

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

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**

*Faculté de Génie de la construction*

*Département de Génie Civil*

*Mémoire de Master Académique*

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : Structure*

*Thème*

***Caractérisation expérimentale des Bétons Autoplaçants en compression***

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

**Réalisé par :**

*M<sup>lle</sup> Meftah Kahina*

**Proposé et dirigé par :**

*Pr. Y. Bouafia*

**Année universitaire : 2011 / 2012**

# Remerciements

*Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer notre travail dans les meilleures conditions.*

*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 MAMMARI, 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.*

*A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce Projet de Fin d'études.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier.*

*Je tiens aussi à remercier ma famille surtout à mes très chers Parents qui ont su être à mes côtés dans les moments difficile sans les quels je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré, fasse Dieu que je puisse les honorés, à tous mes cousin(e)s et mes ami(e)s.*

## Sommaire

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>Introduction générale</b> ..... | 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     |
| <b>III- Quelques modèles de comportement du béton en compression</b>           |        |
| III-1 Introduction .....   | 43     |
| III-2 Béton en compression .....   | 43     |
| III-2-1 Comportement mécanique.....  | 43     |
| III-2-2 Modélisation numérique de comportement du béton en<br>compression..... | 45     |
| III-2-2-1 Les modèles réglementaires.....                                      | 46     |
| III-2-2-2 Les modèles non linéaires .....                                      | 51     |
| <br><b>Conclusion de la partie bibliographique.....</b>                        | <br>62 |

## ***PARTIE2 : ETUDE EXPERIMENTALE***

### **I : Matériaux et formulation**

|  |    |
|--|----|
| I-1 Introduction .....                                 | 64 |
| I-2 Matériaux à utilisés .....                         | 64 |
| I-2-1 Ciment .....                                     | 64 |
| I-2-2 Granulats .....                                  | 65 |
| I-2-3 l'eau de gâchage .....                           | 65 |
| I-2-4 Adjuvant (Superplastifiant) .....                | 65 |
| I-2-5 Ajout minérale .....                             | 66 |
| I-3 Caractérisation des matériaux .....                | 69 |
| I-3-1 Essais sur granulats.....                        | 69 |
| • Echantillonnage (NF P 18-553) .....                  | 69 |
| • Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2) ..... | 69 |
| • Masse volumique apparente et absolue.....            | 70 |

|   |    |
|---|----|
| • Coefficient d'absorption (NF P18-554) .....   | 70 |
| • Module de finesse du sable (NF P18-304) ..... | 71 |
| • Equivalent de sable (NF P18-598).....         | 71 |
| I-3-2 Essais sur le ciment.....                 | 72 |
| • Essai de consistance EN (196-3).....          | 72 |
| • Temps de prise à 20 °C.....                   | 72 |
| I-4 Elaboration des bétons :.....               | 73 |
| I-4-1 formulation de béton ordinaire .....      | 73 |
| I-4-2 Formulation des bétons autoplaçants.....  | 79 |

## **II : Expérimentation et Exploitation**

|   |     |
|---|-----|
| II-1 Introduction .....   | 84  |
| II-2 Confection des bétons .....  | 86  |
| II-2 -1 Préparation de la gâchée .....  | 86  |
| II-2 -2 Conservation des éprouvettes .....                                      | 87  |
| II-3 Essais expérimentaux .....   | 88  |
| II-3-1 Essais sur béton frais .....   | 88  |
| II-3-1-1 Résultats de caractérisation des BAP à l'état frais et discussions..   | 93  |
| II-3-2 Essais sur béton durci.....  | 95  |
| II-3-2-1 Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci et discussions.... |     |
| II-4 :Conclusion de la partie expérimentale.....                                | 105 |

**Conclusion générale.....108**

**Annexes.....111**

**Références bibliographiques.....139**

## 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 chimique et minéralogique du ciment.....     | 65 |
| Tableau I-2  | : Quelques caractéristiques de MEDAPLAST 40.....           | 66 |
| Tableau I-3  | : Composition chimique du déchet de brique broyé .....     | 67 |
| Tableau I-4  | : Quelques caractéristiques de déchet de brique broyé..... | 67 |
| Tableau I-5  | : Quelques caractéristiques de déchet de marbre.....       | 68 |
| Tableau I-6  | : Quelques caractéristiques de Tuf.....                    | 68 |
| Tableau I-7  | : Masse volumique apparente et absolue des granulats.....  | 70 |
| Tableau I-8: | Résultats de l'absorption .....                            | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau I.9: module de finesse du sable.....   | 71  |
| Tableau I.10: valeur de l'équivalent de sable.....   | 72  |
| Tableau I-11 : Le début et la fin de prise.....  | 73  |
| Tableau I-12 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....   | 74  |
| Tableau I-13 : Composition volumique et pondéral du béton vibré .....  | 79  |
| Tableau I-14 Composition du BAP avec ajout de la poudre de marbre.....   | 81  |
| Tableau I-15 Composition du BAP avec ajout de tuf.....   | 82  |
| Tableau I-16 Composition du BAP avec ajout de déchet de brique... ..   | 83  |
| Tableau I-17 Composition des différents bétons pour 1 m <sup>3</sup> .....                                     | 83  |
| <b>II : Expérimentation et Exploitation</b>  |     |
| Tableau II-1: les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.....                                      | 84  |
| Tableau II- 2 : Résultats de l'essai au cône d'Abrams.....   | 89  |
| Tableau II- 3: Essai de la boîte en L.....   | 90  |
| Tableau II-4: Résultats de l'essai de la stabilité.....  | 91  |
| Le tableau II-5: Récapitulatif des résultats d'essais a l'état frais effectué sur différents types de BAP..... | 93  |
| Tableau II-6: Résistance à la compression des bétons étudiés.....  | 97  |
| Tableau II-7 : Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés.....                                    | 99  |
| Tableau II-8 : Récapitulatif des résultats d'essais effectués sur différents bétons étudiés.....               | 100 |

## Liste des figures

### *PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

#### **I : Généralités sur les bétons**

Figure I-1: Composition d'un béton .....4

#### **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  
armatures .....28

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'aéromètre .....33

#### **III- Quelques modèles de comportement du béton**

Figure III-1 : Comportement du béton en compression simple Chen 1982.....44

Figure III-2: Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et  
al 196.....45

Figure III-3 : Loi Parabole-Rectangle du béton en compression BAEL.....47

|   |    |
|---|----|
| Figure III-4 : Diagramme parabole-rectangle du béton en compression<br>EUROCODE2..... | 49 |
| Figure III-5 : Diagramme non linéaire du béton en compression<br>EUROCODE2 .....      | 50 |
| Figure III-6 : Comportement du béton en compression selon<br>Sargin. ....             | 52 |
| Figure III-7 : Comportement du béton en compression selon Popovics.....               | 55 |
| Figure III-8 : Comportement du béton en compression selon Dessayi et<br>Krisnan.....  | 56 |
| Figure III-9 : Loi de comportement du béton en compression, Mac Gregor ...            | 57 |
| Figure III-10 : Réponse uni axiale en compression du modèle de Mazars.....            | 61 |

## ***PARTIE2 : ETUDE EXPERIMENTALE***

### **I : Matériaux et formulation**

|   |    |
|---|----|
| Figure I-1 : Le Super plastifiant MEDAPLAST 40 utilisé.....             | 66 |
| Figure I-2 : Déchets de brique récupérés puis broyé.....                | 66 |
| Figure I-3 : La poudre de marbre utilisé.....                           | 67 |
| Figure I-4 : Le tuf utilisé.....  | 68 |
| Figure I-5 : Courbes granulaires des trois granulats.....               | 70 |
| 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.....75

Figure I-7 : Courbes granulaires des trois granulats, la courbe brisée, avec les  
lignes de partage.....77

## **II : Expérimentation et résultats**

Figure II-1-a : schématisation d'essai de compression.....85

Figure II-1-b: schématisation d'essai de traction par flexion.....85

Figure II-2 : Malaxeur utilisé.....86

FigureII-3: Résultat d'essai d'étalement.....88

Figure II-4: Résultat d'essai de la boîte en L .....89

Figure II-5 : Photo descriptive de l'essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5  
mm) .....91

Figure II-6 : Moules graissés à l'aide d'une huile, remplissage des moules...92

Figure II-7 : Marquage des éprouvettes .....92

Figure II-8 : La presse utilisée .....96

Figure II-9 : Presse hydraulique Ibertest pilotée par un micro-ordinateur.....97

Figure II-10 : Etapes de l'essai de traction par flexion.....99

Figure II-11 :Résistances à la compression des différents bétons  
étudiés.....101

Figure II-12 : Résistances à la traction par flexion des différents bétons  
étudiés.....101

Figure II-13 : Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle de  
Sargin avec la courbe expérimentale de BO.....103

Figure II-14 : Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle  
de Sargin avec la courbe expérimentale de BAP 1.....103

Figure II-15 : Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle  
de Sargin avec la courbe expérimentale du BAP 2.....104

Figure II-16 : Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle  
de Sargin avec la courbe expérimentale du BAP 3.....104



*Introduction*

*Générale*

## Introduction générale

Suite au développement des ciments et bétons à la fin du 19<sup>e</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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.

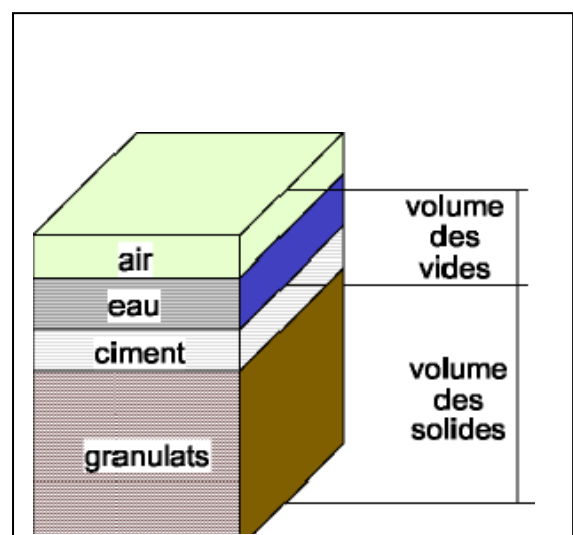


Figure I-1: Composition d'un béton

|        | 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 (SiO<sub>2</sub>) et de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). 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               | /                         | $\geq 32.5$                          | $\leq 52.5$                          |
| 32.5R              | $\geq 13.5$               | $\geq 32.5$                          | $\leq 52.5$                          |
| 42.5               | $\geq 12.5$               | $\geq 42.5$                          | $\leq 62.5$                          |
| 42.5R              | $\geq 20$                 | $\geq 42.5$                          | $\leq 62.5$                          |
| 52.5               | $\geq 20$                 | $\geq 52.5$                          | /                                    |
| 52.5R              | $\geq 30$                 | $\geq 52.5$                          | /                                    |

**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<br>(CEB) | D maximal<br>(CEB) | c minimal<br>(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           | $\leq 2$                  | 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 m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup>, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres (figure II-1).

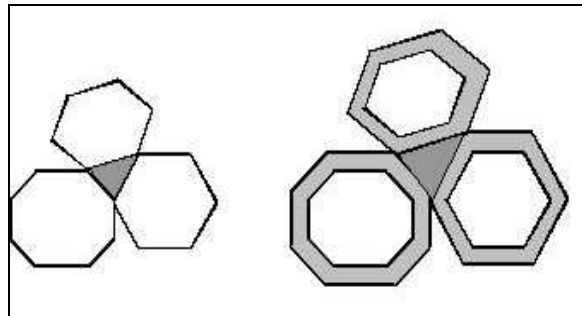


Figure II-1 : dispersion des granulats par excès de pâte

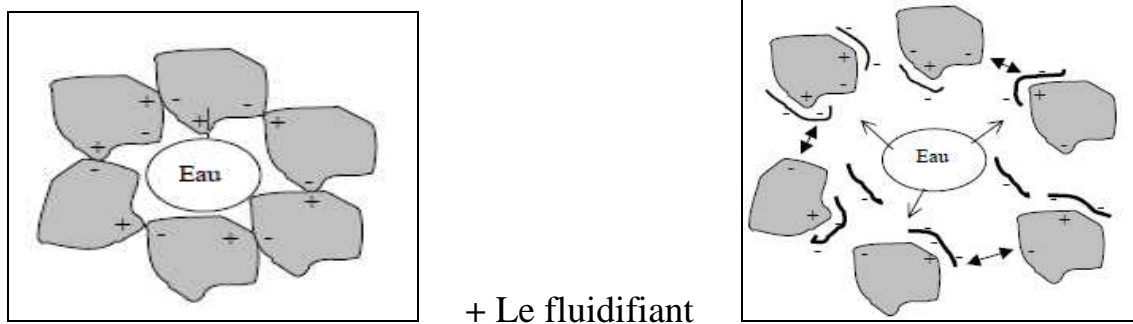
#### II-4-2 Une quantité de fines (<80 µm) élevée :

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/m<sup>3</sup>) 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 :

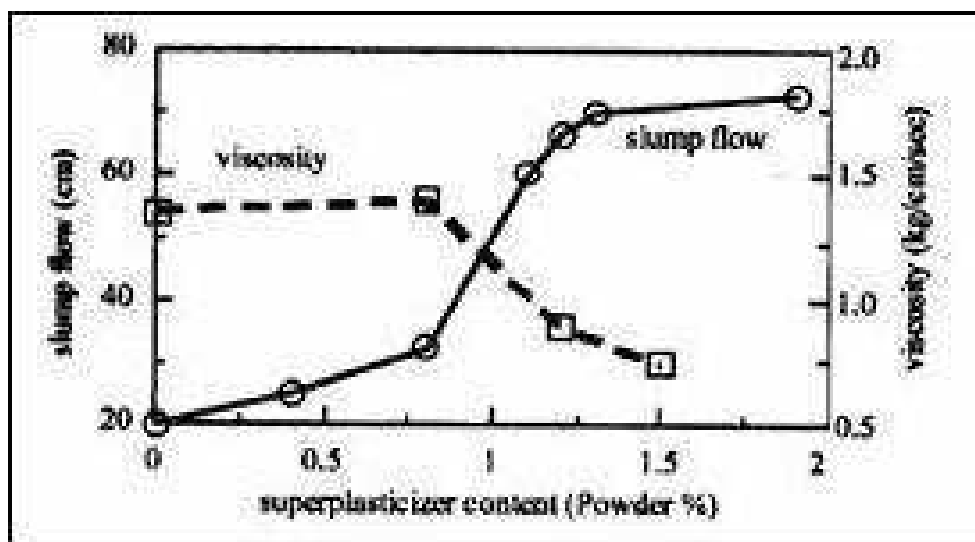
Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de

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 :**

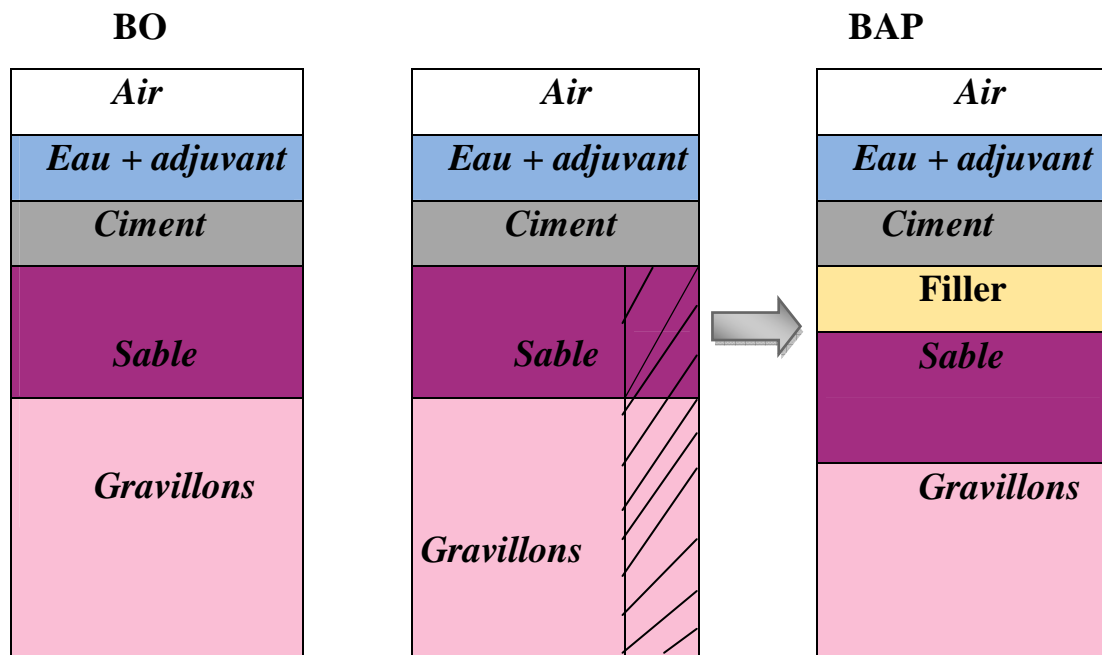
Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite,...), des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice, des déchets de brique. Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, 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 a 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 autoplaçant

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

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées 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].

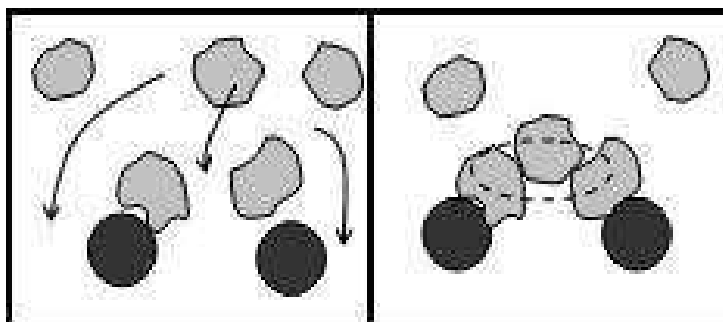
La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

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.

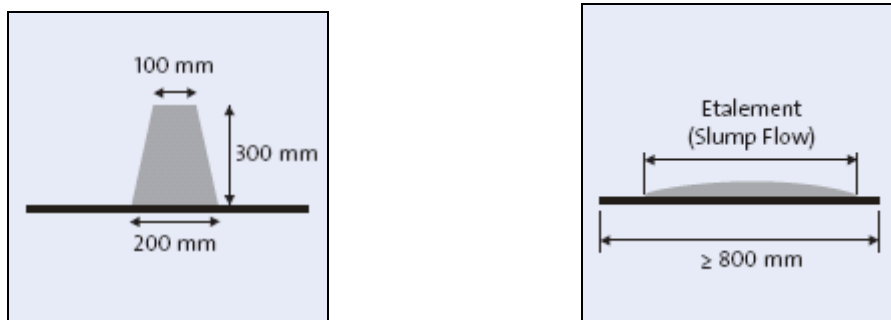
Les principaux tests présentés ci-dessous sont les mieux adaptés pour les BAP, car ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser **le béton autoplaçant avec les termes qualitatifs de fluidité, stabilité, et absence de blocage.**

### 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.

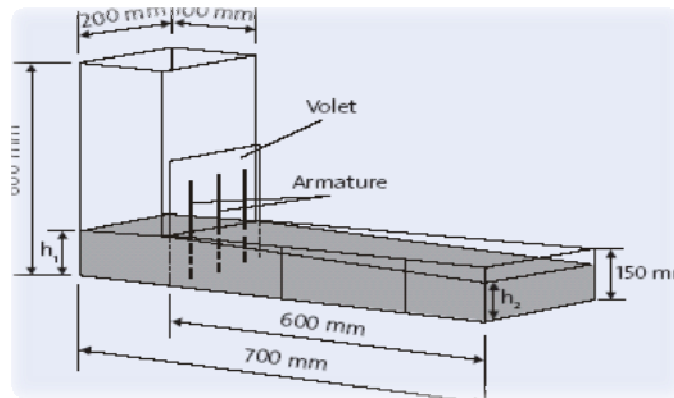
Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au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

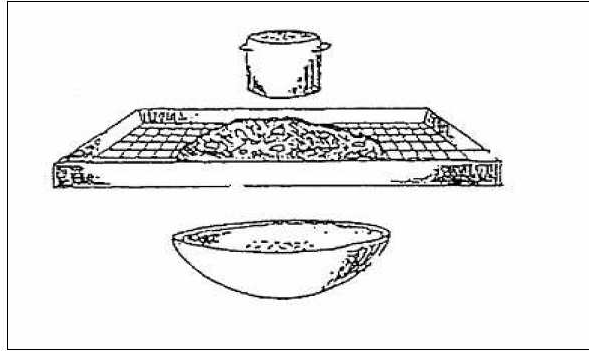
### II-6-2-3 Essais de ségrégation statique :

- **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.

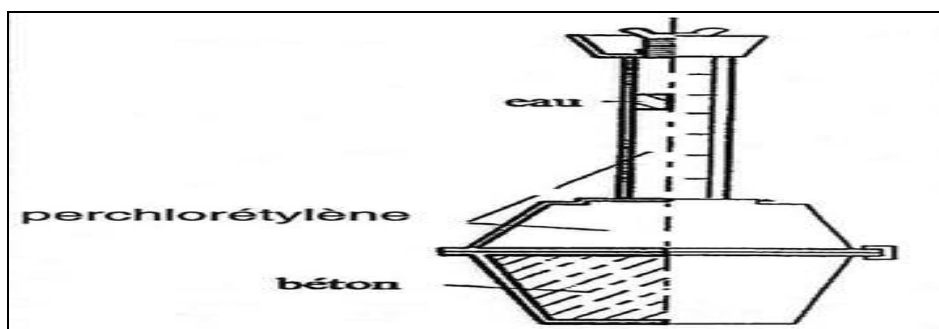
$15\% < \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$  stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ).

$\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$  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/m<sup>3</sup>.
- 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/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- 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 compression**

#### **III-1 Introduction :**

Le béton a été depuis longtemps le matériau de base le plus utilisé dans la construction de divers ouvrages tels que barrages, ponts, immeubles, tunnels, centrales nucléaires... Il peut être soumis aux charges de compression, de traction, de flexion et de cisaillement, mais résiste mieux à la compression.

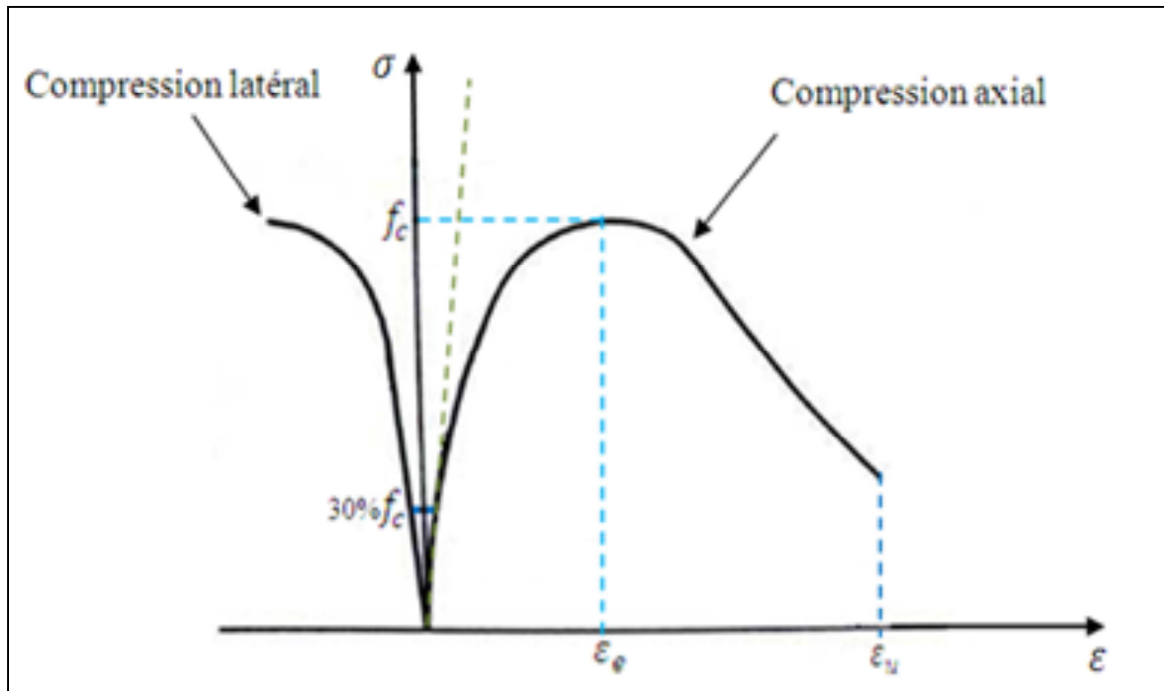
Vu la complexité du comportement du béton et la nécessité de connaître ses propriétés, nous présentons une étude bibliographique portant sur le comportement du béton en compression ainsi que sa modélisation sous sollicitation mono axial.

#### **III-2 Béton en compression :**

Le béton est définie par sa valeur caractéristique spécifiée (c'est-à-dire préciser par le marché ou le contrat) mesuré à 28 jours, notée ,  $f_{cj}$  qui représente La qualité première de ce matériau de résister aux efforts de compression sans se déformer. Cette valeur est mesurée par écrasement des éprouvettes à la presse hydraulique, tel qu'une mauvaise représentation de l'éprouvette influence cette valeur recherchée, et pour but de représenter son comportement a partir des essais réalisé aux laboratoires plusieurs recherches ont été effectuées.

#### **III-2-1 Comportement mécanique :**

Les essais de compression uniaxiale sont réalisés aux laboratoires sur des éprouvettes de dimension normalisées selon des normes imposées dans les codes. L'allure générale de comportement du béton est donnée par la figure suivante :

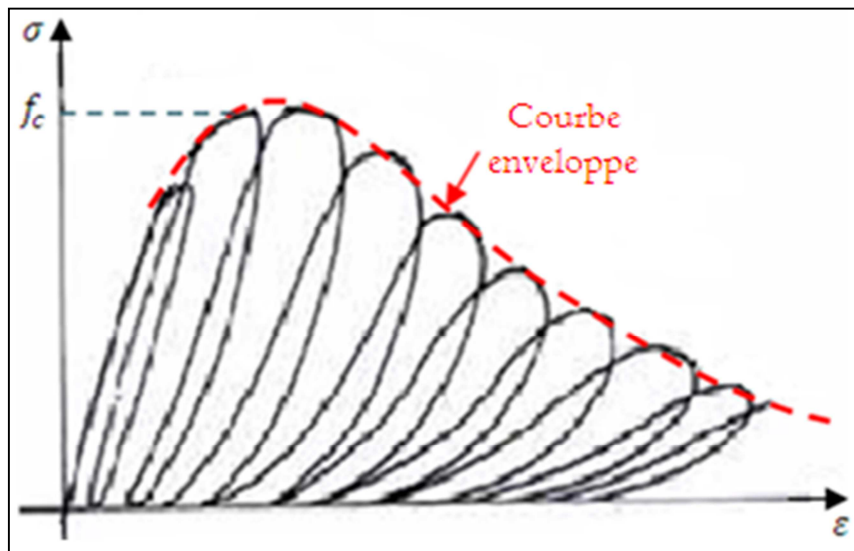


**Figure III-1** : Comportement du béton en compression simple Chen 1982[51]

La courbe présente une réponse presque linéaire jusqu'à 30% de la limite de résistance en compression simple  $f_c$ , en dépassant ce point on observe que la courbe devient de plus en plus non linéaire jusqu'à 75% de la limite en compression simple,

cette phase correspond à un comportement ductile, adoucissant et quasi-linéaire jusqu'à la contrainte maximale. Cette phase est suivie d'un maximum correspond au pic de résistance, au delà de duquel la chute de résistance (radoucissement) de matériaux est attribué à l'endommagement du béton, qui se manifeste à l'échelle microscopique par des phénomènes de : fissuration, mouvement relatifs des grains, écrasement des pores et des grains. Puis une autre branche après le pic associé a une branche descendante jusqu'à rupture totale du matériau.

Pour l'essai cyclique en compression les micros-fissures provoquent une dégradation des caractéristiques élastiques du matériau, d'où, on remarque clairement l'apparition de boucles d'hystérésis lors des cycles charge-décharge qui s'évoluent avec l'endommagement du matériau. Cette dissipation d'énergie s'explique par la présence d'une certaine viscosité et d'une plasticité induite par le frottement et le glissement des lèvres des microfissures lorsque celles-ci s'ouvrent et se referment.



**Figure III-2** : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al 1969[52].

### III-2-2 Modélisation numérique de comportement du béton en compression :

Afin de connaître bien le comportement mécanique du béton à partir des essais effectués aux laboratoires, la modélisation reste toujours difficile à être décrite, plusieurs chercheurs se sont intéressés à définir des lois de comportements qui caractérisent ce matériau en tenant compte de plusieurs

mécanismes, tel que les chutes de raideurs liées à la fissuration, les déformations anélastique et le comportement unilatéral.

En général Le comportement mécanique du béton décrit dans la littérature présente ce matériau comme élastique, fragile et endommageable (Mazars J, Millard A [53]). La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire (Exadaktylos G.E [54]) selon les besoins auxquels doivent répondre ces modèles. Il apparaît que le comportement élastique en compression est non linéaire et La diversité de formulation des bétons conduit à un large éventail de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques très variées.

Nous présentons ci-dessous un nombre restreint de propositions de ces lois qui sont classé selon deux grandes familles :

### **III-2-2-1 Les modèles réglementaires:**

Les modèles réglementaires servent de base aux calculs simplifiés aux Etats limites, ces règlements de calcul sont applicables à tous les ouvrages et construction en béton armé, avec un dosage en ciment au moins égal à 300[kg] par  $m^3$  de béton mis en œuvre (BAEL [55], EUR [56]).

Parmi ces modèles on peut citer :

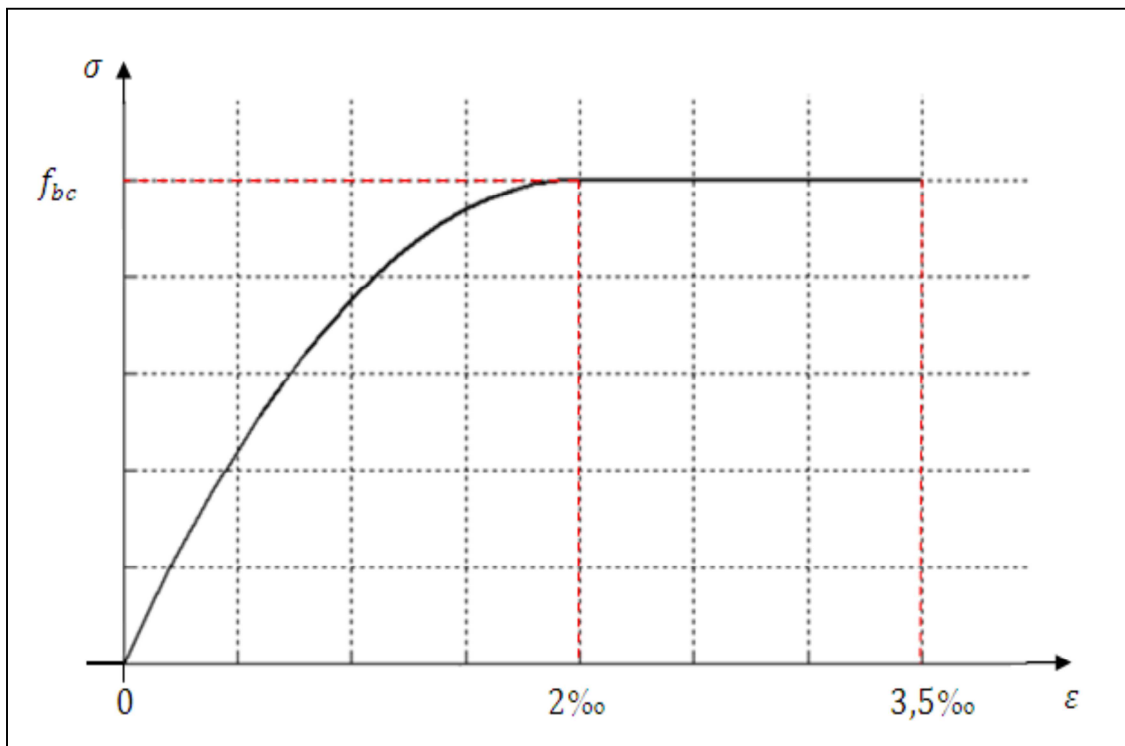
#### **1- Le modèle de béton simplifié BAEL :**

Le diagramme contrainte-déformation du béton reprend le diagramme de calcul dit : Parabole Rectangle (Fig. I.3). Elle peut être utilisé dans tout les calculs aux états limite ultimes, et qui a pour but de simplifier les calculs.

La loi parabole rectangle est composée de deux branches :

- Une branche de parabole du second degré d'axe parallèle à l'axe des contraintes de compression  $\sigma_{bc}$ , qui s'étend de l'origine jusqu'à son sommet.

- Une branche d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations  $\varepsilon_{bc}$ , et tangente à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2‰ à 3.5‰ de la déformation  $\varepsilon_{bc}$ .



**Figure III-3** : Loi Parabole-Rectangle du béton en compression BAEL[55]

Les relations entre contraintes et déformations sont :

$$\begin{aligned} \sigma_{bc} &= 0.25 f_{bc} 10^3 \cdot \varepsilon_{bc} (4 - 10^3 \cdot \varepsilon_{bc}) & 0 \leq \varepsilon_{bc} \leq 2\text{‰} \\ \sigma_{bc} &= f_{bc} & 2\text{‰} \leq \varepsilon_{bc} \leq 3.5\text{‰} \end{aligned}$$

Avec :

$$f_{bc} = \frac{0.85 \cdot f_{cj}}{\gamma_b}$$

0.85 : C'est un coefficient de réduction de la résistance du béton dans le temps, il tient en compte de l'effet du fluage.

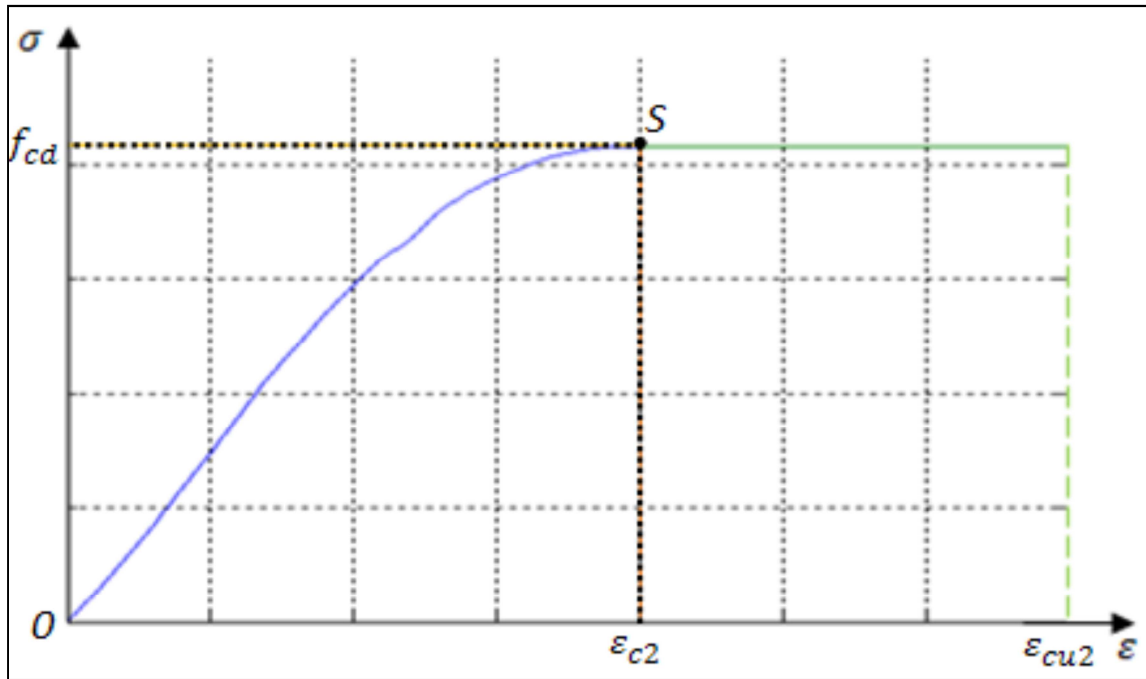
$\gamma_b$  : vaut 1,5 pour les combinaisons fondamentales et 1,15 pour les combinaisons accidentelles.

## **2-Le modèle de béton simplifié Eurocode 2 :**

Les Eurocodes structuraux constituent des normes européennes transposable en norme nationales dans de nombreux pays de l'Europe, ces normes nationales sont amenées à se substituer aux textes réglementaires correspondants en vigueur dans ces pays. Ainsi, en France, l'Eurocode2 remplacera définitivement les règles BAEL 91 pour le béton armé et BPEL 91 pour le béton précontraint en mars 2010.

Pour le calcul des sections, on utilise le diagramme idéalisé dit « parabole-rectangle », constitué par un arc de parabole du second degré prolongé par un segment de droite.

*OS* : Parabole tangente en *S* à l'horizontale,



**Figure III-4 :** Diagramme parabolique-rectangle du béton en compression EUROCODE2[56].

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \epsilon_c > \epsilon_{c2}$$

$f_{cd}$  : Contrainte de compression du béton correspondant à la partie rectiligne du diagramme.

$\epsilon_{c2}$  : Déformation de pic correspondant à  $f_{cd}$ .

n : exposant.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Avec :

$$\gamma_c = \begin{cases} 1,2 & \text{pour les situations accidentelles.} \\ 1,5 & \text{dans les autres cas.} \end{cases}$$

$f_{ck}$  : Résistance caractéristique du béton à 28 jours.

-Pour les bâtiments :  $\alpha_{cc}=1$  valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

- Pour les ponts :  $\alpha_{cc}=0.85$  valeur recommandée. L'Annexe nationale française préconise  $\alpha_{cc}=1$ .

Le coefficient  $0.85 < \alpha_{cc} < 1$  tient compte de l'effet défavorable de la durée de l'application des charges, vis-à-vis de l'essai de courte durée utilisé pour définir  $f_{ck}$ .

Pour l'analyse non linéaire telle que pour le calcul des effets de second ordre et pour des charges de courte durée d'application, on utilise le diagramme de calcul défini de la manière suivante :

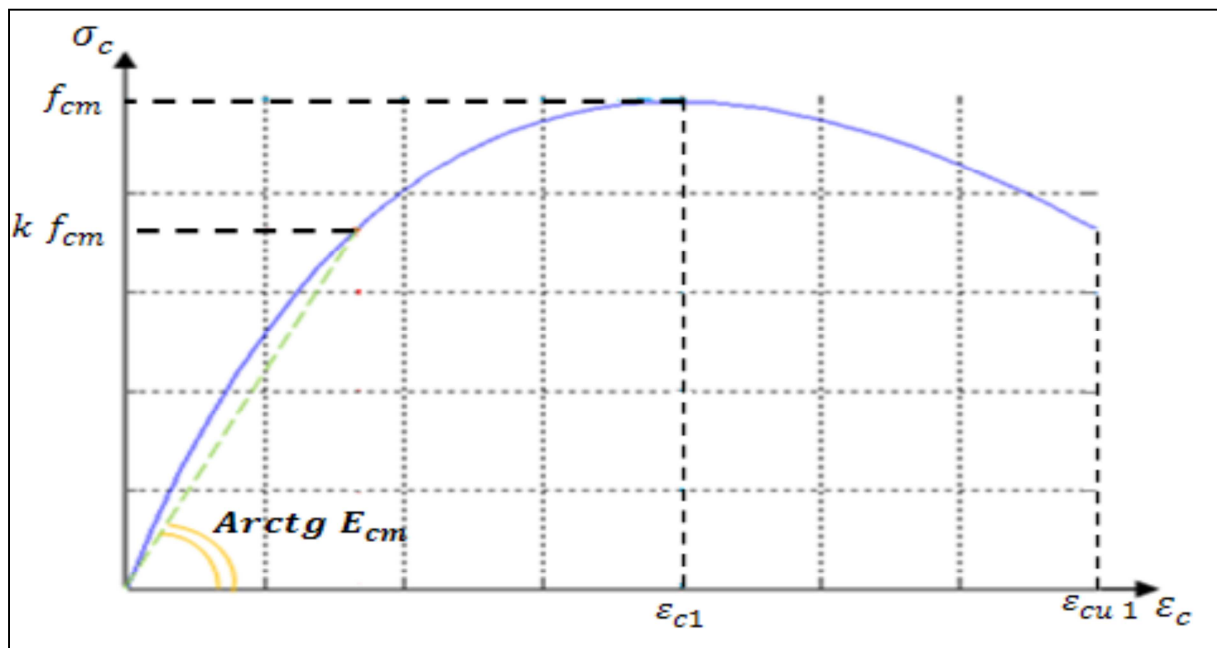


Figure III-5 : Diagramme non linéaire du béton en compression EUROCODE2.

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + (k - 2)n}$$

Avec :

$$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad \text{Où } \epsilon_c \text{ et } \epsilon_{c1} \text{ sont pris en valeur absolue.}$$

$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0.31}$  : Déformation correspondant au pic de la courbe ( $\sigma - \varepsilon$ )

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

$f_{cm}$  : Résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours,

$E_{cm}$  : Module de déformation instantanée du béton.

### III-2-2-2 Les modèles non linéaires :

L'utilisation des modèles de comportement non linéaire pour le béton est encore relativement difficile. C'est qu'il faut pouvoir disposer des modèles adéquats, des paramètres qui caractérisent ce matériau considéré tel que l'élasticité, plasticité et l'endommagement..., dans des codes de calculs des structures pour mieux l'appliquer aux ouvrages de génie civil.

#### 1- Lois du comportement de Sargin [57] :

Ce modèle de comportement du béton en compression est essentiellement employé dans le calcul des structures en béton armé. Il présente un avantage de facilité la détermination des paramètres du modèle d'après les essais en laboratoire.

Ce modèle présente deux branches :

- Branche ascendante, à concavité vers le bas admettant un modèle tangent initial, et un maximum de contrainte qui correspond à la compression  $f_{cj}$ ;
- Branche descendante, commençant par le maximum de la branche ascendante et se termine par le point définissant la déformation ultime correspondante à la contrainte ultime du béton.

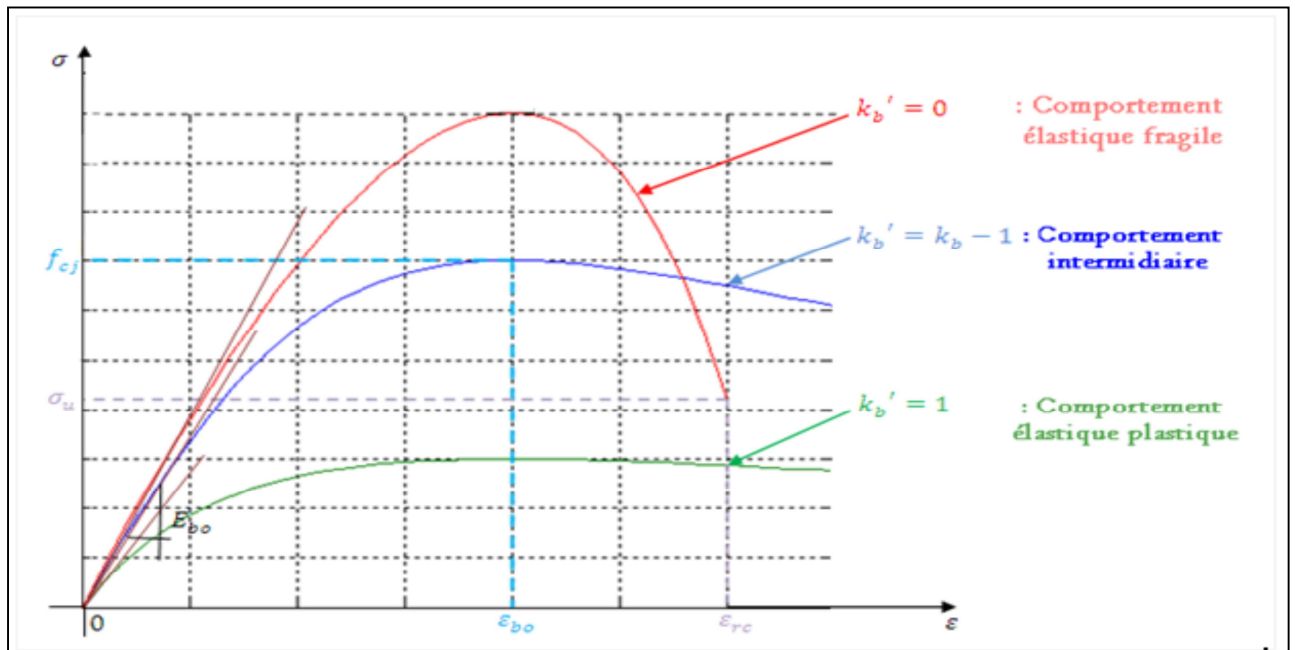


Figure III-6 : Comportement du béton en compression selon Sargin.

▪ **Caractéristiques de la courbe :**

Ce modèle présente deux branches :

- Branche ascendante, à concavité vers le bas admettant un module tangent initial, et un maximum de contrainte qui correspond à la compression  $f_{cj}$ ;
- Branche descendante, commençant par le maximum de la branche ascendante et se termine par le point définissant la déformation ultime correspondante à la contrainte ultime du béton.

Pour décrire le comportement non linéaire du béton en compression, SARGIN a proposé la relation suivante :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \cdot \bar{\epsilon} + (k_b - 1)\bar{\epsilon}^2}{1 + (k_b - 2)\bar{\epsilon} + k_b \bar{\epsilon}^2}$$

Tel que :

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_0$$

$$k_b = \frac{E_{b0} \cdot \varepsilon_0}{f_{cj}}$$

$$E_{b0} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

Avec :

$E_{b0}$  : module d'élasticité longitudinal du béton.

$\varepsilon_{b0}$  : déformation du pic correspondant à  $f_{cj}$ .

$f_{cj}$  : résistance à la compression du béton à l'âge  $j$ .

$K_b, K_b^{\wedge}$  : sont des paramètres adimensionnels, ajustent la branche ascendante et descendante, respectivement, de la loi de Sargin.

Le paramètre  $K_b^{\wedge}$  influe essentiellement sur l'allure de la branche descendante.

$K_b^{\wedge} = 0$  : Correspond à un béton ayant un comportement élastique fragile, avec une branche qui descend brutalement.

$K_b^{\wedge} = 1$  : Correspond à un béton ayant un comportement élastique ductile, plastique, avec une branche descendante assez plate.

Pour un béton normal, on prend généralement :  $K_b^{\wedge} = K_b - 1$ .

Le BPEL propose de prendre :

|  |      |                          |
|--|------|--------------------------|
| $k_b^{\wedge} = k_b - 1$   | pour | $f_{cj} \leq 30 [Mpa]$   |
| $k_b^{\wedge} = 0$   | pour | $f_{cj} \geq 55 [Mpa]$   |
| $k_b^{\wedge} = (k_b - 1) \left( \frac{55 - f_{cj}}{25} \right)$ | pour | $30 < f_{cj} < 55 [Mpa]$ |

La déformation  $\varepsilon_0$  correspondant au pic de contrainte peut être estimée par la formule donnée par le BPEL :

$$\varepsilon_0 = 0,62 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{f_{cj}}$$

Et le module à l'origine par :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

Le béton non armé possède une capacité de déformation à la rupture  $\varepsilon_{cu}$  très limitée, de l'ordre de  $3,5 \cdot 10^{-3}$  cette valeur est de l'ordre de 2 fois le raccourcissement maximum élastique  $\varepsilon_{b0}$ .

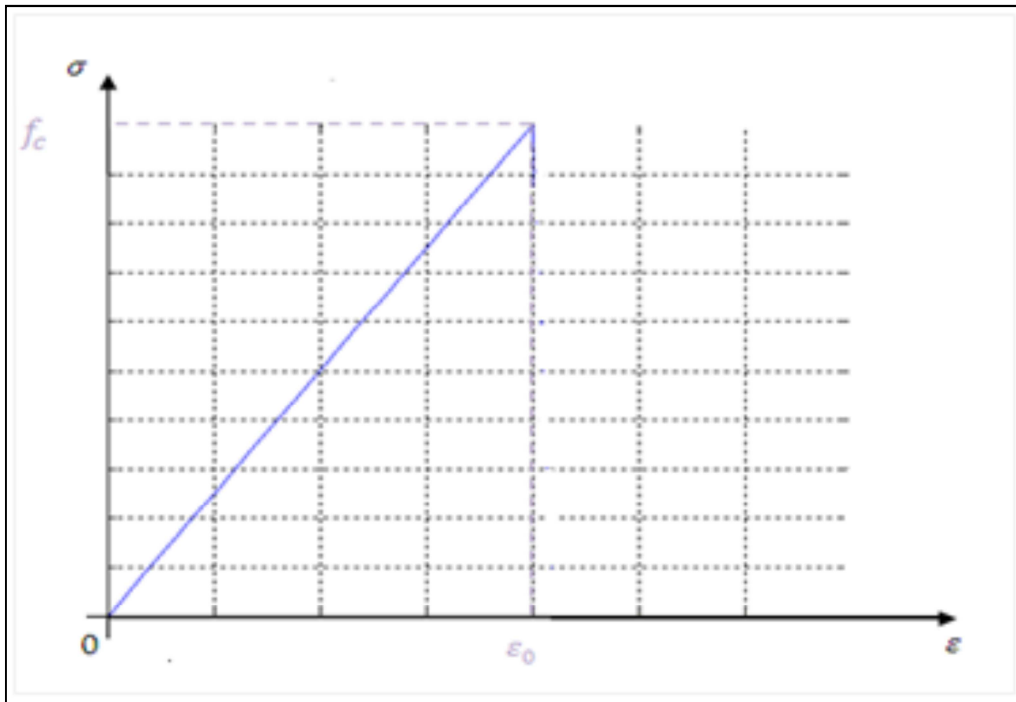
## 2-loi de comportement de POPOVIC (1973) [55]

Popovics, propose une équation mathématique unique de la relation

« contrainte- déformation ». pour représenter tant la phase ascendante que la phase descendante.

Cette loi est décrite selon l'équation suivante :

$$\sigma = f_c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^n}$$



**Figure III-7** : Comportement du béton en compression selon Popovics

Avec :

$f_c$  : Contrainte maximale en compression du béton mesurée sur cylindre.

$\epsilon_0$  : Déformation au maximum de la contrainte maximale  $f_c$ .

$\epsilon$  : Déformation axiale

$n$  : Fonction mathématique dépendant de la contrainte maximale.

Tel que :

$$n = 0.4 \times 10^3 f_c + 1$$

Selon les travaux de Watanabe publiés en 1972, Popovics propose une autre équation afin de déterminer la déformation axiale en fonction de la contrainte maximale en compression.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{K} \left( \sqrt{f_c} + \frac{2500}{\sqrt{f_c}} \right)$$

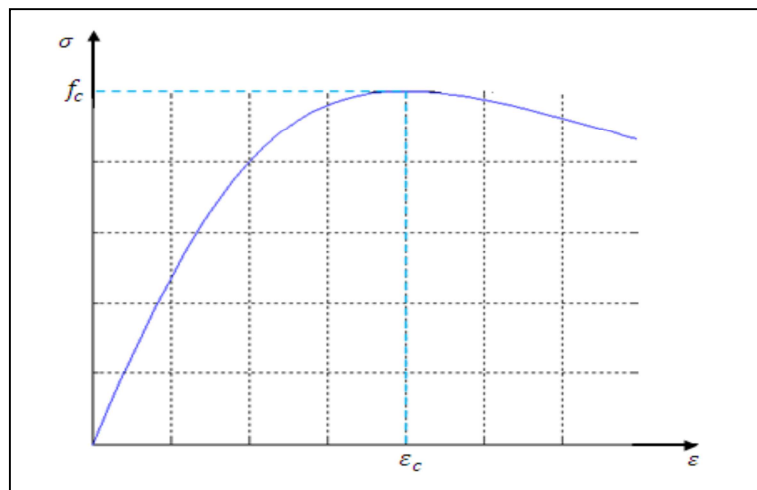
K : Paramètre expérimental à déterminer

La représentation graphique de la relation proposée, donne plutôt une droite linéaire dans la phase ascendante. Le comportement de la partie ascendante est donc de type élastique.

### 3-loi de comportement de DESAYI & KRISNAN (1964) [55]

D'après Neville (1995)[58], la relation proposée par Desayi et Krisnan (1964) constitue l'équation la plus représentative de la réalité. On admet dans cette relation que le module tangent initial correspond au double du module sécant à la contrainte maximale ( $E_c = 2 \cdot \frac{f_c}{\epsilon_c}$ ), ce qui constitue une hypothèse questionnable puisque très simplificatrice.

La relation entre le module tangent initial et le module d'élasticité est donc non linéaire et mieux représentée par une relation exponentielle (Neville, 1995).



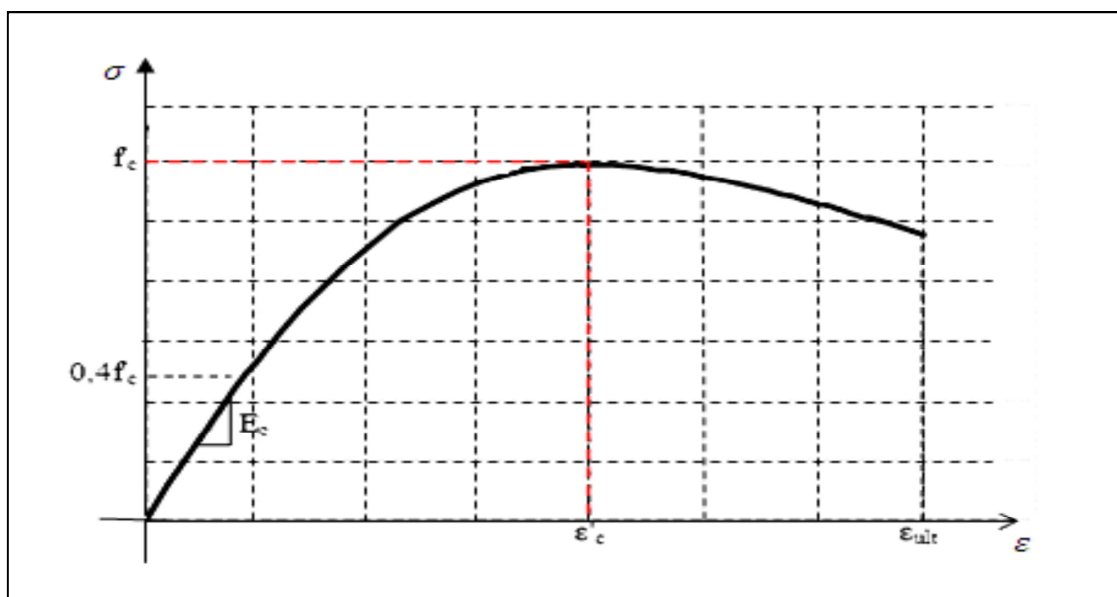
**Figure III- 8 :** Comportement du béton en compression selon Dessayi et Krisnan

$$\sigma_c = \frac{E_c \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2} = \frac{2 \cdot f_c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2}$$

#### 4-loi de comportement de MARC GREGOR (1997)[55]

Lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 40% de sa résistance en compression, la microfissuration s'initie et tend à se propager parallèlement au chargement lors de son augmentation. La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement.

Une certaine résistance subsiste après le pic et se traduit par une branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du matériau, généralement admise à  $3,5 \cdot 10^{-3}$ . Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime.



**Figure III-9 :** Loi de comportement du béton en compression, Mac Gregor

Tel que :

$f_c$  : Résistance limite élastique du béton à la compression.

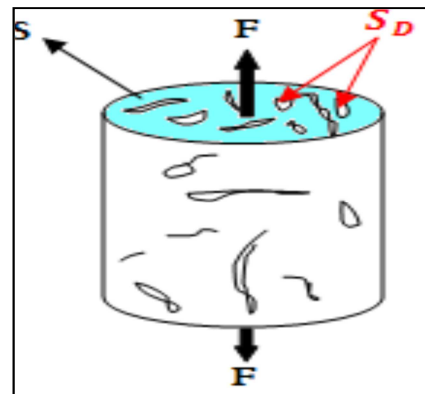
$\varepsilon_c$  : Déformation élastique du béton à la compression correspondante à  $f_c$ .

$\varepsilon_{ult}$  : Déformation ultime du béton.

### 5-modèle d'endommagement de Mazars 1984[53]

Le terme endommagement est assez explicite : il désigne l'action ou l'état d'un matériau ayant subi du dommage, de la dégradation. L'endommagement est intimement lié au nombre, à la forme et à la répartition des microfissures présentes dans le matériau. Le comportement élastique de l'élément de volume endommagé est défini par les variables effectives, l'état local est décrit par la déformation  $\varepsilon$  et la variable local interne  $D$  qu'elle est défini au sens de Kachanov (1958) [59] par:

$$D_n = \frac{S_D}{S}$$



Où

$S_D$  est la surface des fissures dans le plan contenant la section  $S$  considérée.

$D_n = 0$  Correspond à l'état vierge (non endommagé) du matériau.

$D_n = 1$  Correspond au matériau totalement rompu perpendiculairement à la normale  $\vec{n}$ .

$D_n$  est compris entre 0 et 1, il caractérise l'état de l'endommagement.

Le modèle de comportement de Mazars (1984) [60] est un modèle simple, réputé robuste, basé sur la mécanique de l'endommagement), qui permet de décrire la diminution de la rigidité du matériau sous l'effet de la création de microfissures dans le béton.

Dans le cadre de l'isotropie, la relation contraintes-déformations s'écrit comme suit:

$$\sigma_{ij} = (1 - D) E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e$$

Où :

$\sigma_{ij}$  : composante du tenseur de contrainte.

$E_{ijkl}$  : composante du tenseur d'élasticité d'ordre 4.

$\varepsilon_{kl}^e$  : Composante du tenseur de déformation élastique.

Chaque état d'équilibre est distingué par une valeur scalaire du potentiel thermodynamique  $\rho\psi$ , donné par l'expression suivante :

$$\rho\psi(\varepsilon, D) = \frac{1}{2} (1 - D) \Lambda : \varepsilon : \varepsilon$$

Sous un état quelconque de sollicitation, l'endommagement est considéré comme étant une combinaison d'un endommagement dû à la traction  $D_t$  et d'un endommagement dû à la compression (effet de poisson)  $D_c$ . Il est exprimé sous la forme suivante [3] :

$$D = \alpha_t^\beta D_t + (1 - \alpha_t)^\beta D_c$$

$\alpha_t$  traduit la part respective de chacun des endommagements de traction et de compression ( $\alpha_t$  valant 0 pour une compression pure et 1 dans le cas d'une traction pure), et  $\beta$  est calé sur le cisaillement (voisin de 1.05 pour un béton courant, il permet de représenter à peu de frais les résultats expérimentaux, essentiellement pour les essais de cisaillement).

$$\alpha_t = \frac{\sum \langle \varepsilon_i \rangle \varepsilon_{traction}}{\sum \langle \varepsilon_i \rangle^2}$$

Avec  $\varepsilon_{traction}$  les déformations principales dues aux contraintes de traction.

Les lois d'évolution de  $D_t$  et  $D_c$  sont données par (chaque fois que  $\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_{max}$  est atteint) :

$$D_t = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\tilde{\varepsilon}} (1 - A_t) - A_t \exp\{-B_t(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_0)\}$$

$$D_c = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\tilde{\varepsilon}} (1 - A_c) - A_c \exp\{-B_c(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_0)\}$$

La progression de l'endommagement scalaire  $D$  est guidée par l'évolution de la déformation équivalente  $\tilde{\varepsilon}$ , calculée à partir des déformations principales positives  $(\varepsilon_i)_+$  :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum \langle \varepsilon_i \rangle_+^2}$$

Avec :

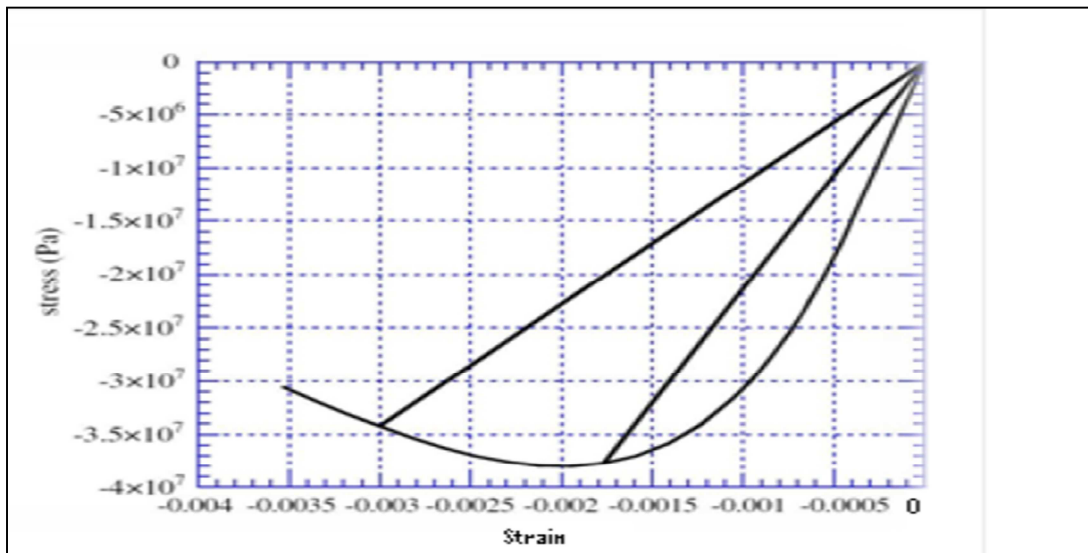
$\varepsilon_0$  : la valeur de déformation qui correspond à l'initiation de l'endommagement.

$A_t, B_t, A_c, B_c$  : paramètres scalaires du modèle.

Lors du chargement de compression pure, le respect de la condition du dérivabilité de la courbe  $(\sigma, \varepsilon)$  à l'initiation de l'endommagement  $(\tilde{\varepsilon}=\varepsilon_0)$  impose une relation supplémentaire entre les paramètres soit :

$$B_c = \frac{A_c - 1}{A_c \varepsilon_0}$$

La figure ci- dessous présente les réponses du modèle d'endommagement de Mazars dans le test de compression.



**Figure III-10 :** Réponse uni axiale en compression du modèle de Mazars [60]

**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 ferrillés. 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 tuffe 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.

D'après les modèles traités dans cette partie , on constate que ceux de la théorie des poutres (plasticité) sont plus simples et souples que ceux de la théorie de l'endommagement.

Le modèle le plus approprié et qui présente l'avantage d'être souple d'utilisation et d'application numérique est celui de SARGIN.

Contrairement aux modèles de la théorie des poutres, le modèle de Mazars introduit le facteur d'endommagement dans la loi de HOOK généralisée.



*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 [61], [62].

### **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 / 42,5N** 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 chimique et 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 inférieur a 80um.



Figure I-2 : Déchets de brique récupérés puis broyé

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

| Composition chimique (%) |                                |                                |       |      |      |                  |       |                  |                   |                 |                 |     |                       |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|------------------|-------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------------|
| SiO <sub>2</sub>         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | S    | FeS <sub>2</sub> | PF    | k <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Cl <sup>-</sup> | F   | SO <sub>3</sub> 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 Tuffe 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).

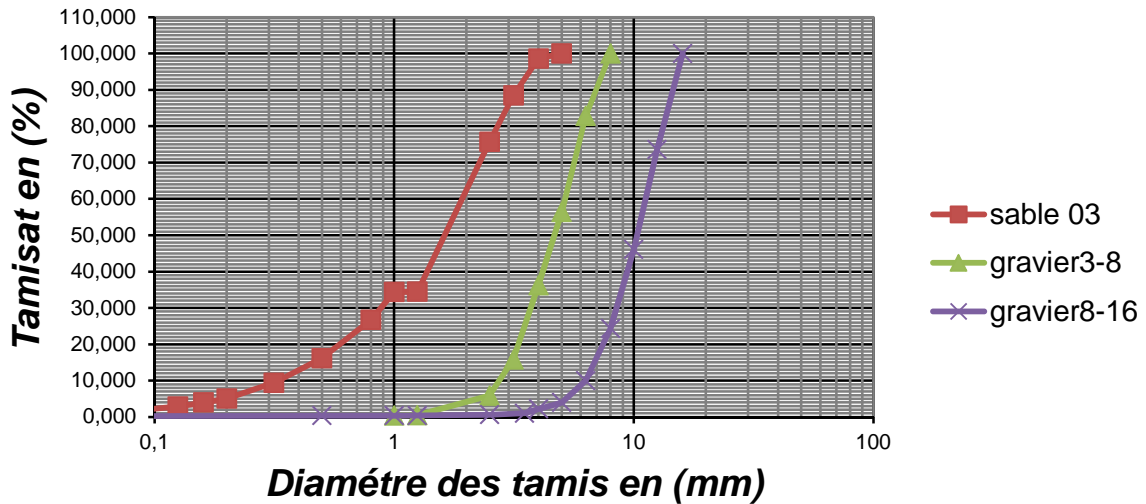


Figure I-5 : Courbes granulaires des trois granulats

- **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 <sup>3</sup> )   | 2,6         | 2,5           | 2,5             |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 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<br>$2,2 < M_f < 2,8$ sable moyen<br>$1,8 < M_f < 2,2$ 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 pate 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    |
| 150min | 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.

$\sigma'_c$  : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment /m<sup>3</sup> de béton).

E : Dosage en eau (Kg d'eau /m<sup>3</sup> de béton ou litre d'eau/m<sup>3</sup> 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.

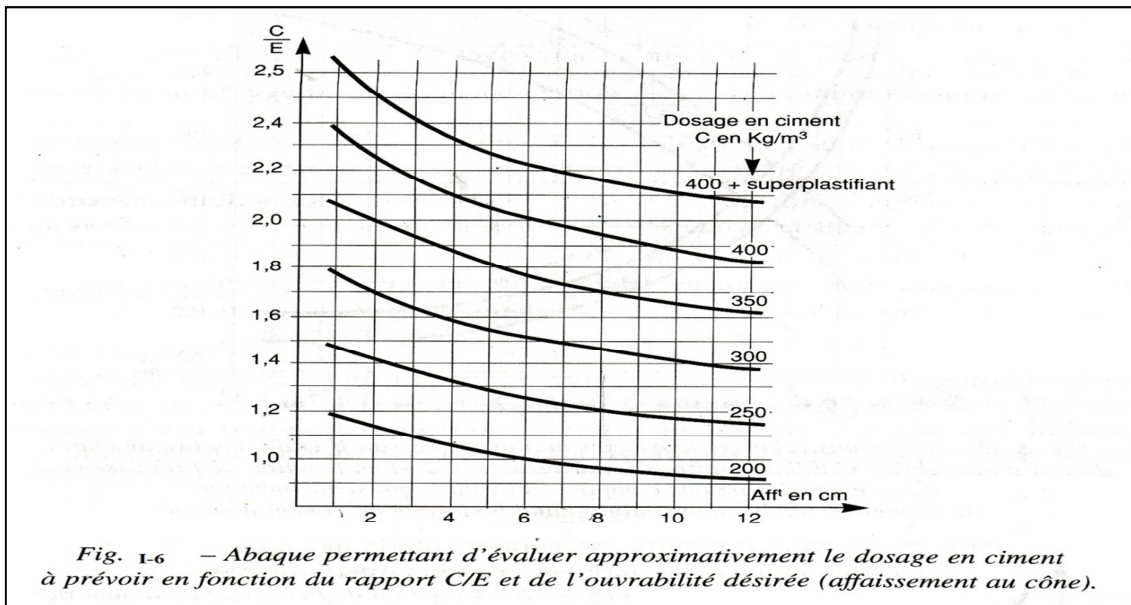
Le rapport  $\frac{C}{E}$  est donné par :  $\frac{C}{E} = \frac{30}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2,07$ .

**-Dosage en ciment par 1m<sup>3</sup> 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  $400 \text{Kg/m}^3$

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  $M_f$ .

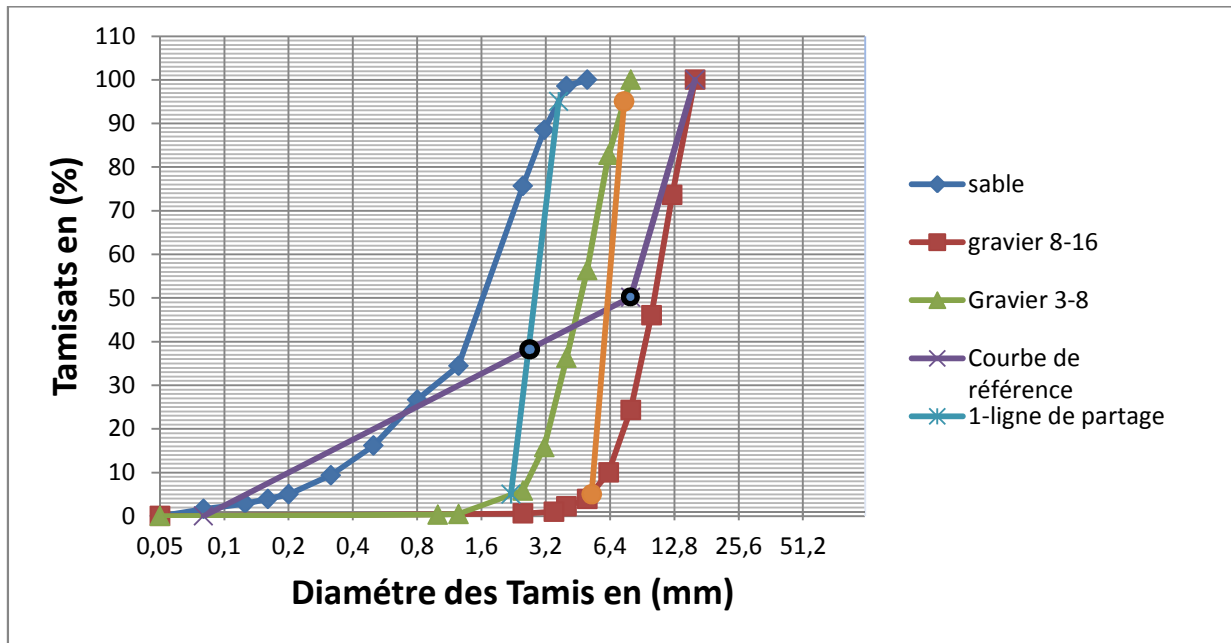
Comme le module de finesse du sable vaut 3,19, la valeur de  $K_s$  est calculée par la formule suivant :  $K_s = 6M_f - 15 = 4,14$ .

$K_p$ : 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  $V_M = V_g + V_c = 0,820 \times 1000 = 820l$ .

- **Dosage des granulats :**

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

✚ **Volume absolu du ciment :**  $V_c = \frac{m_c}{\gamma} = \frac{400}{3,1} = 129.03 l$ .

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

$\gamma$  : Masse volumique du ciment.

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

$$V_g = 1000 \delta - V_c = 820 - 129.03 = 691 \text{ litre.}$$

✚ **Volume absolu du sable :**

$$V_S = \frac{V_g \times 38.5}{100} = \frac{691 \times 38.5}{100} = 266,035l$$

✚ **Volume absolu du gravier 3/8 :**

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

✚ **Volume absolu du gravier 8/16 :**

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

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1m<sup>3</sup>de béton sont donnés par :

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

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

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

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 <sup>3</sup> ) | 266,035   | 58,74       | 366,23       | 194 | 129,03 | 1,504 |
| Poids (Kg/m <sup>3</sup> ) | 692       | 147         | 916          | 194 | 400    | 0,485 |

**Tableau I-13 : Composition volumique et pondéral du béton vibré pour 1m<sup>3</sup>**

**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  $1\text{m}^3$  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, tuffe).

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  $1\text{m}^3$  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) =  $99.37 \text{ l/m}^3$   
 2/3de 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( $\text{l/m}^3$ ) | Densité absolue | Composants ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 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  $1\text{m}^3$  de béton on a les constituants suivants :

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

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

**Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air (A) +ajout (Tuffe) = 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  $G + S = 1000 - 129.03 - 194 - 5 - 79.05$

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

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/m<sup>3</sup>

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

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 <sup>3</sup> ) | Densité absolue | Composants (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Ciment            | 129.03                        | 3.1             | 400                             |
| Tuffe             | 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 1m<sup>3</sup> de béton on a les constituants suivants :

Si on prend un dosage en poudre de marbre de 5 % 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  $E = 194 \text{ l/m}^3$ .

$$\text{On obtient alors } G + S = 1000 - 129.03 - 194 - 5 - 15.94$$

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

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) =  $218.68 \text{ l/m}^3$   
 1/3de gravier (8/16) =  $109.34 \text{ l/m}^3$

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( $\text{l/m}^3$ ) | Densité absolue | Composants ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Ciment            | 129.03                       | 3.1             | 400                            |
| Déchet 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 résumés dans le tableau ci dessous :

| Composants ( $\text{Kg/m}^3$ ) | BT  | 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  $1 \text{ m}^3$ .**

## II : Expérimentation et Résultats

### II-1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de confection des BO et BAP ; depuis les pesées des matériaux jusqu'à la rupture des éprouvettes. On a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes. Nous avons par la suite présenté les résultats de caractérisation des BAP à l'état frais, ainsi que les résistances à 28 jours effectuées sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm et prismatiques de 40x20x10cm.

Nous avons dans une deuxième phase, donné les interprétations, comparaisons et conclusions des résultats de caractérisation des différentes formulations étudiées.

Le programme expérimental comprend deux types d'essais devant être effectués à des échéances bien précises, chaque type d'essai comprend plusieurs :

- Eprouvettes cylindriques
- Eprouvettes prismatiques

Le tableau suivant définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas.

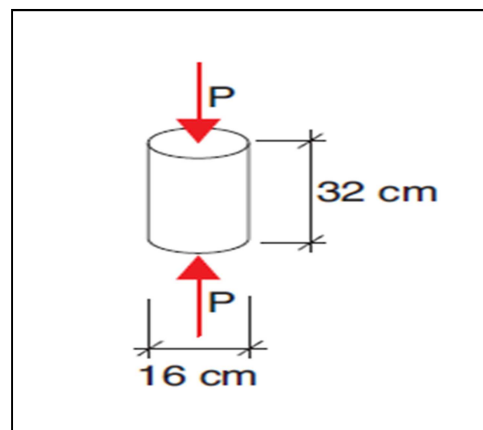
|      | Compression |           |        | Traction par flexion |            |        |
|------|-------------|-----------|--------|----------------------|------------|--------|
|      | Type        | dimension | nombre | Type                 | dimension  | nombre |
| BO   | cylindrique | 16x32cm   | 3      | prismatique          | 10x20x40cm | 3      |
| BAP1 | cylindrique | 16x32 cm  | 3      | prismatique          | 10x20x40cm | 3      |
| BAP2 | cylindrique | 16x32 cm  | 3      | prismatique          | 10x20x40cm | 3      |
| BAP3 | cylindrique | 16x32 cm  | 3      | prismatique          | 10x20x40cm | 3      |

**Tableau II-1:les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.**

**a - Eprouvettes Cylindriques :**

Conformément à la norme NF P18-406 (NA427), les éprouvettes cylindriques s'élancement 2, dont les extrémités ont été préalablement rectifiées sont utilisées pour l'essai d'écrasement compression simple.

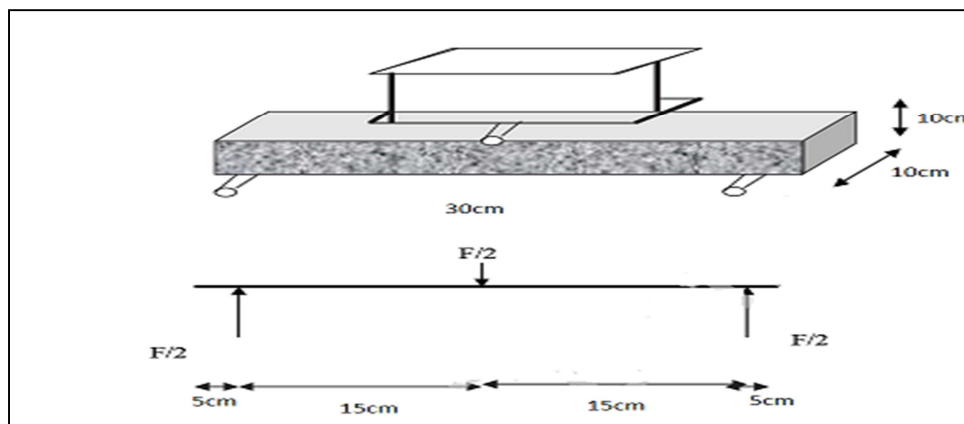
Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance de la compression, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai à 28 jours.



**Figure II-1-a : schématisation d'essai de compression.**

**b. Eprouvettes prismatiques :**

Ces éprouvettes sont réalisées pour les essais de traction par flexion selon les normes NFP18-407(NA428), qui précisent les détails d'exécution, les éprouvettes sont des prismes de 10x20x40cm.



**Figure II-1-b: schématisation d'essai de traction par flexion.**

## II-2 Confection des bétons

### II-2-1 Préparation de la gâchée

Pour la confection des bétons, il y a lieu dans un premier temps de préparer le nécessaire en matériel et matériaux. Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à la température ambiante et les mettre en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité.

Préparer les moules prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Préparer les pesées des matériaux à utilisés (gravillons, ciment filler...). Séparer l'eau en deux quantités (» 10 % pour l'humidification des granulats et » 90 % le reste d'eau prévue pour le béton).

Tous le matériels nécessaire est préparé (balances, récipient, spatules, truelles, cône d'Abrams, table pour l'étalement, boîte en L, tamis et fond de tamis pour l'essai de stabilité, chronomètre, mètre .... Tout le matériel est pré-humidifié. Le malaxeur utilisé est à axe vertical de mouvement planétaire.



**Figure II- 2** : Malaxeur utilisé.

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

- a. Humidifier tout les matériels à utilisé ;
- b. Introduire le sable et les gravillons dans le malaxeur ;
- c. Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 s
- d. Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30 s ;
- e. Laisser reposer 1 mn 30s ;
- f. Ajouter le ciment et la poudre de marbre, ensuite mélanger le tout durant 30 s ;
- g. Verser l'eau restante graduellement et laisser se malaxer pendant 60s ;
- h. Introduire le super-plastifiant et malaxer pendant 1mn 30 s.
- i. Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais, voir la description des essais en annexe 3
  - a. Essai d'étalement
  - b. Essai de la boîte en L (Essai du L-box)
  - c. Essai de stabilité au tamis
- j. Remplir les moules d'éprouvettes sans vibration.

### **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.

## II-3 Essais expérimentaux

### II-3-1 Essais sur béton frais :

#### a- Etalement des BAP (Slump flow) :

L'essai au cône d'Abrams est l'un des essais les plus couramment utilisés car il est très simple à mettre en œuvre. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique <norme NFP 18 451 (NA 431).

L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné donc sans obstacle. (Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation)).



**Figure II- 3 :** Résultat d'essai d'étalement.

| Béton             | BO | BAP1 | BAP2 | BAP3 |
|-------------------|----|------|------|------|
| Etallement (mm)   | /  | 640  | 600  | 670  |
| Affaissement (mm) | 80 | /    |      |      |

**Tableau II- 2: résultats de l'essai au cône d'Abrams**

**b- Essai de la boîte en L (Essai du L-box) :**

L'essai de la boîte en L est effectué pour le BAP seulement, il permet d'évaluer la capacité de remplissage en milieu confiné ainsi le risque de blocage (voir Figure II- 4).

La partie verticale de la boîte est remplie de béton, après soulèvement de la trappe en acier, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs de béton dans les parties verticales. Pour un BAP,  $H1/H2$  doit être supérieur à 0,8.



**Figure II- 4: Résultat d'essai de la boîte en L**

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le tableau ci- dessous :

| Béton                           | BAP1 | BAP2 | BAP3 |
|---------------------------------|------|------|------|
| Capacité de remplissage (H1/H2) | 51   | 25   | 78   |

**Tableau II- 3: essai de la boîte en L.**

### **c- Essai de la 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 et remonté de la pâte qui est légère. 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).

Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation et de ressuage), mais l'essai le plus approprié pour la mesure de la stabilité est l'essai de stabilité au tamis (voir figure II- 5).

On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm. On considère qu'une valeur inférieure à 15 % de laitance est caractéristique d'un béton stable.



**Figure II- 5:** Photo descriptive de l’essai de stabilité au tamis (le tamis est de 5 mm).

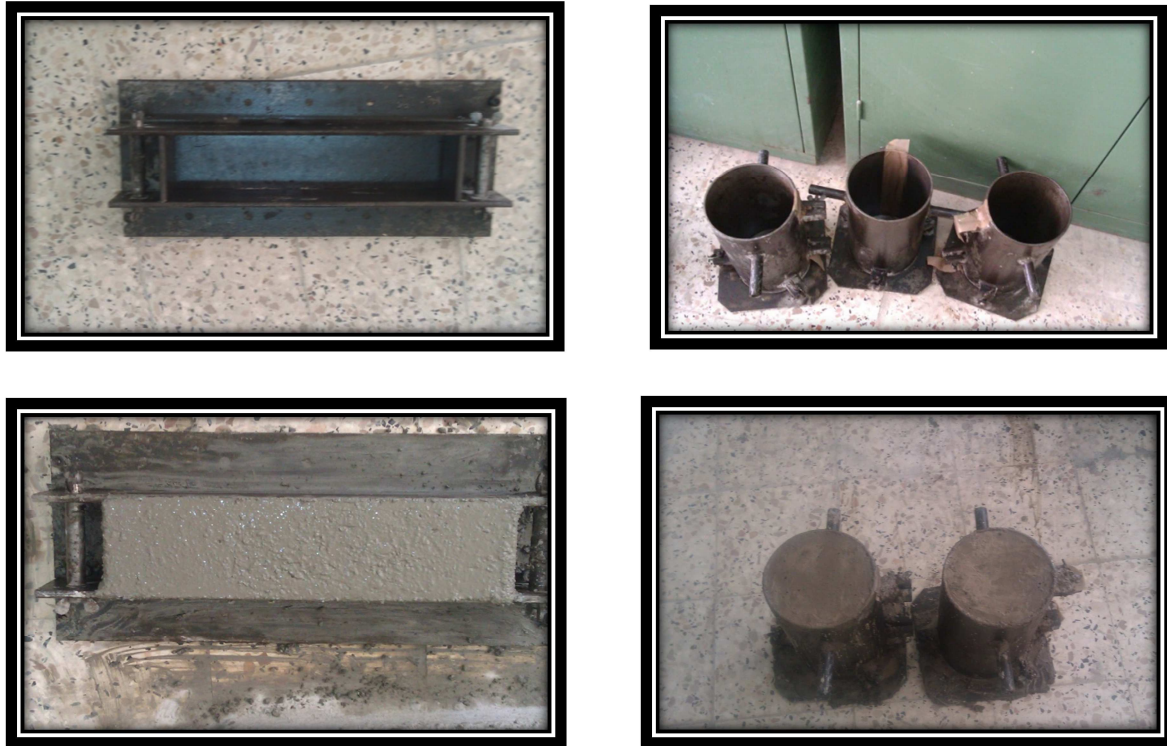
Cet essai a été effectué sur tous les BAP, le tableau II-3 présente les résultats obtenus.

| Béton               | BAP1 | BAP2 | BAP3 |
|---------------------|------|------|------|
| Poids de laitance % | 2    | 5    | 8    |

**Tableau II-4:** résultats de l’essai de la stabilité.

- **Confection des éprouvettes :**

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication. Nous avons protégé les éprouvettes d’un film en plastique pour éviter l’évaporation de l’eau. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. On a remarqué que la qualité des produits finis (aspect apparent) était très bonne. (Voir figure II- 6).



**Figure II- 6: Moules graissés à l'aide d'une huile, remplissage des moules.**

Une fois démoulés, on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes la date de leur confection et la référence du béton (voir figure II- 7). Les éprouvettes sont par la suite immergées dans un bac sous chiffons maintenus humidifiés à la température ambiante. Les éprouvettes sont alors conservées jusqu'à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes sont alors retirées pour être testées à l'essai de compression à 28 jours.



**Figure II- 7 : Marquage des éprouvettes**

- **Récapitulatif des résultats à l'état frais**

Le tableau II-5 est un récapitulatif des performances des différents types de bétons à l'état frais.

| Type                               | Étalement (cm) | La boîte en L dénivelée (%) | Stabilité au tamis (%) | Appréciation visuelle du la galette d'étalement |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------|---|
| <b>BAP1</b><br>(Poudre de marbre)  | 64             | 51                          | 2                      | Bon   |
| <b>BAP2</b><br>(tuf)               | 67             | 78                          | 8                      | Bon   |
| <b>BAP3</b><br>(Déchets de brique) | 61             | 25                          | 5                      | Bon   |

**Le tableau II-5 : récapitulatif des résultats d'essais a l'état frais effectué sur différents types de BAP.**

Avec le super-plastifiant utilisé nous avons pu avoir des bétons auto-plaçant et cela dans la, plage des dosages prescrite dans la fiche technique du produit (soit 2 %).

### III-3-1-1 Discussions des résultats de caractérisation à l'état frais

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique et Cependant on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoires la fluidité et la ségrégation. Par conséquent les BAP doivent satisfaire plusieurs tests. Nous avons choisit trois qui permettent de caractériser

les principales propriétés du BAP à l'état frais (la fluidité et la stabilité statique et dynamique, en milieu libre et confiné) : l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis.

### 1) L'étalement des BAP

L'étalement d'un béton autoplacant peut varier entre 550 et 850 mm selon l'association française du génie civil. Les résultats obtenus présentés sur le tableau II-5, 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 cette composition respecte le critère d'étalement d'un BAP.

### 2) Essai de la boîte en L

Les résultats obtenus par l'essai L – Box sont présentés sur le tableau II- 5. 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 % .

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.

L'augmentation de la viscosité du mortier a rendu difficile l'écoulement et a entraîné, un blocage du béton.

### **3) 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- 5), soit inférieure à 15 % pour tous les BAP validés. On tient toute fois à signaler que pour le BAP1 on a relevé une laitance  $P < 5 \%$ , la résistance à la ségrégation est dite « importante ». Selon la réglementation, 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.

## **II-3-2 Essais sur béton durci**

### **a- Essai de compression (NF P 18-406) :**

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continu jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et est le paramètre fondamental de notre étude. Notre objectif

dans cette étude est de déterminer la résistance à la compression des différents BAP à 28 jours.

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN (voir figure II- 8). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

On note la charge maximale atteinte P (KN) et la surface de chargement S (m<sup>2</sup>), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_C \text{ (MPa)} = P / S$$

dont l'aire de la section droite est de  $200 \text{ cm}^2 = 0,02 \text{ m}^2$



**Figure II- 8 :** La presse utilisée.

Les essais effectués sur les différents bétons 28 jours ont donné les résultats présentés dans le tableau II-6.

| Béton | Résistance à la compression à 28 jours (MPA) |
|-------|--|
| BO    | 26   |
| BAP1  | 35.81  |
| BAP2  | 38.27  |
| BAP3  | 36.22  |

**Tableau II-6: résistance à la compression des bétons étudiés**

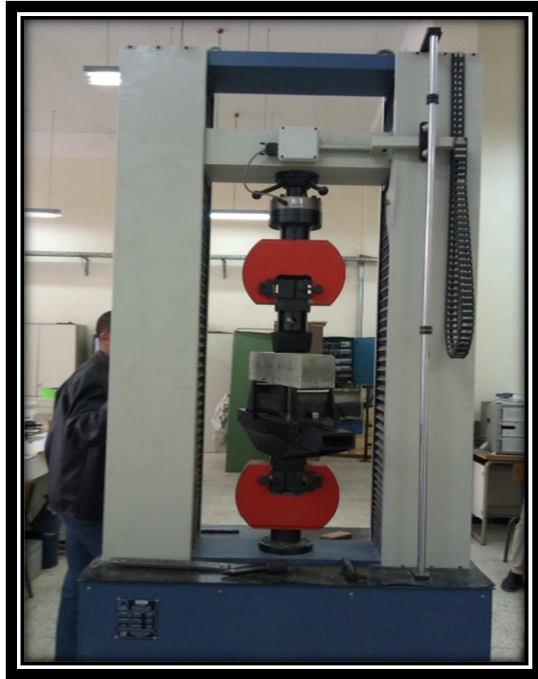
**b- Essai de traction par flexion (NF P 18-407) :**

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections prismatique (10x10x40) cm. Le prisme est placé dans une presse hydraulique de marque **Ibertest** pilotée par un micro-ordinateur. Sa capacité maximale est de 200 KN (voir figure II-9), elle est programmée pour les essais de compression et les essais de flexion pour des éprouvettes en béton. Elle est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture.

Le résultat que l'on cherche à tirer de cet essai est l'identification de la résistance à la traction  $f_t$  ainsi que le module de Young pour le béton vibré et les bétons autoplaçants.



**Figure II- 9 : Presse hydraulique Ibertest pilotée par un micro-ordinateur**



**Etape 1 : Epreuve soumise en Traction par flexion**



**Etape 2 : Fissuration de l'éprouvette.**



**Etape 3 : Les surfaces de l'éprouvette après la rupture totale.**

**Figure II-10 : Etapes de l'essai de traction par flexion.**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau II-7 suivant :

| Béton | Résistance brute à la traction par flexion à 28 jours (MPa) |
|-------|---|
| BO    | *   |
| BAP1  | 4.32  |
| BAP2  | 5   |
| BAP3  | 4.55  |

**Tableau II-7 : résistance à la traction par flexion des BAP.**

\* : L'essai n'est pas effectué, car le béton est écarté.

### ➤ Résultats de caractérisation des BAP à l'état durci et discussions

#### III-3-2-1 Résultats de caractérisation à l'état durci et discussion

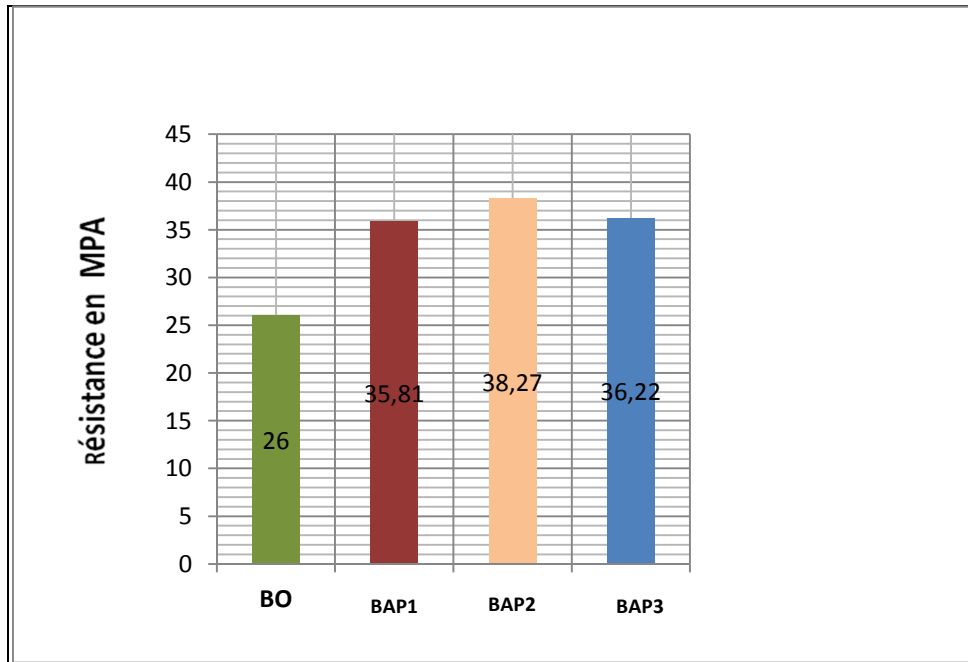
- **Discussion et interprétation des résultats de résistance des bétons à 28 jours :**

|               | Résistance à la compression à 28 jours (MPa) | Résistance brute à la traction par flexion à 28 Jours (MPa) |
|---------------|--|---|
| <b>BO</b>     | 26   | *   |
| <b>BAP 01</b> | 37.81  | 4.32  |
| <b>BAP 02</b> | 38.27  | 5   |
| <b>BAP 03</b> | 36.22  | 4.55  |

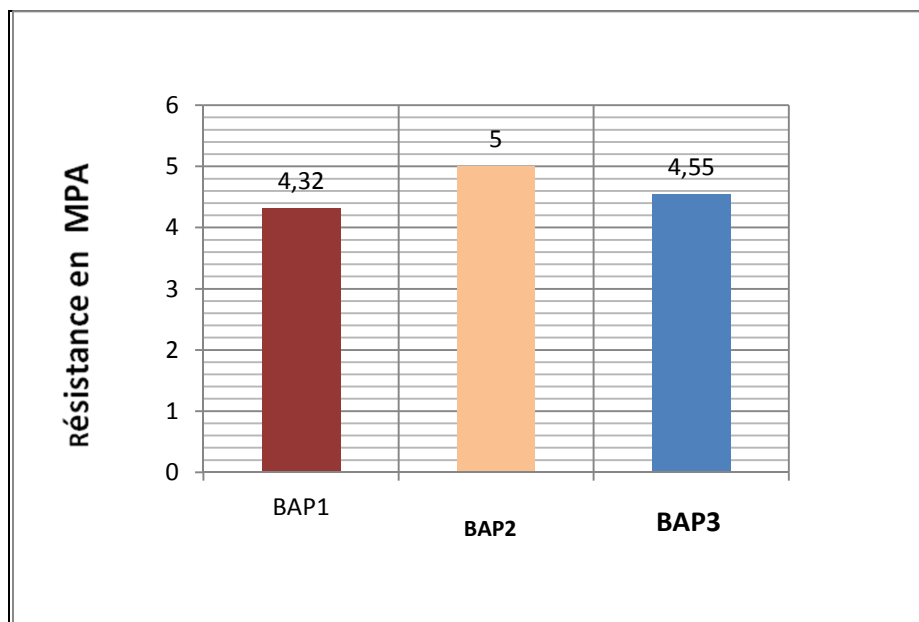
**Tableau II-8 : Récapitulatif des résultats d'essais effectués sur différents bétons étudiés.**

Notre premier constat porte sur la résistance à 28 jours des BAP, avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton auto plaçant qui présente une très bonne résistance mécanique à la compression à 28 jours ( $> 35$  MPa) par rapport au béton ordinaire tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5 et un rapport E/C = 0,485.

Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents BAP, nous avons représenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques sous forme d'histogrammes.



**Figure II-11** : Résistances à la compression des différents bétons étudiés.



**Figure II-12** : Résistances à la traction par flexion des BAP.

-En comparant les résistances mesurées, on constate que la résistance à la compression (figure II-11) des BAP est plus élevée par rapport au BO. On

constate une augmentation variant de ; 37,73 %(entre le BO et le BAP1), 47,19%(entre le BO et le BAP2) et 39,31%.(entre le BO et le BAP3).

-On remarque que la résistance des BAP est autour de 5MPa, le BAP2 a la plus élevée résistance et ce le cas par rapport a la compression.

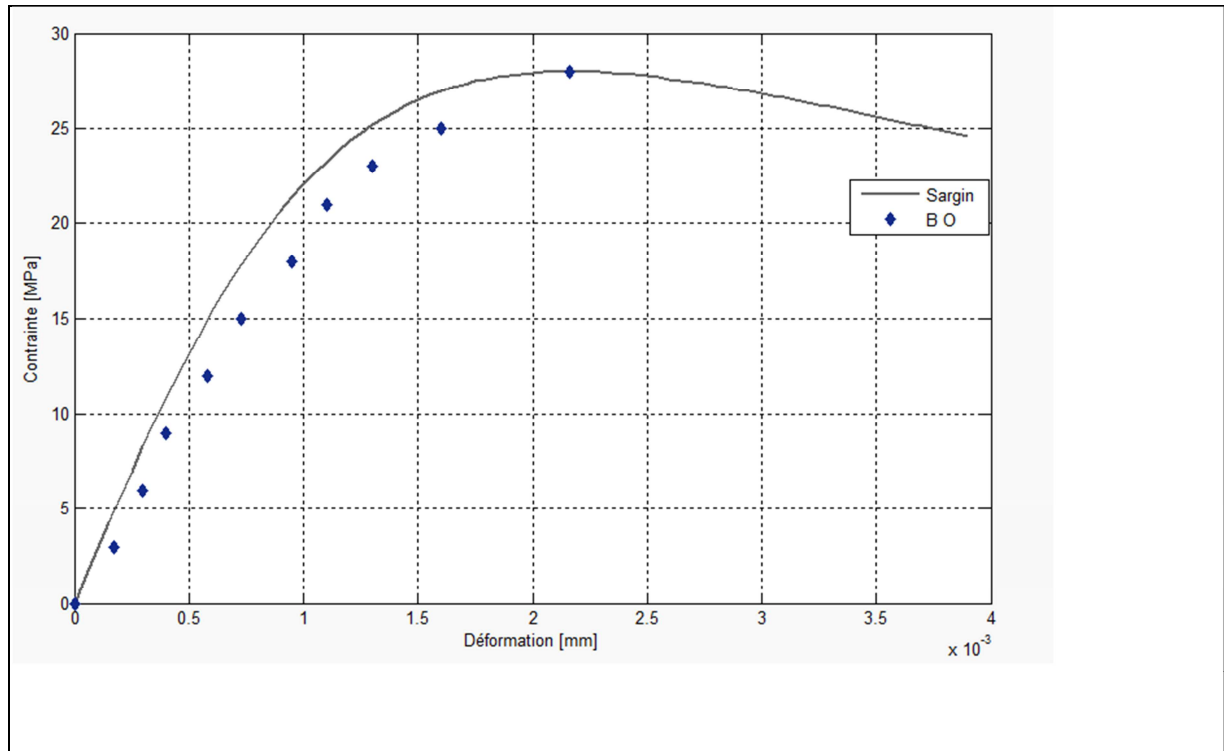
Les résistances élevées des BAP sont liées au :

- Volume de pâte important.
- L'utilisation du superplastifiant "Médaplast 40" dans les formulations des bétons autoplacants peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.
- La présence d'une quantité importante des ajouts (poudre de marbre, tuf, déchets de brique) comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités (réduire le volume des vides entre les granulats) et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.

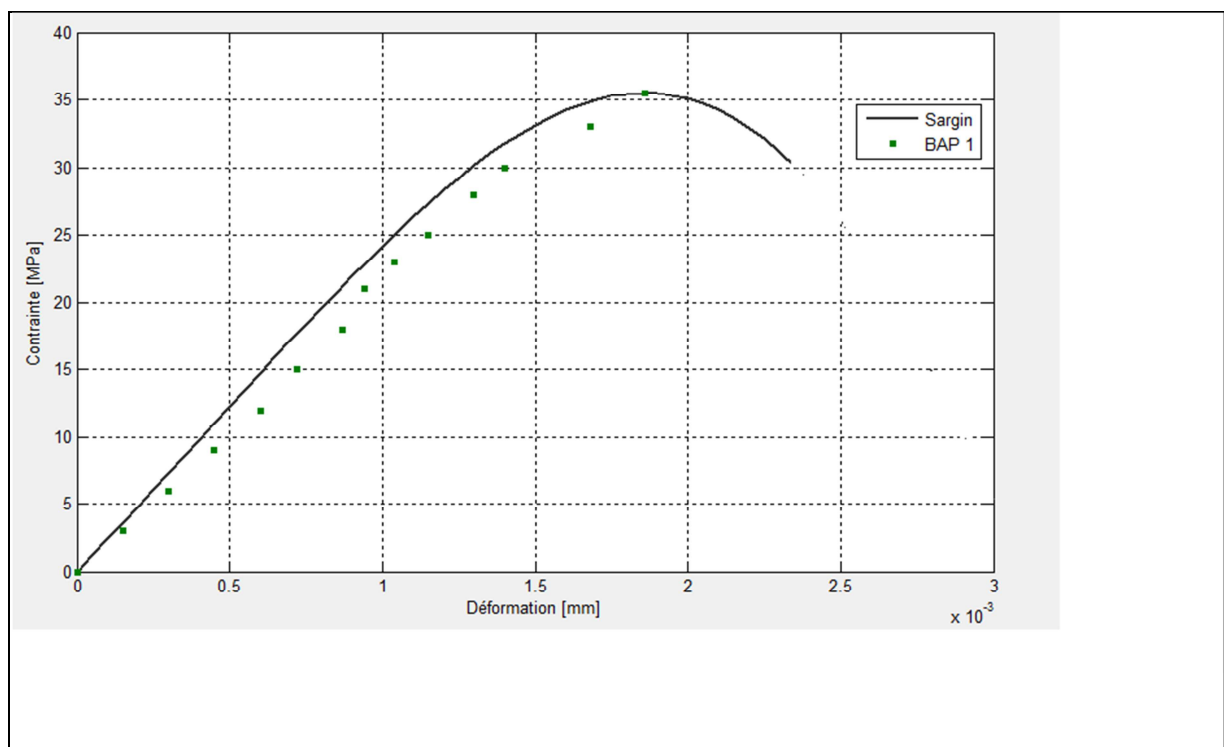
#### ✓ **Application de la relation de Sargin aux résultats expérimentaux**

La pluparts des modèles théoriques présentés dans la première partie précédente décrivent le comportement contrainte-déformation du béton sur une base des données expérimentales. Ici, on opte pour la loi de Sargin à cause de sa flexibilité et des paramètres qui sont proposées. Elle permet en effet de mieux représenter les résultats expérimentaux.

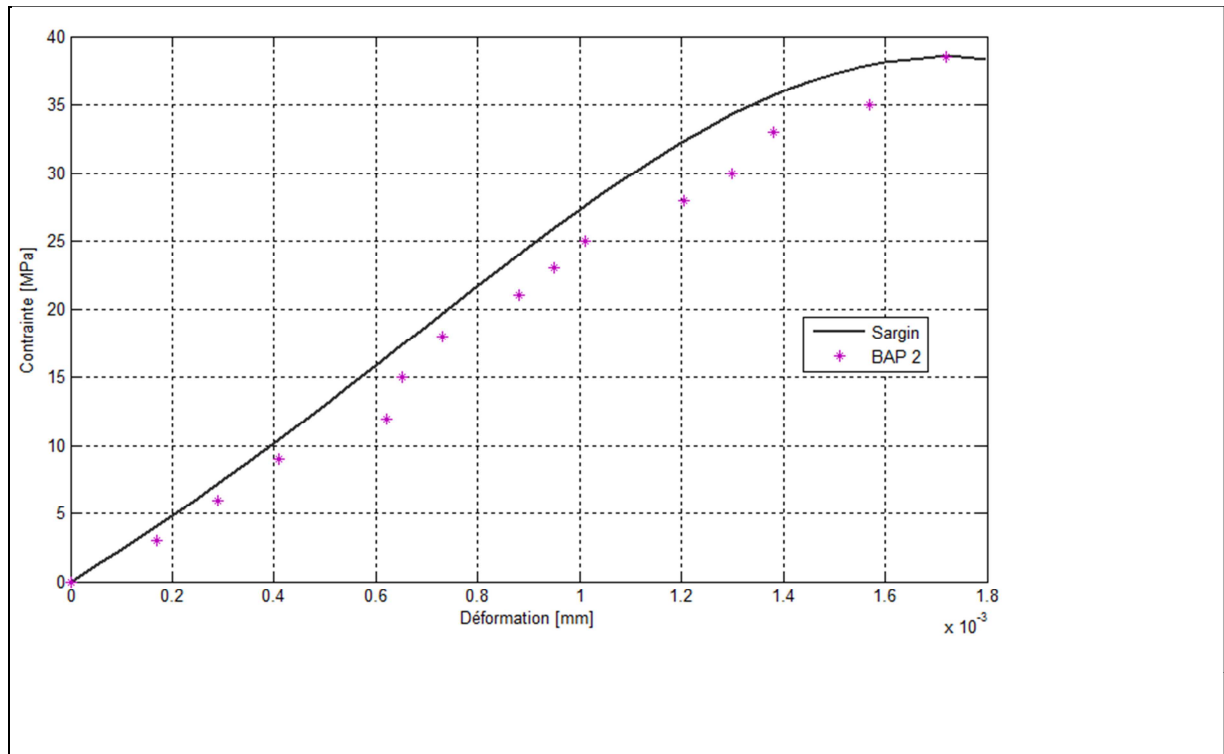
Les figures (II-13), (II-14), (II-15) et (II-16), représentent les confrontations des résultats obtenus des essais expérimentaux en compression avec la courbe théorique proposé par Sargin tout en tenant compte des caractéristiques obtenues expérimentalement.



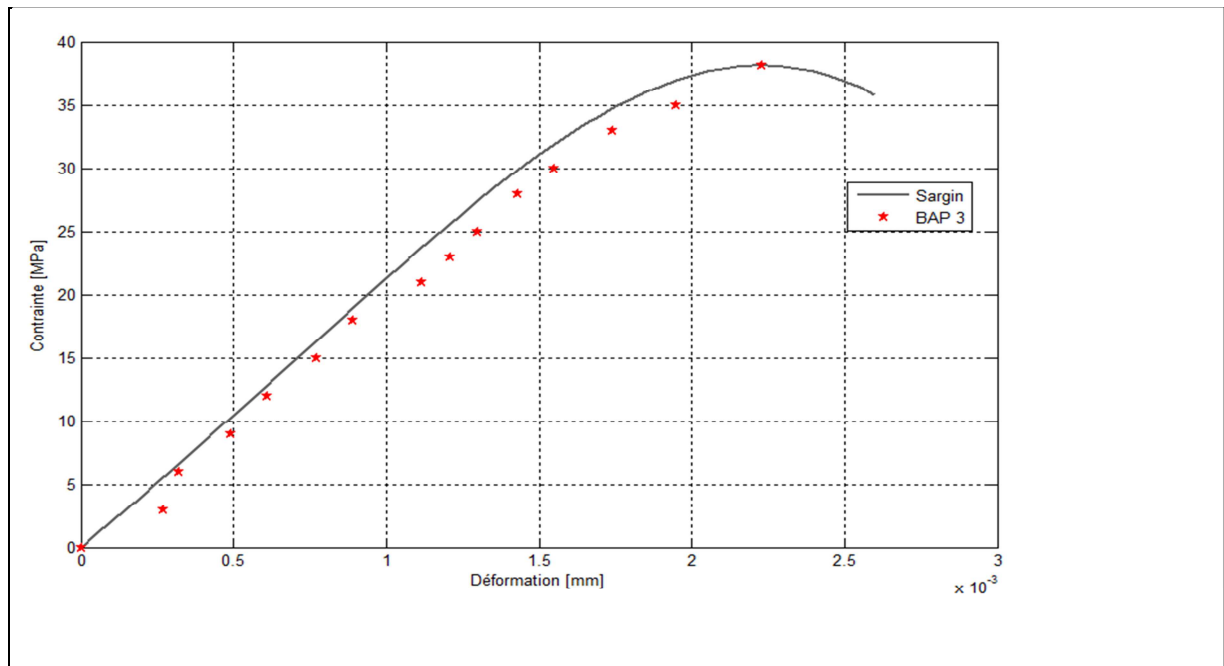
**Figure II-13 :** Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle de Sargin avec la courbe expérimentale de BO.



**Figure II-14 :** Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle de Sargin avec la courbe expérimentale de BAP 1.



**Figure II-15 :** Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle de Sargin avec la courbe expérimentale du BAP 2.



**Figure II-16 :** Confrontation de la courbe contrainte-déformation du modèle de Sargin avec la courbe expérimentale du BAP 3.

Pour les essais de compression, les courbes obtenues présentent toutes une partie droite dans le domaine élastique linéaire, puis ces courbes s'éloignent de cette droite. C'est ce qui représente la partie non linéaire.

Le maximum des courbes correspond à la résistance maximale  $F_{cj}$  et au-delà, les courbes présentent une branche descendante jusqu'à rupture du matériau.

Un palier de ductilité est observé sur la courbe représentant le comportement du BO : comportement élasto – plastique (observé sur la courbe loi de Sargin).

Il est moins visible sur les BAP du fait probablement de la résistance plus élevée : comportement se rapprochant du comportement élastique - fragile.

#### II-4 : Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale des propriétés à l'état frais et durci de bétons autoplaçants ainsi que celles d'un béton ordinaire.

Cette partie expérimentale a pour objectif de caractériser la résistance des bétons autoplaçants par comparaison avec celle du béton ordinaire. Pour cela, plusieurs formulations de BAP et de BO ont été mises au point, à partir de matériaux identiques :

Quatre compositions différentes ont été envisagées, trois bétons autoplaçants (BAP 01, BAP 02 et BAP 03) avec un rapport  $\frac{E}{C}$  et  $\frac{G}{S}$  identique. Un béton ordinaire (BO) conçu d'une manière à obtenir une résistance à la compression à 28 jours égale à 30 MPa.

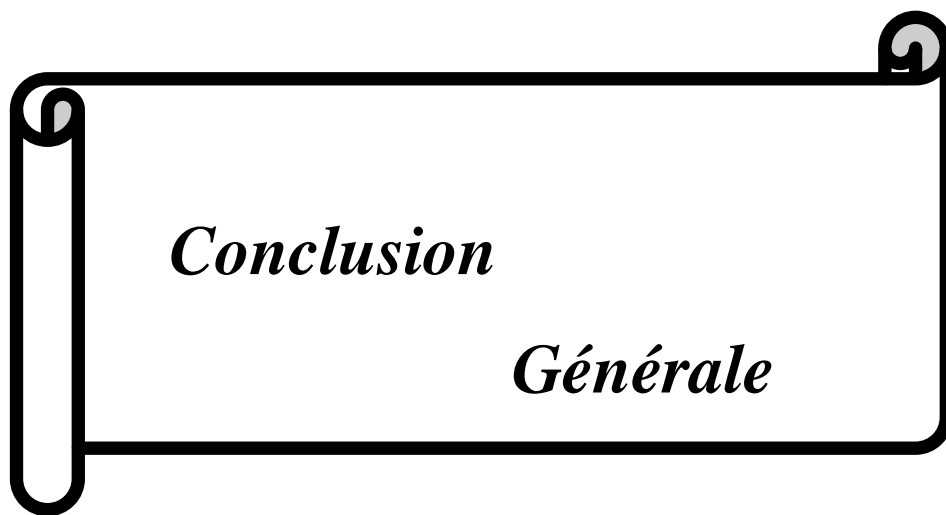
D'après les résultats obtenus précédemment on peut dire qu'effectivement les bétons autoplaçants ont de meilleures caractéristiques mécaniques que les bétons vibrés.

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

- ♦ Avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un béton ordinaire (vibré) qui présente une assez bonne résistance mécanique à la compression ( $\approx 25$  MPa) à 28 jours tout en sachant que nous avons utilisé un ciment 42,5 et un rapport E/C = 0,485.
- ♦ Avec les mêmes matériaux utilisés pour le béton vibré, nous avons formulé des bétons autoplaçants qui présentent des très bonnes résistances mécaniques à la compression à 28 jours ( $> 35$  MPa).
- ♦ Il est possible de confectionner un béton à la fois : fluide, stable, homogène et résistant c'est le béton autoplaçant (BAP).
- ♦ Les BAP présentent de meilleures performances que celles des bétons ordinaires.
- ♦ L'introduction du super-plastifiant, 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 viscosité par les ajouts.
- ♦ Le BAP à base du tuf présente des résistances à la compression ou à la traction par flexion très intéressantes on compare au BAP à base de poudre de marbre et du déchet de brique qui se caractérise par un même rapport E/C et la même quantité de ciment...

- ♦ Les trois types des ajouts (poudre de marbre, déchets de brique et le tuf ont prouvé leur efficacité on terme de substituant aux granulats. les trois types méritent donc des investigations supplémentaires.

Au final, on peut dire que les résistances obtenues a la compression et a la traction par flexion sur les bétons autoplaçants sont satisfaisantes, l'objectif était de fabriquer des BAP de résistance équivalente à celle de BO, ce qui signifie la possibilité d'utiliser ce genre de béton dans le cas des ouvrages courants.



*Conclusion*

*Générale*

## Conclusion générale

Les bétons autoplacants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car il offre de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique et technique. L'absence de vibration aide à la réduction des couts de production, permet d'avoir des éléments de géométrie complexes et fortement ferrailés. L'utilisation de BAP entraine la réduction des nuisances sonores ainsi que la pénibilité du travail.

Les objectifs de ce travail de thèse est de répondre à trois questions principales : le premier objectif était d'établir des formulations des BAP qui répondent aux recommandations et aux normes concernant les BAP. Le deuxième objectif était d'évaluer l'influence des ajouts (poudre de marbre, déchets de brique et le tuf) sur le comportement des BAP a l'état frais et durci. Le troisième objectif, est de comparer les performances des BAP, en termes de résistance mécanique(en compression et a la traction par flexion), par rapport à un béton ordinaire qu'est élaboré en utilisant les même matériaux.

La présente recherche fait partie des expériences algériennes, au terme de celle-ci, nous pouvons noter qu'il est possible de fabriquer des BAP avec les matériaux locaux présentant les mêmes composants de base qu'un béton ordinaire et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles connues a l'échelle internationale.

Cependant les exigences que doit satisfaire un béton autoplacant par rapport à un béton vibré sont sensiblement plus élevées en ce qui concerne sa formulation et sa caractérisation à l'état frais. La formulation du BAP requiert

une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports E/C et G/S, le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons .

Ce qui rend cette étude plus ardue est, d'une part, le manque de matériel sophistiqué pour la réalisation des essais. Et d'autre part le manque de temps nécessaire pour l'observation de différents phénomènes à long terme comme le retrait et la fissuration.

Sur la base des résultats obtenus nous pouvons conclure ce qui suit :

- ♦ L'utilisation des ajouts a été avantageuse pour formuler tous nos bétons autoplaçants. Avec ces additions, nous avons pu avoir des BAP à bonne viscosité (pas de ségrégation) sans ajout d'agent de viscosité.
- ♦ Avec l'ajout du tuf, nous avons formulé un BAP à une résistance en compression à 28 jours de 38,27 MPa.
- ♦ Les BAP élaborés présentent une résistance mécanique plus élevée que BO, l'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et améliorant les résistances mécaniques des BAP.

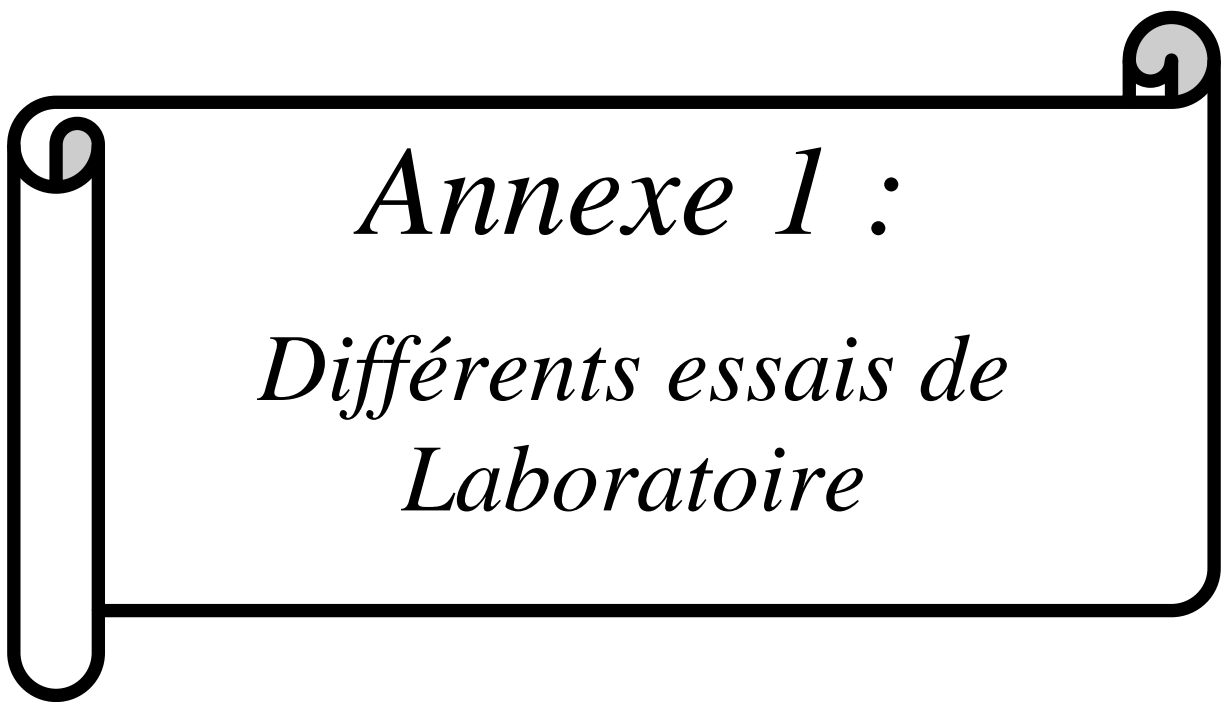
Finalité, tous les BAP formulés par l'ajout de poudre de marbre, déchet de brique et le tuf présentent des résistances en compression supérieures à 35 MPa, cela traduit l'aptitude de ces bétons à être utilisés comme béton prêt à l'emploi dans la construction en générale.

Bien que ces ajouts présentent des résultats satisfaisants sous l'essai de compression, néanmoins, cette étude reste restreinte pour confirmer l'utilisation des BAP étudiés dans le domaine de bâtiment. Des études complémentaires plus approfondies doivent être engagées en de nombreuses zones d'ombre subsistantes dans la connaissance du comportement des BAP, notamment :

- Le phénomène de retrait qui est, d'après quelques recherches, plus important que celui des bétons ordinaires.
- La résistance au feu
- Résistances à l'usure et aux chocs
- L'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques et propriétés des BAP.



*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.

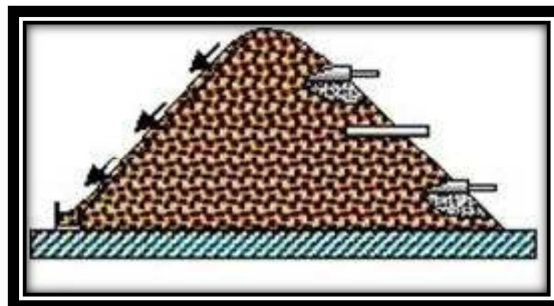
Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- 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.

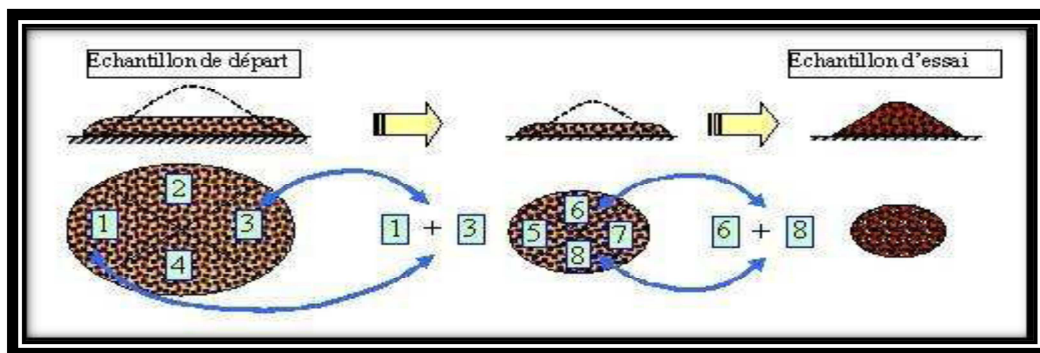


Figure 1.2: Opération de quartage

#### - Echantillonneur (quarter) :

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons a 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<br>(mm) | 0    | 0.063 | 0.08 | 0.1 | 0.125 | 0.16 | 0.2  | 0.25 | 0.315 | 0.4 | 0  | 0.63 |
| Tamis<br>(mm) | 0.80 | 1     | 1.25 | 1.6 | 2     | 2.5  | 3.15 | 4    | 5     | 8   | 10 | 12.5 |
| Tamis<br>(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  $(110 \pm 5)$  °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  $(110 \pm 5)$  °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).

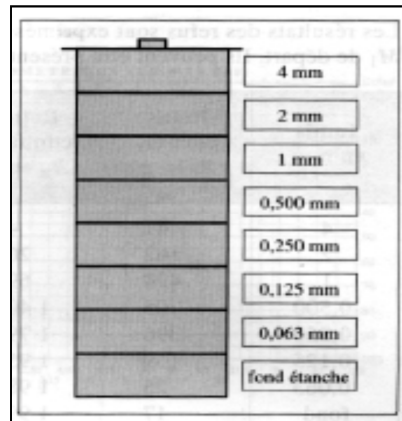


Figure 1.5 : Colonne de tamis

### - 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).

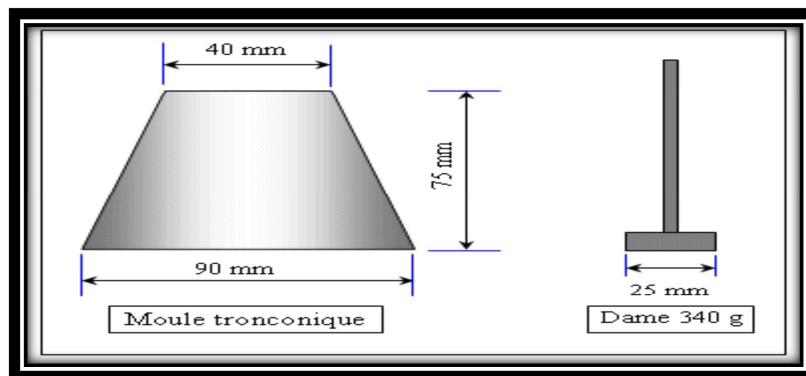


Figure 1. 6: Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers

### 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 du quel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

### 4-2 Equipement nécessaire:

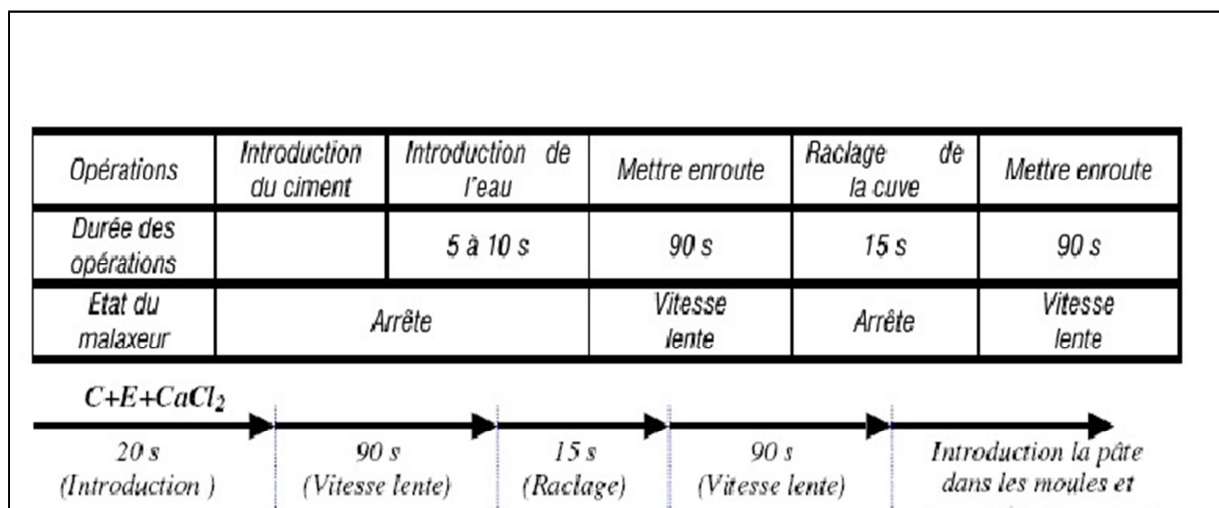
- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue 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(CaCl<sub>2</sub>) en prenant comme poids de CaCl<sub>2</sub>, 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).

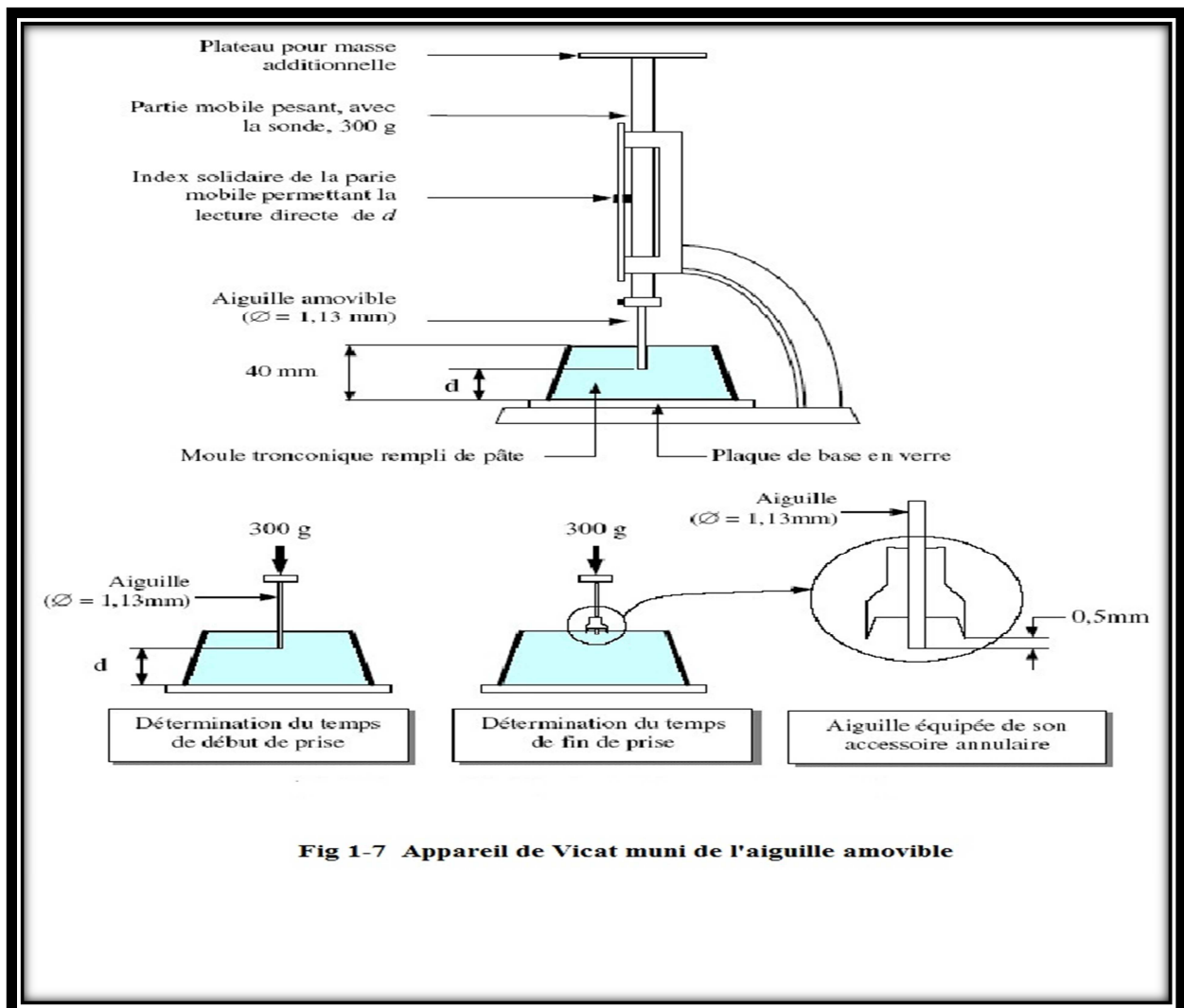


La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

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 pâte :

### 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 ».

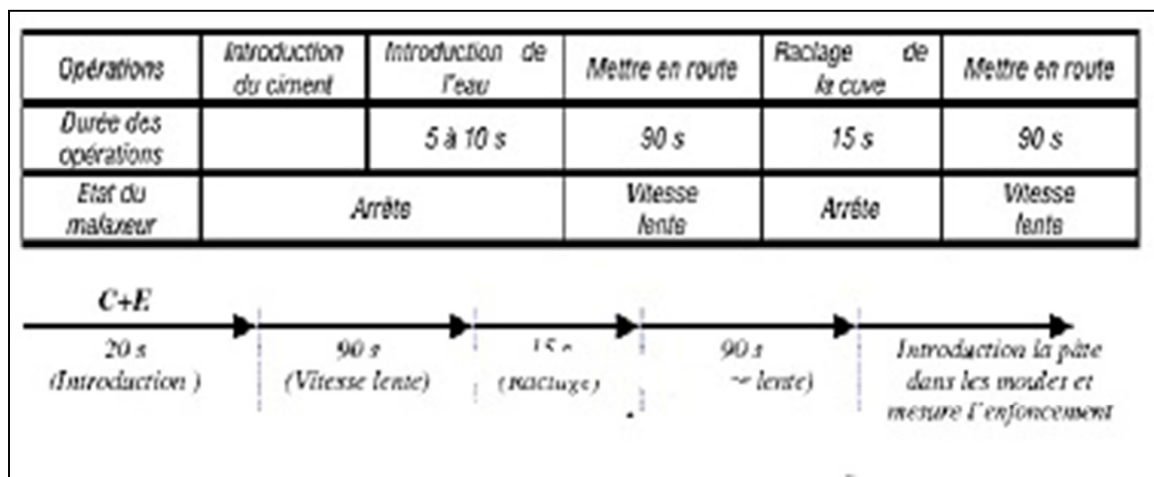
### **5-3 Equipement nécessaire :**

- 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 (**figure1.8**). 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.

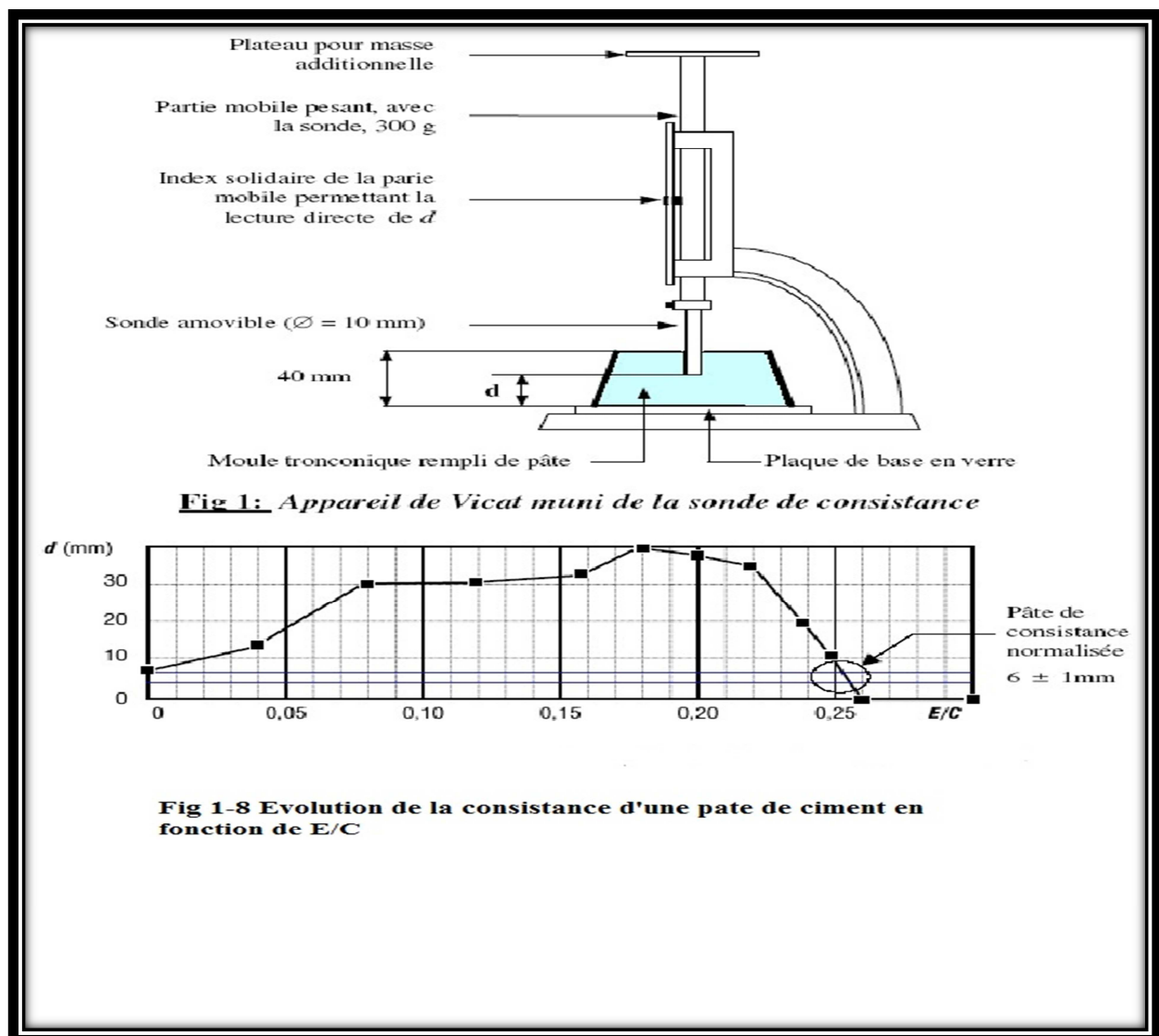


La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

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.

| <b>Matériau : sable 00/03</b>               |                               |  |                                     |                         |
|---|-------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------|
| Nature                                      | <b>Gravier concassé 00/03</b> |  |                                     |                         |
| Provenance                                  | <b>Carrière de Tizi ouzou</b> |  |                                     |                         |
| Date d'analyse                              | <b>25_12_2011</b>             |  |                                     |                         |
| Caractérisation faite selon <b>EN 933-1</b> |                               |  |                                     |                         |
| <b>Analyse granulométrique</b>              |                               |  |                                     |                         |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage        |                               |  |                                     |                         |
| Masse sèche totale                          |                               |  | <b>M<sub>1</sub></b>                | <b>2000g</b>            |
| Masse sèche après lavage                    |                               |  | <b>M<sub>2</sub></b>                | <b>1853g</b>            |
| Masse sèche des fines retirées après lavage |                               |  | <b>M<sub>1</sub>- M<sub>1</sub></b> | <b>147g</b>             |
| Passant au 0.063                            |                               |  | <b>P</b>                            | <b>29.8g</b>            |
| <b>Tamis en (mm)</b>                        | <b>Refus en (gr)</b>          | <b>Refus C en (gr)</b>                                     | <b>Refus C en (%)</b>               | <b>Tamisât C en (%)</b> |
| 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                    |
| <b>C : cumulé</b>                           |                               |  |                                     |                         |
| <b>% du tamisât des fines &lt;0,063</b>     |                               | <b>(M<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>) +p)*100/M<sub>1</sub></b> |                                     | <b>8.84</b>             |

| <b>Matériau : Gravier 03/08</b>             |                                     |                              |                |                  |
|---|-------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------|
| Nature                                      | <b>Gravier concassé 03/08</b>       |                              |                |                  |
| Provenance                                  | <b>Carrière de Tizi ouzou</b>       |                              |                |                  |
| Date d'analyse                              | <b>25_12_2011</b>                   |                              |                |                  |
| Caractérisation faite selon <b>EN 933-1</b> |                                     |                              |                |                  |
| <b>Analyse granulométrique</b>              |                                     |                              |                |                  |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage        |                                     |                              |                |                  |
| Masse sèche totale                          | <b>M<sub>1</sub></b>                |                              | <b>4000g</b>   |                  |
| Masse sèche après lavage                    | <b>M<sub>2</sub></b>                |                              | <b>3990.5g</b> |                  |
| Masse sèche des fines retirées après lavage | <b>M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub></b> |                              | <b>9.5g</b>    |                  |
| Passant au 0.063                            | <b>P</b>                            |                              | <b>8.78g</b>   |                  |
| 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             |
| <b>C : cumulé</b>                           |                                     |                              |                |                  |
| % du tamisât des fines <0,063               |                                     | $(M_1-M_2) + p) * 100 / M_1$ |                | 0.45             |

| <b>Matériau : Gravier 08/16</b>             |                                     |  |                       |                         |
|---|-------------------------------------|--|-----------------------|-------------------------|
| Nature                                      | <b>Gravier concassé 08/16</b>       |  |                       |                         |
| Provenance                                  | <b>Carrière de Tizi ouzou</b>       |  |                       |                         |
| Date d'analyse                              | <b>25_12_2011</b>                   |  |                       |                         |
| Caractérisation faite selon <b>EN 933-1</b> |                                     |  |                       |                         |
| <b>Analyse granulométrique</b>              |                                     |  |                       |                         |
| Procédé utilisé: Lavage par tamisage        |                                     |  |                       |                         |
| Masse sèche totale                          | <b>M<sub>1</sub></b>                | <b>5000g</b>   |                       |                         |
| Masse sèche après lavage                    | <b>M<sub>2</sub></b>                | <b>4994g</b>   |                       |                         |
| Masse sèche des fines retirées après lavage | <b>M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub></b> | <b>6g</b>  |                       |                         |
| Passant au 0.063                            | <b>P</b>                            | <b>12.5g</b>   |                       |                         |
| <b>Tamis en (mm)</b>                        | <b>Refus en (gr)</b>                | <b>Refus C en (gr)</b>                                     | <b>Refus C en (%)</b> | <b>Tamisât C en (%)</b> |
| <b>16</b>                                   | <b>0</b>                            | <b>0</b>   | <b>0</b>              | <b>100</b>              |
| <b>12.5</b>                                 | <b>1318.91</b>                      | <b>1318.91</b>   | <b>26.41</b>          | <b>73.59</b>            |
| <b>10</b>                                   | <b>1375.85</b>                      | <b>2694.76</b>   | <b>53.96</b>          | <b>46.04</b>            |
| <b>8</b>                                    | <b>1084.7</b>                       | <b>3779.46</b>   | <b>75.68</b>          | <b>24.32</b>            |
| <b>6.3</b>                                  | <b>715.14</b>                       | <b>4494.6</b>  | <b>90</b>             | <b>10</b>               |
| <b>5</b>                                    | <b>302.14</b>                       | <b>4796.74</b>   | <b>96.05</b>          | <b>3.95</b>             |
| <b>4</b>                                    | <b>87.39</b>                        | <b>4884.13</b>   | <b>97.8</b>           | <b>2.2</b>              |
| <b>3.15</b>                                 | <b>58.93</b>                        | <b>4943.06</b>   | <b>98.98</b>          | <b>1.02</b>             |
| <b>2.5</b>                                  | <b>20.48</b>                        | <b>4963.54</b>   | <b>99.39</b>          | <b>0.61</b>             |
| <b>1.25</b>                                 | <b>10.98</b>                        | <b>4974.52</b>   | <b>99.61</b>          | <b>0.39</b>             |
| <b>1</b>                                    | <b>1</b>                            | <b>4975.52</b>   | <b>99.63</b>          | <b>0.37</b>             |
| <b>0.08</b>                                 | <b>4.49</b>                         | <b>4980.01</b>   | <b>99.72</b>          | <b>0.28</b>             |
| <b>fond</b>                                 | <b>12.5</b>                         | <b>4992.51</b>   | <b>99.97</b>          | <b>0.03</b>             |
| <b>C : cumulé</b>                           |                                     |  |                       |                         |
| <b>% du tamisât des fines &lt;0,063</b>     |                                     | <b>(M<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>) * 100 / M<sub>1</sub></b> | <b>0.37</b>           |                         |



*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](http://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**  
فرائينكس

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](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto: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](mailto:orgm@wissal.dz)

|   |                                     |                          |
|---|-------------------------------------|--------------------------|
|  | ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE      | Edition du<br>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 :**

Calcite .....95%  
 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 :

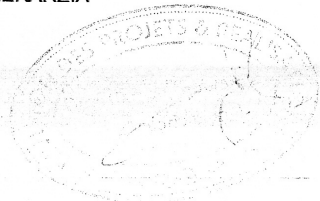
- En grands cristaux, ayant fréquemment une macle de biréfringence de taille variant de 0.3 à > 1mm, constituant en partie la masse de la roche.
- En microcristaux (microgranoblastique) (taille : 0.05- 0.25mm) agglutinés parfois autour des grands cristaux.


• **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



|  |                                       |                        |
|--|---------------------------------------|------------------------|
| <br><b>ORGM</b> | <b>ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE</b> | Date d'envoi :23/01/07 |
|  | <b>Résultats d'analyses chimiques</b> | 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

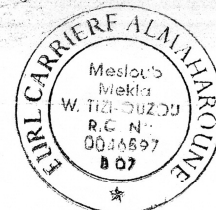
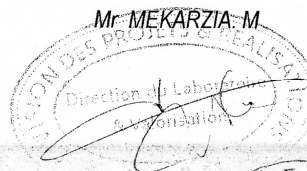
| N°<br>D'ordre | N°<br>D'échantillon | Analyse des éléments majeurs (%) |                                |                                |       |      |                   |                  |                  |      |                               |       |
|---------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------------------|-------|
|               |                     | SiO <sub>2</sub>                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | PAF   |
| 1             | 03<br>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<br>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



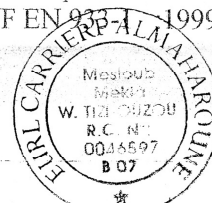
|  |  |                    |
|--|--|--------------------|
| <br><b>ORGM</b> | <b>ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE</b>                  | Edition 17/01/2007 |
|  | Résultats d'analyses et essais sur monolithe et sables | Ref : ENGR 9873    |

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


|  |  |                    |
|--|--|--------------------|
| <br><b>ORGM</b> | <b>ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE</b>                  | 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 <sup>3</sup> | Masse spécifique g/cm <sup>3</sup> | Porosité %     | Absorption, % | Résistance à la compression, Kg/cm <sup>2</sup> |            |
|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------|---------------|---|------------|
|                               |                                   |                                    |                |               | Sec   | Humide     |
| 01                            | 2,66                              | <b>2,70</b>                        | 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                       | <b>2,68</b>                       |                                    |                | <b>0,73</b>   | <b>0,19</b>                                     | <b>476</b> |
| Coefficient de ramollissement |                                   |                                    | 0,97           |               |   |            |
| Particules argileuses, %      |                                   |                                    | 0,14           |               |   |            |
| Classe, mm                    | Lamellaires, %                    | Los Angles, %                      | Micro Deval, % |               |   |            |
|                               |                                   |                                    | MDS            | MDE           |   |            |
| 16 - 31,5                     | <b>89.69</b>                      | <b>60.83</b>                       | //             | //            |   |            |
| 10 - 25                       | <b>86.02</b>                      | <b>65.60</b>                       | //             | //            |   |            |
| 10 - 14                       | //                                | //                                 | <b>19.96</b>   | <b>45.20</b>  |   |            |
| 6,3 - 10                      | //                                | //                                 | <b>43.08</b>   | <b>58.24</b>  |   |            |
| 4 - 6,3                       | //                                | //                                 | <b>84.30</b>   | <b>82.28</b>  |   |            |



|  |  |                    |
|--|--|--------------------|
| <br><b>ORGM</b> | <b>ENREGISTREMENT SYSTEME QUALITE</b>                  | Edition 17/01/2007 |
|  | Résultats d'analyses et essais sur monolithe et sables | Ref : ENGR 9873    |

### Sables

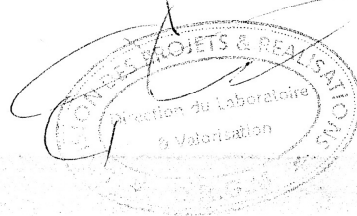
| Essai  | Echantillon       |          | Sable blanc |          | Sable rouge |          |
|--|-------------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
|  | Tamis, mm         | refus, % | Tamis, mm   | refus, % | Tamis, mm   | refus, % |
| Granulométrie                                | 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 <sup>3</sup>   | 2.64              |          | 2.53        |          |             |          |
| Poids volumique apparente, g/cm <sup>3</sup> | 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 <sub>3</sub> (%), (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 Chucho, 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 Committee 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.

[OZA90]- 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]:Chen W.F., [1982]. « Plasticity in reinforced concrete», New York: McGraw-Hill Bookstore, 1982, 456p.

[52]: Karsan P., Jirsa J.O., [1969] « Behavior of concrete under compressive loading». Journal of Structures Div., Vol-95 pp 2543-2563.

[53]: Mazars J., Millard A., « Comportement dynamique des bétons et génie parasismique», Hermès Sciences, 2004, 390 pages.

[54]: Exadaktylos G.E., Vardoulakis I., Kourkoulis S.K., « Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams - I». Technical théory. International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, 2001, pp. 4091-4117.

[55] : BAEL 91 modifié 99. « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites ».

[56]: Eurocode 2, J.-M. PAILLÈ. « Calcul des structures en béton», G12043, 2009.

[57]: Sargin. M, « Stress-strain relation ships for concrete and the analysis of the structural concrete sections » S.M Study n<sup>0</sup>4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1971.

[58]: Neville A.M. (1996) « Current problems regarding concrete under sustained loading», Proceeding International Association for Bridge and structural Engineering. 1996. vol-26, p.337-343.

[59]: Kachanov LM, [1958] « On Creep Rupture Time». Proc. Acad. Sci. USSR, Div. Eng. Sci., 8, pp. 26–31

[60]: Mazars J., [1984]. « Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non-linéaire et à la rupture du béton de structure». Thèse de doctorat d'état, Université Paris6.

[61]-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.

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