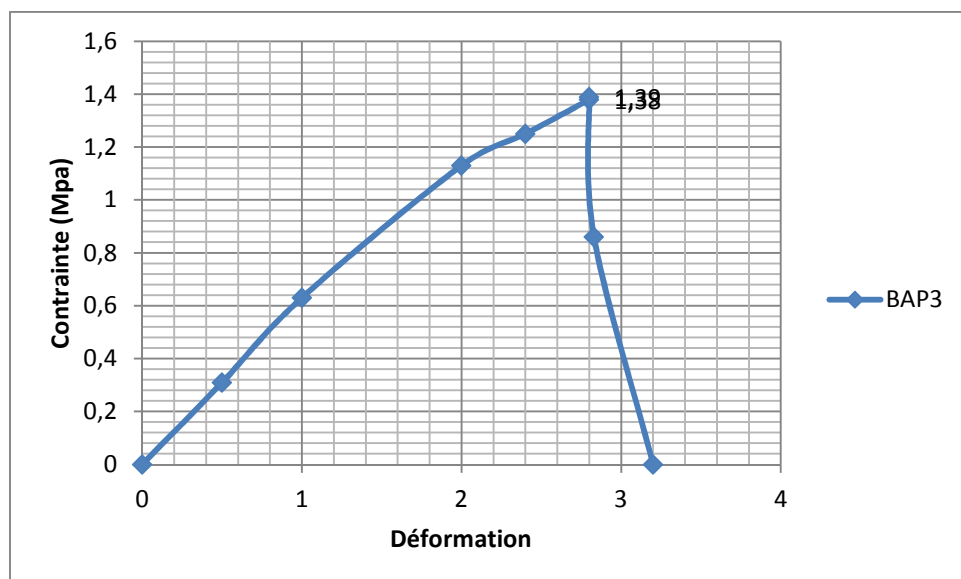


Figure II.13 : Courbe contrainte –déformation pour le BAP3

- **Interprétation de la courbe contrainte-déformation en traction directe :**

Sur les courbes contraintes-déformations du BV et des BAP (Figure II.10, 11, 12,13) montrent que le comportement en traction directe du BAP.1, 2,3 présente une allure similaire à celle d'un béton vibré.

On peut distinguer deux phases de comportement :

- **Le comportement pré-pic** : qui se caractérise par le processus de propagation de microfissures avant la formation d'un système de fissures continues au droit de la section critique au pic. Le comportement avant pic du BV et des BAP en traction directe dévie de la linéarité quand la propagation des microfissures a déjà commencé.
- **Le comportement post-pic** : la courbe caractéristique décroît brusquement en raison d'une évolution rapide de la fissuration et par conséquent la rupture survient plus tôt. Dans ce cas, cette dernière est qualifiée de fragile.

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs des résistances en traction.

	Fcj exp (MPa)	Ftj (MPa)			
		expérimentale	$ftj = 0,6 + 0,06 fcj$	Déduite de la flexion	Déduite du fendage
Béton vibré	26	1.84	2.16	*	1.85
BAP1	35.81	1.48	2.75	2.52	1.87
BAP2	38.27	1.58	2.90	3	2.87
BAP3	36.22	1.39	2.77	2.73	2.03

Tableau II- 3 : Valeurs des résistances pour l'essai de traction.

* : les essais ne sont pas effectués, car le béton est écarté.

- **La relation entre traction et compression :**

La relation réglementaire (règle **BAEL A.2.1, 12**) qui lie la résistance caractéristique à la traction f_{tj} à j jours du béton et sa résistance caractéristique en compression f_{cj} , dans laquelle et sont exprimés en MPa (ou N/mm²). Cette formule est valable pour les valeurs de $f_{cj} \geq 60$ MPa s'écrit :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

- **La relation entre traction directe et traction par flexion et par fendage (EUROCODE 2, page 34 et 35) :**

Lorsqu'il est nécessaire de contrôler la valeur de **la résistance à la traction F_{ct}** , on peut en faire la mesure de manière indirecte :

- **Soit par essai de flexion pure.**
- **Soit par essai de fendage.**

L'essai de résistance à la traction par fendage et par flexion permettent d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

A) Essai de flexion pure d'une éprouvette prismatique a base carrée, non armée:

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction.

$$F_{ct} = 0.6 F_{ct}, f_l = 0.6 \frac{6.M}{a^3}$$

Avec M : moment de rupture,
A : coté de la poutre.

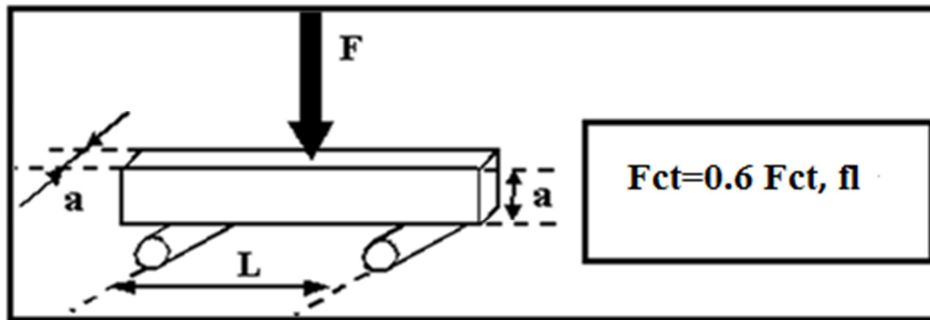


Figure II.14 : Essai de traction par flexion.

B) Essai de fendage diamétral d'une éprouvette cylindrique (□ essai brésilien □ ou « splitting ») :

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

Lors d'un essai de fendage, la partie centrale de l'éprouvette est soumise à la fois à des contraintes de compression et à des contraintes de traction.

Dans ce cas la résistance en traction f_{ct} peut être estimée à partir de celle mesurée $f_{ct,sp}$ par la relation :

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct, sp} = 0,9 \frac{2.P}{\pi d l}$$

(EUROCODE2 relation 3.3 page 35)

Avec d : diamètre de l'éprouvette

l : longueur de l'éprouvette

P : charge de rupture

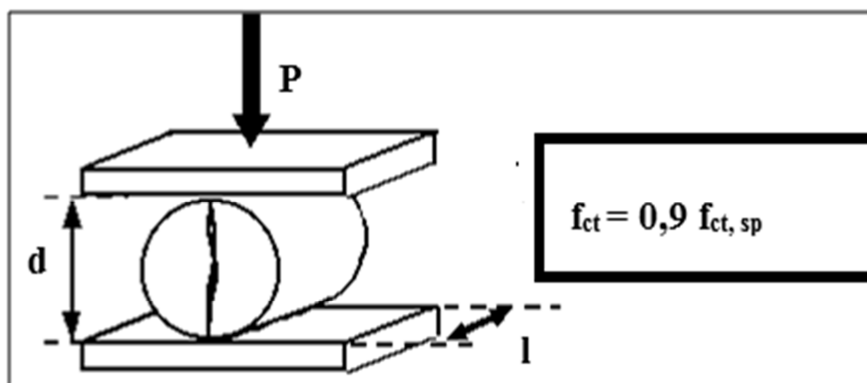


Figure II.15 : Essai de traction par fendage

Les coefficients 0,6 et 0,9 proviennent des comparaisons faites avec des mesures de la résistance par traction directe (délicats à réaliser).

II-3-4-2 Discussion des résultats de résistance des bétons à 28 jours

- **Comparaison de la résistance a la traction directe du BV au BAP1 :**

Les résultats sont représentés sous forme d’histogramme sur la figure suivante (figure II-16).

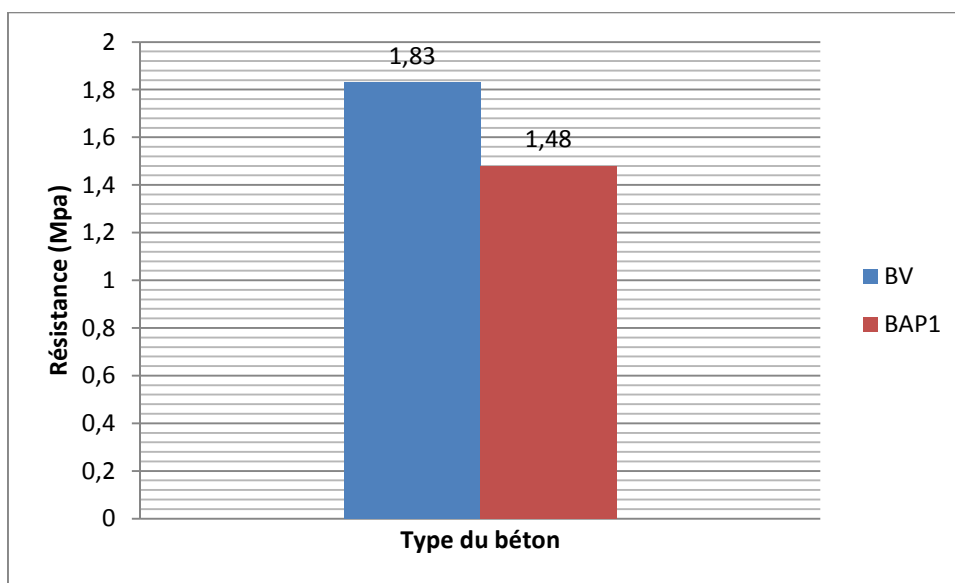


Figure III- 16 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 1

- **Comparaison de la résistance à la traction directe du BV au BAP2 :**

Les résultats sont représentés aussi sous forme d’histogramme sur la figure suivante (figure II-17).

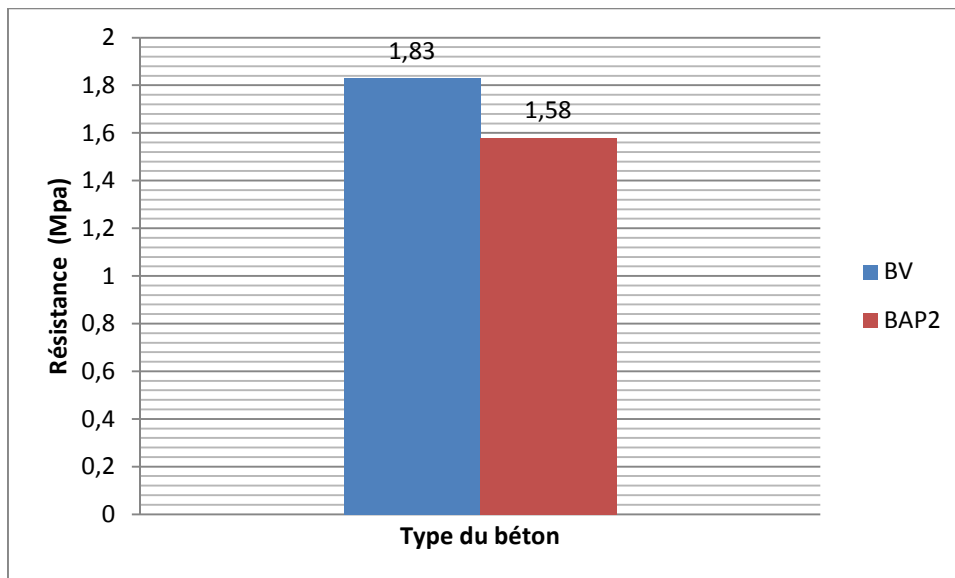


Figure III- 17 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 2

- **Comparaison de la résistance à la traction directe du BV au BAP3 :**

Les résultats sont représentés aussi sous forme d’histogramme sur la figure suivante (figure II-18).

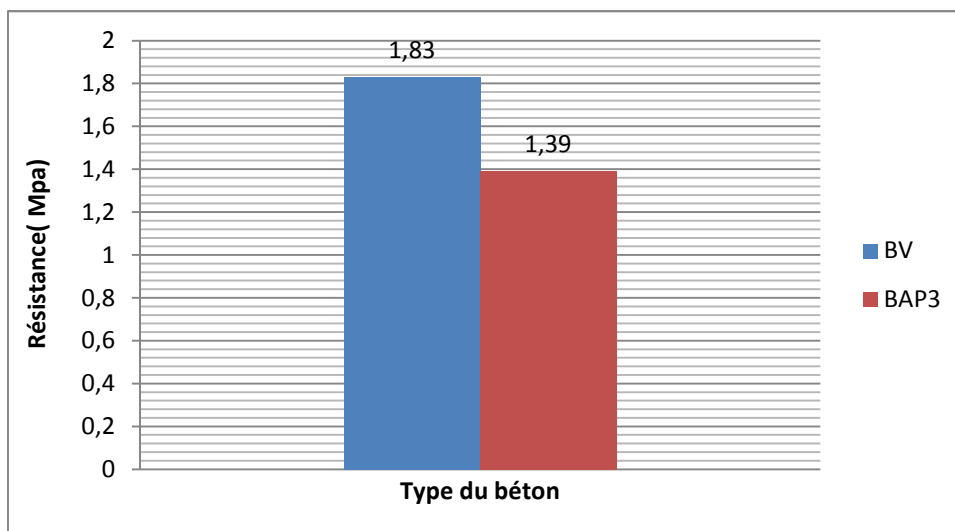


Figure III- 18 : Résistances à la traction directe du BV et de BAP 3

En comparant les résistances mesurées (figures II16, 17,18), on constate que la résistance à la traction directe du BV est légèrement supérieure à celle du BAP1, BAP2, BAP3 malgré que la résistance à la compression du BAP1, 2, 3 est nettement supérieure par rapport a celle du BV. Ceci est dû essentiellement à la teneur en gravillon qui est plus importante dans le cas du BV et à la vibration du béton qui a été faite avec soin. Il faut signaler que les éprouvettes sont de petites dimensions avec un coffrage assez complexe : effet d'échelle !

La résistance en traction par fendage pour chaque type du béton est plus élevée que celle de la résistance en traction directe, il s'explique par un effet d'échelle : dans l'essai de fendage le plan de rupture est imposé par l'essai, alors que dans l'essai de traction directe c'est le plan le plus faible qui va se rompre. Il y a donc plus de chance d'avoir un plan plus faible dans ce dernier essai. On remarque aussi que la résistance en traction par flexion pour chaque type du béton est supérieure par rapport à celle de la résistance en traction directe.

- **Comparaison de la résistance a la traction directe du BAP1 au BAP2 au BAP3:**

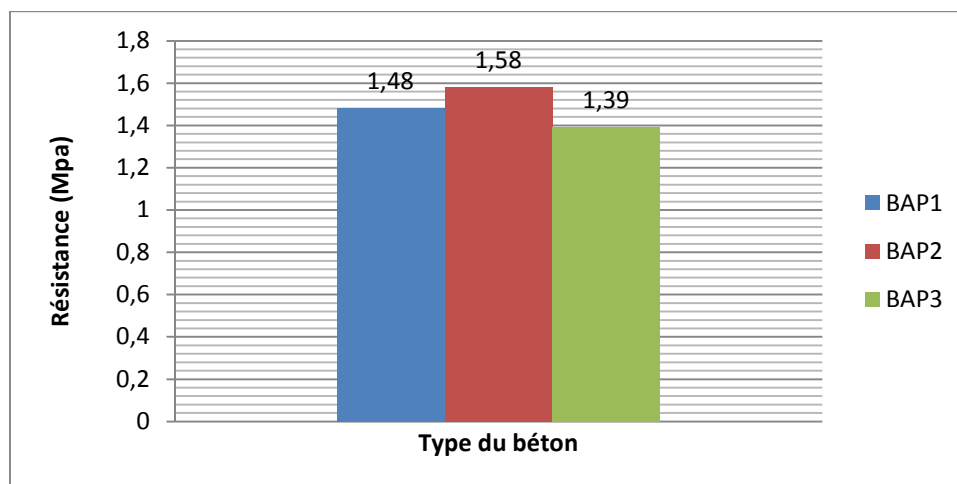


Figure III- 19 : Résistances à la traction directe du BAP1, 2,3

La résistance du BAP 2 est légèrement supérieure à celle du BAP1, 3 (1,58 contre 1,48 et 1,39 MPa) à 28 jours, il s'explique par l'influence de la nature et du dosage de l'addition, donc l'utilisation de TUF dans les BAP comme addition peut avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.

III-Conclusion

Ce projet expérimental a pour objectif de caractériser la résistance des bétons autoplaçants par comparaison avec celle du béton vibré. Pour cela, plusieurs formulations de BAP et de BV ont été mises au point, à partir de matériaux identiques :

Par les résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'introduction du superplastifiant, mais surtout des fines de marbre ou de tuf ou des déchets de brique, nous ont permis de formuler des béton à ouvrabilité conforme à celle de BAP, tout en assurant le compromis entre une bonne fluidité par le superplastifiant et une bonne viscosité par les ajouts.

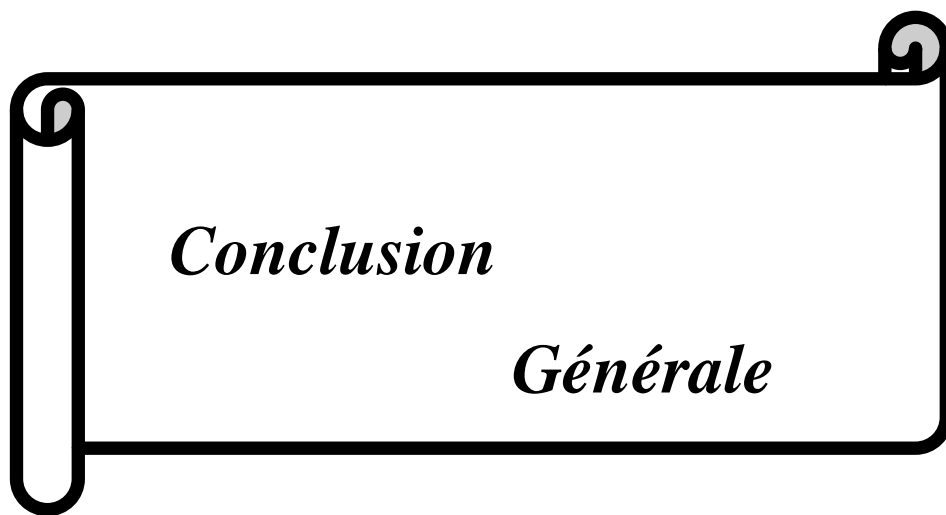
- Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton vibré (ordinaire) qui présente une assez bonne résistance mécanique à la compression ($\approx 26\text{MPa}$) et en traction directe ($\approx 2\text{MPa}$) à 28 jours tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5R et un rapport E/C = 0,485.

- Avec les mêmes matériaux utilisés aussi pour le béton vibré, nous avons formulé des bétons autoplaçants qui présentent des résistances mécaniques nettement supérieure par rapport au béton vibré en compression ($> 30\text{MPa}$), dues essentiellement à la composition des BAP (une forte compacité - adjuvantation, dosage en fines élevé) tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5R avec le même rapport E/C = 0,485.

- Avec les mêmes matériaux utilisés pour le béton vibré, nous avons formulé des bétons autoplaçants qui présentent des résistances mécaniques légèrement inférieure par rapport au béton vibré en traction directe, tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5R avec le même rapport E/C = 0,485. La composition des BAP, et notamment la diminution de la teneur en gravillons, les dimensions des éprouvettes (effet d'échelle) sont probablement une cause de cette diminution.

- Le BAP à base de Tuf présente une résistance en traction directe intéressante on comparaison aux BAP à base de la poudre de marbre et de déchets de brique qui se caractérisent par un même rapport E/C et par la même quantité de ciment, et par le même dosage en superplastifiant.

- Au final, on peut dire que les résistances obtenues en traction directe sur les bétons autoplaçants sont satisfaisants, l'objectif était de fabriquer des BAP de résistance équivalente à celle de BV, ce qui signifie la possibilité d'utiliser ce genre de béton dans le cas des ouvrages courants.



Conclusion

Générale

Conclusion générale

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Leur utilisation est notamment simplifiée par la suppression de la vibration et permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique.

Les objectifs de ce travail étaient donc de donner des réponses claires à trois questions majeures. Ainsi, le premier objectif était d'établir des formulations des BAP. Le deuxième objectif était d'évaluer l'influence des ajouts (poudre de marbre, tuf, déchets de brique) sur le comportement des BAP. Le troisième objectif, est de comparer les performances des BAP, en termes de résistance mécanique, par rapport à un béton ordinaire en particulier en traction directe.

Les formulations de BAP se distinguent par un volume de pâte plus important, l'emploi de superplastifiants. Toutes ces formulations ont été ensuite caractérisées à l'aide d'essais spécifiques pour vérifier leurs aptitudes à être conforme aux recommandations et aux normes concernant les BAP, qui se sont révélés corrects pour la quasi-totalité des formulations.

Notre travail a ainsi donné certaines réponses aux questions qui se posaient au départ de ce projet sur les BAP. Parmi les résultats intéressants de cette étude nous pouvons citer, la comparaison du comportement des bétons autoplaçants et le BV.

Les résultats tirés de nos essais expérimentaux montrent également que les BAP ont des caractéristiques de résistance presque équivalentes à celles des BV en traction directe.

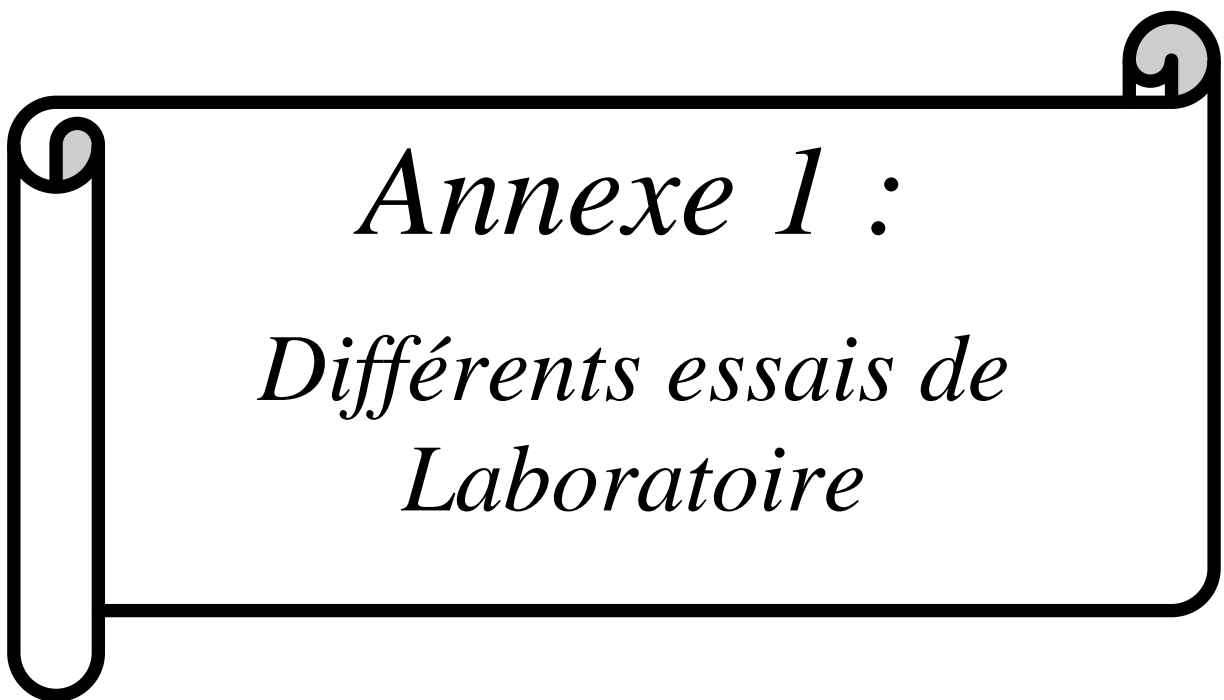
En finalité, les BAP à base de la poudre de marbre, déchets de brique, et de tuf peuvent être considérés à partir des mêmes règles qui s'appliquent aux bétons vibrés, en ce qui concerne leurs comportements mécaniques.

En perspectives, il sera intéressant de reproduire cette étude, en formulant cette fois ci les BAP en faisant une variation de la nature des additions (inertes, réactives) et du dosage en fines, et en superplastifiant.

Bien que ces additions présentent des résultats satisfaisants sous l'essai traction directe, néanmoins, cette étude reste restreinte pour confirmer l'utilisation des ajouts étudiés dans les différents domaines. Il est aussi intéressant, de mener des études en termes de durabilité sur des BAP formulés par ces mêmes additions.



Annexes



Annexe 1 :
Différents essais de
Laboratoire

1. Echantillonnage (NF P 18- 553)

1.2 But et principe de l'échantillonnage :

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement.

Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- b) Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

a. Prélèvement sur tas normaux :

- a) à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.
- b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure1.1**
- c) au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

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

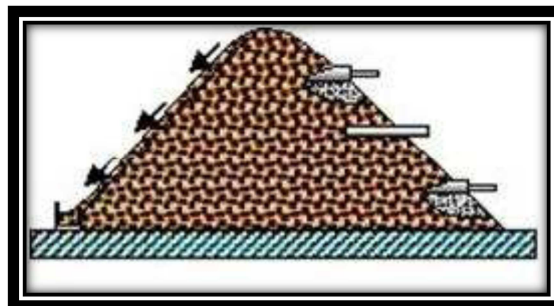


Figure 1.1: le matériau en stock

b. Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) :

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

- Quartage :

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (**figure1.2**): Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres ; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ; Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (**figure1.2**) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

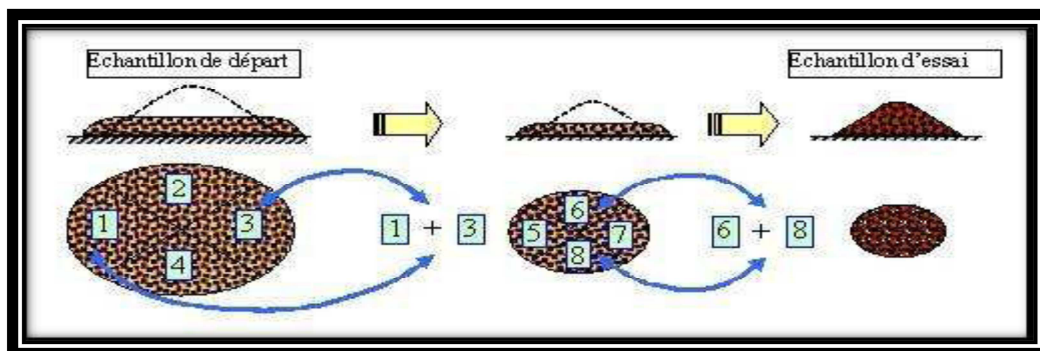


Figure 1.2: Opération de quartage

- Echantillonneur (quarter) :

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons à 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 passée 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 1.3 Echantillonneur pour gravier

Aspects pratiques :

Les pièces typiques d'un système de quartage sont (**Figure 1.3**) :

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions 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 (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3).

Le procédé peut être résumé par la (**figure 1.4**) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse 3m.

Figure 1.4: Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

2. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2) :

2.1 But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale 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 l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'**ouverture** de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison 10/10 (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Tamis (mm)	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.16	0.2	0.25	0.315	0.4	0	0.63
Tamis (mm)	0.80	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	/	/

Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2

2.3 Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M1**). On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063 mm soit claire.

L'échantillon ainsi préparé est alors séché à (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 de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (**tableau 1.1**).

Note : Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

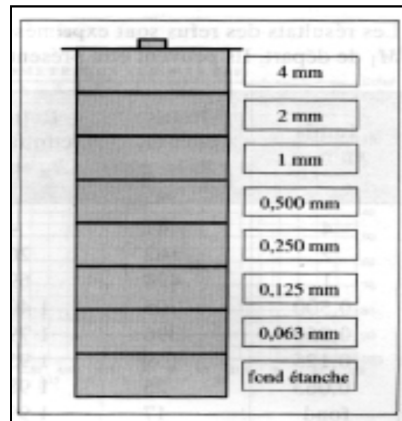


Figure 1.5 : Colonne de tamis

- Préparation de l'échantillon :

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

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

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

M : masse de l'échantillon en kg ;

D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

- Description de l'essai :

Le matériau séché, de masse M_2 , est versé sur une série de tamis choisis de telle 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 fond 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 toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci est vibrée à l'aide de la **tamiseuse électrique**. Le temps de tamisage varie avec le type de 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.

3. Absorption (NF P 18- 555) :

3.1 But de la mesure :

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

3.2 Principe de la mesure :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C.

Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_s = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.

M_a = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

3.3 Conduit de l'essai :

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche.

Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.

On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (Figure 1.6).

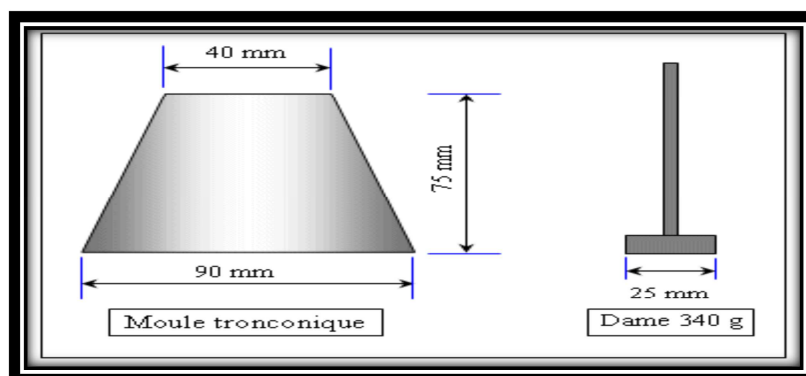


Figure 1. 6: Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers

3.4 Mesure pour les gravillons (NF P 18.554) :

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.

4-Mesure des temps de début et de fin de prise :

4-1 Objectif de l'essai :

Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT (**figure1.7**) équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \mp 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

4-2 Equipement nécessaire:

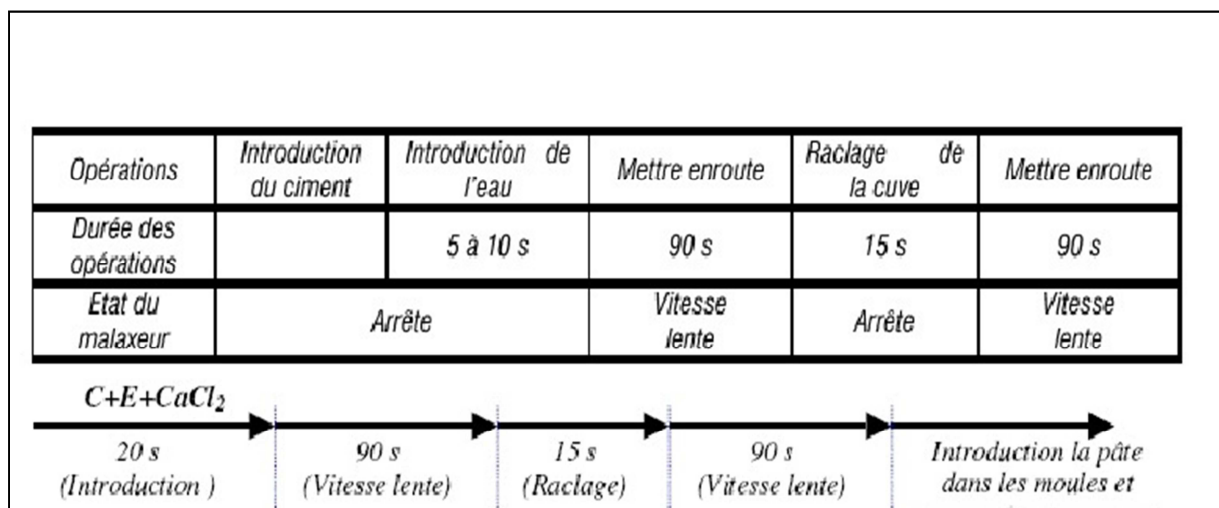
- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Malaxeur normalisé: avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140tr/mn et rapide 285tr/mn).
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

4-3 Conduite de l'essai :

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée: On préparera 2 Kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,26.

Ceci permettra de préparer 5 moules. Pour accélérer les phénomènes, on dissolva dans l'eau de gâchée du chlorure de calcium(CaCl₂) en prenant comme poids de CaCl₂, 2% du poids d'eau calculé pour la gâchée.

On versera l'eau avec l'accélérateur de prise dissous dans la cuve du malaxeur, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres, (Un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).

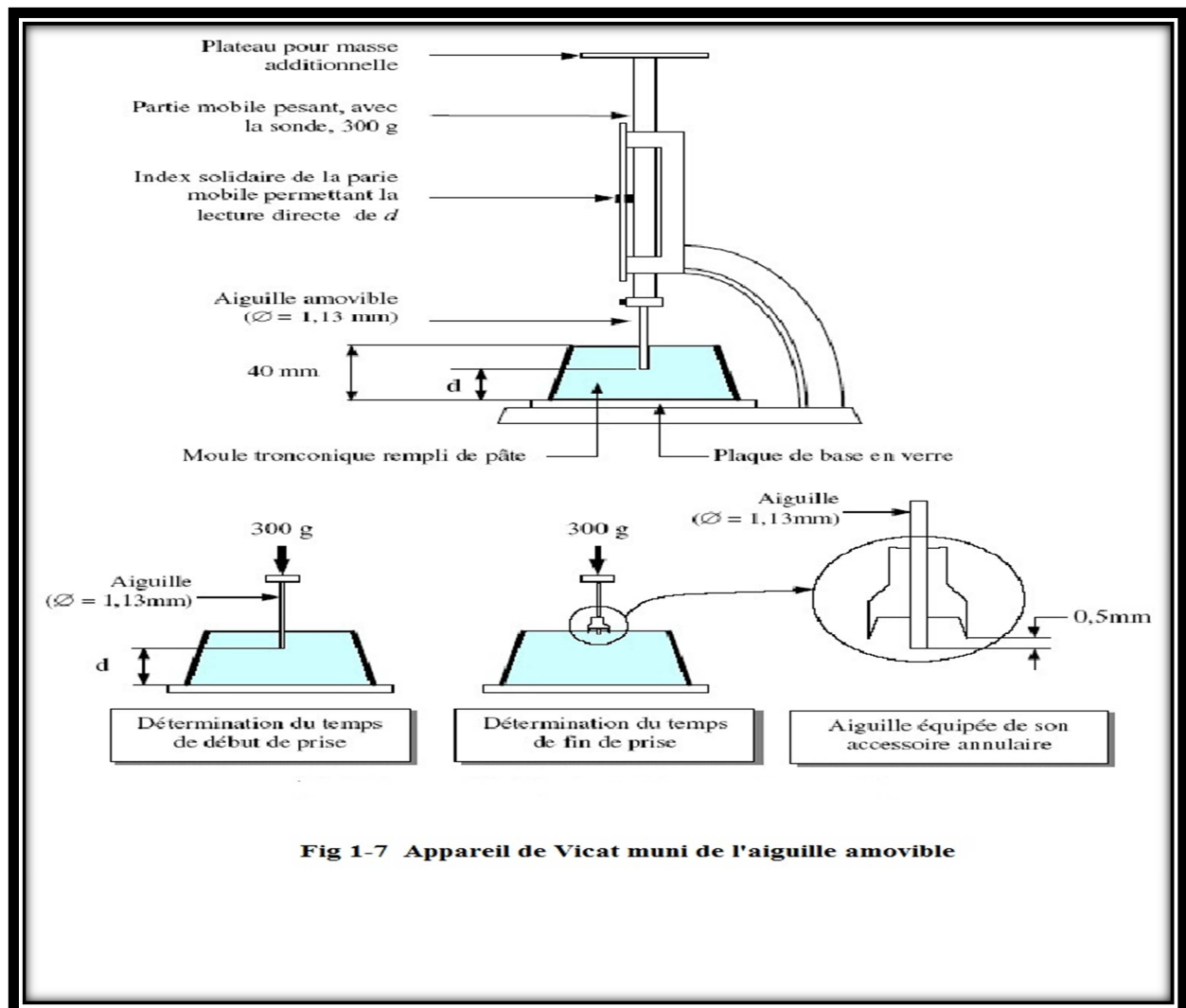


La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat. Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon être lâchée sans élan (sans vitesse).

L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10-15$ mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné (étudié).



5-Mesure la consistance de la pate :

5-1 Objectif de l'essai :

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance.

1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3.

2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NFP-18 358.

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite «CONSISTANCE NORMALISEE ».

5-2 Principe de l'essai :

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT ».

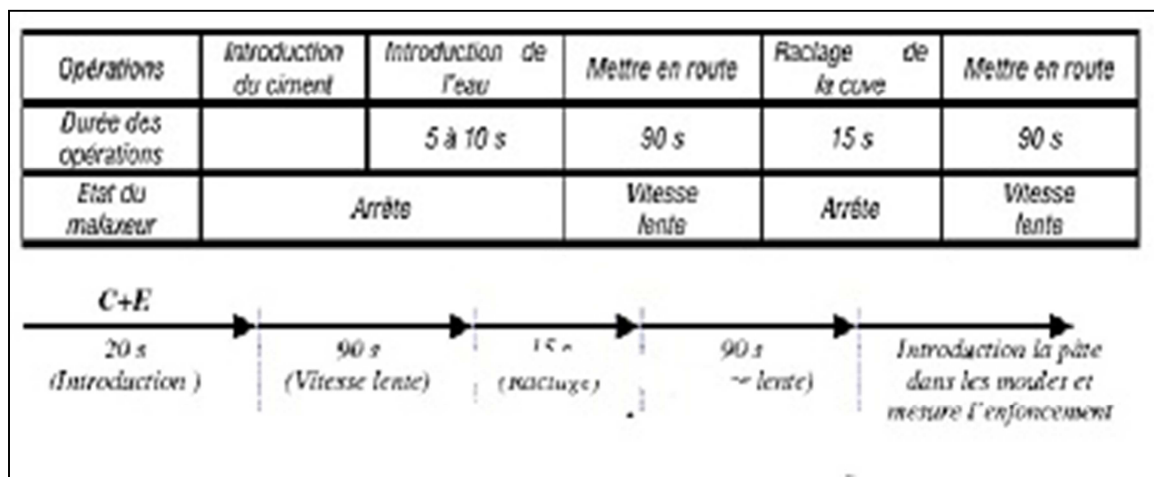
5-3 Equipement nécessaire :

- Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn)
- Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre (**figure 1.8**). La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près.- Une Chronomètre précis à 1 s près.

5-4 Conduite de l'essai :

500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

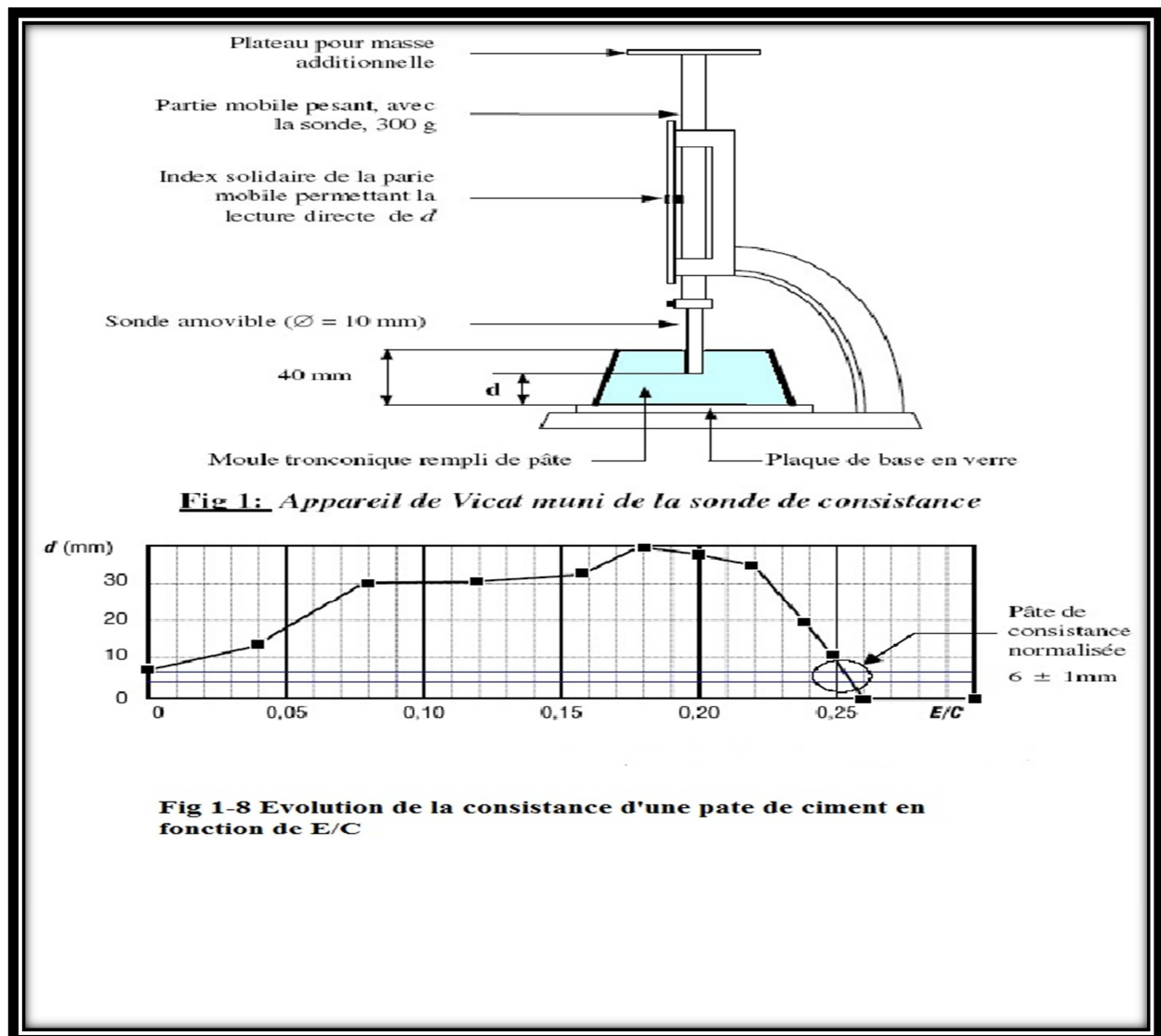


La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat. Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan.

La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

- Si $d = 6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si d n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{ mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.





Annexe 2 :

*Résultats des différents essais
De caractérisation*

1. Analyse granulométrique (résultats de caractérisation expérimentale des granulats) : Dans cette annexe sont présentés les résultats de caractérisation des granulats utilisés pour notre étude.

Matériau : sable 00/03				
Nature	Gravier concassé 00/03			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Date d'analyse	25_12_2011			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			M₁	2000g
Masse sèche après lavage			M₂	1853g
Masse sèche des fines retirées après lavage			M₁- M₁	147g
Passant au 0.063			P	29.8g
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
5	0	0	0	100
4	26.49	26.49	1.43	98.57
3.15	186.97	213.46	11.52	88.48
2.5	237.56	451.02	24.34	75.66
1.25	763.99	1215.01	65.57	34.43
1	0.9286	1215.94	65.62	34.38
0.315	463.62	1679.56	90.64	9.36
0.16	100.43	1779.99	96.06	3.94
0.08	42.99	1822.98	98.38	1.62
fond	29.835	1852.81	99.99	0.01
C : cumulé				
% du tamisât des fines <0,063		(M₁-M₂) +p)*100/M₁		8.84

Matériau : Gravier 03/08				
Nature	Gravier concassé 03/08			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Date d'analyse	25_12_2011			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale			M₁	4000g
Masse sèche après lavage			M₂	3990.5g
Masse sèche des fines retirées après lavage			M₁- M₂	9.5g
Passant au 0.063			P	8.5g
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
16	0	0	0	100
12.5	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	0	0	0	100
6.3	687.96	687.96	17.24	82.76
5	1054.29	1742.25	43.66	56.34
4	802.09	2544.34	63.76	36.24
3.15	815.26	3359.6	84.19	15.81
2.5	397.06	3756.66	94.14	5.86
1.25	213.89	3970.55	99.5	0.5
1	6.78	3977.33	99.67	0.33
fond	8.78	3986.11	99.89	0.11
C : cumulé				
% du tamisât des fines <0,063		$(M_1 - M_2) + p) * 100 / M_1$		0.45

Matériau : Gravier 08/16				
Nature	Gravier concassé 08/16			
Provenance	Carrière de Tizi ouzou			
Date d'analyse	25_12_2011			
Caractérisation faite selon EN 933-1				
Analyse granulométrique				
Procédé utilisé: Lavage par tamisage				
Masse sèche totale	M₁	5000g		
Masse sèche après lavage	M₂	4994g		
Masse sèche des fines retirées après lavage	M₁- M₂	6g		
Passant au 0.063	P	12.5g		
Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus C en (gr)	Refus C en (%)	Tamisât C en (%)
16	0	0	0	100
12.5	1318.91	1318.91	26.41	73.59
10	1375.85	2694.76	53.96	46.04
8	1084.7	3779.46	75.68	24.32
6.3	715.14	4494.6	90	10
5	302.14	4796.74	96.05	3.95
4	87.39	4884.13	97.8	2.2
3.15	58.93	4943.06	98.98	1.02
2.5	20.48	4963.54	99.39	0.61
1.25	10.98	4974.52	99.61	0.39
1	1	4975.52	99.63	0.37
0.08	4.49	4980.01	99.72	0.28
fond	12.5	4992.51	99.97	0.03
C : cumulé				
% du tamisât des fines <0,063		(M₁-M₂) * 100 / M₁	0.37	



Annexe 3 :

Les notices techniques

NOTICE TECHNIQUE

Edition Juillet 2007

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2

Super plastifiant - haut réducteur d'eau**DESCRIPTION**

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

CARACTERISTIQUES

• Forme	Liquide
• Couleur	Marron
• PH	8,2
• Densité	1,20 ± 0,01
• Teneur en chlore	< 1g/L
• Extrait sec	40%

PROPRIETES ET EFFETS

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

DOMAINES D'APPLICATION

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

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0.6 à 2.5% du poids de ciment
soit 0,5 l à 2 l par 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

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 ait été introduite.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg en fûts de 270 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

96



Granitex
فرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz





O.R.G.M
DIRECTION GENERALE

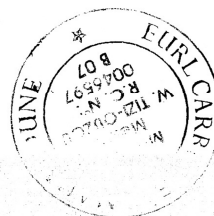
الديوان الوطني للبحث الجيولوجي و المنجمي
Office National de Recherche Géologique et Minière

Etablissement public à caractère industriel et commercial créé par décret n° 92-31 du janvier 1992

DIRECTION DES PROJETS ET REALISATIONS
DIRECTION DES LABORATOIRES ET VALORISATION


RESULTATS DES TRAVAUX DE LABORATOIRE
ETUDE PETROGRAPHIQUE
EURL CARRIEREALMAHAROUNE
Commande N° 01 du 22/01/07

JANVIER 2007



Siège : Cité Ibn Khaldoun - B.P 102 BOUMERDES 35000 - ALGERIE

☎ 213 (24) 81 75 99 - Fax 213 (24) 81 83 79 - Telex 68 467 ORGM DZ - 📧 orgm@wissal.dz

 ORGM	ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE	Edition du 22/01/2007
	Fiche de description pétrographique	ENRG .9875

Client : **EURL Carrière ALMAHAROUNE Tizi Ouzou**
 N° du Bon : 01
 N° commande interne : LB11/07
 Nombre d'échantillons : 01 lame mince

Lame mince N°: LM01

CALCAIRE CRISTALLIN

Structure : Hétérogranoblastique

Texture : massive , vaguement orientée

Composition minéralogique :

Calcite95%
 Micas :
 Muscovite 1%
 Quartz.....4%
 Hydroxydes de fer.....<1%

La roche est caractérisée par la présence abondante de carbonate (calcite). Elle possède une structure hétérogranoblastique formée d'un assemblage de cristaux de calcite légèrement aplatis et disposés suivant une orientation préférentielle.

• **Calcite:**

Elle se présente sous deux formes :

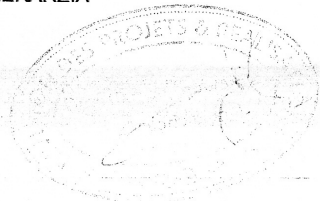
- En grands cristaux, ayant fréquemment une macle de biréfringence de taille variant de 0.3 à > 1mm, constituant en partie la masse de la roche.
- En microcristaux (microgranoblastique) (taille : 0.05- 0.25mm) agglutinés parfois autour des grands cristaux.


• **Micas:**

Très peu abondants, ils sont représentés par quelques fines lamelles de muscovite allongées et rarement groupées. Leur taille est comprise entre 0.1 et 0.3 mm. Ils sont par fois pigmentés par des hydroxydes de fer.

LE DIRECTEUR DES LABORATOIRES ET VALORISATION
 M. MEKARZIA

LE CHEF DE LABORATOIRE PETRO MINERALOGIE
 N. AOUN



 ORGM	ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE	Date d'envoi :23/01/07
	Résultats d'analyses chimiques	REF : ENRG 9876

CLIENT : EURL CARRIERE ALMAHAROUNE
BON DE COMMANDE N° 01/07
NATURE DES ECHANTILLONS : MINERAIS
NOMBRE D' ECHANTILLONS : 03
N°LB 11/07

RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES

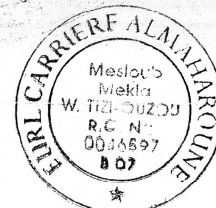
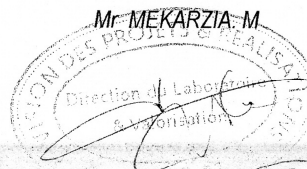
N° D'ordre	N° D'échantillon	Analyse des éléments majeurs (%)										
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	PAF
1	03 sable rouge	70.78	13.50	3.83	0.84	0.27	2.58	5.49	0.12	0.02	0.28	1.60
2	01 sable blanc	6.51	1.11	0.93	50.75	0.93	0.21	0.22	<0.05	0.02	0.08	39.04
3	01	2.90	0.11	0.44	52.84	1.00	0.32	<0.05	<0.05	0.01	0.07	41.96


Chef de Laboratoire

Mme SEDDIKI.Z

Le Directeur des Laboratoires et Valorisation

Mr MEKARZIA.M



 ORGM	ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE	Edition 17/01/2007
	Résultats d'analyses et essais sur monolithe et sables	Ref : ENGR 9873

Direction des Projets et Réalisations
 Direction des Laboratoires et Valorisation
 Laboratoire de Géotechnique

Client	EURL CARRIERE ALMAHAROUNE
N° commande	SANS
N° interne	LB 11/07
Nombre d'échantillon.	03
Date de réception	17/01/2007


Introduction :

- Les échantillons ont été reçus sous forme de : un monolithe et deux sables.
- On n'a pas pu prélevé d'éprouvettes pour l'essai de traction vu les dimensions insuffisantes du monolithe.
- Après réduction à la masse, le monolithe a été passé dans un concasseur à mâchoires d'ouverture 50 mm.
- Les fractions non testées dans l'essai Los Angles n'ont pas atteint les poids normalisés.
- Les essais ont été exécutés selon les normes suivantes :
 1. Masse volumique, absorption et porosité NF EN 1097-6 : 2001
 2. Masse spécifique NF EN 1097-7 : 1999
 3. Prélèvement et écrasement d'éprouvettes Norme GOST
 4. Micro Deval NF P 18- 572 : 1978
 5. Los Angles NF P 18- 573 : 1978
 6. Taux des grains lamellaires Mode opératoire
 7. Particules argileuses Mode opératoire
 8. Module de finesse (Granulométrie) NF EN 933-1 : 1999



DPR – DLV – Laboratoire de Géotechnique. Tel : 024 81 77 94, Fax : 024 81 13 39

1/3


 ORGM	ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE	Edition 17/01/2007
	Résultats d'analyses et essais sur monolithe et sables	Ref : ENGR 9873

Résultats d'analyses

Monolithe

N° d'ordre	Masse volumique g/cm ³	Masse spécifique g/cm ³	Porosité %	Absorption, %	Résistance à la compression, Kg/cm ²	
					Sec	Humide
01	2,66	2,70	1,58	0,20	566	//
02	2,69		0,39	0,19	482	//
03	2,69		0,23	0,19	380	//
04	//		//	//	//	471
05	//		//	//	//	509
06	//		//	//	//	409
Moyenne	2,68			0,73	0,19	476
Coefficient de ramollissement			0,97			
Particules argileuses, %			0,14			
Classe, mm	Lamellaires, %	Los Angles, %	Micro Deval, %			
			MDS	MDE		
16 - 31,5	89.69	60.83	//	//		
10 - 25	86.02	65.60	//	//		
10 - 14	//	//	19.96	45.20		
6,3 - 10	//	//	43.08	58.24		
4 - 6,3	//	//	84.30	82.28		



 ORGM	ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE	Edition 17/01/2007
	Résultats d'analyses et essais sur monolithe et sables	Ref : ENGR 9873

Sables

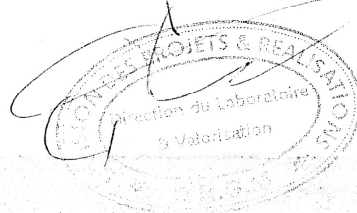
Essai	Echantillon		Sable blanc		Sable rouge	
	Tamis, mm	refus, %	Tamis, mm	refus, %	Tamis, mm	refus, %
Granulométrie	5	//	6.3	18.00	5	11.57
	2.5	0,37	2.5	19,30		
	1.25	19,44	1.25	15,47		
	0.63	29,24	0.63	11,50		
	0.315	22,49	0.315	8,97		
	0.16	12,84	0.16	6,12		
	0.08	7,87	0.08	4,68		
	< 0.08	7,75	< 0.08	4,40		
	Module de finesse	2.25		3.94		
Poids volumique absolue, g/cm ³	2.64		2.53			
Poids volumique apparente, g/cm ³	1.64		1.55			
Absorption, %	3.31		1.86			
Particules argileuses, %	6.40		13.09			

DIRECTEUR DES LABORATOIRES
& VALORISATIONS

Chef de Laboratoire

B. YAHIAOUI

M. MEKARZIA



DPR – DLV – Laboratoire de Géotechnique. Tel : 024 81 77 94, Fax : 024 81 13 39

3/3

FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C3S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C2S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C3A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98





Annexe 4 :

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

1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow) :

1.1 Le but de l'essai : caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

1.2 Matériel nécessaire :

- Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée au moins 90 cm de coté.
- Cône d'Abrams dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- Mètre.

1.3 Mode opératoire :

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal ;
- Humidifier la surface de la plaque ;
- Placer le cône au centre du plateau ;
- Prélever un échantillon représentatif du béton ;
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide ;
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
- Une fois le béton étalé ; mesurer (au centimètre le plus proche) le diamètre de la galette formée (deux mesures diamétralement opposées). Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5 cm, l'essai est invalide et reconduit ;
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues en arrondissant au centimètre supérieur.

2 Essai de stabilité au tamis

2.1 Le but de l'essai : vérification les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation.

2.2 Matériel nécessaire :

- Seau de 10 litres et couvercle ;
- Tamis 5mm diamètre et fond de tamis ;
- Balance de portée minimale 20 kg.

2.3 Mode opératoire :

- Echantillonnage : verser directement 10 litres de béton dans le seau ;
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation ;
- Attendre 15 minutes ;
- Poser le tamis et le fond sur la bascule ;
- Verser au centre du tamis un poids de béton égal à $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$, hauteur de chute du béton $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$;
- Attendre 2 minutes ;
- Faire la tare ;
- Peser le poids de la laitance : **Plaitance = Pfond+laitance - Pfond** ;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

$$\text{Stabilité (\%)} = (\text{Plaitance} \times 100) / \text{Péchantillon}$$

3 Essai de la boîte en L (Capacité de remplissage) :

3.1 Le but de l'essai : Permet de vérifier que la bonne mise en place du béton, sans blocage au voisinage des armatures.

3.2 Matériel nécessaire :

La boîte en L.

Mètre

3.3 Mode opératoire :

- Vérifier que la boîte est sur un plan horizontal ;
- Remplir de béton la partie verticale de la boîte en L ;
- Araser et laisser le béton reposer pendant 1 minute ;
- Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm ;
- Quant le béton se stabilise, on mesure la dénivelée soit les hauteurs H1 et H2. On exprime le rapport **H2 /H1**. Ce rapport doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe de blocage ou de ségrégation.



Références

Bibliographique

Références Bibliographique

- [1]- Gunning J.G," concret technology: level 4 " Longman technician séries;
Const & civil, england, p 293, 1983.
- [2]- Georges Dreux et Jean Festa, " Nouveau guide du béton et de ses
constituants" ; édition Eyrolles 2002.
- [3]- Emile Olivier," Technologie des matériaux de construction" ; Techniciens
de la construction (Tome 1) ; entreprise moderne d'édition, Paris, 1978.
- [4]- M. Rissel Khelifa , " Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité
des bétons autoplaçants", thèse de doctorat, 2009.
- [5]- P.C. Aitcin, " l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les bétons à ultra
hautes performances" presse de l'ENPC, 1992.
- [6]- A.M. Paillere, "Les adjuvants", Le béton hydraulique Presse de ENPC 1982
- [7]- D. L. Kantro, "Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les
propriétés de la pâte de ciment – un slump test miniature", cement and concrete
aggregate, Vol. 2, pp 95-102, 1980.
- [8]- A.R. Kara, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les
résistances mécaniques des mélanges cimentaires", ThD, U Cergy Pontoise,
décembre2002.
- [9]-A.M. Neville, "Propriétés des bétons", Edition Eyrolles 2000.
- [10]- Georges Dreux "Composition des bétons" techniques de l'ingénieur :10
mai 1982.
- [11]-Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants -
Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC:
juillet 2000.
- [12]-CIM béton, Fiches techniques, Tome II " Les bétons : formulation,
fabrication et mise en œuvre " Édition octobre 2006.
- [13]-Okamura.H., Ozawa, K. (1994) "Self compactable high performance
concrete in Japan "ACI International Workshop on high Performance
concrete,Bangkok, Thailand.

[14]-Hayakawa, M., Matsuoka, Y., Yokota, K (1995). "Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan " ACI SP 154 Las Vegas.

[15]-O. Haddad, "Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge ", thèse de doctorat, France, 2007.

[16]-Abib Zinnedine, "Formulation et Caractérisation des bétons autoplaçants ", Thèse de Magister USTHB, Alger, 2004.

[17]-Projet national de recherche CERIB, " béton autoplaçant BAP " France, Octobre2001.

[18]- Christophe Chuche, Dossier technique, " Les bétons autoplaçants ", MBT France.

[19]- Philippe Turcry, " Retrait et fissuration des bétons autoplaçants " Influence de la formulation. Thèse doctorale, université de Nantes (2004).

[20]- Rilem, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications, France, 2001.

[21]- Legrand C., "La structure des suspensions de ciment", chapitre 6 dans le béton hydraulique, presses de l'ENPC, 1982.

[22]- Walraven J., "Structural aspects of self compacting concrete", Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, pp. 85-104, 1998.

[23]- Projet Région "Amélioration des constructions par la maîtrise des BAP" du Conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche "l'homme et sa région", 131 p., 2005.

[24]- Grünewald S., Walraven J.C., "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.

[25]- Nielsson I., Wallewick O.H., "Rheological evaluation of some empiric methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.

- [26]-Utsi S., Emborg M., Carlswärd J., "Relation between workability and rheological parameters", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003.
- [27]-Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P., "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre 2002.
- [28]-Jin, "Properties of mortar for self compacting concrete", PhD Thesis de l'Université de Londres, 2002.
- [29]- M. Ouchi and Y. Edamatsu. "A simple valuation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete" .In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [30] -Loukili A. Turcry P., "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self-compacting concrete", In proceeding of Conference ICPCM A new era of building, 18-20 February 2003.
- [31]- Ozawa K., Maekawa K., Okamura H., "High performance concrete with high filling capacity", Proceedings of RILEM International Symposium on Admixtures for Concrete :Improvement of Properties, Barcelone, pp. 51-, 1990.
- [32]- Okamura H., Maekawa K., Ozawa K., "High performance concrete", First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo, 1993. Cité par [RIL01].
- [33]-Okamura H., Ozawa K., "Mix design method for self-compacting concrete", Proceedings of Japan Society of Civil Engineers 24.8 (496), 1995. Cité par [20].
- [34]- Okamura H., Ouchi M., "Self-compacting high performance concrete", Progress in Structural Engineering and Materials 1, 14, 1998.
- [35]- Petersson O., Billberg P., Van B.K., "A model for self-compacting concrete", Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.
- [36]-Petersson O., Billberg P., "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.

- [37]- Billberg P., "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 80 p., 1999.
- [38]- Ozawa K., Tangtermsirikul S., Maekawa K., "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", Proceedings of the 4th CANMET/AI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turquie, pp. 121-137, 1992.
- [39]-Van B.K., "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994. Cité par [20].
- [40]- Tangtermsirikul S., Van B.K., "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995. Cité par [RIL01].
- [41]- Sedran T., de Larrard F., "Optimization of self compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332, 1999.
- [42]- de Larrard F., Sedran T., "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002.
- [43]-Turcry P., Loukili A., "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques", Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.
- [44]- Proust E., "Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2002.
- [45]-Assié S., "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- [46] -Gibbs J,Zhu.,W., "Strength of hardend Self-Compacting concrete" proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete ,Stockholm, Suède, pp. 199-209, 1999.

[47]- Pera J., Husson S., Guilhot B., "Influence of finely ground limestone on cement hydration", *Cement and Concrete Composites*, 21, 2, pp. 99-105, 1999

[48]-de Larrard F., "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.

[49]- Cim beton, Le béton "Les techniques de mise en place du béton évoluent", *CSTB magazine*, N°109 Novembre 1997.

[50]-JF. Bertin, "Recommandations de mise en œuvre des bétons autoplaçants et des autonivelants", Fédération Française du Bâtiment, SEBTP (Paris), 2003.

[51]- W.Merabet " Modélisation du comportement des poutres après fissuration " « TENSION STIFFENING EFFECT », thèse de Magistre.

[52]-Peterson P.E "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials", Report TVBM-1006; Lund institute of technology, Sweden, 1981.

[53]-Hughes B.P, "The complete stress-strain curve for concrete in tension», *Bulletin de la RILEM*, 30, 95-97, 1966.

[54]-Mazar J, "Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non-linéaire et à la rupture du béton de structure", Thèse de Docteur d'état, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 1984.

[55]- Zhen-Hai G. and Xiu-Qin Z, "Investigation of complete stress-deformation curves for concrete in tension" *ACI Materiel Journal*, July-August, 1987.

[56]-Aldstedt E, "Nonlinear analysis of reinforced concrete frames", report N°75-1, NTH-Trondheim, 177pp.March 1975.

[57]-Mang H.A, Flogl H. "Tension-Stiffening Concept for Reinforced concrete Surface Structures" in *Proceedings of the IABSE (IVBH) Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete* ", IABSE,S.351-370, 1981.

[58]-Flogl H, Mang H.A, "On Tension Stiffening in Cracked Reinforced Concrete Slabs and Shells Considering Geometric and Physical Nonlinearity " *Ingenieur-Archiv*,51, S.215-242,1981.

[59]-Walraven J. C, Reinhardt H. W, Concrete Mechanics, Part A, "Theory and experiments on the mechanical behavior of crack in plain and reinforced subjected to shear loading", Heron,26(1a), 68pp, 1981.

[60]-Groot A.K, Kusters G. M. A, Monnier T, Concrete Mechanics, Part B, "Numerical modeling of bond-slip behaviour", Heron, 26(1b), 90pp 1981.

[61]-Rots J.G, Nauta P, Kusters G.M.A; Blaauwendraad J, "Smearred crack approach and facture localization in concrete ", Heron, 30(1), 48p; 1985.

[62]-Scanlon A, "Time-dependent Deflexion Concrete Slabs", thesis presented to the University of Alberta, at Edmonton, Alberta, Canada, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, in 1971.

[63]- Scanlon A, Murray D.W, "An Analysis to Determine the Effects of Cracking in Reinforced Concrete Slabs" Proceedings of the Speciality Conference on the Finite Element Method in Civil Engineering, Canada, Engineering Institue of Canada, Mc Gill University, Montreal, pp.841-867, 1972.

[64]- Scanlon A, Merray D.W , "Time-dependent reinforced Concrete Slab deflections", A.S.C.E, Journal of Structural Division, VOL 100 N°ST9, pp 1911-1924, September 1974.

[65]-Lin C. S, Scordelis A. C, " Nonlinear analysis of R.C shells of General Form", A.S.C.E , Journal of Structural Division, Vol. 101, N°ST3, pp 532-538, March 1975.

[66]- Grelat A, "Calcul non linéaire des ossatures en béton armé ", Thèse de Docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 1978.

[67]-R. Lanchon : Ingénieur Professeur Technique, Cours de laboratoire ; " Granulats, Bétons et sols " Brevets de Techniciens et Baccalauréats F (Bâtiment et Travaux Publics) Formation Continue, Paris 2004.

[68]- R. Dupain, R. Lanchon, J. C. Saint Arroman, "Granulats, sols, ciments et bétons ", Paris 2004.