

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : Matériaux en Génie Civil



FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE  
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

THEME

**Amélioration du comportement rhéologique et mécanique  
des B.AP sans/avec fine par l'ajout de différentes  
fractions des granulats.**

Présenté par :

**HALLAB Nafia El Aid  
DJEMLI Dawoud Belkacem**

Dirigé par :

**Dr. BAALI laid**

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021 / 2022



# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier tous d'abord (ALLAH), qui nous a donné la force de faire ce modeste travail.*

*Aussi nous tenons à exprimer notre gratitude et profonde reconnaissance à tous ceux et toutes celles qui nous ont donnés le coup de main à la réalisation de ce mémoire et on particulier :*

*Notre encadreur : Mr. BAALI.L pour sa direction.*

*Tous les enseignants de l'université de M'sila, spécialement ceux du département de Génie Civil, pour les efforts qui nous ont donnés durant notre formation.*

*Sans oublier nos collègues; les étudiants de 2<sup>ème</sup> années master Matériaux en Génie Civil.*

## Résumé

Les bétons auto-plaçants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car ils offrent de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique, technique que social. Ils sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais. L'utilisation de béton auto-plaçants entraîne la réduction des nuisances sonores, ainsi que la pénibilité du travail.

Ce travail s'inscrit dans une politique de contribution à l'amélioration des propriétés des bétons autoplaçants préparés à base de matériaux locaux de la région de M'sila. Dans cette étude, on s'intéresse à obtenir une formulation du béton la plus adéquate aux différents matériaux locaux de la région de M'sila avec l'ajout de différentes fractions des granulats.

Notre étude est dirigée vers l'effet des paramètres suivants sur les propriétés physico-mécaniques du composite tels que : la ségrégation dynamique, le diamètre d'étalement ainsi que les résistances mécaniques (compression, traction). Il s'agit donc de déterminer les critères à imposer sur ces paramètres, afin d'aboutir à la confection d'un béton auto-plaçant caractérisé par une résistance acceptable.

Les résultats obtenus montrent que la maniabilité des BAP est améliorée par l'ajout des superplastifiants, par contre les résistances mécaniques sont affectées pour les BAP avec fine. Par contre, les résultats expérimentaux de résistances en compression montrent des comportements significatifs des BAP sans fine et sans agent de viscosité. Ils ont permis de distinguer un gain de résistance entre 27.30 et 52, ce gain est expliqué par une réhydratation de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau à travers les pores pour les BAP, mais aussi à de meilleures propriétés liantes des hydrates formés.

## **Abstract**

Self-compacting concretes represent a new advance for concrete construction because they offer many advantages from an economic, technical and social point of view. They are very fluid concretes, which are put in place without vibration. When casting in a formwork, the tightening of a SCC is ensured under the simple effect of gravity. Thanks to their formulation, they offer exceptional flow and form-filling characteristics while perfectly resisting segregation. Homogeneous and stable, they have resistance and durability similar to those of traditional concretes, from which they differ by their properties in the fresh state. The use of self-compacting concrete leads to the reduction of noise pollution, as well as the difficulty of the work.

This work is part of a policy to contribute to the improvement of the properties of self-compacting concretes prepared from local materials in the M'sila region. In this study, we are interested in obtaining a formulation of the most suitable concrete for the different local materials of the region of M'sila with the addition of different fractions of aggregates.

Our study is directed towards the effect of the following parameters on the physico-mechanical properties of the composite such as: the dynamic segregation, the diameter of spreading as well as the mechanical resistances (compression, traction). It is therefore a question of determining the criteria to be imposed on these parameters, in order to achieve the making of a self-compacting concrete characterized by an acceptable resistance.

The results obtained show that the workability of SCC is improved by the addition of superplasticités; on the other hand the mechanical resistances are affected for SCC with fine. On the other hand, the experimental results of compressive strengths show significant behavior of SCC without fine and without viscosity agent. They made it possible to distinguish a gain in resistance between 27.30 and 52, this gain is explained by a rehydration of the cementations matrix due to the migration of water through the pores for the SCC, but also to better binding properties of the hydrates forms.

## **SOMMAIRE**

i. INTRODUCTION GENERALE.....	01
ii. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	02
iii. PRESENTATION DU CONTENU DE CETTE ETUDE.....	03

### **Chapitre-I- Synthèse bibliographique**

I.1. INTRODUCTION.....	04
I.2. HISTORIQUE.....	04
I.3. CONSTITUANTS DU BETON AUTOPLAÇANTS.....	04
I.3.1. Granulats.....	04
I.3.2. Pâte.....	05
I.3.3. Ciment.....	05
I.3.4. Additions minérales.....	05
I.3.5. Superplastifiants.....	06
I.3.6. Agent de viscosité.....	07
I.3.7. Eau.....	08
I.3.8 Fillers calcaires.....	08
I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BETON AUTOPLAÇANT.....	08
I.5. CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT (BAP).....	09
I.5.1 Caractérisation à l'état frais.....	09
I.5.1.1 Essai évaluant la fluidité (étalement).....	09
I.5.1.2 Essai de la boîte en L (L-box test).....	10
I.5.1.3 Essai de stabilité au tamis.....	11
I.5.2 Caractérisation d'un BAP à l'état durci.....	13
I.5.2.1 Essais de compression.....	13
I.5.2.2 Essais de traction par flexion.....	13
I.5.2.3 Module d'élasticité.....	13
I.5.3 Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP).....	14
I.6. DIFFERENTES METHODES DE FORMULATION DES BAP.....	14
I.6.1 L'approche japonaise.....	14
I.6.2 L'approche suédoise.....	15
I.6.3 L'approche du laboratoire centrale des ponts et chaussier LCPC.....	15
I.7. DOMAINE D'UTILISATION DES BAP.....	15
I.9. DURABILITE DES BETONS.....	16
I.9.1 Principaux processus chimiques de dégradation des BAP.....	16
I.9.1.1 Effet de l'Attaque des sulfatique externe.....	16
I.10. ETUDE COMPARATIVE DE DURABILITE ENTRE LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS ET LES BÉTONS ORDINAIRES.....	17
I.11. CONCLUSION.....	17

## **Chapitre-II-**

### **Les caractéristiques des matériaux**

II. 1 INTRODUCTION .....	19
II. 2 SABLE .....	19
II. 2. 1 sable de RIVIÈRE (oued mAiter) .....	19
II. 2. 1. 1 Origine du sable .....	19
II. 2. 1. 2 Exploitation du sable .....	19
II. 2. 1. 3 Aspect général.....	19
II. 2. 2 Caractéristiques physiques du sable utilisé .....	20
II. 2. 2. 1 Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555 .....	20
II. 2. 2. 2 Masse volumique apparente : NF P 18-554.....	21
II. 2. 2. 2 1 Masse volumique apparente à l'état lâche .....	21
II. 2. 2. 3 Compacité .....	21
II. 2. 2. 4 Porosité : NF P 18-554 .....	22
II. 2. 2. 5 Equivalent de sable : NF P 18-598.....	23
II. 2. 2. 6 Teneur en eau : NF P 18-555 .....	25
II. 2. 2. 8 Analyse granulométrique : NF P 18-304. NF P 18-560 .....	26
II. 2. 2. 9 Module de finesse.....	28
II. 2. 3 Caractéristiques chimique du sable.....	28
II. 3 Gravier .....	29
II. 3. 1 Origine du gravier de COSIDER .....	29
II. 3. 1. 1 Classes granulaires .....	29
II. 3. 1. 2 Résistance à la compression de la roche d'origine.....	29
II. 3. 2 caractéristiques physiques du gravier utilisé .....	29
II. 3. 2. 1 Masse volumique apparente.....	29
II. 3. 2. 2 Porosité et compacité : NF P 18-554.....	30
II. 3. 2. 3 Masse volumique absolue.....	31
II.3.2.4 Analyse granulométrique.....	31
II. 3. 2. 5 Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554.....	32
II. 3. 2. 6 Teneur en eau .....	33
II. 3. 3 caractéristiques mécaniques des graviers utilisés .....	33
II. 3. 3. 1 Essai de résistance au choc (essai Los Angeles) : NF P18-573 .....	33
II. 3. 3. 2 Essai de résistance à l'usure (Essai MD) : NF P18-572.....	33
II. 3. 4 caractéristiques chimiques des graviers utilisés.....	34
II. 4 CIMENT.....	34
II. 4. 1 Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	35
II. 4. 1 Caractéristiques chimiques du ciment utilisé.....	35
II. 5 L'EAU DE GACHAGE .....	36
II. 5. 1 Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée.....	36

## **Chapitre-III-**

### **Techniques expérimentales**

III.1. INTRODUCTION .....	37
III.2 EXPERIMENTATION .....	37
III.2.1 Description des essais expérimentaux employés (état frais et durci) .....	37
III.2 1.1 À l'état frais.....	37
III.2 1.1.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8].....	37

III.2.1.1.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11].....	39
III.2.1.1.3 Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10].....	40
III.2.1.1.4 Masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6].....	41
III.2.1.2 À l'état durci .....	42
III.2.1.2.1 Essai de compression [NF EN206-1].....	42
III.2.1.2.2 Essai de traction par flexion : [NF P18-408].....	43
III.2.1.2.3 Essai brésilien traction par fendage NFP 18-408.....	43
III.2.2 Confection des éprouvettes .....	44
III.2.3 Procédure de conservation des éprouvettes.....	44
III.2.4 Composition du béton	

## **Chapitre-VI-**

### **Résultats, Interprétations et Commentaires**

IV. 1 INTRODUCTION.....	45
IV.2 PRESENTATION DES RESULTATS .....	45
IV.2.1 L'état frais .....	46
IV.2. 2 L'état durci .....	49
IV.2.2.1 Résistance à la compression .....	49
IV.2.2.2 Résistance traction par flexion .....	50
IV.2.2.3 Essai de fendage .....	51
IV.3 CONCLUSION .....	52

---

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

---

## **i. INTRODUCTION GENERALE**

Les bétons autoplaçants (BAP) s'écoulent sous l'effet de leur poids propre sans recours à aucune vibration, cette propriété nécessite une très grande fluidité (sans risque de ségrégation) en incorporant dans le béton une quantité élevée de fines, et en réduisant le rapport (Eau/Poudre) par l'introduction des superplastifiants. La qualité des granulats est un paramètre très important, elle influe sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. 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, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc. Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR). Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferrailés ou à géométrie complexe. Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines ou l'emploi d'un agent de viscosité.

Dans le cadre de la rentabilité économique et de l'optimisation des performances techniques dans le domaine des travaux de bétonnage, la nécessité pour notre pays d'accélérer le

développement des bétons s'avère une priorité , ainsi , l'industrie de la construction est sans doute une des plus grandes consommatrices de ressources naturelles est en même temps responsable de la production d'un grand volume de déchets , donc l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des bétons et les questions liées à l'environnement sont les préoccupations fréquentes des études actuelles sur les bétons avec le développement des adjuvants et la disponibilité d'additions actives, l'emploi de béton de haute performance a fortement augmenté durant ces dernières années. L'utilisation des ajouts minéraux dans les bétons comme substitut du ciment a des avantages divers dont les principaux se rapportent au fait que le ciment est le composant le plus coûteux du béton que sa production exige une grande consommation d'énergie et que la production d'une tonne de ciment libère approximativement autant de dioxyde dans l'atmosphère. Les autres avantages comprennent la minimisation des résidus industriels (dans des sites d'enfouissement), une réduction de la demande en ressources naturelles par exemple, moins de calcaire pour fabriquer le ciment. L'un des matériaux les plus utilisés comme addition remplaçant une partie du ciment dans les bétons est le laitier de hauts fourneaux qui est un déchet industriel résultant de l'élaboration de la fonte et les fillers calcaire.

## **ii. OBJECTIF DE L'ETUDE**

Les différentes propriétés des bétons autoplacants (viscosité, fluidité, ségrégation,...) rendent leur composition relativement compliquée.

C'est dans ce contexte que se situe l'étude menée dans ce travail. On s'est attaché à établir une composition du béton auto-plaçant à base de matériaux locaux; consistant à évaluer l'influence de différentes fractions des granulats (dimensions) sur les propriétés physico-mécaniques.

Cette étude comporte trois grandes parties :

- Une étude physico-chimique des granulats (analyse chimique, granularité, porosité, compacité, etc...);
- Une évaluation d'effet de la dimension des granulats sur les propriétés du béton autoplacants à l'état frais tels que : la ségrégation dynamique, le diamètre d'étalement, ....etc ;
- Une caractérisation mécanique (essais mécaniques sur béton confectionné à base des matériaux locaux).

Enfin, nous pouvons dire, que ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des bétons autoplacants préparés à base de matériaux locaux.

### **iii. PRESENTATION DU CONTENU DE CETTE ETUDE**

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier est destiné à un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Dans cette partie, nous avons fait la synthèse des principales informations contenues dans certains ouvrages et articles, afin d'obtenir une synthèse, rassemblant et comparant les éléments utiles, pour obtenir de meilleures performances à l'utilisation de matériaux dans le béton autoplaçant.

Dans le second chapitre, nous présenterons, les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans l'expérimentation.

Le troisième chapitre est consacré à la technique expérimentale. Nous présenterons dans cette partie les essais expérimentaux effectués sur les composites élaborés.

Le quatrième chapitre, présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions faites lors de cette étude.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

---

---

**CHAPITRE-I-**  
**Synthèse bibliographique**

---

---

## **I.1. INTRODUCTION**

Les bétons autoplaçants (BAP) sont reconnus pour leur très grande déformabilité et leur facilité de mise en œuvre sous l'effet de leur poids propre, sans nécessité de vibration, même en présence de ferraillements très denses. Il peut être intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil : ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement. Donc, on présente dans ce chapitre, les propriétés du béton autoplaçant, les opportunités technologiques apportées par ce type de béton et les arguments qui jouent en sa faveur comme matériau d'avenir. On présente aussi l'historique de leur développement ainsi que leur définition, ce chapitre fait une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BAP et les caractéristiques à l'état frais et durci, finalement, il met en relief les innovations et les avantages apportés par les BAP.

## **I.2. HISTORIQUE**

Il est apparu dans les années 1980 au Japon, par les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de l'Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton.

## **I.3. CONSTITUANTS DU BETON AUTOPLAÇANTS**

Le béton se compose de deux parties principales : l'agrégat et la pâte. Par rapport au béton ordinaire (BO), une pâte se définit comme un mélange de ciment, d'eau et de gravier.

En général, les BAP contiennent les mêmes composants que le BO, qui est du ciment, Eau, sable et gravier. A ces quatre ingrédients s'ajoutent des fines et Matériaux auxiliaires selon la caractéristique requise. Proportions exactes de chaque composant dépend bien sûr de la méthode de rédaction choisie [01].

### **I.3.1. Granulats**

La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des bétons autoplaçants aux états frais et durci [03]. Les bétons autoplaçants peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, afin d'éliminer le risque de blocage du béton en zone confiné, il faut limiter le volume des granulats en éliminant les gros diamètres. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité du liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre, pour les bétons

autoplaçants, un rapport gravier/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée [04].

### **I.3.2. Pâte**

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment+ additions+ eau efficace) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les bétons autoplaçants est donc élevé (330 à 400 l/m<sup>3</sup> )

### **I.3.3. Ciment**

Le ciment contient deux matériaux de base, la chaux et l'argile, et des matériaux de base leur sont ajoutés, à savoir la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. La chaux et l'argile sont broyées dans des concasseurs et mélangées dans des proportions déterminées par le laboratoire et broyées dans des concasseurs, puis passées dans un four dont la température est d'environ 1430°C. Ensuite, nous obtenons du clinker.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. [3]

Plusieurs travaux ont été menés sur les bétons autoplaçants dans le sens du choix du type de ciment à utiliser. Ces travaux montrent que la résistance et la durabilité du béton dépendent principalement du dosage du ciment [05].

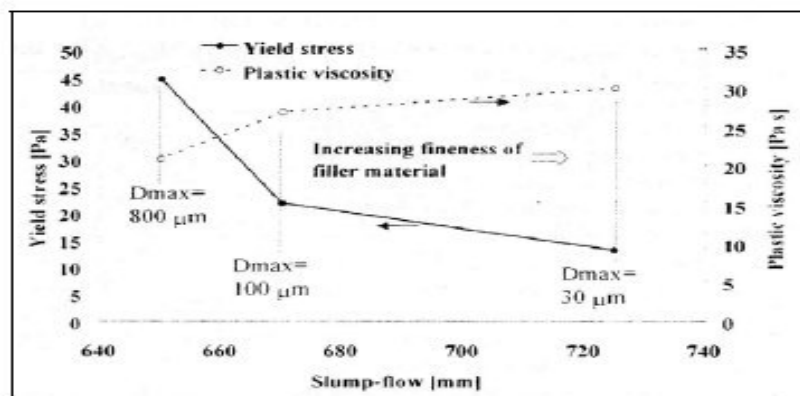
### **I.3.4. Additions minérales**

Les additions minérales sont connues par leur influence sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci [06]. Les additions minérales améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'addition, elles améliorent aussi la granulométrie du squelette dans le béton en remplissant les vides entre les grains grâce à leurs petites tailles.

Toutefois, l'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais dépend principalement du dosage, du type et de la finesse [05]. L'addition la plus utilisée généralement est la poudre de calcaire appelée aussi filler de calcaire car elle est généralement admise dans plusieurs travaux de recherches en tant qu'ajout économiquement fiable. Ce sont les exigences de résistances à la compression, les critères de durabilité (EN 206,

DTU 21, ou normes XP P 18-305 etc..) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire etc.) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques du béton [04] (voir fig. 1.1).



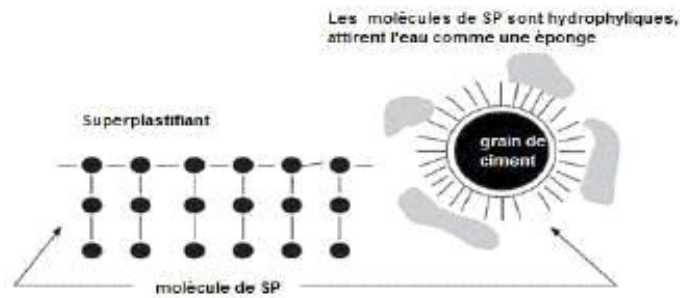
**Fig 1.1 Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant [04].**

L'une des fines les plus récentes utilisées comme addition remplaçant une partie du ciment dans le béton autoplaçant sont les fines d'argiles cuites à une température de 900°C. L'ajout de 5% de ces fines qui se présentent sous forme de poudre de déchet de brique a permis non seulement d'améliorer les résistances mécaniques mais aussi de favoriser un meilleur comportement rhéologique en matière de fluidité et de stabilité par rapport au béton autoplaçant témoin (sans ajout) [07]. Comme on peut citer aussi d'autres ajouts comme le laitier, utilisé dans le cadre du développement de la formulation du BAP à base des matériaux locaux Algériens [08]. D'après les résultats des recherches menés sur le BAP à base de laitier, ce dernier présente des caractéristiques rhéologiques telles que l'étalement et la résistance à la ségrégation nettement améliorées par rapport à un BAP sans laitier [08]. Son avantage qu'il soit à base de matériaux locaux ce qui réduit le coût et en même temps avoir l'aspect écologique en réduisant la quantité de ciment et le laitier comme étant un déchet.

### **I.3.5. Superplastifiants**

Produit incorporé au moment du malaxage du béton ou mortier à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton ou mortier, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou dur, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des afin de modifier ses propriétés à l'état frais

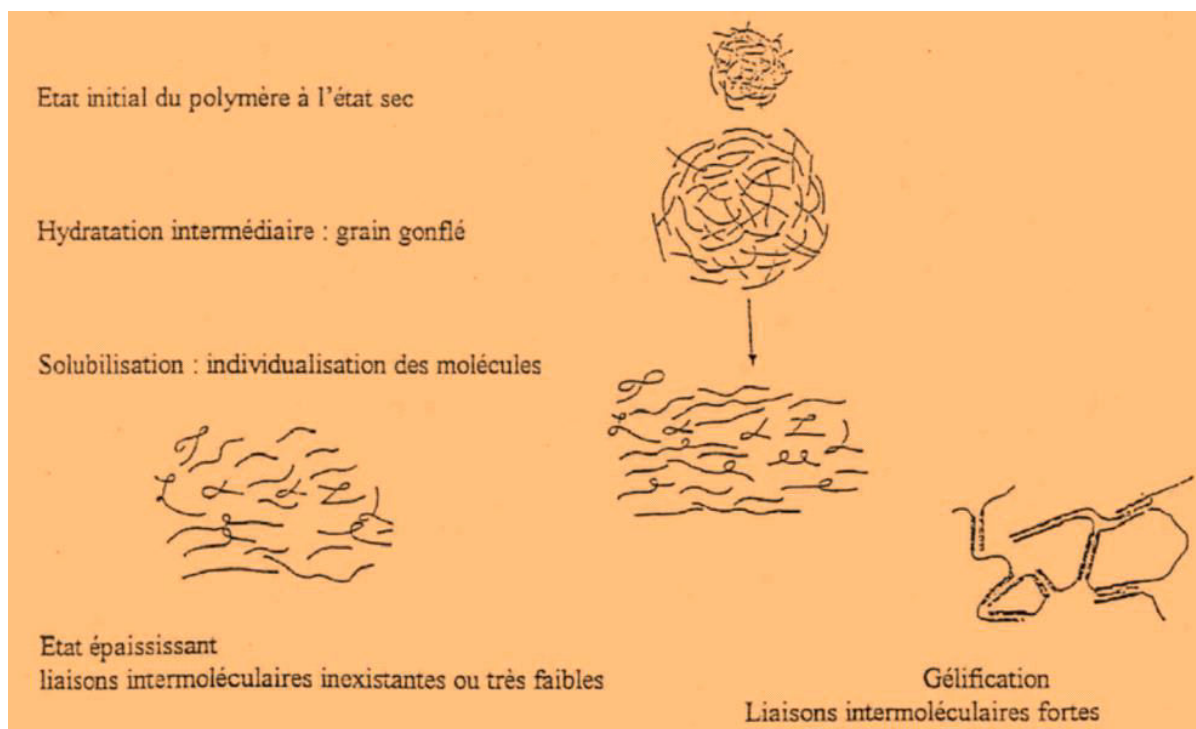
et à l'état durci. L'apparition des bétons autoplaçant est fortement liée au progrès réalisés dans le domaine des adjuvants est plus particulièrement celui des Superplastifiants, pendant le gâchage une grande quantité d'eau est emprisonnée entre les particules. Afin d'obtenir une fluidité suffisante, les Superplastifiants sont souvent utilisés. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérations. [3]



**Fig 1.2 Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate [05]**

### I.3.6. Agent de viscosité

Un agent de viscosité est un produit soluble dans l'eau qui en augmente la viscosité. Les agents de viscosité sont composés de molécules de longues chaînes de polymères qui adhèrent à la périphérie des molécules d'eau et adsorbent une partie de cette eau. Les fonctions secondaires de ces agents sont très différentes selon le type d'agent de viscosité employé (Kawai, 1987).



**Fig 1.3 Les étapes d'interaction entre l'eau et les polysaccharides [04].**

### **I.3.7. Eau**

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats. Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. [M.El barrak, 2005].

### **I.3.8 Fillers calcaires.**

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. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  ;
- Une valeur minimale de l'indice d'activité. Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

## **I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BETON AUTOPLAÇANT;**

Les bétons autoplaçants BAP présentent de nombreux avantages, on cite :

### ***a) Avantages techniques :***

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton ;
- Réalisation d'éléments de forme complexe ;
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés.

### ***b) Avantages économiques :***

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage ;
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

### ***c) 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)

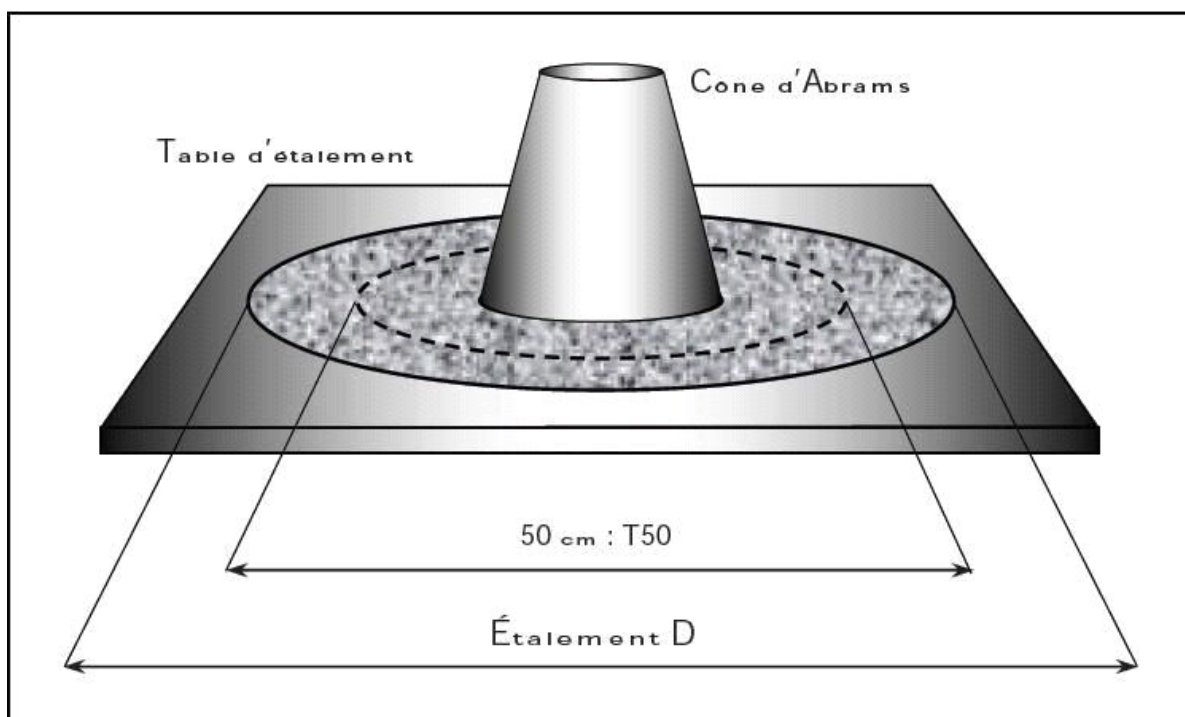
## **I.5 CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT (BAP)**

### **I.5.1 Caractérisation à l'état frais**

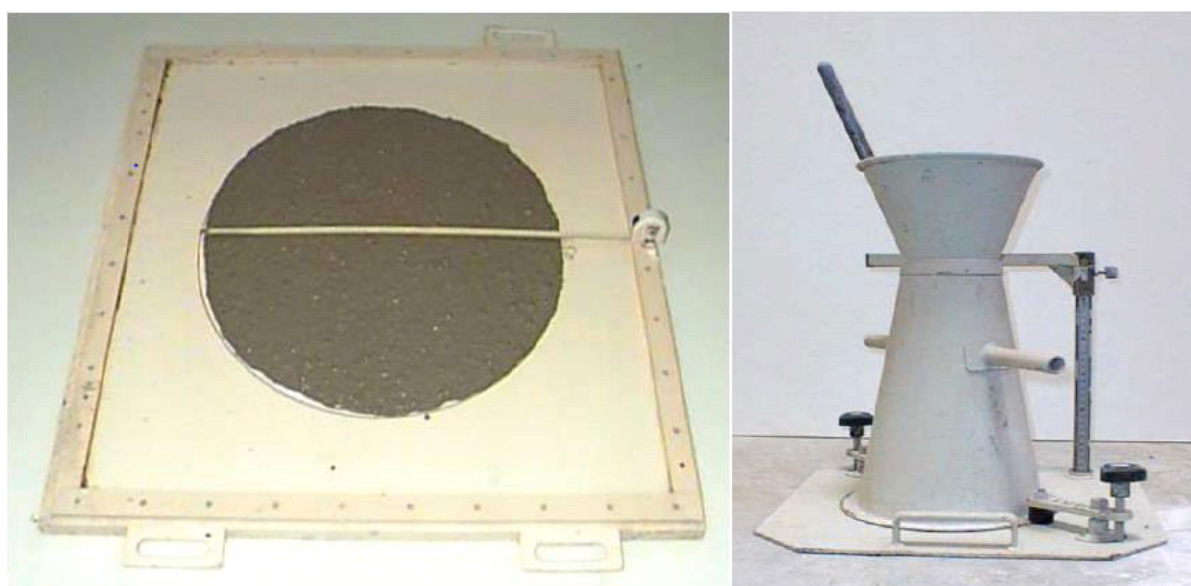
Les BAP sont des matériaux encore relativement nouveaux au monde de construction. Les formateurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à caractériser leurs propriétés à l'état frais, car il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'essais normalisés ni de critères associés pour s'assurer qu'un béton est effectivement "autoplaçant" [25]. Pour remédier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur béton, qui permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de fluidité, de déformabilité, de stabilité et d'autres tentent de mesurer les valeurs fondamentales de l'écoulement. Les prochaines tentatives présentent les principaux de ces tests suivant un classement définissant les paramètres rhéologiques.

#### **I.5.1.1 Essai évaluant la fluidité (étalement)**

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cependant, l'affaissement est toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [25]. Ce diamètre, appelé étalement D, donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu non confiné. Les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm [29]. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Par exemple, avec un béton peu stable, on remarque une séparation de la pâte et des granulats. Ce pendant, cette observation est difficilement quantifiable. La (Fig 1.4) représente schématiquement l'essai d'étalement et la (Fig 1.5) montre ses différents processus. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. En revanche, il ne met pas en relief l'importance du caractère hétérogène du béton, il s'est donc avéré nécessaire de développer une autre famille d'essais [25].



*Fig 1.4. Représentation schématiques de l'essai d'étalement*



*Fig 1.5 Schéma de cône d'Abrams pour la détermination de l'étalement*

### I.5.1.2 Essai de la boîte en L (L-box test)

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure suivante La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé on

mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H2/H1$ . le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieure à 0,8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation.[10]

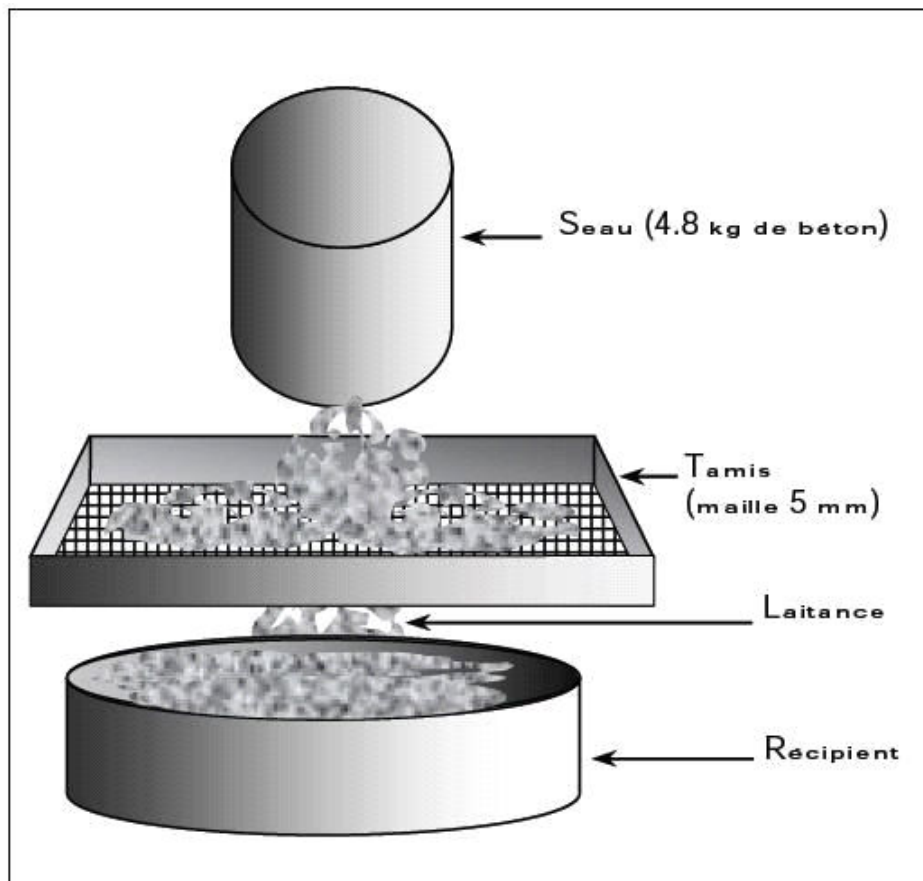


*Fig 1.6. L'écoulement de BAP dans la boîte en «L»*

### **I.5.1.3 Essai de stabilité au tamis**

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [21] :

- $0\% \leq \% \text{ P laitance} \leq 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ P laitance} \leq 30\%$  : stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% \text{ P laitance} > 30\%$  : stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



*Fig 1.7. Représentation schématiques de l'essai de l'essai de stabilité au tamis*



*Fig 1.8. Dispositif de l'essai de stabilité au tamis*

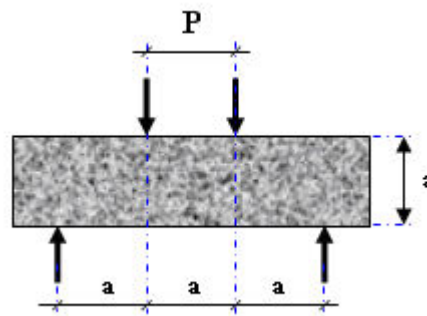
## I.5.2 Caractérisation d'un BAP à l'état durci:

### I.5.2.1 Essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme ou bien des éprouvettes 10x10x10 cm. Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon.

### I.5.2.2 Essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (fig 1.9). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.



*Fig 1.9. Essais de traction par flexion*

### I.5.2.3 Module d'élasticité:

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000f_{cj}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton, ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [Person 03], les mêmes résultats trouvés par. [27]. Par contre, le module d'élasticité de BAP est inférieur à celui de BV ; donc le BAP est plus rigide [36]. On a trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats  $E_g$  (60000 à 100000 MPa) [27].

### **I.5.3 Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)**

Les Bétons Autoplaçants (BAP) sont des matériaux extrêmement fluides qui se mettent en place sans vibration. Cependant du fait de leur fluidité, les BAP présentent un risque de ségrégation important. Au vu des connaissances actuelles, il s'avère essentiel de tout d'abord comprendre les mécanismes d'initiation de la ségrégation afin de proposer un essai de caractérisation adéquate. Le comportement d'une seule particule immergée dans un fluide à seuil d'écoulement, a tout d'abord été étudié. Bien que l'initiation de la ségrégation statique soit essentiellement conditionnée par la taille et la densité des granulats, ainsi que par le seuil d'écoulement de la matrice cimentaire, le rôle de la phase granulaire ne peut être négligé. Un nouveau dispositif expérimental a été mis au point afin de mettre en évidence les effets de groupe des granulats. Il permet de mesurer l'effort de résistance d'un réseau granulaire modèle immergé dans une matrice cimentaire et donc d'intégrer l'influence des interactions entre particules à la description des mécanismes d'initiation de la ségrégation. Les résultats d'essais réalisés dans des pâtes de ciment issues de différentes compositions de BAP ont montré que les effets de groupe positifs peuvent effectivement être mis en évidence. Quelques essais ont par ailleurs été menés afin d'appliquer les résultats expérimentaux à la formulation de bétons autoplaçants. (Ce rapport est issu de la thèse de doctorat soutenue par l'auteur en 2005).

### **I.6 DIFFERENTES METHODES DE FORMULATION DES BAP**

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des BO. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut assurer, en plus de l'étalement, la capacité de remplissage et la stabilité. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [9]. Depuis l'invention du BAP, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée. De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales [8].

#### **I.6.1 L'approche japonaise**

La méthode de formulation des bétons autoplaçants est la suivante : La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide. Selon les auteurs, ce pourcentage permet de prévenir le risque de blocage si le mortier est correctement formulé [9]. Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est fixé à 40% du volume total du mortier.

L'estimation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés par deux essais :

- Un essai d'étalement au cône
- Un essai d'écoulement à l'entonnoir.

### **I.6.2 L'approche suédoise:**

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [8].

### **I.6.3 L'approche du laboratoire centrale des ponts et chaussier LCPC**

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité. La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivantes :

- Les distributions granulaires.
- Les proportions du mélange. La compacité propre.
- La densité apparente. [9]

## **I.7 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 [6]. 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 des 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.

## **I.9 DURABILITE DES BETONS**

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps. Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton. Les altérations physiques peuvent être surfaciques (abrasion, érosion, cavitation ou écaillage) ou interne sous forme de fissures (changement structural, gradients d'humidité ou de température, pression de cristallisation, exposition aux températures externes). Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation de composés nouveaux. [11]

### **I.9.1 Principaux processus chimiques de dégradation des BAP**

#### **I.9.1.1 Effet de l'Attaque des sulfatique externe**

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment). On distingue l'attaque sulfatique interne [45], qui fait intervenir des sulfates déjà

présents dans le béton (DEF), de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.

## **I.10 ETUDE COMPARATIVE DE DURABILITE ENTRE LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS ET LES BÉTONS ORDINAIRES**

Les bétons autoplaçants présentent des particularités de compositions comparativement aux bétons ordinaires. Parmi ces particularités, un volume élevé de fines et un volume de pâte élevé qui est d'ailleurs responsable de leur comportement rhéologique. De plus, la texture très complexe des bétons autoplaçants à l'état durci qui a fait l'objet de nombreuses recherches. L'objectif principal de ce travail est d'établir un programme expérimental afin de comparer entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la durabilité des bétons. Dans ce travail expérimental, nous avons préparé des échantillons de BAP avec différentes teneur de filler calcaire (10,17 et 20%) comme substitut au ciment avec un échantillon de béton ordinaire ce qui va nous permettre d'étudier la valorisation filler calcaire sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la durabilité du béton (porosité, perméabilité à l'air et l'absorption d'eau). Grâce aux résultats obtenus, on en conclut que filler calcaire a un effet positif sur les propriétés mécaniques et physiques. L'effet est quelques peu acceptable pour la durabilité du béton en particulier à long terme, mais d'une manière générale, la durabilité de béton autoplaçant est supérieure à celle de béton ordinaire

## **I.11 CONCLUSION**

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage.

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- Fluidité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Capacité de passage dans les milieux confinés.
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

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.

A l'état durci, le béton doit garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour celui-ci.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau. En effet, le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques.

---

---

**CHAPITRE-II-**  
**Les caractéristiques des matériaux utilisés**

---

---

## II. 1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région de M'SILA (région semi -aride).

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de rivière fin d'origine silicique de la région de BOUSAADA (OUED M'AITAR).
- Le gravier d'origine calcaire de carrière COSIDER .
- Le ciment CPJ de la cimenterie ACC.
- Et de l'eau potable du laboratoire.

## II. 2 SABLE

### II. 2. 1 SABLE DE RIVIÈRE (OUED MAITER)

#### II. 2. 1. 1 Origine du sable

Le sable de base de notre recherche provient des abords de l'OUED MAÏTAR. Cet oued est situé entre les collines de BOUSAADA, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins.

L'avancée du désert a permis donc au fil des ans, le dépôt du sable dans l'OUED, qui par la suite a assuré son transport et son étalement. Ainsi plusieurs couches de sable fin mélangé aux galets de l'OUED se sont formées sur des profondeurs de plusieurs mètres, le long de l'OUED MAITER.

Nous pouvons dire que ce sable est d'origine éolienne.

#### II. 2. 1. 2 Exploitation du sable

Au seuil de ces dernières années ; plusieurs entreprises étatiques et privées exploitent des carrières le long de l'OUED avec divers moyens surtout mécaniques.

Le matériau ; mélangé de grains fins et de galets, est passé à travers des tamis de dimensions de mailles égales à 50 mm, puis livré aux différents chantiers de toute la région et ses environs, telles que M'SILA, BOURDJ-BOUARRERIDJ, SETIF,DJELFA, ..etc.

#### II. 2. 1. 3 Aspect général

Le sable de Boussaâda à l'œil nu, apparaît de couleur ocré, composé surtout de grains fins et uniformes, mais il existe aussi une petite quantité de gros grains.

Afin de diminuer la qualité de ces grains et d'uniformiser la granulométrie, et faciliter l'exploitation, on a ouvert des carrières là où le sable est creusé avec les bulldozers et tamisé à travers des tamis de dimensions de mailles de 5cm.

C'est pourquoi on trouve quelques fois dans ce sable des quantités de graviers de dimensions de 5 à 50 mm. Cela cause des inconvénients pour la technologie de la fabrication du béton, car la composition de ce dernier déjà calculée sera faussée en employant le sable mêlé préalablement avec le gravier et c'est pour cela qu'il faut étudier sérieusement ce sable (sable de Boussaâda) avant de l'employer dans la construction .

## II. 2. 2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE UTILISE

Le sable de Boussaâda a été soumis à plusieurs essais en laboratoire de Génie civil de université de M'sila, suivant les normes françaises AFNOR [ 01 ].

### II. 2. 2. 1 Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

#### **Mode opératoire**

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend 3 échantillons de masse 300g.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300 ml d'eau préparé préalablement dans 2<sup>ème</sup> récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable – eau. Soit ( $V$ ) ce volume.

Sachant que le volume ( $V_e$ ) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

$$\text{Volume de sable} = V_1 = V - 300 \text{ ml}$$

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$\rho = \frac{M}{V_1} \text{ avec } M = 300 \text{ g}$$

#### **Résultats obtenus :**

**Tableau II.1** Masse spécifique du sable

N° d'essai	M (g)	$V$ ( $cm^3$ )	$V_1$ ( $cm^3$ )	$\rho$ ( $g/cm^3$ )	$\rho_{\text{moy}}$ ( $g/cm^3$ )
1	300	420	120	2,50	2,55
2	300	418	118	2,54	
3	300	415	115	2,61	

## II. 2. 2. 2 Masse volumique apparente : NF P 18-554

### II. 2. 2. 2. 1 Masse volumique apparente à l'état lâche :

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

#### Mode opératoire

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres.

- ◆ On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- ◆ On pèse le récipient vide  $M_1$ .
- ◆ On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- ◆ Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit  $M_2$  ce poids.
- ◆ Volume de récipient  $V_r$

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}, \quad V_r = 900 \text{ cm}^3$$

**Tableau II.2** Masse volumique apparente du sable à l'état lâche

N° d'essai	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	116	1459	1,492	1,497
2	116	1460	1,493	
3	116	1471	1,505	

### II. 2. 2. 3 Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est à dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

#### Mode opératoire :

- ◆ Peser un échantillon de sable (150g)
- ◆ Verser à l'aide d'un entonnoir dans une éprouvette graduée au niveau  $V_1$
- ◆ Verser un volume d'eau ( $V_2 = 150 \text{ cm}^3$ ) sur le sable, on obtient alors un volume total  $V_3$ .

La compacité du sable est donnée par le rapport :

$$C = \frac{(V_3 - V_2)}{V_1}$$

Où :

$V_1$  : Volume apparent du sable en ml

$V_2$  : Volume d'eau (150ml)

$V_3$  : Volume total (sable + eau) en ml

**Tableau II.3 : Compacité du sable**

N° d'essai	$V_1$ (ml)	$V_2$ (ml)	$V_3$ (ml)	C (%)	C (%)
1	96	150	213	65,62	67,01
2	96	150	215	67,70	
3	96	150	215	67,70	

#### II. 2. 2. 4 Porosité : NF P 18-554

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminé par la formule suivante :

$$P (\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) \times 100$$

$$P(\%) = \left[ 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

On distingue deux cas :

- ◆ Etat compacte :  $\rho_c = 37,05 \%$
- ◆ Etat lâche :  $\rho_L = 41,87\%$

Pour les sables courants, on admet que la compacité en vrac est de l'ordre de 60% à 70%, c'est -à- dire la porosité est de 30% à 40% [ ].

On constate que, la porosité du sable de BOUSAADA à l'état lâche est de 41.87% ; un plus grande que 30% par conséquent, ce sable n'est pas de meilleure qualité mais il peut être utilisé et considéré comme acceptable du point de vue de porosité.

### II. 2. 2. 5 Equivalent de sable : NF P 18-598

Nous essayons de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultra-fines contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité des bétons et mortiers.

#### Mode opératoire

- ◆ Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500 g)
- ◆ Prendre une pesée de 120 g
- ◆ Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm)
- ◆ A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
- ◆ Laisser reposer pendant 10 minutes
- ◆ Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique
- ◆ Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de celle-ci
- ◆ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2<sup>ème</sup> repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.

#### a/ Equivalent de sable visuel (ESV):

- ◆ Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur  $h_1$  du niveau supérieure du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- ◆ Mesurer également avec la règle la hauteur  $h_2$  comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100 [\%]$$

Où :

$$h_2 < h_1$$

$h_1$  : sable propre + éléments fins

#### b/ Equivalent de sable visuel (ESP):

- ◆ Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- ◆ Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit  $h'_2$  la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 [\%]$$

Où :

$h'_2$  : La hauteur du sable ( $h'_2 < h_1$ )

**Tableau II.4 : Equivalent de sable**

N° d'essai	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	ESV (%)	$h'_2$ (cm)	ESP (%)
1	10	9.3	93	8.8	88
2	9.8	9.2	93.88	8.7	88.77
3	9.6	8.9	92.70	8.7	90.63

$$(ESV)_{moy} = 93,19\%$$

$$(ESP)_{moy} = 89,13\%$$

Donc:            E.S.V < 85%  
                     E.S.P > 80%.

**Tableau II.5: Comparaison des résultats.**

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < ES < 75	65 < ES < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES ≤ 85	70 ≤ ES ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E.S ≥ 85	E.S > 80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

C'est un sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau (le sable a été lavé).



**Fig.II.1 : Sable après le lavage**

**II. 2. 2. 6 Teneur en eau : NF P 18-555**

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre 20 à 25 % de son poids). Si son humidité est comprise entre la limite de 0 à 3 %, on l'appelle sec.

**Mode opératoire :**

- ◆ Peser un échantillon de sable humide, soit  $M_h$  son poids (1500 g).
- ◆ Laisser l'échantillon dans une étuve à une température dans l'intervalle de 105 °C à 110 °C pendant 24 heures.
- ◆ Peser l'échantillon de nouveau, soit  $M_s$  son poids.

$$W = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100 \text{ [%]}$$

Où :

$M_h$  : Poids du sable humide en (g)

$M_s$  : Poids du sable sec en (g)

**Tableau II.6 : Teneur en eau du sable**

N° d'essai	$M_h$ (g)	$M_s$ (g)	$W$ (%)	$W_{moy}$ (%)
1	1000	975	2,56	2,56
2	1000	980	2,04	
3	1000	970	3,09	

**II. 2. 2. 7 Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555**

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante.

$$A = \left( \frac{M_1 - M_2}{M_2} \right) \times 100 \text{ [%]}$$

Où :

$M_1$  : La masse du matériau saturé d'eau en (g)

$M_2$  : La masse du matériau sec en (g)

**Tableau II.7 : Degré d'absorption du sable**

N° d'essai	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$A$ (%)	$A_{moy}$ (%)
1	1500	1460	2,74	3,21
2	1500	1450	3,44	
3	1500	1450	3,44	

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18- 554 et NF P18- 555 [07], la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est -à- dire  $Ab < 5\%$ . Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée pour le sable utilisé.

La norme P 18 541 fixe comme valeur maximale 5% , pour les bétons classiques , ce qui est peut-être insuffisamment sévère , valeur d'ailleurs ramenée à 2,5% pour les bétons de résistance caractéristique supérieure à 36MPa .

### Observation

Exceptionnellement, pour certaines utilisations, cette valeur est abaissée à 2 %[ 07].

### II. 2. 2. 8 Analyse granulométrique : NF P 18-304. NF P 18-560

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

- ◆ Tamisage :
- ◆ Sédimentation :
- ◆ La granularité est exprimé par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau. Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :
  - ◆ En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissante
  - ◆ En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction du sable dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant)



**Fig II.2 :** Les Tamis .

On constate que la courbe granulométrique est un élément fondamental de la classification do matériau.

Les résultats de cette étude permettent de prévoir certaines propriétés du matériau comme la perméabilité, l'aptitude au compactage et l'utilisation comme filtre.

### Mode opératoire :

- ◆ Prélever (1,5 kg) de matériau (sable sec) .
- ◆ Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit  $m_i$  la masse du tamis
- ◆ Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125 et éventuellement 0,08 mm. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
- ◆ Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique. Agiter pendant 5 minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
- ◆ Peser chaque tamis séparément à 1 g près. Soit  $M_i$  la masse du tamis (I) + le sable. La différence entre  $M_i$  et  $m_i$  (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel  $R_1$  du tamis 1.

- ◆ Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
- ◆ Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à  $R_1$ , soit  $R_2$  la masse du refus cumulé du tamis 2 ( $R_2 = R_1 + \text{Refus partiel sur tamis}$ )
- ◆ Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés  $R_3, R_4, \dots$

Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante :  $T = 100 - R_C$

Où :

T: Tamisât en %

$R_C$  : Refus cumulés en %

**Tableau : II.8** : Analyse granulométrique du sable rivière (Oued Maiter) .

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	85	85	4.25	95.75
1.25	73	158	7.9	92.1
0.63	85	243	12.15	87.85
0.315	574	817	40.85	59.15
0.125	1070	1887	94.35	5.65
0.08	104	1991	99.55	0.45
Fond	8	1999	99.95	0.05

## REMARQUES

D'après les résultats donnés au tableau (II-8), nous pouvons constater que :

- ◆ 24,80% des grains de sable ont un diamètre compris entre 0.315 et 0.125, c'est un sable fin.
- ◆ Le pourcentage des fines (particules inférieures à 0.08 mm) est inférieur à 5%, ceci à montrer que notre sable était propre. (sable lavé)

## COMMENTAIRES

Selon l'analyse granulométrique du sable de rivière et d'après la figure II-3 correspondante à la méthode française, nous notons que plus de 30% de la courbe obtenu dans ce cas est en dehors des fuseaux de spécification du sable pour les bétons.

Nous déduisons que c'est un sable fin et il n'est pas de bonne qualité. Il n'est donc spécifié pour la fabrication des bétons du point de vue de l'analyse granulométrique.

### II. 2. 2. 9 Module de finesse

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm) sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100}$$

Où :

$R_c$  : Refus cumulé.

Dans notre cas :  $M_f = 1,60$

Les normes soviétiques spécifient le  $M_f$  des sables comme suit :

- ❖ Sable gros  $M_f > 2.5$
- ❖ Sable moyen  $2 < M_f < 2.5$
- ❖ Sable fin  $1.5 < M_f < 2$
- ❖ Sable très fin  $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:  
 $1.5 < M_f < 2$  : C'est un sable fin.

### II. 2. 3 Caractéristiques chimique du sable :

La composition chimique du sable de dune (OUED MAITRE) est établie en mars 2005, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée par le tableau II.09.

**Tableau II.11** : Analyse chimique du sable de BOUSAADA

<i>constituants</i>		
<i>Elément</i>	<i>Symbole</i>	<i>Teneur en (%)</i>
Silice	SiO <sub>2</sub>	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90
Alumine	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	SO <sub>3</sub>	0.44
Pente au fer	P.A.F	2.81

**Commentaire :**

Notre sable est un sable à haute teneur en silice.

## II. 3 GRAVIER

Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques du gravier utilisé dans notre étude.

### II. 3. 1 ORIGINE DU GRAVIER DE COSIDER

Le gravier de base utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à 25 Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER).

#### II. 3. 1. 1 Classes granulaires

Les fractions du gravier sont :

- Fraction 3/8.
- Fraction 8/16.
- Fraction 16/25.

#### II. 3. 1. 2 Résistance à la compression de la roche d'origine

La roche d'origine, est un calcaire compact de résistance à la compression, égale à 610 /Cm<sup>2</sup> [02].

### II. 3. 2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU GRAVIER UTILISE

#### II. 3. 2. 1 Masse volumique apparente

##### Mode opératoire

- ◆ Sécher le matériau jusqu'au poids constant.
- ◆ Peser le récipient à l'état vide ( $M_1$ ).
- ◆ Poser le récipient sur une table et à l'aide d'une pelle le remplir de gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient. La distance séparant le récipient de la pelle doit être aux environs de 10 cm .
- ◆ Peser de nouveau le récipient plein de gravier. Soit  $M_2$  ce poids .

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Où :

V: Volume du récipient

$M_1$ : Le poids du récipient à l'état vide

$M_2$ : Le poids du récipient plein de gravier

**Tableau II.12 : Masse volumique apparente du gravier :**

Graviers	N° d'essai	$M_1(kg)$	$M_2(kg)$	$\rho_{app}(kg/l)$	$\rho_{moy}(kg/l)$
3/8 V = 7 L	1	2,924	10,068	1,020	1,011
	2	2,924	9,978	1,007	
	3	2,924	9,980	1,008	
8/15 V = 10 L	1	3,496	14,596	1,110	<b>1,104</b>
	2	3,496	14,564	1,106	
	3	3,496	14,470	1,097	
15/25 V = 20L	1	7,32	33,74	1,321	1,31
	2	7,32	33,60	1,314	
	3	7,32	33,46	1,307	

**II. 3. 2. 2 Porosité et compacité : NF P 18-554**

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable

On calcule la porosité selon la formule :

$$P(\%) = \left[ 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

L'indice des vides est donné par la formule suivante :

$$e = \frac{P}{(100 - P)}$$

**Tableau II.13 : Porosité, Compacité Et Indice Des Vides**

fraction de gravie	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
8/16	47,67	52,33	0,91
16/25	48,02	51,98	0,92
3/8	49,41	50,59	0,97

**II. 3. 2. 3 Masse volumique absolue :****Tableau II.14 : Masse volumique absolue du gravier.**

Graviers	N° d'essai	$M_1(g)$	$V_e(cm^3)$	$V(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$	$\rho_{moy}(g/cm^3)$
3/8	1	300	300	417	2,56	2,53
	2	300	300	419	2,52	
	3	300	300	419	2,52	
8/16	1	300	300	417	2,56	2,58
	2	300	300	417	2,56	
	3	300	300	415	2,61	
16/25	1	300	350	469	2,52	2,52
	2	300	350	468	2,54	
	3	300	350	470	2,5	

**II.3.2.4 Analyse granulométrique :**

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

**a)- Fraction 3/8 (2Kg)****Tableau II-15 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	9	9	0,45	99,55
6.3	328	337	16,85	83,15
5	484	821	41,05	58,95
4	560	1381	69,05	30,95
3.15	411	1792	89,6	10,4
fond	200	1992	99,6	0,4

**b)- Fraction 8/16 (3,5Kg)****Tableau II -16 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	100	100	2,85	97,15
12.5	845	945	27	73
10	1613	2558	73,09	26 ,91
8	772	3330	95,14	4,86
6,3	147	3477	99,34	0,66
Fond	19	3496	99,89	0,11

**b)- Fraction 16/25 (05Kg)****Tableau II -17 : Analyse granulométrique du gravie16/25**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	0	0	0	100
20	1113	1113	22,26	77,74
16	2255	3368	67,36	32,64
12,5	1340	4708	94,16	5,84
10	264	4972	99,44	0,56
Fond	25	4997	99,94	0,06

**II. 3. 2. 5 Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554****Tableau II -18 : Degré d'absorption d'eau du gravier .**

Graviers	N° d'essai	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$A$ (%)	$A_{moy}$ (%)
3/8	1	1000	985	1,52	1,42
	2	1000	983	1,73	
	3	1000	990	1,01	
8/16	1	1500	1475	1,69	1,35
	2	1500	1485	1,01	
	3	1500	1480	1,35	
16/25	1	1500	1480	1,35	1,21
	2	1500	1484	1,08	
	3	1500	1482	1,21	

**II. 3. 2. 6 Teneur en eau :****Tableau II -19 : Teneur en eau du gravier .**

Graviers	N° d'essai	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	W (%)	W <sub>moy</sub> (%)
3/8	1	1000	997	0.30	0.30
	2	1000	997	0.30	
	3	1000	997	0.30	
8/16	1	1400	1397	0.215	0.334
	2	1400	1395	0.358	
	3	1400	1394	0.430	
16/25	1	1500	1494	0.402	0.402
	2	1500	1494	0.402	
	3	1500	1494	0.402	

**II. 3. 3 CARACTERISTIQUES MECANIKES DES GRAVIERS UTILISES**

Le gravier utilisé dans l'étude du béton, a été soumis à deux essais mécaniques en laboratoire.

**II. 3. 3. 1 Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P18-573.**

La présente norme est utilisée pour la mesure de la résistance, à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier.

**II. 3. 3. 2 Essai de résistance à l'usure (Essai MD) : NF P18-572.**

L'essai consiste à mesurer, la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de MICRO- DEVAL (MD).

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

**Tableau II-20 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.**

Caractéristiques	Fractions du gravier	
Coefficient de Los Angeles	25	28
Coefficient micro-deval « MDS »	14	18

### II. 3. 4 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES GRAVIERS UTILISES

La composition chimique du gravier de carrière COSIDER est établie en mars 2004, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée par le tableau II.21.

**Tableau II-21:** analyse chimique de la pierre concassée:

Eléments	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

### II. 4 CIMENT :

Les ciments utilisés dans la construction sont caractérisés par leurs constituant, clinker presque pur ( $\approx 97\%$ ), avec laitier (CLK, CHF) ou ajout divers (CPJ).

Certains ajouts ont des propriétés pouzzolaniques qui donnent un supplément de résistance à long terme, ainsi qu'une meilleure durabilité (cendres volantes), d'autre son aux même des liants hydrauliques (laitiers). Cette aultiplcité des types de liants hydrauliques correspond aux exigences économiques et techniques actuelles.

#### II. 4. 1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU CIMENT UTILISE :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie de (wilaya de M'sila).

**Tableau II.22 :** Caractéristiques physiques de ciment.

Masse Spécifique	Masse volumique $g / cm^3$	Module de finesse $cm^2 / g$	Porosité %
3.1	1.1	3600	64

**II. 4. 1 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU CIMENT UTILISE :**

La composition chimique du ciment de ACC est établie à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée par le tableau II.23.

**Tableau II.23 :** Caractéristiques Chimiques Du Ciment.

Elément	Teneur en %
SiO <sub>2</sub>	20.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.89
CaO	63.40
MgO	1.31
K <sub>2</sub> O	0.20
Na <sub>2</sub> O	0.21
CSC	96.00
MS	2.38
MA	1.23
C <sub>3</sub> S	57.75
C <sub>2</sub> S	6.13
C <sub>4</sub> AF	11.85

## II. 5 L'EAU DE GACHAGE :

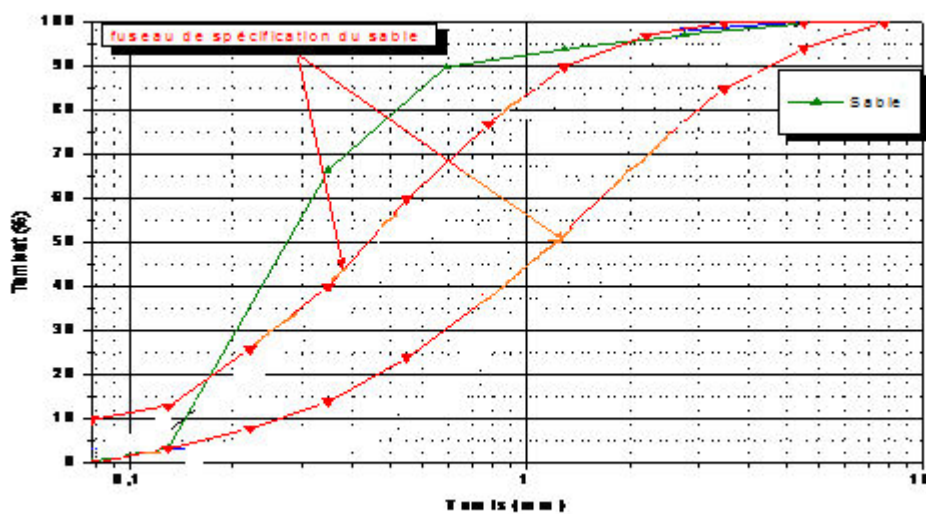
L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de département de génie civil.

### II. 5. 1 Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/05, à laboratoire de département de chimie (M'sila). Elle est donnée par le tableau II.24.

**Tableau II.24** : Caractéristiques chimiques d'eau.

La mesure	Teneur en (mg / l)
Le temps de prend d'échantillon	10/10/05 (9.25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore $Cl^-$	234.3
Sulfate $So_4^-$	351.60
Magnésium $Mg^{2+}$	110.8
Sodium $Na^+$	/
Calcium $Ca^{2+}$	267.2
Sédiment sec	1412
rééligibilité d'oxydation en eau	1024



**Fig II.3** : Analyse granulométrique

---

---

**CHAPITRE-III-**  
**Techniques expérimentales**

---

---

### III.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans cette partie les essais expérimentaux effectués sur les composites élaborés.

### III.2 EXPERIMENTATION

Cette partie consiste à présenter d'une façon globale les expériences effectuées concernant :

- La description des essais expérimentaux employés (état frais et durci).
- La confection des éprouvettes ;
- La Procédure de conservation ;
- La composition du béton.

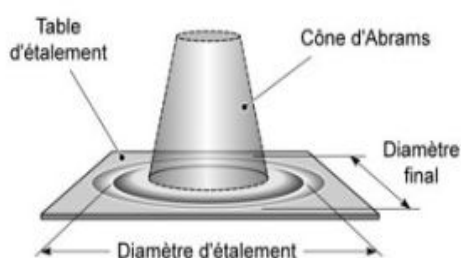
#### III.2.1 Description des essais expérimentaux employés (état frais et durci).

##### III.2 1.1 À l'état frais

Les caractérisations à l'état frais des bétons sont limitées aux essais recommandés par l'AFGC : l'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, et stabilité au tamis.

##### III.2 1.1.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8]

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (Essai d'étalement ou Slump flow). (Moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP [21]



*Figure III.1 : Essai d'étalement par cône d'Abrams sur les BAP.*

##### a) Objet d'étalement (Slump flow)

L'essai d'étalement ou Slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

**b) Matériel nécessaire**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm

**c) Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux cotés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doivent être invalidé et reconduit
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre.



**Figure III. 2. Essai d'étalement**

### III.2.1.1.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]:

Pour réaliser cet essai un seau et un tamis sont utilisés. Le tamis a une ouverture de maille de 5 mm.

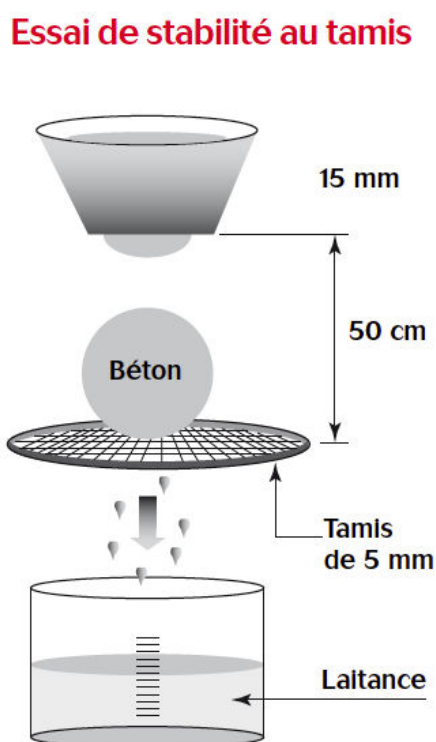
Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.

#### a) *Objet de l'essai*

Cet essai vise à qualifier les bétons auto plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

#### b) *Matériel utilisé :*

- Seau de 10 L + couvercle
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond
- Balance : précision minimale 20 g, portée minimale 20kg.



*Fig III. 4. Stabilité au tamis.*

**c) Mode opératoire**

Pour réaliser cet essai un seau et un tamis sont utilisés. Le tamis a une ouverture de maille de 5 mm.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Remplir un seau de 10 litres avec du béton.
- Laisser reposer 15 minutes.
- Verser la partie supérieure (4,8 kg de béton  $\pm$  0.2 kg) sur le tamis depuis une hauteur de 50 cm.
- Attendre 2 minutes puis peser la laitance qui est passée au travers le tamis.
- Calculer le pourcentage de laitance en divisant la masse de la laitance par la masse initiale du béton.

**Peser le fond avec la laitance :**

- On a :  $P \text{ laitances} = P \text{ fond} + \text{laitance} - P \text{ fond}$

Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.

- $\delta = (P \text{ laitance} / P \text{ échantillon}) * 100$

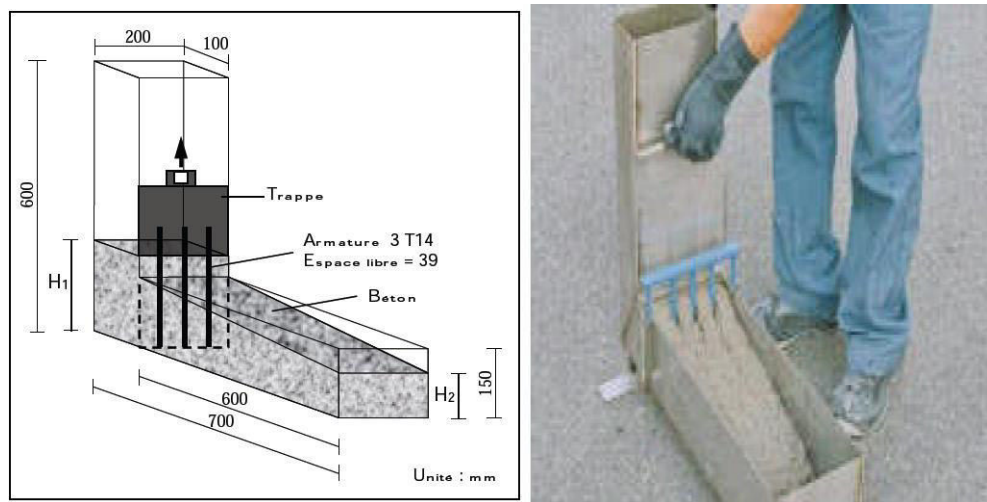
**III.2.1.1.3 Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]:**

Simule l'écoulement du béton dans les coffrages en béton armé Et de vérifier l'aspect ou le non colmatage du béton au niveau des armatures.

Le taux de remplissage final nous renseigne sur la mobilité du béton. Ce test, Il permet de vérifier que le coffrage ne sera pas affecté par des obstructions cumulus en amont des renforts. La méthode consiste à remplir la partie verticale avec du BAP d'un caisson, puis en surélevant une ouverture pour permettre au béton de s'écouler dans la partie horizontale à Par le renforcement (le nombre et le diamètre du béton, sa mobilité en milieu confiné et sa capacité à traverser une zone fortement renforcée peut être adaptée pour refléter renforcement déjà dans la structure). Après l'écoulement du béton, la différence de l'hauteur dans la partie verticale ( $H_1$ ) et horizontale ( $H_2$ ). Résultat du test, il est exprimé en taux de compactage  $H_2/H_1$ .

**a) Objectif de la boîte en L**

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.



**Fig III.5: Essai de boîte L**

### **b) Mode opératoire**

La boîte en L est une boîte en acier avec deux parties, l'une verticale et l'autre horizontale, séparées par une trappe et une grille de deux ou de trois barres de diamètre et d'espacement fixé.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Remplir la partie verticale de la boîte en L ;
- Attendre une minute avant de soulever la trappe, le béton s'écoule à travers la grille;
- Calculer le rapport de la hauteur de béton dans la partie verticale de la boîte après l'essai et la hauteur du béton dans l'extrémité de la partie horizontale ;
- Ce rapport correspond au taux de remplissage.

### **III.2 1.1.4 Masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6]:**

La masse volumique béton n'est pas une chose qui se mesure directement. En règle générale, si vous voulez calculer la masse volumique de quelque chose, vous devez connaître sa masse puis mesurer son volume.

$$\rho = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(III-1)$$

La masse volumique exprimée en kg/dm<sup>3</sup> car-la densité.

### III.2.1.2 À l'état durci

#### III.2.1.2.1 Essai de compression [NF EN206-1] :

##### a) But de l'essai :

L'essai est effectué sur une éprouvette cylindrique de dimensions standard et ou un échantillon de cube 10x10x10, avec :  $H = 20 \text{ cm}$   $\varnothing = 10 \text{ cm}$ .

##### b) Principe de l'essai :

Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.

- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de  $20 \text{ C}^\circ$ .
- Le démoulage se fera après un 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 28 jours.

##### Calcul:

La résistance est calculée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{F}{S} \dots\dots\dots\text{(III.2)}$$

F: Force au moment de la rupture.

S: Section de l'éprouvette :  $100 \text{ cm}^2$ .



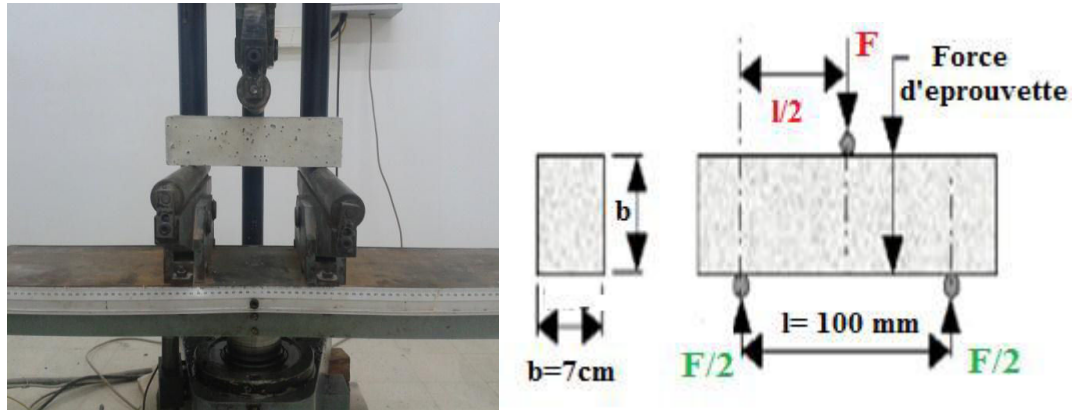
**Figure III.6 : Appareil de compression.**

### III.2.1.2.2 Essai de traction par flexion : [NF P18-408]

#### a) But de l'essai :

Cet essai vise également à déterminer la résistance à la traction par la flexion du béton.

Cet essai de traction en flexion qui consiste en une fissuration prismatique (7 x 7 x 28) du béton posé horizontalement entre deux plateaux de la presse [8].

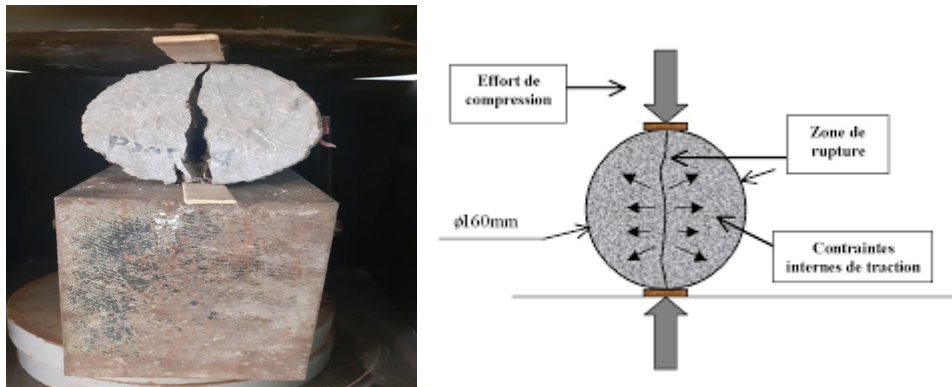


*Fig.III.7 : Principe d'Essai de traction par flexion.*

### III.2.1.2.3 Essai brésilien traction par fendage NFP 18-408:

#### a) But de l'essai:

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par fendage qui consiste à écraser un cylindre de béton placé horizontalement entre les deux plateaux d'une presse [08].



*Fig.III.8: Traction par fendage.*

### III.2.2 Confection des éprouvettes

Pour la préparation des éprouvettes, nous avons procédé de la façon suivante :

- Préparer une série des moules des dimensions (07×07×28-10×10×10-15×30) cm convenables, avec la quantité du béton ;
- Placer les moules sur une table ;
- Huiler les moules et vérifier leurs serrages ;
- Remplir les moules par le béton, l'exécuter en deux couches ;
- Vibrer les moules remplis selon le type d'essai. Il faut qu'elle soit bien arasée à l'aide d'une règle métallique et placée lentement sur la face du moule ;
- Conserver les éprouvettes dans leurs moules jusqu'au démoulage ;
- Démouler les moules après 24 heures de leur confection.

### III.2.3 Procédure de conservation des éprouvettes

Une fois démoulées, les éprouvettes ont été conservés dans des bacs remplis par l'eau, après lesquels les éprouvettes ont été laissées dans le même état jusqu'au jour de teste.

### III.2.4 Composition du béton

La formulation des BAP a été faite d'après AFGC (Association Française de Génie Civil). Les paramètres du béton sont fixés comme il est indiqué au tableau suivant.

*Tableau III.1: Les paramètres fixés du béton autoplaçant.*

N°	Caractéristiques	Valeurs
01	Le rapport E/C	0.5
02	Le rapport F/C	0.25
03	Le dosage en super plastifiant	1.5%
04	Le dosage en agent de viscosité	0.1%
05	Le dosage en granulats	850 kg/m <sup>3</sup>
06	Le dosage en Sable	850 kg/m <sup>3</sup>
07	Le rapport G/S	1
08	volume de la pâte (fixe)	370 l

*Tableau III.2: La composition d'un m<sup>3</sup> de béton (BAP).*

	Ciment	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Fines	Eau	Agent de viscosité Medacole bse	Medaplast Medaflow30
<b>Quantité Kg/ m<sup>3</sup></b>	400	850	425	425	100	200	0.2	6

---

---

## CHAPITRE-IV-

### **Résultats, Interprétations et Commentaires**

---

---

## IV. 1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des essais rhéologiques, physiques et mécaniques réalisés sur un béton auto-plaçant additionné par l'ajout de différentes fractions des granulats.

Les résultats obtenus en laboratoire sont regroupés dans les tableaux et représentés dans les graphes ci-dessous.

## IV.2 PRESENTATION DES RESULTATS

Dans cette partie, nous allons discuter les résultats obtenus d'après les essais exécutés afin de caractériser les BAP confectionnés, en deux états essentiels : « frais et durci » à partir des mélanges obtenus suivant les tests recommandés et déclarés par l'AFGC.

La composition du béton utilisé dans cette étude est regroupée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau IV.1 : Composition des BAP préparés*

Composition (kg/m <sup>3</sup> )	Désignation des bétons					
	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
G/S	1	1	1	1	1	1
E/C	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
F/C	0.25	0.25	0.25	0	0	0
E/L	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50
Eau	200	200	200	200	220	220
Ciment	400	400	400	400	400	400
Fine (Calcaire/laitier)	100	100	100	0	0	0
Gravier 3/8	250	250	250	250	250	250
Gravier 8/15	300	300	300	300	300	300
Gravier 15/25	300	300	300	300	300	300
Sable de dune	850	850	850	850	850	850
% Super plastifiant	6	0	6	6	0	6
Agent de viscosité	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0

### IV.2.1 L'état frais

Les résultats des propriétés rhéologiques de différents mélanges des BAP (taux de remplissage, diamètre d'étalement, ségrégation) sont présentés dans les tableaux ci-dessous et illustrés également dans les figures suivantes.

*Tableau IV.2 : Caractéristiques rhéologiques des BAP étudiés.*

Type du béton	Etalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L (h2/h1) (%)
<b>BAP<sub>1</sub></b>	71.5	4.6	75
<b>BAP<sub>2</sub></b>	72	6.32	83.33
<b>BAP<sub>3</sub></b>	66	5.65	72.22
<b>BAP<sub>4</sub></b>	66.5	8	83.33
<b>BAP<sub>5</sub></b>	71.5	7.6	75
<b>BAP<sub>6</sub></b>	70.5	8.04	82.35

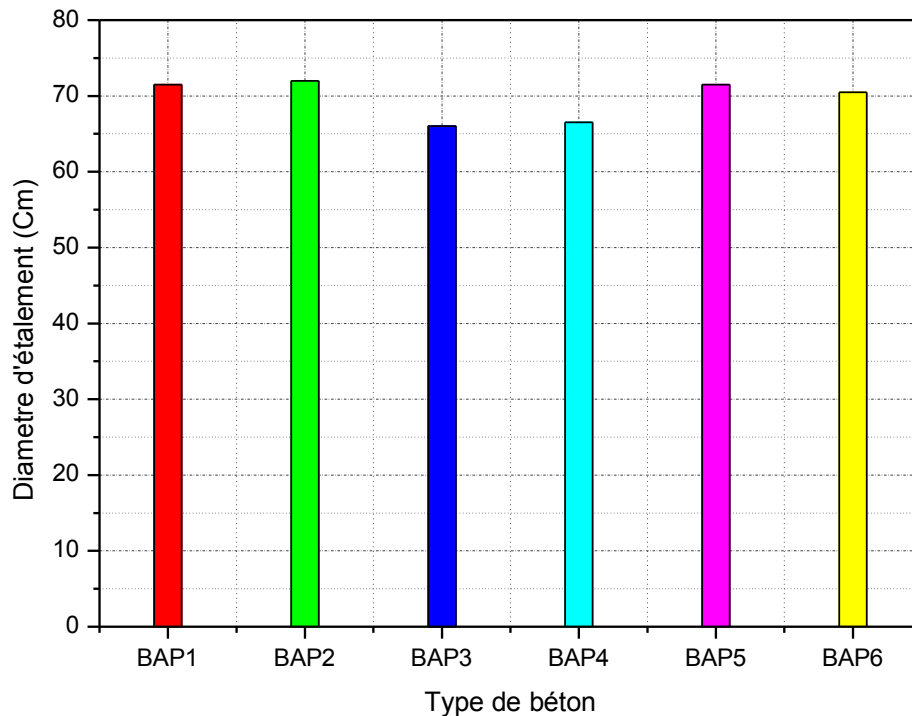


Figure IV.1 : Le diamètre d'étalement en fonction du type de béton

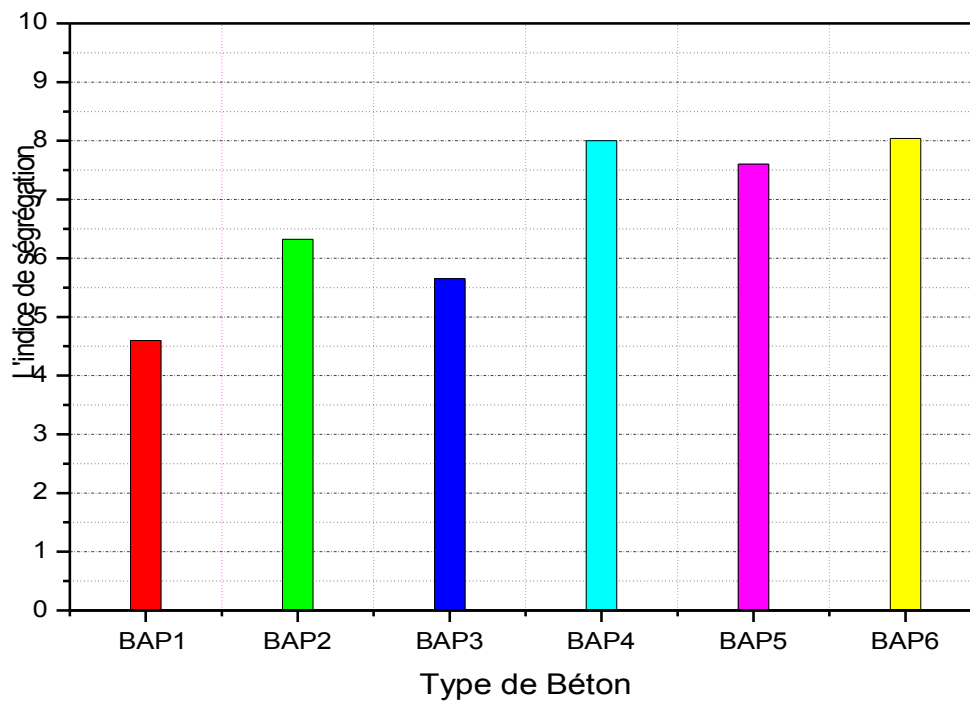


Figure IV.2: L'indice de ségrégation en fonction du type de béton

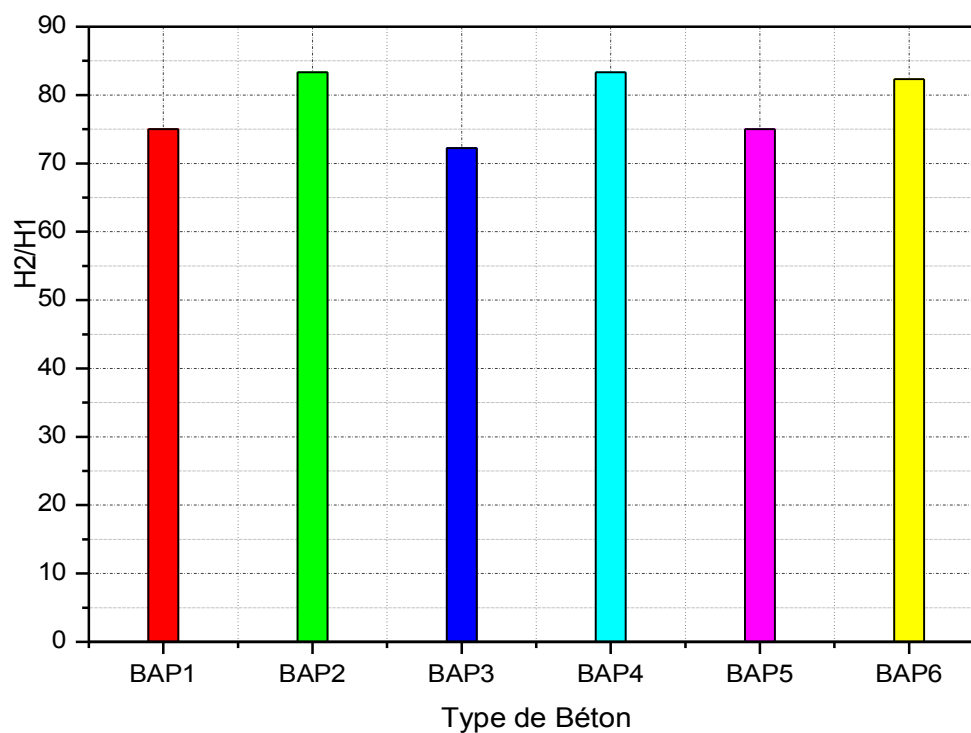


Figure IV.3: La ségrégation dynamique en fonction du type de béton

Les résultats obtenus montrent clairement, que l'accroissement du dosage de superplastifiant influence les propriétés rhéologiques des BAP avec fines. En effet les molécules de ce dernier en s'absorbant à la surface des grains de ciment et du filler calcaire, entraînent une sorte d'enrobage de ceux-ci, tout en empêchant que l'eau ne vienne se fixer directement sur la paroi des grains, ainsi la lubrification du mélange est d'autant plus remarquée avec les forts dosages en superplastifiants [19].

Avec un rapport  $E/C = 0.50$ , l'effet du superplastifiant n'est pas significatif, la finesse, la surface spécifique et le degré d'absorption élevés du sable de dune, demande une quantité importante d'eau pour leur mouillage, d'où la quantité exigée pour lubrifier le béton est insuffisante. Dans ce cas ( $E/C = 0.5$ ) un dosage de 6% en superplastifiant peut procurer au béton un comportement autoplaçant : étalement supérieur à 60 cm, un taux de remplissage  $H2/H1$  supérieur à 0.72, et une résistance à la ségrégation (stabilité) satisfaisante inférieure à 10%. Par contre l'utilisation d'un agent de viscosité a augmenté la viscosité du mélange et la résistance à la ségrégation est satisfaite.

Un dosage trop élevé en superplastifiant (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de la teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [20].

Il est raisonnable de penser que, pour les bétons préparés à base des granulats grossiers (115/25), le ciment produit des pâtes qui sont moins maniables contrairement à ceux obtenus pour un béton à base de granulats moyenne (8/15) qui se caractérise par une mauvaise adhérence – granulats- liant.

Enfin, on peut dire que l'interface pâte- granulats joue un rôle essentiel dans la structure du béton. Lorsqu'elle est modélisée par une liaison parfaite, l'idéalisation est trop poussée et par conséquent pénalisante.

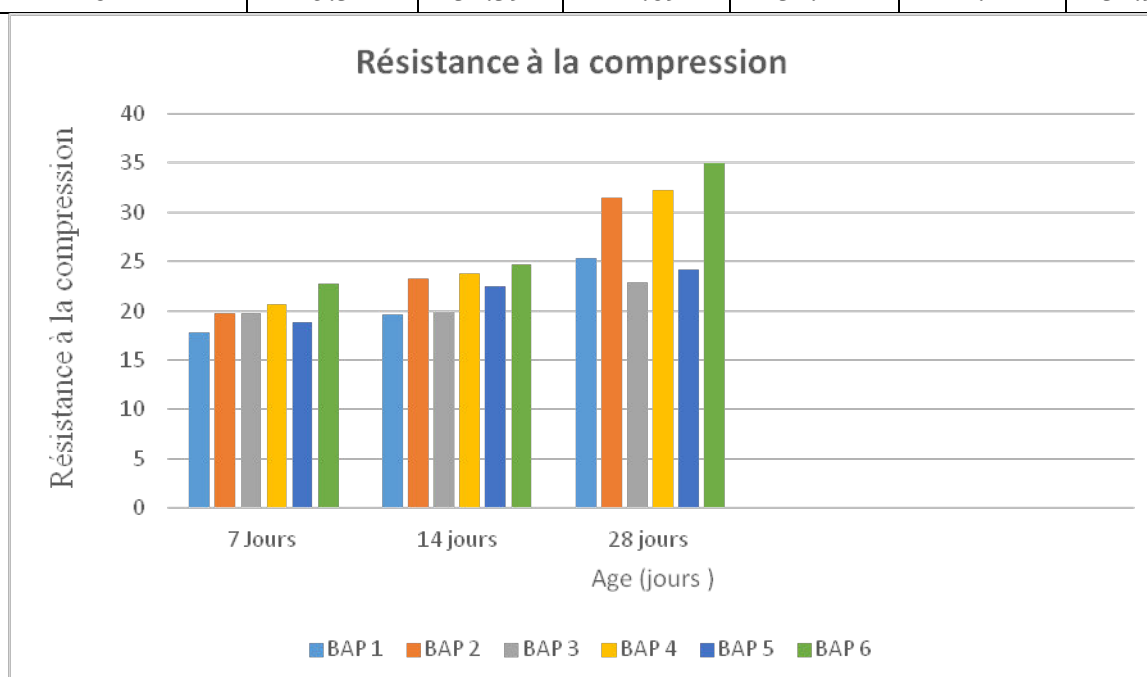
## IV.2. 2 L'état durci

### IV.2.2.1 Résistance à la compression

La résistance en compression (MPa) est estimée à 07 jours, 14 jours et 28 jours de durcissement. Les résultats obtenus sont représentés à la figure IV.4.

*Tableau IV.3 : La résistance à la compression*

Type de béton Age( en jour)	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
7	17.79	19.69	19.69	20.61	18.80	22.71
14	19.56	23.23	19.94	23.77	22.51	24.64
28	25.31	31.39	22.89	32.22	24.21	34.98



**Figure IV.4 : Evaluation de Résistance à la compression en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.**

La figure IV.4. Représente la variation de la résistance à la compression des différents bétons autoplaçants. On remarque que les valeurs de BAP qui développe par rapport le temps. Dans le début de l'âge la valeur de BAP est 17 après il augment jusqu'à 34.98.

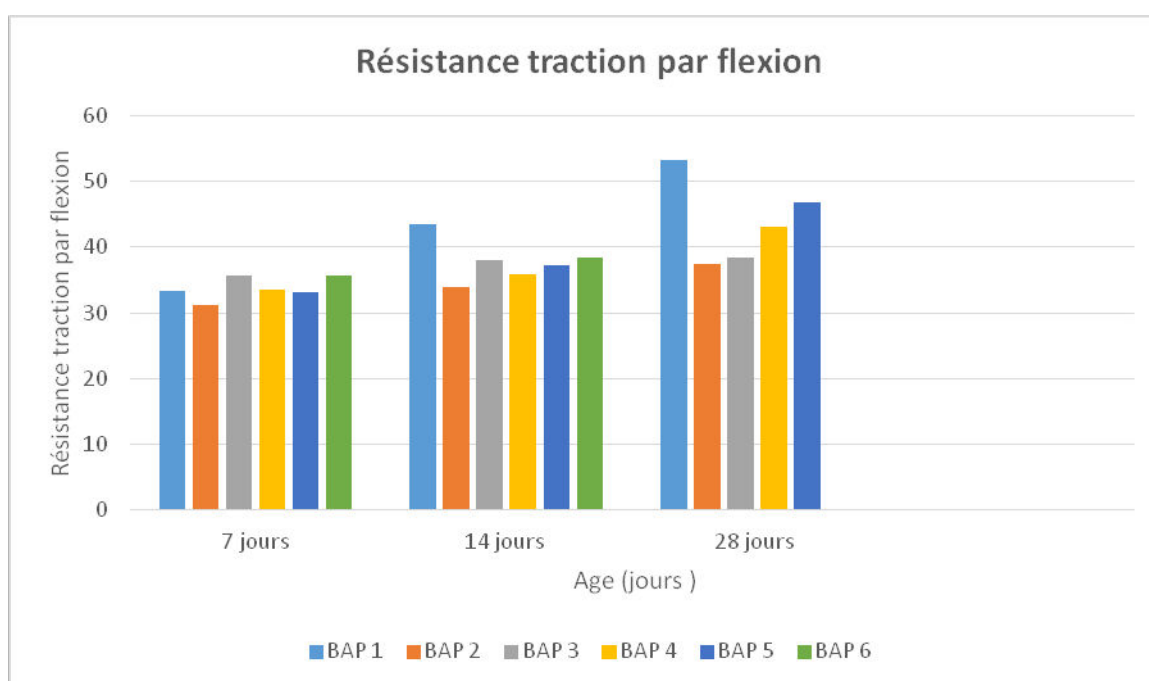
Généralement le rapport E/C est l'un des facteurs qui gouverne la cinétique du développement des résistances au jeune âge, l'augmentation de ce rapport affecte la résistance en compression, par l'augmentation de la porosité du béton durci. La réduction du rapport E/C à 0.50 et l'incorporation du superplastifiant ont amélioré considérablement la résistance en compression.

### IV.2.2.2 Résistance traction par flexion

La résistance à la traction est estimée par l'essai de traction par flexion par des éprouvettes prismatiques à 07 jours, 14 jours et 28 jours de conservation. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure IV.5.

**Tableau IV.4 : La résistance à la traction par flexion**

Type de béton Age(en jour)	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
7	33.29	31.21	35.74	33.44	33.04	35.65
14	43.4	33.94	38.01	35.79	37.28	38.36
28	53.32	37.37	38.46	43.08	46.70	54.07



**Figure IV.5 : Evolution de la résistance de traction par flexion en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.**

Selon la figure IV.5 on remarque la résistance de traction par flexion qui développée par le temps elle augmente jusqu'à la valeur 54.

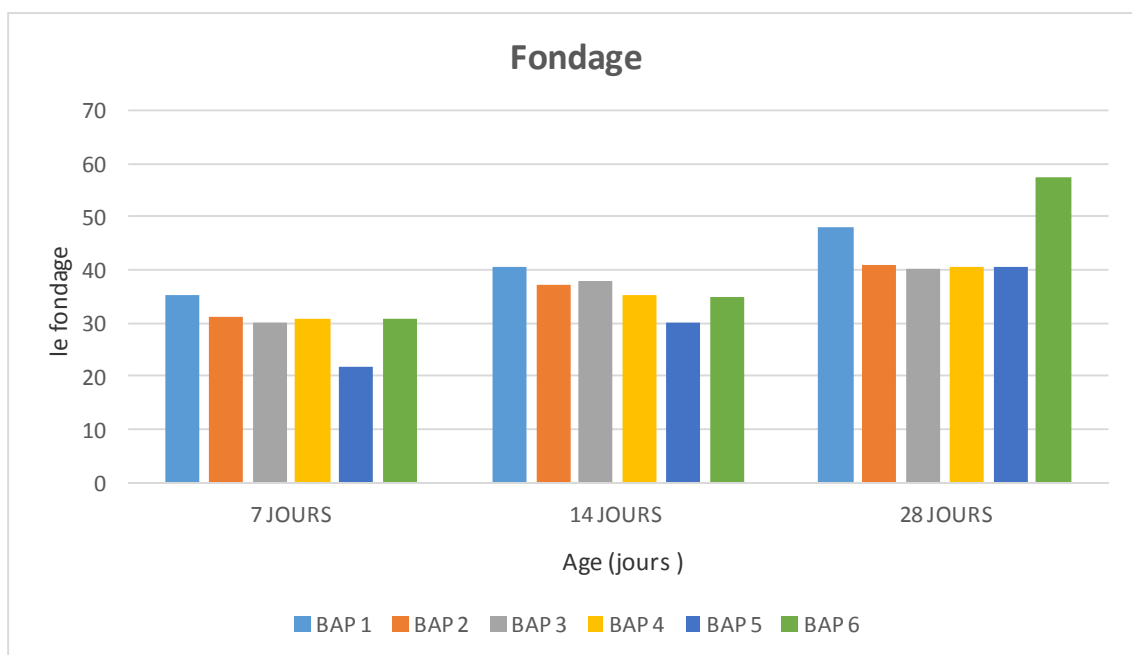
La résistance en traction est conditionnée par l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire, généralement la forme des granulats qui exerce le plus d'influence sur cette dernière, les particules du sable de dune ont une forme arrondie ce qui présente un désavantage. L'utilisation du superplastifiant, et la réduction du rapport E/C augmentent la compacité du squelette granulaire et par suite la résistance en traction du béton.

### IV.2.2.3 Essai de fendage

Le fendage a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques (15\* 30) à 07 jours, 14 jours et 28 jours de conservation. Les résultats obtenus sont indiqués à la figure IV.6 :

**Tableau IV.5 : Essai de fendage**

Type de béton Age(en jour)	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
7	35.50	31.13	30.22	30.88	22.01	30.9
14	40.50	37.19	38.10	35.13	30.25	35.01
28	48	40.89	40.05	40.49	40.56	57.31



**Figure IV.6 : Evaluation de Fendage en fonction de l'âge pour les BAP étudiés.**

À titre de comparaison, la figure IV.6 représente l'histogramme des valeurs de Fendage des différents bétons autoplaçants en fonction de l'âge (jours).

Ce graphe montre que les bétons dans la période 7 jours donnent même valeur sauf le BAP 5 est démunie. Mais dans l'âge 14 jours jusque 28 jours les valeurs sont augmentés.

### **IV.3 CONCLUSION**

Les travaux présentés concernent l'élaboration d'un nouveau type de composite cimentaire (BAP), à base des gros granulats(15/25) ; consistant à évaluer l'influence de ces granulats sur les propriétés physico-mécaniques, à une teneur pondérale égale à presque 50%. Donc, d'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'utilisation des granulats de fractions (15/25) améliore la qualité du béton. Cependant, pour obtenir un béton de bonne qualité à base des granulats grossiers, il est vivement recommandé à l'utilisation des fillers de laitier qui améliorent le comportement d'une part et qui parviennent à l'obtention d'un béton auto plaçant de haute qualité d'autre part.

---

---

## **Références Bibliographiques**

---

---

- [01] **Georges Dreux, Jean Festa** "Méthode pratique pour la composition des bétons- Méthode dite « Dreux-Gorisse »", Nouveau guide du béton, Editions Eyrolles, ISBN ISBN 2-212-10230-5, Paris 1995, Paris 1995
- [2] **J. K. Knapp, T. A. Taylor.** Waterjet roughened surface analysis and bond strength. Surface and Coatings Technology, Vol. (86-87), pp. 22-27, 1996.
- [03] **H.Hafid** "Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologiques des bétons frais" Thèse de doctorat de l'université Paris-Est, France-2012.
- [04] **S.Assié** "Durabilité des bétons autoplaçants" Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliqués-INSA Toulouse-France-2004.
- [05] **B.Safi** "Formulation et caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaires et mortiers autoplaçants » Thèse de doctorat de l'université M'hamed BougaraBoumerdès-Algérie-2012.
- [06] **ShenJie** "Comportement mécanique des matériaux et des structures précontraintes en bétons autoplaçants (BAP)" Thèse de doctorat de l'université de Reims champagne-ardenneFrance-2009
- [7] **K.K.Bamzai, P.N.Kotru,** "Fracture mechanics, cracks propagation and micro hardness studies on flux grown ErAlO<sub>3</sub>, single crystals," Mater. Sci. Tech., Vol.16, pp.405-410, 2000.
- [8] **D.G. Bhat,** "Comment on elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system," J. A, Cer, Soc, Vol.64, C165-C-166, 1981.
- [9] **ABIB Zinneddine,** « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Thèse de Magistère de l'Université USTHB, 2004.
- [10] **etude comparative BAP ordinaires 2018** – messias boutheyna houssem.
- [11] **RISSELKHLIFA Mohamed,** « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de l'Université de Constantine, 2009
- [12] **RISSELKHLIFA Mohamed,** « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de l'Université de Constantine, 2009.
- [13] **HANAA Fares,** « Propriétés mécaniques physico-chimiques du béton autoplaçant exposé à une température élevée », thèse de Doctorat de l'Université Cegy-Pontoise, 2010
- [14] **HANAA Fares,** « Propriétés mécaniques physico-chimiques du béton autoplaçant exposé à une température élevée », thèse de Doctorat de l'Université Cegy- Pontoise, 2010
- [15] **NF ISO 14577-3** "Metallic materials instrumented indentation test for harness and other materials parameters", part 3, Calibration of reference test pieces, pdf, 2003.

- [16] **ABIB Zinneddine**, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Thèse de Magistère de l'Université USTHB, 2004.
- [17] **GR. Anstis, P. Chantikul, BR. Lawn**, “A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, Direct crack measurements”. *J. Am. Ceram. Soc*, Vol.64, pp.533– 538, 1981
- [18] **Brunetaud X.**, Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux, «Etude de influence de différent paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton », Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris, le 08 Décembre 2005.
- [19] **T. Naadia**, Influence des fillers calcaires sur le comportement rhéologique des pates des bétons autoplaçants, Séminaire sur les Technologies du Béton, 2004.
- [20] **AFGC**, Béton autoplaçant, Recommandations provisoires, 2000.
- [21] **T. Sedran**: «Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars–Avril 1995
- [22] **Domone, P.L.**, “ Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies ”, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(2):197-208.