

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur

Département : Génie Civil

Domaine : Sciences techniques

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

# VALORISATION DES DECHETS INDUSTRIELS SUBSTITUTION DES GRANULATS NATURELS PAR LES GRANULATS DE LAITIER CRISTALLISE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS

Présenté par : *Reffes Lilya et Guias Yousra*

Encadrant : *Boumaza Fatiha* Dr Université badji mokhtar annaba

### Jury de Soutenance :

BELOUETTAR RADJEM	Pr	Université badji mmokhtar annaba	Président
BOUMAZA FATIHA	Dr	Université badji mmokhtar annaba	Encadrant
MELAIS F. ZOHRA	Dr	Université badji mmokhtar annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## *Remerciement*

*Nous témoignons que c'est par la grâce de Dieu le tout puissant et miséricordieux, d'aide incessante, qu'il a porté et d'orientation imminente qu'il a accordé pour achever ce travail.*

*Nous tenons à exprimer toute notre estime et notre reconnaissance envers notre encadreur professeur Mme BOUMAZA, pour nous avoir donné la chance de réaliser ce travail, pour la confiance qu'elle a manifestée à notre égard, pour son aide précieuse, pour ses conseils très constructives et pour nous avoir soutenus et toujours encouragés.*

*Nos vifs remerciements aux membres des jurys, pour l'honneur qu'ils ont fait en de juger et d'examiner ce travail.*

*Bien sûr sans oublier notre famille en particulier, et tous nos amis, pour leurs grande aide morale et physique.*

*Enfin, nous remercions du fond du cœur nous parents sans qui rien de tout cela ne serait arrivé.*

*Vous aviez toujours supportés et accompagnés dans notre projet. Voyez ici une reconnaissance Profonde de ce que vous aviez apportés dans la vie. On vous doit beaucoup. Nous dédions ce travail à nous parents, que nous espérons serons fiers de nous.*

*YOUSRA & LILYA*

## RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants se caractérisent par une grande fluidité et une mise en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et un volume de pâte approprié.

Nous avons cherché à réaliser des bétons autoplaçants à base de granulats de laitier de haut fourneau. Le laitier cristallisé est peu valorisé, souvent utilisé comme remblai. Son emploi dans les bétons, en remplacement total du gravillon et du gravier calcaire concassé peut avoir des avantages techniques par l'amélioration de certaines propriétés, économiques pour son prix et écologiques par la réduction de consommation de matières premières et l'élimination de sous – produits industriels.

La forte absorption d'eau des granulats de laitier cristallisé incite cependant à effectuer avant fabrication un traitement de prémouillage. Les bétons formulés ont été caractérisés à l'état frais par les essais d'étalement au cône, le taux de remplissage par la L-Box, la stabilité au tamis, le seuil de cisaillement par la méthode LCPC et la viscosité plastique. A l'état durci, les bétons ont été contrôlés en compression à différentes échéances. Les résultats obtenus montrent une nécessité d'augmenter le volume de pâte pour les BAP avec granulats de laitier cristallisé, une légère diminution des paramètres d'ouvrabilité et une amélioration des résistances mécanique

---

**Mots clés:** Formulation, béton autoplaçant, laitier cristallisé, fluidité, résistances mécaniques.

## **ABSTRACT**

---

The self-compacting concrete are characterized by a great fluidity and a free-vibration installation. This property can be obtained by the use of super-plasticizer and an appropriate volume of paste. We sought to achieve self-compacting concrete containing aggregates of blast furnace slag. The granulated slag is not valued, often used as backfill. Its use in concretes, in a total replacement of the gravel and crushed limestone, may have technical advantages by improving certain properties, an economical cost and ecological function by reducing raw material consumption and disposal of sub-industrial products.

The high water absorption of aggregates of granulated slag, however, encouraged to do before making a pre-wetting treatment. The concretes were characterized in a freshly-state by trials of spreading to the cone , the filling rate by the L-Box, stability in the sieve, the yield stress by the LCPC method and the plastic viscosity. In the cured state, the concretes were well-tested and controlled in compression at different maturities. The results show a need to increase the volume of paste to the BAP with aggregates of crystallized slag, a slight decrease of workability and improved mechanical resistance.

---

**Keywords:** Formulation, self placing concrete, granulated slag, fluidity, mechanical strengths.



## ملخص

تتميز الخرسانة المضغوطة ذاتيًا بسيولة كبيرة وتركيب خال من الاهتزازات. يمكن الحصول على هذه الخاصية عن طريق استخدام مادة ملدنة فائقة وكمية مناسبة من المعجون. لقد سعينا إلى تحقيق خرسانة ذاتية الضغط تحتوي على مجاميع من خبث فرن الصهر. لا يتم تقييم الخبث المحبب، وغالبًا ما يستخدم كردم. قد يكون لاستخدامه في الخرسانة، في الاستبدال الكامل للحصى والحجر الجيري المسحوق، مزايا تقنية من خلال تحسين خصائص معينة، وتكلفة اقتصادية ووظيفة بيئية عن طريق تقليل استهلاك المواد الخام والتخلص من المنتجات الصناعية الفرعية.

ومع ذلك، يتم تشجيع امتصاص الماء العالي من ركام الخبث المحبب قبل إجراء معالجة التبليل المسبق. تم تمييز الخرسانة في حالة جديدة من خلال تجارب الانتشار إلى المخروط، ومعدل التعبئة بواسطة L-BOX، والثبات في الغربال، وإجهاد الخضوع بطريقة LCPC ولزوجة البلاستيك. في الحالة المعالجة، تم اختبار الخرسانة جيدًا والتحكم فيها في ضغط عند فترات استحقاق مختلفة. تظهر النتائج الحاجة إلى زيادة حجم العجينة إلى BAP مع تراكمات الخبث المتبلور، وانخفاض طفيف في قابلية التشغيل وتحسين المقاومة الميكانيكية.

---

**الكلمات المفتاحية:** التركيب، الخرسانة ذاتية الصب، الخبث المحبب، السيولة، القوة الميكانيكية.

## SOMMAIRE

Résumé.....	I
Abstract.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction général.....	1
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
I.1. GENERALITES SUR LE BETON AUTOPLAÇANT.....	3
I.1.1 Introduction.....	3
I.1.2. Historique.....	3
I.1.3. Définition du BAP.....	3
I.2. CONSTITUANTS D'UN BETON AUTOPLAÇANT.....	4
I.2.1.Ciment .....	4
I.2.2. Les granulats .....	5
I. 2.2.1. Les granulats fins .....	5
I.2.2.2 Les gros granulats .....	5
I.2.3 L'eau.....	7
I.2.4 Le superplastifiant.....	7
I.2.5.L'agent colloïdal ou de viscosité.....	8
I.2.6.Additions minérales.....	8
I.3.EFFETS DES ADDITIONS FINES.....	9
I.3.1.Effets physiques et chimiques des additions .....	9
I.3.2.Effet rhéologique du filler calcaire et du laitier granulé sur les BAP.....	10
I.4. DOMAINES D'EMPLOI DES BAP .....	11
I.5.LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BAP.....	12
I.6. FORMULATION DES BETONS.....	13
I.6.1 Formulation du béton ordinaire.....	13
I.6.2. Approches de formulation de BAP .....	13
I.7. CARACTERISATION DE BAP A L'ETAT FRAIS .....	17
I.7.1 Propriétés des BAP à l'état frais.....	17
I.7.2. Essais de Caractérisation d'un BAP .....	19
I.8. CARACTERISATION DE BAP A L'ETAT DURCI.....	23
I.8.1 Propriétés mécaniques.....	23
I.8.2 Propriétés physico-chimiques.....	24
CONCLUSION.....	24
<b>CHAPITRE II :Caracteristiques des materiaux et methodes experimentales</b>	
II.1 INTRODUCTION.....	25
II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE.....	25
II.2.1 Le ciment.....	25
II.2.2 L'eau.....	26
II.2.3 Squelette granulaire.....	26
II.2.4 Additions minérales.....	27
II.2.4.1 Laitier granulé.....	27
II.2.4.2 Super plastifiant .....	28

II.3.CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX.....	28
II.3.1.Masses volumiques apparentes des matériaux.....	28
II.3.2.Masse volumiques absolus des matériaux.....	31
II.3.3.Equivalent de sable.....	34
II.3.4.Absorption d'eau.....	36
II.3.5.modules de finesse.....	37
II.3.5.1.Sable siliceux.....	37
II.3.5.2.Laitier granulé 0/2.5.....	37
II.3.5.3.Laitier granulé 0/3.15.....	38
II.4.Composite et dosage des bétons .....	39
<b>Chapitre III</b>	
III.1 INTRODUCTION.....	41
III.2 APPROCHE DE FORMULATION DES BETONS DE REFERENCE ET D'ETUDE PAR LA METHODE DE DREUX GORISSE.....	41
III.2.1 Les donnees.....	42
III. 2.2 Mode operatoire.....	42
III. 2.2.1- Dosage en ciment et en eau.....	42
III. 2.2.2- Dosage en granulat.....	42
III.3 CALCULS DE LA COMPOSITION DES BETONS.....	43
III.3.1 Analyses granulométriques des matériaux.....	43
III.3.2. Explication des bétons formulés.....	51
III.4. CONCLUSION.....	53
<b>CHAPITRE IV</b>	
INTRODUCTION.....	54
IV.1.RESULTATS ET DISCUSSION SUR BETON A L'ETAT FRAIS.....	54
IV.1.1. Essais de contrôle.....	54
IV.1.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	54
IV.1.1.2.Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	55
IV.1.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	57
IV.1.1.4.Essai à la boîte en L.....	58
IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION SUR BETON DURCI.....	58
IV.2.1. Vérification de l'absence de ségrégation.....	58
IV.2.1.1. Béton sans addition (BO).....	59
IV.2.1.2.Béton avec 45 % d'addition (BAP2).....	59
IV.2.1.3. Béton avec 55 % d'addition (BAP3).....	60
IV.2.2. Résistance en compression.....	60
IV.2.2.1. Béton sans addition (BO).....	61
IV.2.2.2.Comparaison entre les résistances en compression des bétons à base des GN et des GLC.....	62
IV.2.2.3.Influence du type d'addition sur la résistance à la compression des BAP 55 % filler.....	64
IV.3.CONCLUSION.....	64
CONCLUSION GENERALE.....	66
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	67
ANNEXE.....	70

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

Figure I.1. : Formulation qualitative du BAP .....	4
Figure I.2 : Coupe d'un haut- fourneau.....	6
Figure I.3 : Refroidissement lent du laitier cristallisé.....	6
Figure I.4 : Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression.....	7
Figure I.5 : Illustration de l'effet filler.....	10
Figure I.6. Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP .....	12
Figure I.7 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.....	14
Figure I.8 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.....	15
Figure I.9 : Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D.....	16
Figure I.10 : Mesure de l'eau retenue par les granulats.....	17
Figure I.11 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.....	18
Figure I.12.a : Essai d'étalement au cône.....	20
Figure I.12.b : dimensions du V-funnel.....	20
Figure I.13 : Anneau Japonais (J-ring) –[36].....	21
Figure I.14 : L'essai de boîte en L (L-Box).....	22
Figure I.15 : Essai de stabilité au tamis.....	23

### Chapitre II

Figure II .1: laitier granulé broyé .....	28
Figure II .2 : Mesure de la masse volumique apparente du laitier granulé.....	28
Figure II .3 : Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du laitier cristallisé (3/8 et 5/16).....	29
Figure II. 4 : Mesure de la masse volumique absolue du laitier granulé et sable siliceux.....	31
Figure II. 5 : Mesure de la masse volumique absolue du laitier cristallisé 3/8 et 5/16.....	33
Figure II. 6 : Mesure de la propreté du sable.....	35

### Chapitre III

Figure III .1 : méthode graphique de composition des granulats (composition N°1).....	45
Figure III. 2 : méthode graphique de composition des granulats (composition N°2).....	48
Figure III. 3 : Différence entre l'affaissement au cône des BO a) avec des granulats de laitier cristallisé sec ; b) avec des granulats de laitier cristallisé prémouillé.....	51
Figure III. 4 : Différence entre l'étalement des BAP1 a)avec des granulats de laitier cristallisé sec ; b) avec granulats de laitier cristallisé prémouillé.....	52

### Chapitre IV

Figure IV.1 : Affaissement du BO avec granulats de LC à l'état sec ou prémouillé.....	54
Figure IV.2 :Affaissement du BO en fonction de la nature des granulats.....	55
Figure IV.3: Etalement du BAP (35% LG) avec granulats de LC à l'état sec ou prémouillé..	56
Figure IV.4 : Influence du dosage en addition sur l'écoulement (Slump flow).....	56
Figure IV.5 : Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis.....	57

Figure IV.6 : Influence de dosage en addition sur l'écoulement (L-box) des BAP.....	58
Figure IV.7 : Observation de la répartition des granulaire du BO 0 %.....	58
Figure IV.8 : Confirmation de la présence de ségrégation de (BAP2) 45 % LG.....	59
Figure IV.9 : Observation de la répartition du squelette granulaire du (BAP3)55% LG.....	60
Figure IV.10: Influence du prémouillage des granulats sur la résistance à la compression des bétons ordinaires à base des ganulats de laitier cristallisé.....	61
Figure IV.11 : Évolution de la résistance à la compression des bétons GN et GLC avec 0%, 35% et 45% d'addition à 2 jours.....	62
Figure IV.12 : Évolution de la résistance à la compréssion des betons GN et GLC avec 0%, 35% et 45% d'addition à 7 jours.....	63
Figure IV.13: Évolution de la résistance à la compréssion des betons GN et GLC avec 0 %, 35 % et 45 % d'addition à 28 jours.....	63
Figure IV.14 : Influence du type d'addition sur la résistance à la compression des BAP à base des granulats de laitier cristallisé.....	64

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

Tableau I.1. : Propriétés d'ouvrabilité des BAP.....	19
--	----

### Chapitre II

Tableau II. 1 : Compositions chimiques du ciment.....	25
Tableau II. 2 : Compositions minéralogiques du clinker.....	25
Tableau II. 3 : Caractéristiques physiques du ciment.....	26
Tableau II. 4 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs.....	27
Tableau II .5 : composition chimique de laitier granulé en%.....	27
Tableau II. 6 : caractérisation du laitier cristallisé.....	27
Tableau II 7 : Résultats de la masse volumique apparente du laitier granulé.....	29
Tableau II .8 : Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 3/8.....	30
Tableau II. 9 : Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 5/16.....	30
Tableau II .10: Résultats des mesures de la masse volumique apparente laitier granulé broyé.....	30
Tableau II. 11 : Résultats de la masse volumique absolue du sable (laitier granulé).....	32
Tableau II. 12: Résultats de la masse volumique absolue du sable siliceux.....	32
Tableau II. 13: Laitier cristallisé 3/8.....	33
Tableau II. 14 : Laitier cristallisé 5/16.....	33
Tableau II. 15 : Résultats de la masse volumique absolue du laitier granulé broyé.....	34.
Tableau II. 16 : Résultat de l'équivalent de sable siliceux.....	35
Tableau II. 17 : Résultat de l'équivalent de sable laitier granulé.....	36
Tableau II. 18 : Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 3/8 .....	36
Tableau II. 19 : Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 5/16 .....	36
Tableau II. 20 : résultats sable siliceux.....	37
Tableau II. 21 : résultats Laitier granulé (2.5) .....	37
Tableau II. 22 : résultats Laitier granulé (3.15) .....	38
Tableau II .23 : caractéristiques physico – mécaniques des granulats et fine.....	39

### Chapitre III

TableauIII.1 :analyse granulométrique de(50% sable + 50% de laitier granulé 0/2.5).....	44
Tableau III.2 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8.....	44
Tableau III.3 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16.....	44
Tableau III.4 : analyse granulométrique de (33% de sable + 66% de laitier granulé 0/3.15).....	46
Tableau III.5 : formulation de BAP d'étude (composition N°1).....	49
Tableau III.6 : pourcentages de SP et addition de laitier granulé.....	49
Tableau III. 7 : résultats de comparaison.....	50
Tableau III. 8 : Classes de résistance à la ségrégation - Essai de stabilité au tamis.....	52

### Chapitre IV

Tabeau IV.1 : Résultats des essais sur béton autoplaçant frais à base de laitier cristallisé.....	55
Tableau IV.2 : Essai de compression.....	60

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

Ce travail constitue une partie de la réalisation d'une mémoire de Master promo 2012 menée sur la substitution des granulats naturels par les granulats de laitier cristallisé dans les bétons autoplaçants.

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans les coffrages les plus ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais pour des projets d'envergure. Ces bétons connaissent un essor important, car ils présentent deux intérêts technico-économiques majeurs :

- Une diminution du temps lors de la mise en place du béton en chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais étant donné la complexité sans cesse croissante des coffrages (forme, ferrailage,...)
- L'obtention d'une meilleure qualité du béton in-situ. Pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

Hormis le Japon, l'intérêt des autres pays pour ces bétons n'est apparu que récemment, mais il est en pleine augmentation.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

Notre travail consiste justement une étude sur la formulation de ce type de béton ainsi qu'une caractérisation de ces certaines propriétés.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les BAP en général ces propriétés, ses avantages, et ces constituants, les différentes méthodes élaborées pour sa formulation et les différentes techniques permettant sa caractérisation.

La caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude est présentée dans le deuxième le chapitre.

# INTRODUCTION GENERALE

---

Le troisième chapitre contient la formulation des bétons de référence et d'étude par la méthode de Dreux Gorisse.

Le dernier chapitre regroupe les résultats obtenus sur béton frais et béton durci ainsi que les discussions.

Ce travail est terminé par un une conclusion générale.



---

***INTRODUCTION GENERAL***

---

*CHAPITRE I*

---

*ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

---

## **I.1. GENERALITES SUR LE BETON AUTOPLAÇANT**

### **I.1.1 Introduction**

En raison de ses propriétés spécifiques, l'étude du béton Autoplaçant (BAP) représente un domaine de recherche qui possède un fort potentiel de développement. Le développement d'un BAP économique ayant des propriétés intéressantes à l'état frais et à l'état durci est important pour qu'un tel béton soit employé dans l'industrie de la construction.

Pour trouver de nouvelles solutions économiques s'ajoutant aux solutions techniques, des recherches sur les BAP économiques ont été conduites au cours de ces dernières années. Cependant, la quantité très importante de l'addition minérale dans la formulation des BAP, nous laisse penser que l'utilisation des ajouts minéraux naturels et économiques semble être l'une des solutions envisageables pour l'avenir des BAP.

La technologie des bétons autoplaçants est capable de consommer d'énormes quantités d'additions, parce que la formulation du BAP comporte une grande quantité de fines (environ 500 kg/m<sup>2</sup>). Ces dernières pourraient améliorer les caractéristiques et performances de ce type de béton.

### **I.1.2. Historique**

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de 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 2<sup>ème</sup> 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 4<sup>ème</sup>, Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention d'Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [1].

### **I.1.3. Définition du BAP**

Les bétons autoplaçants dite BAP, sont des bétons très fluides en écoulement, homogènes et stables, et se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions.

Les bétons auto-plaçant « BAP » se distinguent donc des bétons dits ordinaires « BO », ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique), [2] [3].

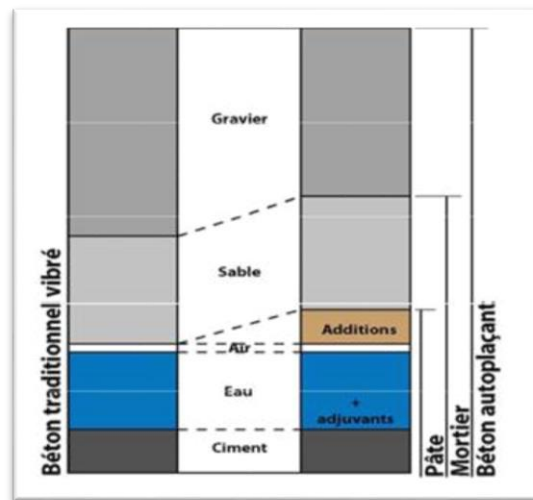
Pour parvenir à ce cahier de charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas la pâte définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (Figure I.1).

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les Bo, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [4].

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloquant (super plastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.



*Figure I.1. : Formulation qualitative du BAP [5]*

La quantité des fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au super plastifiants et aux additions.

Evidemment, un béton est qualifié d'auto-plaçant, non pas par rapport à sa composition mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais (site BAP).

## I.2. CONSTITUANTS D'UN BETON AUTOPLAÇANT

### I.2.1.Ciment

Le ciment est un liant hydraulique indispensable, 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.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450C<sup>0</sup>, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [6].

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Le clinker est constitué de quatre minéraux : le silicate tricalcique, le silicate bicalcique, l'aluminate tricalcique, l'aluminoferrite tetracalcique.

## **I.2.2. Les granulats**

### **I. 2.2.1. Les granulats fins**

#### ➤ **Le sable roulé (sable de dune)**

Les sables sont classés selon leur granulométrie (la grosseur des grains) [7]

- Sable fin, de 0.03 à 0.315mm
- Sable moyen de 0.315 à 2mm
- Sable gros de 2 à 5mm

#### ➤ **Les sables concassés (Sable de carrière)**

Obtenu par la réduction de gravier en granulats fins concassé ou plus simplement le déchet d'abatage et de concassage des roches pour l'obtention du gravier, les poussières de concassage dues à cette opération ne peuvent pas être éliminées, mais ne doivent pas être présent en quantité excessive ce qui augmente la demande en eau d'humidification, en plus, ils peuvent gêner la liaison pate-granulats.

Les granulats fins concassés foisonnent beaucoup plus qu'un sable naturel à cause de leur teneur en fine. S'il contient de l'argile qui enrobe les grains de sable et les empêche d'adhérer aux liants, il est donc à proscrire.

### **I.2.2.2 Les gros granulats**

Les granulats utilisés pour le béton peuvent être d'origine naturelle ou artificielle.

#### ➤ **Les graviers naturels**

- **Les graviers roulés**

Les graviers roulés sont de grains de roche non concassés, de 3 à 22mm de diamètre, les graviers roulés sont extraits des gravières des alluvions, Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico – calcaires.

- **Les graviers concassés**

Les graviers concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage ... sont obtenue par abatage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. Les graviers concassés se maintiennent entre eux et assurent une excellente stabilité de l'ouvrage.

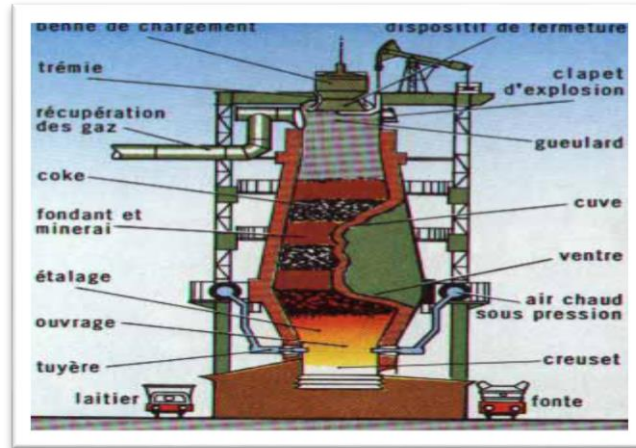
#### ➤ **Les graviers artificiels**

- **Le laitier de haut-fourneau cristallisé**

La première étape dans la production d'acier est l'obtention de fonte. Le fer (Fe) est naturellement contenu dans le minerai de fer, dont la teneur en oxydes peut atteindre 60%. Ce

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

minerai, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, est alimenté dans un haut-fourneau (figure I.2), sorte de grand four vertical dans la partie basse duquel sont soufflés de larges volumes d'air chaud. Ce procès fonctionne en continu, la colonne de matières brutes descendant au fur et à mesure que le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut-fourneau, recouvert par une couche de laitier plus léger. Ce laitier est une roche liquide (1500°C environ) composée des parties non métalliques du minerai à la chaux. Le fer (sous forme de fonte) et le laitier, tous les deux en fusion, sont périodiquement sous-tirés du haut-fourneau. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 kg de laitier.



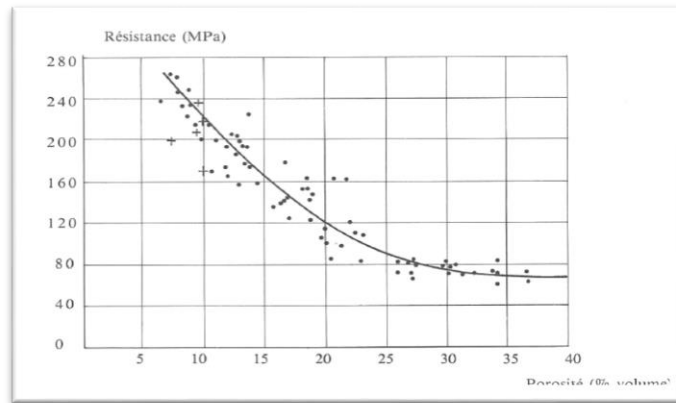
*Figure I.2 : Coupe d'un haut-fourneau.*

Après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier de haut fourneau est dirigé par une rigole vers des fosses où il va refroidir à l'air et se cristalliser sous forme de roche (figure I.3). Après le début de la solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. On obtient ainsi du laitier cristallisé brut, qui peut alors être concassé et criblé (comme dans une carrière) pour produire des granulats.



*Figure I.3 : Refroidissement lent du laitier cristallisé.*

Schématiquement le laitier cristallisé est considéré comme un mélange des quatre oxydes : silice  $\text{SiO}_2$  ; chaux  $\text{CaO}$  ; alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ; magnésie  $\text{MgO}$  pour 95% à 98% de sa composition, le complément étant constitué par des oxydes secondaires et des composés sulfurés. Et d'un point de vue minéralogique ses constituants cristallisés sont essentiellement des silicates et silico-aluminates de calcium [8].



**Figure I.4 :** Influence de la porosité du laitier cristallisé sur sa résistance à la compression.

La résistance mécanique d'un laitier cristallisé sera fonction de la nature de constituants minéraux ; de la dimension des cristaux ; et de leur imbrication (condition de refroidissement) et leur dureté.

La résistance à la compression simple sur cubes de laitier cristallisé est habituellement comprise entre 130 et 180Mpa. L'immersion est sans effet sur les résistances, cette résistance reste toujours relativement importante à la porosité élevée (figure I.4). Les granulats de laitier cristallisé sont utilisés notamment dans les bétons routiers ou pour les bétons réfractaires [9].

### I.2.3 L'eau

L'eau de gâchage qui entre dans la réaction chimique de liant pour former les hydrates, elle doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [10] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants.

### I.2.4 Le superplastifiant

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation [11].

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas,

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées.

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de superplastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau.

### **I.2.5.L'agent colloïdal ou de viscosité**

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré [12] qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

### **I.2.6.Additions minérales**

Un BAP doit contenir un certain volume de fines, en particulier pour assurer sa stabilité à l'état frais vis-à-vis de la ségrégation et des variations d'eau. Quand ce volume est occupé intégralement par du ciment portland, il fournit au matériau durci, un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications, il est naturel de l'occuper en partie avec des matériaux fins, moins réactifs que le clinker mais d'un coût inférieur, notamment sur les plans énergétiques et environnementaux. Ces additions minérales peuvent être mélangées au ciment lors de sa fabrication (ciments composés) ou ajoutées directement dans le malaxeur à béton.

On passe en revue dans cette partie les additions minérales les plus couramment utilisées dans les BAP [13].

#### **➤ 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.



## ➤ **Laitiers de haut fourneau granulé**

Dans le processus de fabrication de la fonte, on utilise des minerais de fer qui, outre leur phase ferreuse, contiennent des minéraux voisins de ceux du cru de clinker. La fusion des minerais dans les hauts fourneaux provoque alors la séparation gravitaire de la fonte liquide (en partie inférieure) et d'un résidu surnageant, également liquide appelé laitier en raison de sa couleur claire (lorsqu'il est à température ambiante). Pour rendre ce matériau utilisable en tant que liant hydraulique, il faut assurer sa vitrification par un refroidissement rapide (sans lequel les minéraux cristallisent, et deviennent presque insoluble à l'eau). Le broyage, légèrement plus difficile que celui du clinker, fournit alors un liant.

Le laitier de haut fourneau étant un coproduit de la sidérurgie, ses caractéristiques cimentaires ne sont pas optimisées vis-à-vis de son utilisation en génie civil. En particulier, sa prise est lente et nécessite un activant. C'est pourquoi il n'est jamais employé pur. Dans le béton de structure, on l'utilise en combinaison avec du ciment portland, qui assure l'activation chimique. Par contre, l'hydratation des laitiers, une fois démarrée, contribue aux qualités du béton durci dans des proportions similaires à celle du portland. La pâte de ciment au laitier durcie, présente une moindre quantité de chaux (portlandite), par rapport à celle issue de l'hydratation du ciment portland seul. C'est pourquoi les ciments au laitier sont particulièrement indiqués pour les bétons soumis à des ambiances agressives.

## ➤ **Autres additions**

On emploie aussi d'autres additions minérales, en particulier les additions pouzzolaniques comme les cendres volantes, les cendres de paille de riz, les métakaolins et le verre broyé sous forme de poudre et la fumée de silice. [13]

## **I.3.EFFETS DES ADDITIONS FINES**

### **I.3.1.Effets physiques et chimiques des additions**

#### ➤ **Effet Filler ou effet de remplissage**

Une addition minérale [14] incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé « effet filler ».

#### ➤ **Effet chimique ou pouzzolanique**

L'activité chimique est le résultat de réactions chimiques entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction pouzzolanique. La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, (hydrate sous produit de la formation du CSH du clinker).

## ➤ Effet physique ou de surface

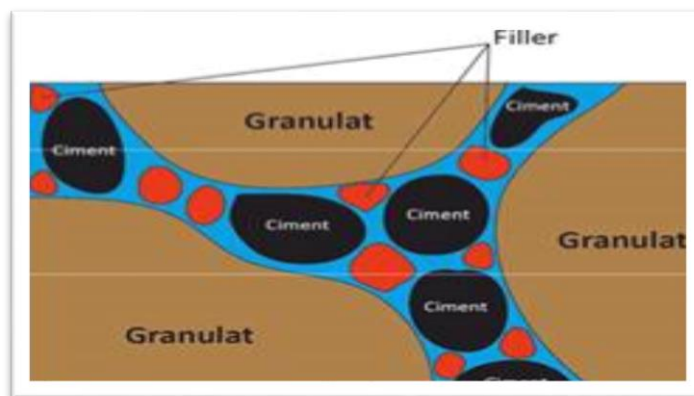
L'incorporation dans les liants hydrauliques d'une addition minérale, même inerte est favorable au développement de la résistance à court terme. Cet effet est observé par de nombreux auteurs, aussi bien sur des pâtes de ciment que des mortiers. Sans que les processus mis en jeu soient clairement précisés et quantifiés, l'action de l'addition est généralement désignée sous le terme de germination hétérogène. Les hydrates nouvellement formés par l'hydratation du ciment pourraient se précipiter en partie sur les surfaces minérales offertes par l'addition. En conséquence la couche d'hydrate qui se forme autour d'un grain de ciment anhydre, présente une épaisseur réduite ; l'hydratation du cœur anhydre, régie par des phénomènes de diffusion, est alors facilitée.

L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment à un instant donné. Ce processus d'hydratation différentielle entraîne une apparente accélération d'hydratation la germination hétérogène reposant sur des phénomènes de surface, il est donc logique que la résistance des mortiers augmente avec l'augmentation de la finesse des additions, mais en fait, plus que la surface spécifique, c'est vraisemblablement le nombre de particules d'addition par unité de volume de pâte qui est le paramètre essentiel de ce phénomène.

### I.3.2.Effet rhéologique du filler calcaire et du laitier granulé sur les BAP

#### ➤ Effet des fillers calcaires

Neto et Campitelli [15] utilisent le « tow-points » test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire (figure I.5).



*Figure I.5 : Illustration de l'effet filler.*

Notons que les auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

Brookbans, a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air. A. Ghezal [16], a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3  $\mu\text{m}$  et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

Ogawa et coll. (1995) ont développé des formulations de bétons fluides (Détal =  $650 \pm 30$ mm) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C =  $0,55 \pm 5\%$ , contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300L, des granulats concassés de diamètre maximum 20mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de  $51 \pm 1\%$ , 8 kg/m<sup>3</sup> de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m<sup>3</sup> d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.

Les mêmes bétons ont été étudiés vis à vis du retrait suivant la norme (JIS A1129) à une température de 20°C et une humidité relative de 60%. On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire, présentent une réduction très significative du retrait ( $< 400$  (µm/m) et de la fissuration des surfaces.

### ➤ Effet des laitiers de hauts fourneaux (granulé)

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [17]. Shi et al montrent par exemple, que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil de cisaillement.

## I.4. DOMAINES D'EMPLOI 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 [18]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

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

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton auto plaçant.

Malgré ça on pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie [19].

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure (figure I.6). Composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût.

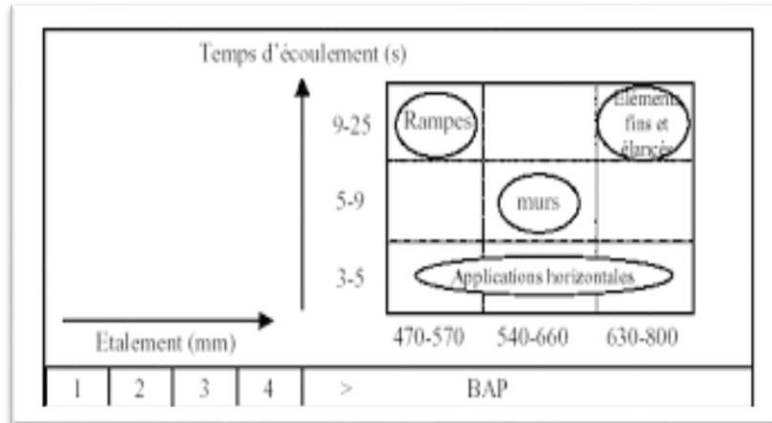


Figure I.6. Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [20]

## I.5.LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BAP

Les BAP présentent de nombreux avantages :

➤ **Avantages techniques :**

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

➤ **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.

➤ **Avantages écologiques :**

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

**Comme inconvénients, on distingue :**

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans

les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [21].

### **I.6. FORMULATION DES BETONS**

#### **I.6.1 Formulation du béton ordinaire :**

##### **Méthode de Dreux Gorise :**

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

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

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

#### **I.6.2. Approches de formulation de BAP**

##### **➤ Méthode de formulation pratique de BAP**

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de DREUX-GORISSE n'est pas adaptée [22] car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont les composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

-Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.

- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.

- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation. La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

##### **➤ Formulations de BAP existant dans la bibliographie**

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Dans ce qui suit, un exposé général sur les approches principales [23].

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

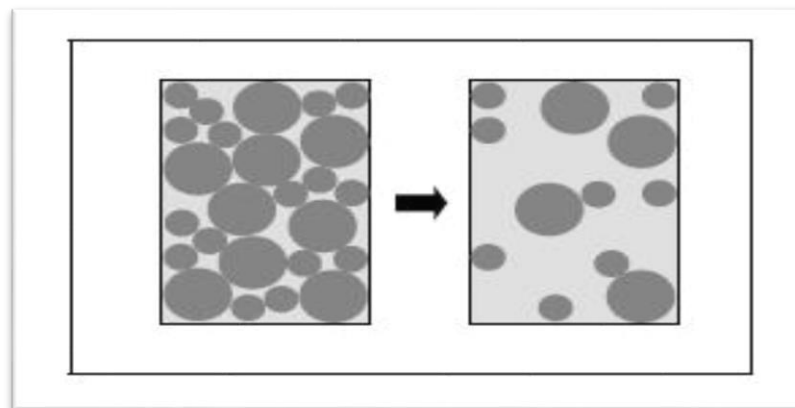
### ➤ Approche Japonaise basée sur l'optimisation du mortier :

Les chercheurs de l'université de Tokyo Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi. Ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants.

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50 % de leur compacité (les chercheurs ne précisent pas dans leur article comment la compacité est mesurée). Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats [24]. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

**Dosage des gravillons :** Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (figure I.7). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.



**Figure I.7 :** Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité

A défaut d'indication, ils ont choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC.

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, ils choisissent de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

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

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



## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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



*Figure I.8 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.*

Les auteurs définissent l'étalement relatif  $D$  par l'équation (I.1),  $d0^2$  :

$$D = \frac{d^2 - d0^2}{d^2} \quad (I.1)$$

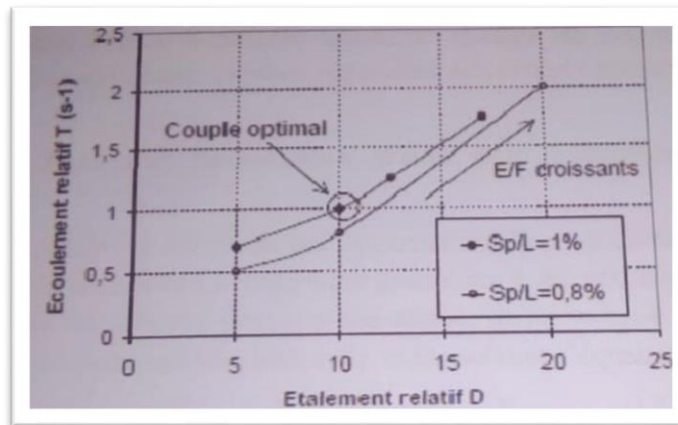
Où  $d$  est le diamètre de la galette et  $d0$  la base du cône. Ils définissent également l'écoulement relatif  $T$  par l'équation (I.2) :

$$T = \frac{10}{te} \quad (I.2)$$

Où  $te$  : est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. A l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier.

Lors des essais sur mortiers de Philippe Turcry, il a préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m', ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams. La figure (1.7) présente le résultat de la recherche du couple eau / superplastifiant. L'étalement normalisé  $D$  optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif  $T$  optimal est égal à 1. Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.



**Figure I.9 :** Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif  $T$  en fonction de l'étalement relatif  $D$

Sur (la figure I.9) la flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle.

➤ **Approche du LCPC basé sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires :**

L'approche développée en France au LCPC par De Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides.

D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Cette approche fait l'objet d'un logiciel BétonlabPro qui prend en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche pour différents types de béton (bétons ordinaires, bétons à hautes performances, bétons autoplaçants, etc.). Cette approche adopte la procédure ci-après pour la détermination des divers constituants [25]

- La proportion du liant est fixée a priori (70 % de liant et 30 % de filler).
- La détermination du dosage à saturation en superplastifiant.
- Détermination du dosage en eau en présence du superplastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme du modèle.
- Les calculs sont effectués à l'aide d'un logiciel en tenant compte du confinement, les grandeurs exigées à l'état frais sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 60 cm, un seuil de cisaillement inférieur à 500Pa, et la viscosité est comprise entre 100 et 200 Pa.

(Grandeurs rhéologiques mesurées au BTR rhéomètre). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation. En conséquence, la quantité d'eau est réduite et la proportion du liant reste constante, tout en optimisant les proportions (granulats 7 pâte liante). On ajuste le dosage en adjuvant pour l'obtention de l'étalement ciblé, ce qui donne un béton répondant aux critères rhéologiques.



## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

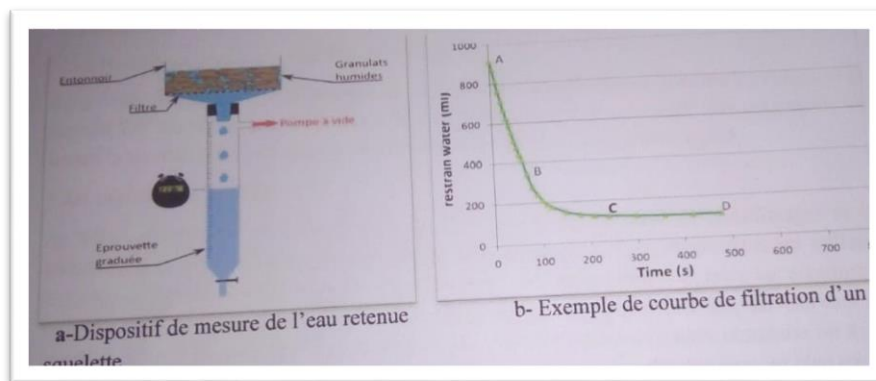
### ➤ Approche basé sur l'association d'une pâte optimisée et d'un squelette granulaire humide :

Cette approche de formulation est basée sur l'association d'un squelette granulaire (Gravillon + sable) humide et une pâte dont l'arrangement granulaire à été optimisé. Cette proche met en avant un concept classique qui stipule qu'un volume de béton est la somme d'un volume de pâte, de granulats humides et de vides suivant l'équation I.3:

$$V \text{ béton} = V \text{ pâte} + \text{Squelette granulaire} + V \text{ vides (I.3)}$$

- VEC : volume d'eau compacte correspondant au volume d'eau permettant de remplir les vides entre les particules solides à compacité maximale. Le VEC résulte de la connaissance du ratio de vide déterminé à la compacité maximale de la suspension.
- VEX : volume d'eau en excès qui permet la fluidification de la suspension. Il est défini à partir de l'épaisseur EPEX fixée et de la surface de poudre (ciment+addition) obtenue à partir des surfaces spécifiques BET de chaque nature de poudre.

Une fois la composition de la pâte déterminée, l'étape suivante consiste à estimer la demande en eau des granulats. En effet, la connaissance de l'eau retenue par le squelette granulaire est importante lorsque celui-ci est associé à une pâte. Cette quantité d'eau sera alors logiquement incorporée afin de ne pas modifier les propriétés d'écoulement de la pâte. La méthode d'essai est inspirée des travaux de Barrioulet, l'essai est réalisé par une filtration sous pression de l'eau contenue dans le squelette granulaire (Figure I.10-a et I.10-b). Le mode opératoire est décrit en détail dans les travaux d'El Barrak et Diederich .



*Figure I.10 : Mesure de l'eau retenue par les granulats.*

L'intersection des droites AB et CD (Figure I.10.b) correspond au volume d'eau retenue par les granulats au point A' [26]

## I.7. CARACTERISATION DE BAP A L'ETAT FRAIS :

### I.7.1 Propriétés des BAP à l'état frais :

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

Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [27].

### ➤ Le remplissage :

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [28].

### ➤ La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [29]. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes comme :

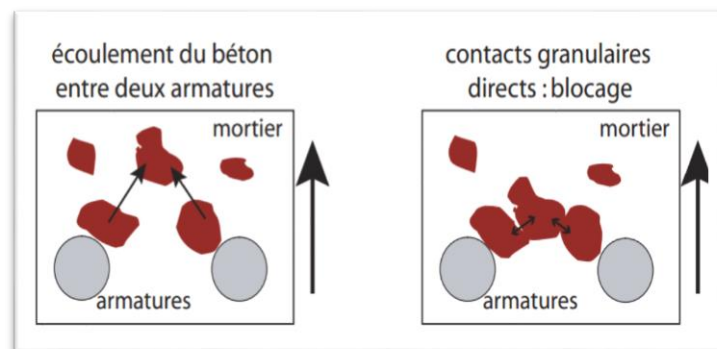
- La séparation entre la pâte et les granulats.
- La séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées.
- Une répartition non homogène de l'air occlus.

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

### ➤ La capacité de passage :

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

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [28]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la (figure I.11) ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.



*Figure I.11 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures*

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

*Tableau I.1. : Propriétés d'ouvrabilité des BAP*

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

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

## **I.7.2. Essais de Caractérisation d'un BAP :**

L'essai de référence pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai au cône d'Abrams.

Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique, pour les bétons autoplaçant la norme NF EN 206-1 [30] définit une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement du béton. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

En général, pour une fluidité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [31]

## **Essais de caractérisations d'un béton autoplaçant à l'état frais :**

Trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par la norme 206-1 [30]

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques :

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement).
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L).
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

L'essai d'étalement modifié fut développé par J-Ring au Japon [32] et peut remplacer la boîte en L pour la mobilité en milieu confiné.

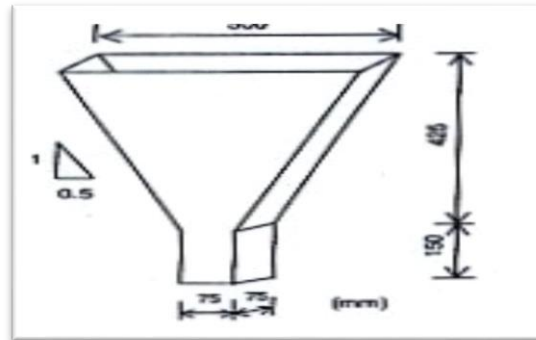
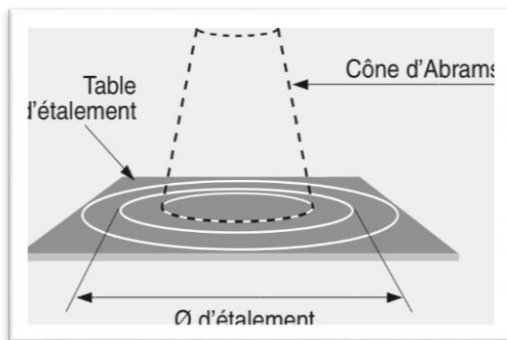
## ➤ Mobilité en milieu non confiné :

### Essai d'étalement :

Au cône d'Abrams est simple à réaliser et ne demande qu'une faible quantité de matériau (6 litres) (figure I.12-a). Il peut donc être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site. Il peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 500 mm (T500), ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau.

Cette dernière caractéristique est plus généralement étudiée au moyen de l'essai au V-funnel [33] (figure I.12-b). Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 l de béton passant à travers une ouverture étroite. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

Suivant le même principe, l'Orimet-test est également cité dans la littérature. Il s'agit d'un tube dont l'extrémité inférieure est un cône inversé de 8 cm de diamètre. Après remplissage du tube vertical avec un échantillon de 10 l de béton, la trappe située sous l'ouverture conique est ouverte. Le temps d'écoulement de la totalité de l'échantillon est enregistré et ne doit pas dépasser 5s pour les BAP[33].



**Figure I.12.a :** Essai d'étalement au cône

**Figure I.12.b :** dimensions du V-funnel

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont groupés que selon 2 classes:

- Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10 s
- Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27 s

L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du matériau et l'essai au Vfunnel est relié à la viscosité, bien que le seuil d'écoulement soit également mobilisé aux parois du dispositif. Le résultat d'un essai empirique seul n'est, cependant, pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton. Quelques exemples montrent que deux mélanges de béton ayant une même valeur d'affaissement peuvent avoir un comportement différent lors de l'écoulement [34]. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux doivent donc être déterminées.

### ➤ **Mobilité en milieu confiné (Essai J-ring):**

Le test au J-ring est une conception de GTM construction. il a pour but de considérer le comportement du béton face au blocage dans les armatures selon la déformabilité du BAP suivant un écoulement pareil à celui rencontré avec l'étalement au cône d'Abrams. le nombre d'armature peut être modifié selon l'essai souhaité. Le comportement au blocage du béton quantifié par le diamètre d'étalement  $s_J$  et le coefficient  $st_J$  qui la différence des hauteurs moyennes du béton entre la surface du béton dans le cône formé et celle du béton qui se trouve à l'extérieur des armatures du J-ring [35].



*Figure I.13 : Anneau Japonais (J-ring) [36]*

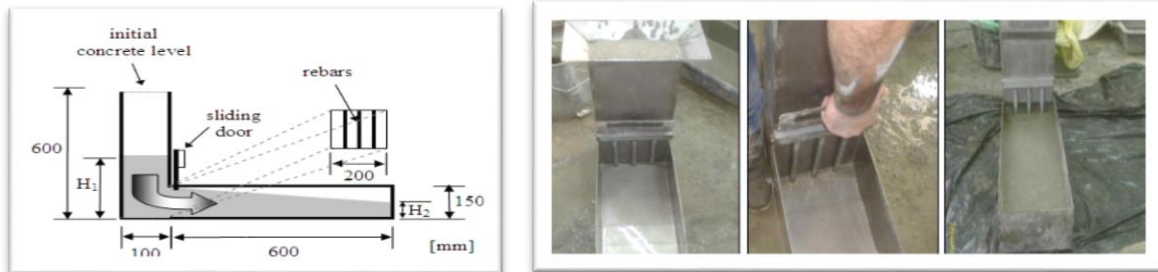
### ➤ **Essais de la Ségrégation dynamique (boîte en L (L-Box)) :**

L'essai à la boîte en L permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du béton autoplaçant au travers de zones confinées, y compris des espaces entre les barres d'armature et autres inserts, sans aucune ségrégation ou aucun blocage.

L'essai comporte deux variantes à savoir, l'essai avec deux barres et l'essai avec trois barres. L'essai avec trois barres simule en plus fort pourcentage d'armatures. Un volume donné de béton frais s'écoule horizontalement à travers les espaces entre les barres d'armatures lisses verticales de diamètre 14mm et distance de 39mm. Les hauteurs du niveau de béton dans la

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

partie verticale (H1) et à l'extrémité de la partie horizontale (H2), sont mesuré et le rapport H2/H1 est déterminé, ce rapport constitue une mesure de la capacité d'écoulement ou de blocage du béton autoplaçant c'est le taux de remplissage. La boîte en L a un volume total de 10 litres et suivant la (figure I.14) on peut savoir plus des dimensions de cette boîte [37]



*Figure I.14 : L'essai de boîte en L (L-Box).*

## ➤ Essais de ségrégation statique (stabilité au tamis) :

La qualification des bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation est visée par cet essai, qui est d'une simplicité lui permettant d'être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

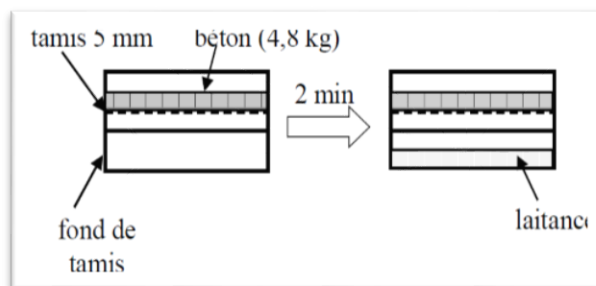
Il consiste à verser 10 litres de béton juste après le malaxage dans un sceau couvert pour protéger le béton de la dessiccation, après 15 min on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égale 4.8 kg, avec une hauteur de chute du béton 50 cm, après 2 min on calcule le poids de la laitance passer au tamis, ce qui nous permet de nous situer vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage [38]

Calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} * 100 \quad (\text{I.4})$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- **0% < % Laitance < 15 %** : Stabilité satisfaisante.
- **15% < % Laitance < 30 %**: Stabilité critique essai de ségrégation à réaliser in situ.
- **% Laitance > 30%** : Stabilité très mauvaise ségrégation systématique, béton inutilisable.



*Figure I.15 : Essai de stabilité au tamis.*



### **I.8. CARACTERISATION DE BAP A L'ETAT DURCI :**

Dans cette partie, on fera une comparaison des propriétés à l'état durci entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

#### **I.8.1 Propriétés mécaniques :**

##### ➤ **-Résistance mécanique :**

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (phases solide et liquide), le béton autoplaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grace notamment à une résistance à la ségrégation élevée, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique. Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [39] [40]. L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [41]. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

##### ➤ **Module d'élasticité statique (en compression) :**

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [39]. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

##### ➤ **Retrait au jeune âge (0-24 heures)**

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

##### ➤ **Retrait à l'état durci**

En dessiccation, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées (pour les BHP), où le retrait des BAP est supérieur. En mode endogène, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours. Au-delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton sont dues au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants.

##### ➤ **Déformations et fluage**

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [39]. Les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

supérieurs dans le cas des bétons autoplaçants, sauf pour la gamme de résistance relative aux bétons de bâtiment pour lesquels ces paramètres sont identiques entre BAP et BO.

### I.8.2 Propriétés physico-chimiques

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [39].

### CONCLUSION :

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants,

L'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

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

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

- Fluidité et viscosité 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.



***CHAPITRE II***

---

***CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX***

---

# CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

## II.1 INTRODUCTION

Cette partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et mécanique des constituants des bétons testés. Les essais ont été effectués au Laboratoire de génie civil de l'Université Badji-Mokhtar Annaba.

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

## II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE

Les propriétés et les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application.

Ce n'est qu'en évaluant ou en mesurant exactement les qualités et les caractéristiques les plus importantes, que nous pourrions confectionner des bétons qui nous permettent de construire des ouvrages solides, durables et de haute efficacité économique et technique.

Toutes les caractéristiques des matériaux de construction, d'après l'ensemble de leurs indices, sont divisées en caractéristiques physiques, chimiques ou mécaniques, ces derniers dépendent à tour de la nature et de l'origine des matériaux.

Les matériaux que nous avons utilisés pour l'exécution de tous les travaux expérimentaux sont d'une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement.

### II.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CPJ-CEM II/B de classe 42.5, c'est un ciment portland composé, résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80 %), de laitier granulé (15 à 25 %) et de gypse (5 %), provenant de la cimenterie de la FARGE «MSSILA »

La composition chimique et minéralogique du ciment et ses caractéristiques physiques sont données dans les tableaux 1, 2 et 3.

**Tableau II. 1 :** Compositions chimiques du ciment.

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PAF	CaO, libre
en %	61.53	4.69	17.38	2.72	1.55	0.20	0.95	2.44	8.20	0.00

**Tableau II. 2 :** Compositions minéralogiques du clinker.

<b>Minéraux</b>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Gypse	Ajouts
<b>% massique</b>	59	16	9	10	5	15% calcaire

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

**Tableau II. 3** : Caractéristiques physiques du ciment.

Désignations	valeurs	Unités
Densité apparente	1013	Kg/m <sup>3</sup>
Densité absolue	3060	Kg/m <sup>3</sup>
Refus au tamis 100u	1.71	%
Surface Spécifique Blaine	3726	Cm <sup>3</sup> /g

### II.2.2 L'eau

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics).

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques).

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.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton.

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

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.

### II.2.3 Squelette granulaire

C'est-à-dire le mélange de sable et de graviers, intervient dans la résistance finale du béton, occupent près de la 3/4 du volume du béton et influent donc sur ses propriétés. Ils permettent aussi de diminuer la quantité de ciment utilisée.

#### ➤ Le sable

Est un sable moyen roulé siliceux de dune de module de finesse de 2,51 correspond a un sable (0/2)

La composition du sable de dune est très simple : plus de 95% de Silice (Quartz) et de 1 à 2% de Calcaire et des traces de différents oxydes. La répartition en oxydes de la masse du sable est donnée par le tableau 2.

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

**Tableau II. 4** : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs

Elements	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PAF
%	90.46	1.38	1.92	1.63	0.39	0.2	0.00	0.22	2.56

### ➤ Le laitier granulé :

Le laitier granulé utilisé est celui du complexe sidérurgique d'El-Hadjar

Il se présente sous forme de grains sphériques, de couleur jaune clair, il a une finesse de 80µm

Dont la courbe et les résultats de l'analyse granulométrique sont présentées sur les tableaux 5 et 8

**Tableau II .5** : composition chimique de laitier granulé en%

Elements	SiO <sub>2</sub>	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Soufre	MnO
%	39.82	1.54	8.76	37.2	5.62	0.70	2.05

### ➤ Le gravier

Le gravillon et le gravier utilisés dans cette étude sont de laitier cristallisé (3/8 ; 5/16)

**Tableau II. 6:** caractérisation du laitier cristallisé

Composition chimique en (%)						Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Humidité (%)
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	CaO	MgO	MnO	2.3	1
40.6	7.5	0.3	38.5	7.1	2.6		

## II.2.4 Additions minérales

### II.2.4.1 Laitier granulé

Ces laitiers sont finement broyés obtenus par un concassage à l'aide d'un concasseur à mâchoires, suivit d'un broyage dans un broyeur à boulets pour obtenir une finesse inférieure à 200µm.



**Figure II .1:** laitier granulé broyé.

### II.2.4.2 Super plastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à base de poly-carboxylates modifiés, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique selon un taux de 0.25 à 2.5% du poids de ciment.

Ces caractéristiques sont les suivantes :

Forme ..... visceux;  
Couleur..... miel foncé;  
Masse volumique... .....1110 Kg/m<sup>3</sup> ;  
Teneur en chlore..... ≤0.1 %;  
Teneur en Na<sub>2</sub>O.....Eq≤2.5 %;  
L'extrait sec..... 3.6±1.8 (%);  
pH.....5±1.

## II.3.CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX :

### II.3.1.Masses volumiques apparentes des matériaux :

- **Masse volumique apparente du laitier granulé :**

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est présentée à travers la figure suivante :



**Figure II.2 :** Mesure de la masse volumique apparente du laitier granulé.

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

**Tableau II. 7:** Résultats de la masse volumique apparente du laitier granulé.

Volume d'un récipient connu (ml)	volume	1000
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	masse	936.1
Masse volumique apparente $M/V$ (gr/ml)	$\rho_{app}$	0.9361
$\rho_{app}=936.1\text{kg/m}^3$		

- **Masse volumique apparente du laitier cristallisé 3/8 et laitier cristallisé 5/16 :**

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume en vrac, c'est-à-dire «vides» compris.

– **Principe de mesure :**

La mesure consiste à verser le granulat sec dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une règlette. La masse volumique apparente, notée  $M_v$  est donnée par l'expression :

$$M_v = M / V$$

Avec : M : masse des granulats contenus dans le récipient ;

V : volume du récipient.



**Figure II.3 :** Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du laitier cristallisé (3/8 et 5/16)

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

**Tableau II. 8 :** Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 3/8.

Volume d'un récipient connu (ml)	volume	1000
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	masse	1217
Masse volumique apparente $M/V$ (gr/ml)	$M\rho_{app}$	1.217
$\rho_{app}=1217 \text{ kg/m}^3$		

**Tableau II. 9 :** Résultats des mesures de la masse volumique apparente du laitier cristallisé 5/16.

Volume d'un récipient connu (ml)	volume	1000
Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	masse	1339.1
Masse volumique apparente $M/V$ (gr/ml)	$M\rho_{app}$	1.339
$\rho_{app} =1339 \text{ kg/m}^3$		

- **Masse volumique apparente des fines :**

**Tableau II. 10:** Résultats des mesures de la masse volumique apparente laitier granulé broyé.

Volume d'un récipient connu (ml)	volume	2000
----------------------------------	--------	------



## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Masse de sable contenu dans le récipient (gr)	masse	1124.7
Masse volumique apparente $M/V$ (gr/ml)	$M \rho_{app}$	0.562
$\rho_{app} = 562 \text{ kg/m}^3$		

### II.3.2. Masse volumiques absolus des matériaux :

#### La masse volumique absolue ( $\rho$ )

Est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

#### – Principe de mesure (Méthode de l'éprouvette graduée) :

Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau. Peser un échantillon sec  $M$  de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume  $V_2$ .

La masse volumique absolue est alors :  $\rho = M / (V_2 - V_1)$

#### ❖ Masse volumique absolue du sable et laitier granulé

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.



**Figure II.4 :** Mesure de la masse volumique absolue du laitier granulé et sable siliceux.



## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

---

**Tableau II. 11:** Résultats de la masse volumique absolue du sable (laitier granulé).

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	560
Masse volumique absolue $M / (V2 - V1)$	$\rho_{Abs}$	1.87
$\rho_{Abs} = 1870 \text{ kg/m}^3$		

**Tableau II. 12:** Résultats de la masse volumique absolue du sable siliceux.

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	520
Masse volumique absolue $M / (V2 - V1)$	$\rho_{Abs}$	2.5
$\rho_{Abs} = 2500 \text{ kg/m}^3$		

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

### ❖ Masse volumique absolue de laitier cristallisé 3/8 et laitier cristallisé 5/16 :



**Figure II.5 :** Mesure de la masse volumique absolue du laitier cristallisé 3/8 et 5/16.

Les résultats des mesures, sont reportés dans le tableau suivant :

**Tableau II. 13: Laitier cristallisé 3/8**

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	510
Masse volumique absolue $M / (V2 - V1)$	$\rho_{Abs}$	2.72
$\rho_{Abs} = 2720 \text{ kg/m}^3$		

**Tableau II. 14 : Laitier cristallisé 5/16**

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Lire le nouveau volume (ml)	V2	520
Masse volumique absolue M/(V2-V1)	$\rho$	2.5
$\rho_{Abs} = 2500 \text{ kg/m}^3$		

### ❖ Masse volumique absolue des fines :

**Tableau II. 15:** Résultats de la masse volumique absolue du laitier granulé broyé.

Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
Masse de l'échantillon (gr)	M	300
Lire le nouveau volume (ml)	V2	515
Masse volumique absolue M/(V2-V1)	$\rho_{Abs}$	2.6
$\rho_{Abs} = 2600 \text{ kg/m}^3$		

### II.3.3. Equivalent de sable :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé. Pour cela on utilise une solution lavante, elle permet de séparer les éléments fins argileux et provoque la floculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines floculées, (sable propre + éléments fins = hi) et la hauteur de sable propre (h2 si c'est au piston ou h'2 si c'est au réglet).

#### 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).

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

- 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 20cm 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 la vante atteigne le 2ème repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.
- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieure du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$ESV = h2 / h1 \times 100[\%]$$



**Figure II.6 :** Mesure de la propreté du sable.

**Tableau II. 16 :** Résultat de l'équivalent de sable siliceux.

h1	8.5
h2	10
Sur l'échantillon : E.S.V	85

L'ESV de notre sable est de 85%, ce qui montre qu'il est très propre.

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

---

**Tableau II. 17 :** Résultat de l'équivalent de sable laitier granulé.

h1	14
h2	14
Sur l'échantillon : E.S.V	100

L'ESV de notre sable est de 100%, ce qui montre qu'il est très propre.

L'ensemble des résultats, à l'exception de l'étendue granulaire, montre que le sable utilisé répond aux différentes normes utilisées.

### II.3.4. Absorption d'eau :

**Tableau II. 18 :** Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 3/8

Massa de l'échantillon (gr)	Mh	314
Masse de l'échantillon après séchage (gr)	Ms	278.7
Absorption d'eau (%) $(Mh - Ms) / Ms$	Abs	0.13
13%		

**Tableau II. 19:** Absorption d'eau des graviers laitier cristallisé 5/16

Masse de l'échantillon (gr)	Mh	732.5
Masse de l'échantillon après séchage (gr)	Ms	703.2
Absorption d'eau (%) $(Mh - Ms) / Ms$	Abs	0.04
14%		

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

### II.3.5.modules de finesse :

II.3.5.1.Sable siliceux : masse totale= 995.8g

**Tableau II. 20: résultats sable siliceux**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	4.9	0.49	0.49
3.15	9.3	0.93	1.42
2.5	42.3	4.24	5.66
1.6	41.9	4.2	9.86
1.25	63.6	6.38	16.24
1	45.5	4.56	20.8
0.63	139.9	14.04	34.84
0.5	399.5	40.11	74.95
0.315	55.2	5.54	80.49
0.16	150.4	15.10	95.09
Fond	43.3	4.34	99.93

➤ **Module de finesse :**

$MF = 1/100 \sum$  refus cumulées en % des tamis [5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.16]

**Mf=2.3**

II.3.5.2Laitier granulé (0/ 2.5) : masse totale = 996.7g

**Tableau II. 21: résultats Laitier granulé (0/2.5)**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0	0	0

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

2.5	0.3	0.3	0.03
1.6	121.3	12.17	12.2
1.25	236.6	0.23	12.43
1	142.9	14.33	26.76
0.63	292.9	29.38	56.14
0.5	84	8.42	64.56
0.315	36.8	3.69	68.25
0.16	49.1	4.92	73.17
Fond	32.8	3.29	76.56

➤ **Module de finesse :**

MF = 2.1

**II.3.5.3.Laitier granulé (0/ 3.15) :** masse totale =996.5g

**Tableau II. 22: résultats Laitier granulé (0/3.15)**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %
5	0	0	0
4	0	0	0
3.15	0.6	0.06	0.06
2.5	22	0.22	0.28
1.6	142.8	14.33	14.61
1.25	234.3	23.51	38.12
1	140.2	14.06	52.18
0.63	259.8	26.07	78.25
0.5	88.2	8.85	87.1
0.315	17.3	17.3	88.83
0.16	49.8	4.99	93.82

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Fond	61.3	6.15	99.97
------	------	------	-------

➤ **Module de finesse :**

MF = 2.9

→ Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II .23** : caractéristiques physico – mécaniques des granulats et fines

Caractéristiques	Unité	Sable de dune	Laitier granulé	Laitier cristallisé 3/8	Laitier cristallisé 5/16	Les fines
Masse volumique apparente	Kg/m <sup>3</sup>	1410	936.1	1217	1339	562
Masse volumique absolue	Kg/m <sup>3</sup>	2500	1870	2720	2500	2600
d/D		0/5	0/2.5-0/3.15	3/8	5/16	-
Module de finesse		2.3	2.1-2.9	-	-	-

### II.4.COMPOSITE ET DOSAGE DES BETONS :

▪ **Méthode d'ABRAMS :**

**Mélange 1 : (sable + laitier granulé 0/3.15)**

MF1= 2.9

MF2= 2.3

MF=2.5

S1= MF1-MF = 2.9-2.5=0.4

S2=MF-MF2= 2.5-2.3=0.2

→ S=0.6

S2/S= 33%

S1/S=66%

66% de laitier granulé

33% de sable

**Mélange 2 : (sable + laitier granulé 0/2.5)**

MF1 = 2.3

MF2 = 2.1

MF=2.2

S1= MF1-MF= 2.3-2.2 =0.1

S2= MF-MF2= 2.2-2.1=0.1

→S=0.2

S1/S=50%

S2/S=50%



## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

---

50% de laitier granulé

50% de sable

## ***CHAPITRE III***

---

### ***FORMULATION DES BAP***

---

## III.1 INTRODUCTION

Réaliser un béton auto plaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Plusieurs approches ont été élaborées à travers le monde, approche japonaise [42], approche suédoise [43], approche LCPC) [44] pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Néanmoins, ces approches restent empiriques et sont basées sur l'optimisation soit de la fraction fine de la pâte de ciment ou de mortier soit du squelette granulaire. Deux grandes familles d'approche de formulation des BAP prévalent actuellement, la première, concerne des formulations fortement dosées en ciment et une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [45].

## III.2 APPROCHE DE FORMULATION DES BETONS DE REFERENCE ET D'ETUDE PAR LA METHODE DE DREUX GORISSE

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose et dont les qualités sont recherchées soit à l'état frais par sa facilité de mise en œuvre soit à l'état durci par sa résistance à 28 jours.

Plusieurs méthodes sont proposées parmi lesquelles la méthode pratique simplifiée dite méthode de "Dreux Gorisse". Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités.

Dans cette approche empirique [Dreux, Festa, 1995), les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB présentée par deux segments de droite dans le diagramme granulométrique. Cette courbe représente la distribution optimale, sans le ciment (liant), qui conduit à la plus forte compacité granulaire. La formule s'appuie sur quatre relations principales [46] cité par [47].

- Une relation (équation III-2) entre la résistance en compression du béton et le rapport eau/ciment dans la matrice cimentaire en fonction de la classe des ciments et la nature des agrégats. Cette relation s'appuie sur des modèles prédictifs de la résistance en compression comme ceux de Bolomey ou de Féret. Elle permet de relier les résistances requises pour le béton à un paramètre clef de la formulation du béton qui est le rapport eau/ciment. A partir de ce rapport et d'un dosage minimal en ciment fixé pour l'ouvrage ou de la consistance désirée.
- Une relation entre le rapport eau/ciment et le dosage en ciment, d'une part et sa consistance, d'autre part. Elle permet de choisir le dosage en eau et la consistance, soit le dosage en ciment et en eau. A partir du dosage en ciment (voir abaque Annexe III-1)
- Une relation (équation III-3) entre la consistance du béton frais et la compacité ou la masse volumique apparente du mélange frais après la mise en place en fonction des moyens de serrage et la dimension maximale des granulats. Elle permet de déterminer le volume total des granulats (voir tableau Annexe III-2)
- Une relation (équation III-4) qui permet de définir le rapport entre les classes granulaires grossières et les classes granulaires fines conduisant à l'optimisation du squelette granulaire

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

du mélange et à l'obtention de la compacité maximale. Elle permet de déterminer le volume relatif des différentes classes granulaires à mettre en œuvre dans le mélange.

### III.2.1 Les données

- ❖  $f_{c28}$  : Résistance en compression à 28 jours
- ❖ La plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abraham (AC) pour avoir un béton peu plastique
- ❖ D: Dimension maximale des granulats en mm.
- ❖ Résistance nominale  $\delta_n$

### III. 2.2 mode opératoire

La résistance moyenne serait :

$$F_{c28} = \delta_n + 15\% \delta_n \dots\dots\dots(III - 1)$$

#### 1- Dosage en ciment et en eau :

A partir de la formule ci-dessous on détermine le rapport C/E

$$f_{c28} = G. \delta_c(C/E - 0.5) \dots\dots\dots(III - 2)$$

Avec :

- $f_{c28}$  : résistance moyenne en compression désirée à 28 j en bars
- $\delta_{cj}$  : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars
- C: Dosage en ciment (en kg/m<sup>3</sup>)
- G: Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats (Bonne ou courant, excellente, passable) et de la dimension D des gros granulats; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).
- E: Dosage en eau sur matériaux secs (en litres pour 1 m<sup>3</sup> de béton) Le dosage en ciment est tiré de l'abaque en fonction de C/E et A. (voir abaque Annexe III-1). Ayant fait le choix du dosage en ciment C, on calcule alors le dosage approximatif Du l'eau (E).

#### 2- Dosage en granulat :

Les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB.

Le point O (origine) a pour coordonnées [X<sub>0</sub>=0,08 mm, Y<sub>0</sub>=0 % passant).

Le point B (extrémité) a pour coordonnées [X<sub>B</sub>=D<sub>max</sub>, Y<sub>B</sub>=100 % passant] (avec D<sub>max</sub> la taille du plus gros granulat).

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

Le point A (brisure de la courbe) a pour coordonnées [ $X_A = D_{max}/2$  et  $Y_A = 50 - D + K + K_s + K_p$ ]. Les valeurs de K, et  $K_p$  sont donnés à partir de tableaux (voir Tableau Annexe III-2) ou d'abaques associés à la méthode. La valeur de  $K_s = 6 M_f - 15$

Les proportions volumiques des différents granulats dans le mélange sont alors tirées du graphique (Fig. II-3) selon les lignes de partage. La projection sur l'axe des tamisât des points d'intersection entre les lignes reliant le point 95 % des passants d'un granulat au point 5 % des passants du granulat suivant et la courbe granulair de référence permet de lire les quantités ( $g_i$ ) en pourcentage de chaque fraction de granulair (sable et gravier).

Le volume total absolu des granulats

$$V = 1000 \gamma - V \dots\dots\dots (III - 3).$$

Avec :

- $\gamma$  : coefficient de compacité qui est fonction de  $D_{max}$ , de la consistance et du moyen du serrage (voir Tableau annexe III-3).

Les volumes absolus de chaque granulat sont donnés par l'expression suivante :

$$V_i = g_i . V \dots\dots\dots (III - 4).$$

Avec :

- $V_i$  : Volume du granulat en ( $Kg/m^3$  de béton).
- $g_i$  : Pourcentage du granulat tiré du graphique (%).
- $V$  : Volume total des granulats ( $m^3$ ).

Les masses absolues de chaque granulat sont donnés par l'expression suivante :

$$M_i = V_i . \rho \dots\dots\dots (III - 5).$$

- $M_i$  : La masse du granulat en (Kg)
- $V_i$  : Volume du granulat en ( $Kg/m^3$  de béton)
- $\rho$  : La masse Volumique absolue du granulat en ( $Kg/m^3$  de béton).

### III.3 CALCULS DE LA COMPOSITION DES BETONS :

#### La composition N°1 :

$$[(\text{sable } 50\% + 50\% \text{ laitier granulé } 2.5) + \text{gravillon } 3/8 + \text{gravier } 5/16]$$

#### III.3.1 Analyses granulométriques des matériaux :

(sable 50% + 50% laitier granulé 2.5) : masse totale = 998g

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

**Tableau III.1 : analyse granulométrique de (50% sable + 50% de laitier granulé 0/2.5)**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât %
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3.15	0.3	0.03	0.03	99.97
2.5	7.2	0.72	0.75	99.25
1.6	62.2	6.23	6.98	93.02
1.25	138.3	13.85	20.83	79.17
1	88.3	8.84	29.67	70.33
0.63	187.6	18.79	48.46	51.54
0.5	107.1	10.73	59.19	40.81
0.315	179.7	18	77.19	22.81
0.16	172.6	17.29	94.48	5.52
Fond	54.7	48	99.96	0.04

Laitier cristallisé 3/8 : masse totale = 1598.1g

**Tableau III.2 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
8	7.2	0.45	0.45	99.55
6.3	201.4	12.6	13.05	86.95
5	165.7	10.36	23.41	76.59
4	515.8	32.27	55.68	44.32
3.15	559.8	35.02	90.7	9.3
Fond	148.2	9.27	99.97	0.03

Laitier cristallisé 5/16 : masse totale = 3197.9g

**Tableau III.3 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
16	0	0	0	100
12.5	848.3	26.52	26.52	73.48
10	996.7	31.16	57.68	42.32
8	726.5	22.71	80.39	19.61
6.3	423.8	13.25	93.64	6.36
5	152.9	4.78	98.42	1.58
Fond	49.7	1.55	99.97	0.03

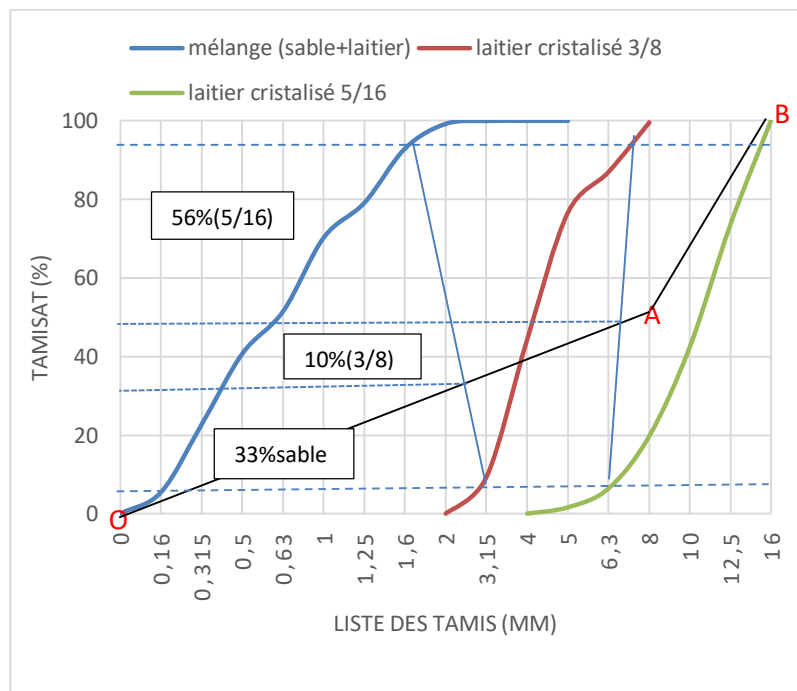
La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP dans cette étude expérimentale c'est la méthode de Dreux, elle se base sur les données suivantes:

- La résistance nominale  $\sigma'_n = 30$  Mpa ;
- La résistance moyenne à 28j  $\sigma'_{28} = 34.5$  Mpa ;

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

- C/E= 2
- D'après C/E et AC de l'abaque (ANNEX 4) on trouve la quantité de ciment C= 400 kg/m<sup>3</sup>
- Le dosage en eau : E=200 l/ m<sup>3</sup> de béton
- Tracé de la courbe de référence (figure 23) ;
- Tracé de la courbe de référence OAB
- O(0 ,0)            B(D max ,100)
- A( XA ,YA)    → XA = DMAX /2 = 16/2 = 8
- →YA = 50-√(DMAX)+k+kp+ks
- Ks= 6MF-15 = 6(2.2)-15= -1.8
- A (8 ; 44.2)
- Sable =34%
- G 3/8= 10%
- G5/16= 56%

**Courbe 1 OAB : O(0,0) A (8 ; 44,2) B (16 ; 100)**



**Figure III.1 : méthode graphique de composition des granulats (composition N°1)**

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

### Composition N°2 :

[(sable 33% + 66% laitier granulat 0/2.5) + gravillon 3/8 + gravier 5/16]

### Analyses granulométriques des matériaux :

(sable 33% + 66% laitier granulé 3.15) : masse totale = 993.4g

**Tableau III.4 : analyse granulométrique de (33% de sable + 66% de laitier granulé 0/3.15)**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât %
5	0	0	0	100
4	2.3	0.23	0.23	99.77
3.15	3.9	0.39	0.62	99.8
2.5	31.4	3.16	3.78	96.22
1.6	95.3	9.59	13.37	86.63
1.25	159.4	16.04	29.41	70.59
1	112.1	11.28	40.69	59.31
0.63	217.4	21.88	62.57	37.43
0.5	121.6	12.24	74.81	25.19
0.315	163.9	16.49	91.3	8.7
0.16	53.7	5.4	96.7	3.3
Fond	32.4	3.26	99.96	0.04

Laitier cristallisé 3/8 : masse totale = 1598.1g

**Tableau III.2 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 3/8**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
8	7.2	0.45	0.45	99.55
6.3	201.4	12.6	13.05	86.95
5	165.7	10.36	23.41	76.59
4	515.8	32.27	55.68	44.32
3.15	559.8	35.02	90.7	9.3
Fond	148.2	9.27	99.97	0.03

Laitier cristallisé 5/16 : masse totale = 3197.9g

**Tableau III.3 : analyse granulométrique de laitier cristallisé 5/16**

Tamis	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât
16	0	0	0	100
12.5	848.3	26.52	26.52	73.48
10	996.7	31.16	57.68	42.32
8	726.5	22.71	80.39	19.61
6.3	423.8	13.25	93.64	6.36



## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

5	152.9	4.78	98.42	1.58
Fond	49.7	1.55	99.97	0.03

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP dans cette étude expérimentale c'est la méthode de Dreux, elle se base sur les données suivantes :

- La résistance nominale  $\sigma'n = 30 \text{ Mpa}$  ;
- La résistance moyenne à 28j  $\sigma'28 = 34.5 \text{ Mpa}$  ;
- $C/E = 2$
- D'après C/E et AC de l'abaque N on trouve la quantité de ciment  $C = 400 \text{ kg/m}^3$
- Le dosage en eau :  $E = 200 \text{ l/m}^3$  de béton

Tracé de la courbe de référence (figure 24) ;

- Tracé de la courbe de référence OAB

O(0, 0)            B(D max , 100)

A( XA , YA)     $\rightarrow XA = DMAX / 2 = 16/2 = 8$

$\rightarrow YA = 50 - \sqrt{(DMAX) + k + kp + ks}$

$Ks = 6MF - 15 = 6(2.5) - 15 = 0$

A(8 , 46)

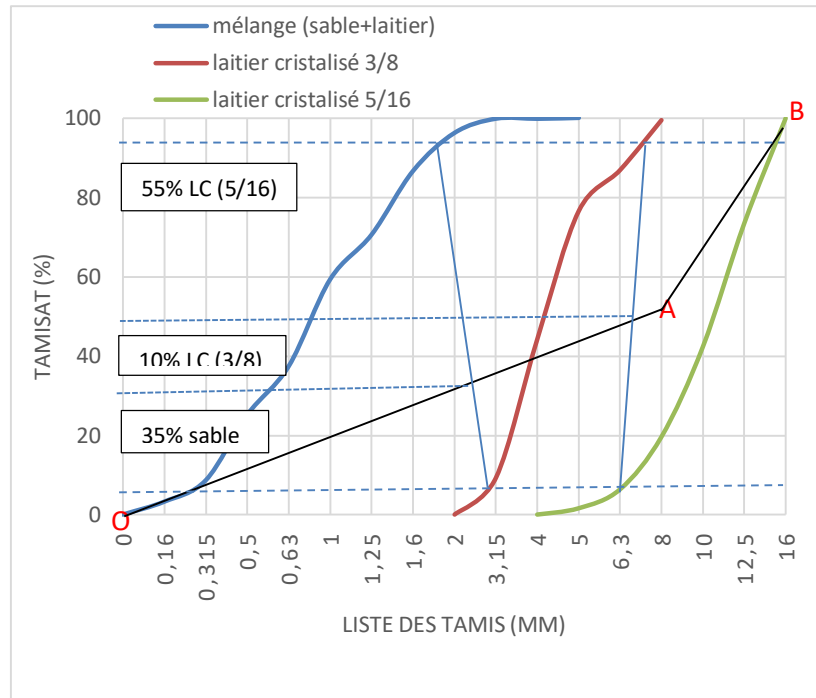
Sable = 35%

G 3/8 = 10%

G5/16 = 55%

Courbe 2

OAB : O(0,0)            A(8,46)            B(16,100)



**Figure III.2 : méthode graphique de composition des granulats (composition N°2)**

Données :

- Un rapport  $L_{\text{éq}}/E = 2$

Objectifs : Garantir les critères d'autoplaçance :

- Un étalement qui s'inscrit dans la plage normalisée ( $SF = 550$  à  $750$ ) mm
- Une stabilité suffisante ( $SR < 15\%$ )
- Un taux de remplissage ( $PL < 0,8$ )

-Une résistance mécanique au moins égale à celle d'un béton ordinaire

-Une durabilité égale ou supérieure à celle d'un béton ordinaire

La norme NF EN 206-1 définit les modalités de prise en compte des additions :

$$L_{\text{équivalent}} = C + K * A \dots \dots \dots (III_6)$$

Avec :

- $L_{\text{eq}}$ : Liant équivalent ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- C: Quantité de ciment ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- A: Quantité d'addition ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), K: Coefficient de prise en compte de l'addition (voir abaques et tableaux méthode C.E.S Dreux-gorisse)

Optimisation du dosage en superplastifiant

L'un des critères qui qualifie un béton autoplaçant est son étalement, qui doit être compris entre 55 et 75 cm selon la norme EN 206-9. A cet effet les dosages du superplastifiant et des

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

additions doivent être ajustés jusqu'à l'obtention d'un BAP dans les critères de qualifications sont vérifiés

Une série d'essai a été conduite afin d'optimiser le dosage du superplastifiant et de l'addition en relation avec l'étalement, dont l'essentiel des résultats est donné au tableau

Pour notre cas :

$K=0.9$  pour laitiers granulé

$Leq = C + KA$

$C = 400$

$A = 60\% \text{ de } C = 240 \rightarrow Leq = 400 + 0.9 \cdot 240 = 616$



$E/C = 0.5 \rightarrow E/Leq = 0.5$

$E = Leq \cdot 0.5 = 616 \cdot 0.5 = 30.8 \text{ l/m}^3$

**Tableau III.5 : formulation de BAP d'étude (composition N°1)**

	1m <sup>3</sup>	10l
C	400	4
E	238	2.38
C/E	2	2
Sable	235	2.35
Laitier granulé	341	3.41
G <sub>3/8</sub>	226	2.26
G <sub>5/16</sub>	829	8.29
SP %	1%	1%
SP	4	0.04
Addition %	45%	45%
Addition	180	1.8

**Tableau III.6 : pourcentages de SP et addition de laitier granulé**

	%	Pour 1m <sup>3</sup>	Pour 10l	Commentaire	photos
Addition	25	100	1	Ségrégation	 D= 55cm
SP	0.8	3.2	0.032		
Addition	35	140	1.4	Ségrégation	Débordement du béton sur la planche
SP	1	4	0.04		
Addition	45	180	1.8	Un bon étalement	 D=65cm
SP	1	4	0.04		

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

**On voulait faire une comparaison de notre étude au travail d'une thèse de Master promo 2012 menée sur la substitution des granulats naturels par les granulats de laitier cristallisé dans les bétons autoplaçants, le travail a donnée :**

**Tableau III. 7 : résultats de comparaison**

Composants	Unité	BO	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4
Ciment	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	400	400	400	400	400
Sable	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	661	661	661	661	661
Gravillon	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	254	254	254	254	254
Gravier	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	867	867	867	867	867
G/S	-	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Addition LG	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	-	140	180	220	-
Addition LG	<b>%de ciment</b>	-	35	45	55	-
Addition FC	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	-	-	-	-	220
Addition FC	<b>% de ciment</b>	-	-	-	-	55
E/C	-	0.5	-	-	-	-
E/ C+A	-	-	0.37	0.34	0.32	0.32
E	<b>l/m<sup>3</sup></b>	200	242	254	266	227.5
Sp	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	-	8	8	8	8
Sp	<b>% de ciment</b>	-	2	2	2	2
V <sub>de la pâte</sub>	<b>L/m<sup>3</sup></b>	332	428	454	480	450.69
Mv	<b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	2388	2406	2395	2310	2300

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

Les essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Etalement (cone dd'abrams) (mm)	760	710	670	660
La capacité de remplissage (la boîte en L) (mm)	1100	1000	860	960
La résistance à la ségrégation (stabilité au tamis) (%)	5	7.81	15.93	17.82

### III.3.2. Explication des bétons formulés :

Le béton ordinaire (BO) a été formulé pour le mettre comme un BAP sans addition ou on a travaillé en premier lieu avec des granulats de laitier cristallisé sec, ce qui a donné un très faible affaissement au cône (2cm) c'est un béton très ferme, après et avec la technique de prémouillage on a utilisé des granulats saturés à surface sèche qui ont donné un béton plastique de (8cm) d'affaissement (figure 2).



AC=2cm.



AC=8cm.

**Figure III. 3 : Différence entre l'affaissement au cône des BO a) avec des granulats de laitier cristallisé sec ; b) avec des granulats de laitier cristallisé prémouillé.**

Pour les bétons auto-plaçants on remarque dans la formulation de référence tableau 5 (BAP avec granulats naturels) le dosage optimum est de 35% LG, et pour cela une première approche était de contrôler ce dosage en substituant les granulats naturels par ceux de laitier cristallisé.

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

Les BAP avec granulats de laitier cristallisé non saturées ont donnés un étalement de 50cm (figure a-25) ce qui est insuffisant. Dans le but d'augmenter l'étalement nous avons procédé à un prémouillage aux granulats 24h au minimum avant leur utilisation.

**Tableau III. 5 : Classes de résistance à la ségrégation - Essai de stabilité au tamis. [46]**

Classe	Pourcentage de la laitance (%)
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

Il est apparu que ce dosage était valable pour les granulats naturels mais ce n'est pas le cas pour les granulats de laitier cristallisé pour deux raisons :

- Apparition du phénomène de ressuage à cause probablement du prémouillage de laitier cristallisé (figure b-3) BAP1 ;
- Granulats mal enrobés, signe de manque de mortier



**(a)Etalement de 50 cm.**



**(b) Etalement de 76 cm avec un signe de ségrégation.**

**Figure III. 4 : Différence entre l'étalement des BAP1 a)avec des granulats de laitier cristallisé sec ; b) avec granulats de laitier cristallisé prémouillé.**

## CHAPITRE III : FORMULATION DES BETON AUTOPLAÇANT

---

donne les bons résultats dans tous les essais de contrôle c'est pour cette raison qu'on a augmenté encore une fois le dosage de LG de 10% pour corriger la pâte et assurer un volume convenable de mortier.

Le dosage 55% de LG a donné un béton autoplaçant (BAP3) avec des caractéristiques qui s'inscrivent dans les limites des valeurs préconisées par les normes (figure 21).

Dans le but d'homogénéiser cette étude on a repris un béton autoplaçant (BAP4) en changeant le type d'addition au 55% FC (le même dosage que BAP3 avec LG).

### III.4. CONCLUSION

Tous les matériaux utilisés dans notre étude présentent une bonne qualité sauf en ce qui concerne le laitier cristallisé, à cause de sa nature de formation il contient une certaine porosité. Cette dernière nous pose un problème d'ouvrabilité dans les bétons à état frais. La solution de ce problème c'est de faire le prémouillage des granulats 24 heures au minimum avant leur utilisation.

Lorsque le BAP1 avec 35% de filler de laitier et le BAP2 avec 45% de filler nous montrent dans les principaux essais qui permettent la caractérisation et le contrôle rhéologique des BAP qu'il y a toujours un problème au niveau de la pâte et une présence de ségrégation très importante, on a effectué une correction de la laitance en rajoutant encore un pourcentage des fines et on a trouvé que 55 % de filler nous donne une bonne formulation de BAP à base de granulats de laitier cristallisé c'est le dosage optimum.

La substitution des granulats naturels par les granulats de laitiers cristallisés dans les bétons autoplaçants peut donner lieu à une comparaison entre ( l'étalement et la viscosité ; le taux de remplissage et le pourcentage de la laitance ) des BAP à base de granulats naturels et les BAP à base de granulats de laitier cristallisé, c'est-à-dire leur comportement à l'état frais et aussi bien à l'état durci tel que la résistance à la compression et l'arrangement des granulats ce qui est bien détaillé dans le chapitre III avec les résultats trouvés.

## ***CHAPITRE IV***

---

# ***PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS***

---



## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

### IV. 1 INTRODUCTION

Pour dépasser le problème survenu lors de la reformulation des bétons autoplaçants en substituant les granulats naturels par ceux de laitier cristallisé, on a fait beaucoup de mélange bien testé et élaboré suivant des critères de base et des méthodes empiriques, de sorte qu'on a corrigé la pâte des bétons par l'ajout des fines ainsi que l'état des granulats par le fait de les pré mouiller; et dans les deux cas on a eu des résultats et des mesures qui sont clairement expliqués et précisés par les courbes et les graphes de ce chapitre.

### IV.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR BÉTON A L'ÉTAT FRAIS

#### IV 2.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Les résultats obtenus par l'expérimentation qui concerne l'affaissement du béton témoin (BO) avec les granulats de laitier cristallisé concassé et non saturé, ont montré un faible affaissement de 2cm qui correspond à un béton très ferme, alors que le béton réalisé avec les mêmes granulats mais après les avoir trempés, a donné un béton plastique avec un affaissement de 8cm (figure. IV.1).

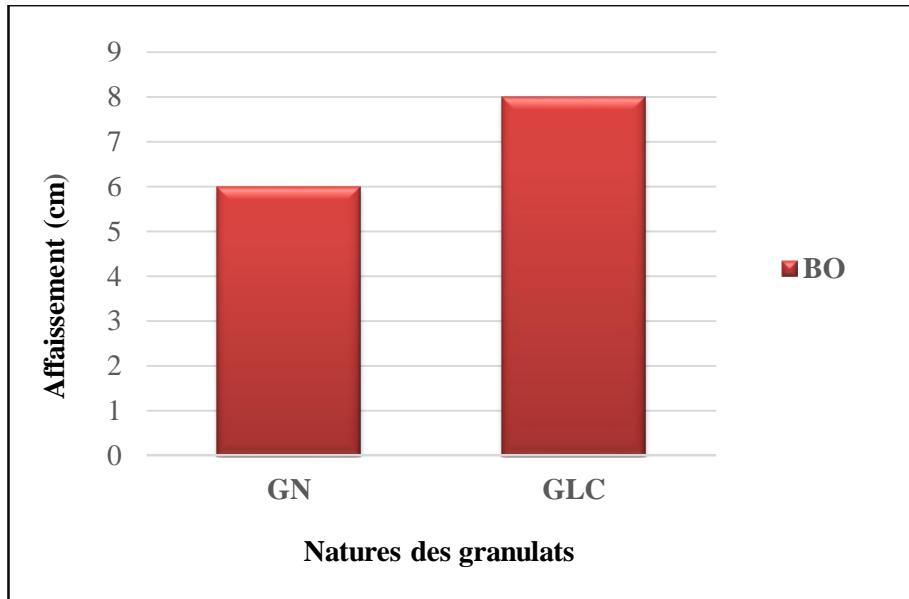


*Figure IV.1 : Affaissement du BO avec granulats de LC à l'état sec ou prémouillé.[48]*

Ce faible affaissement est dû à la structure de laitier concassé utilisé dans cette étude et son coefficient d'absorption d'eau de gachage très élevé (13.67 %).

En revanche, l'étude comparative entre un affaissement d'un béton à base des granulats naturels (GN) et un autre avec granulats de laitier cristallisé (GLC) qui nous donne un affaissement supérieur à ceux du premier. Cette différence est proportionnelle à la quantité d'eau piégée dans les pores des granulats à cause de leur prémouillage (figure IV.2).

**CHAPITRE IV**  
**PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS**



*Figure IV.2. : Affaissement du BO en fonction de la nature des granulats. [48]*

**IV 2.2 Essai d'étalement au cône d'Abrams**

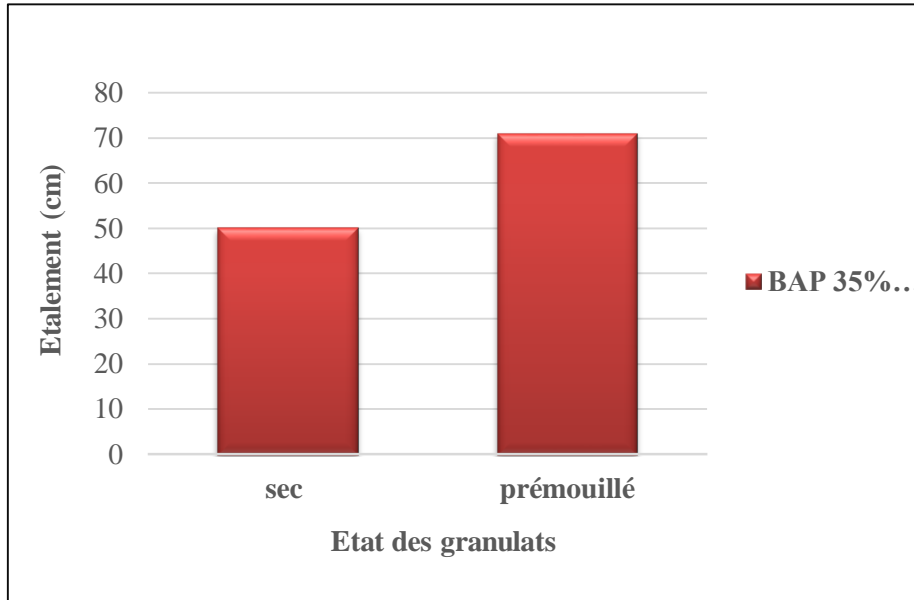
*Tableau IV.1 : Résultats des essais sur béton autoplaçant frais à base de laitier cristallisé. [48]*

Essais	Shump flow	Stabilité au tamis	Lbox
Unités	mm	%	mm
LG35	760	5	1100
LG45	710	7.81	1000
LG55	670	15.93	860
FC55	660	17.82	960

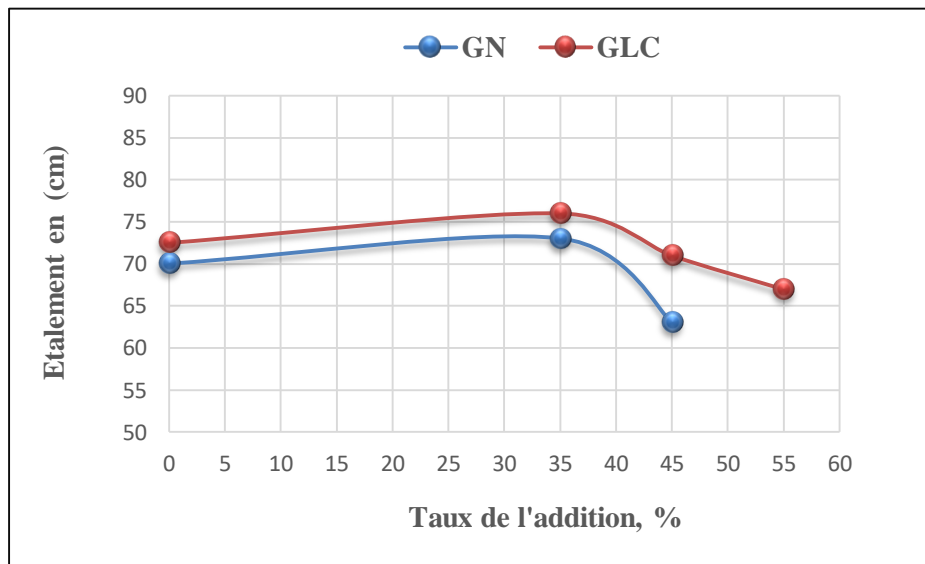
Lors de l'étude des BAP à base de granulats naturels , le dosage 35% LG est pris comme un dosage optimum et pour contrôler ce dosage dans notre étude basée sur la substitution des granulats naturels par le laitier cristallisé concassé on a refait l'essai d'un BAP avec des granulats non saturés pour obtenir un bon étalement. Malgré qu'on a ajouté le superplastifiant, le problème se pose toujours car on a eu un faible étalement de 50cm (figure IV.3).

C'est pour cette raison qu'on est obligé, dans tout type de béton de faire saturer les granulats de laitier cristallisé en eau avant de les utiliser pour éviter les problèmes de l'ouvrabilité.

## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS



*Figure IV.3: Etalement du BAP (35% LG) avec granulats de LC à l'état sec ou prémouillé. [48]*



*Figure IV.4 : Influence du dosage en addition sur l'écoulement (Slump flow). [48]*

L'étalement des bétons autoplaçants peut varier entre 55 et 85 cm selon les classes d'étalement. La figure IV.4 montre que les résultats d'étalement de nos BAP à base des deux natures des granulats (GN, GLC) ont eu des valeurs situées à l'intérieur du domaine des BAP mentionné au début du paragraphe.

## CHAPITRE IV

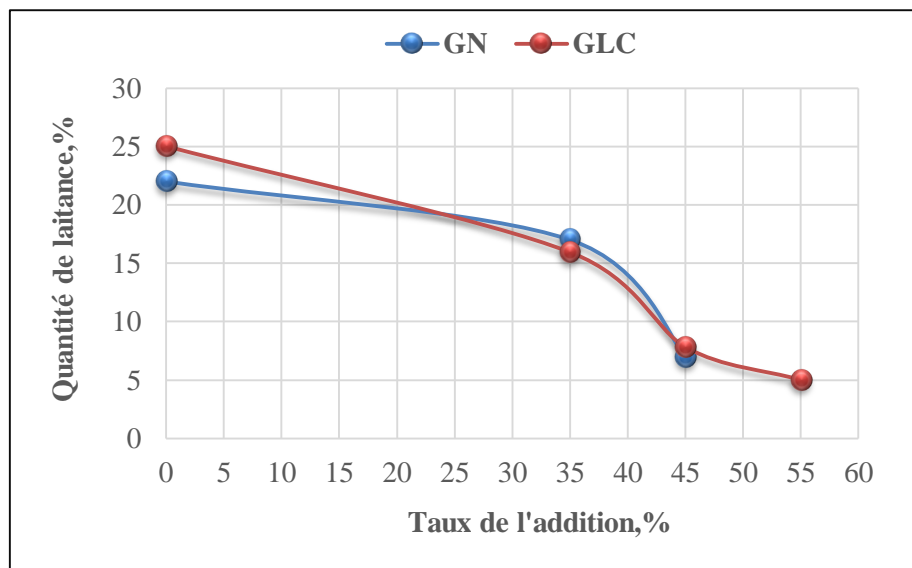
### PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

Lorsqu'on augmente les proportions en filler de 0 à 35% on obtient des augmentations au niveau des étalements de 70 à 73 cm pour les BAP à base des granulats naturels. Avec les mêmes proportions les BAP à base des granulats de laitier cristallisé atteignent 72,5 et 76 cm d'étalements. Les BAP avec 0% d'addition ont un faible volume de pâte par rapport au BAP avec 35% LC c'est pour cette raison on marque l'augmentation au niveau des étalements, ainsi qu'il faut savoir que ces étalements ont été accompagnés par un ressuage très important c'est pour cela on a augmenté le dosage en fine jusqu'à 45%, ou on a eu un étalement de 63cm pour les BAP à base des GN et 71cm pour les BAP à base des GLC, c'est une diminution due à la propriété de la demande en eau des fillers de laitier.

Malheureusement, l'étalement dans les BAP des granulats LC n'était pas encore corrigé et on a eu toujours un ressuage provoqué par le prémouillage des granulats, par ailleurs, si on rajoute 10% des LG on assure un bon étalement de 67cm sans aucun risque de ségrégation et de ressuage c'est le dosage optimum (55%).

#### IV 2.3. Essai de stabilité au tamis

La figure IV.5 désigne l'effet de laitier granulé comme addition sur la stabilité à la ségrégation statique des BAP avec les deux natures des granulats (GN et GLC).



**Figure IV .5 : Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis[48].**

Pour 0% d'addition les BAP présentent un risque de ségrégation ( $P > 20\%$ ) dont ils ont entraîné une mauvaise formulation.

Pour les autres dosages 35 et 45 %, le BAP à base des granulats naturels est homogène et stable. Les valeurs respectivement enregistrées sur l'essai de stabilité au tamis sont de 17 et 7 %. Ce sont des valeurs inscrites dans le domaine des BAP.

Concernant le BAP à base des granulats de laitier cristallisé et pour 35% de LG on relève un pourcentage de laitance égal à 15.93 % et il diminue lorsqu'on augmente le dosage en addition jusqu'à 5% pour un dosage de 55% LG, où on remarque que le mortier devient un peu visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

IV 2.4.Essai à la boîte en L

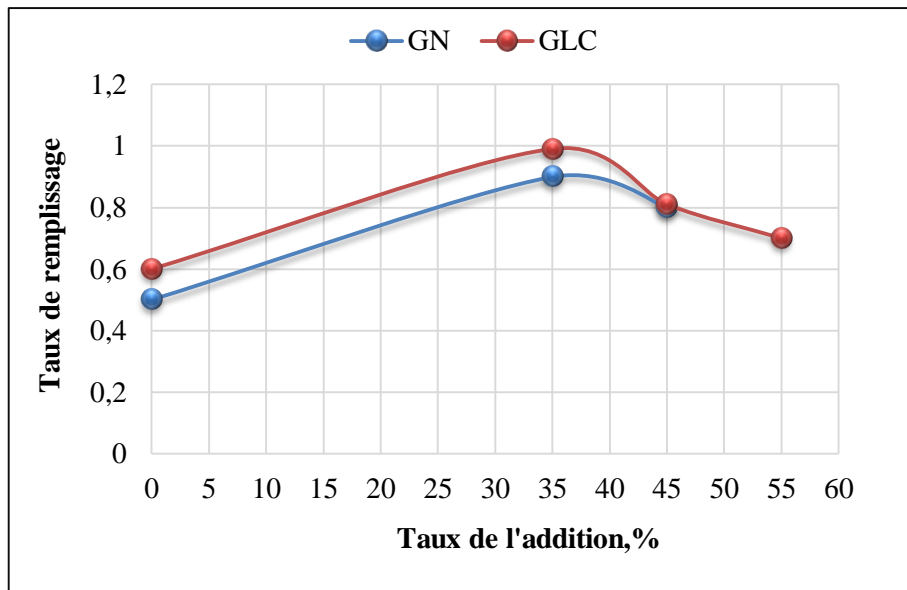


Figure IV .6 : Influence de dosage en addition sur l'écoulement (L-box) des BAP. [48]

Puisqu'on a remarqué un faible étalement dans le cas de 0 % d'addition dans le milieu non confiné, on marque aussi un blocage des granulats du béton au niveau des barres en acier du dispositif expérimental dont le taux de remplissage a été très faible  $H_2/H_1=0,5$  pour le BAP à base des GN et 0,6 pour les BAP à base des GLC (figure IV.6).

Pour le dosage de 35 et 45% les BAP à base de granulats naturels admettent des valeurs correctes à la boîte en L (0,9) supérieures à celles édictées par la norme FN EN 206 (0,8). On remarque le même comportement du BAP à base de granulats de laitier cristallisé avec les deux dosages 35 et 45% de LG par contre l'augmentation du dosage en filler de laitier jusqu'au 55% a tendance à diminuer la mobilité du béton ou on a noté un rapport  $H_2/H_1=0,7$ .

### IV.3. RESULTATS ET DISCUSSION SUR BÉTON DURCI

#### IV.3.1. Vérification de l'absence de ségrégation

La vérification de l'absence de ségrégation sur béton frais est utile et nécessaire. Elle constitue une garantie de la bonne qualité du BAP.

A cet effet, nous avons préparé des éprouvettes en béton durci scié en deux et on a observé les sections suivant le sens du coulage, pour se renseigner sur la répartition des granulats dans la matrice colloïdale et donc sur la ségrégation. Les figures qui suivent, présentent quelques photographies des sections sciées des différents bétons formés à base des granulats de laitier cristallisé.

## CHAPITRE IV

### PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

---

#### IV.3.1.1. Béton sans addition (BO)

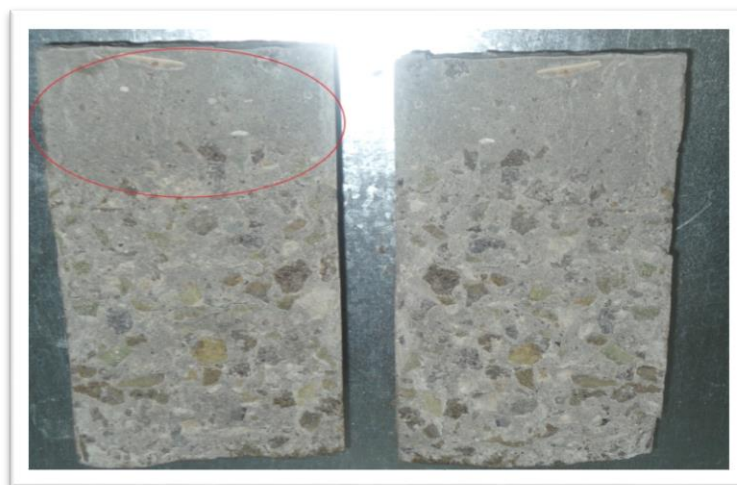
L'observation de la répartition granulaire du béton témoin BO, nous montre une distribution homogène du squelette granulaire. Les gros granulats sont bien répartis dans tout le volume de l'éprouvette, ou on ne relève aucun signe de ségrégation (figure IV.7).



*Figure IV.7 : Observation de la répartition des granulats du BO 0 %.[48]*

#### IV.3.1.2. Béton avec 45 % d'addition (BAP2)

Contrairement au béton témoin, le béton autoplaçant avec 45% de filler de laitier granulé ne répond qu'à certains critères recommandés par l'AFGC, et on a remarqué un signe de ségrégation très clair comme le confirme la figure IV.8 ; c'est la couche de mortier observée dans la partie supérieure de l'éprouvette.



*Figure IV.8 : Confirmation de la présence de ségrégation de (BAP2) 45 % LG. [48]*

## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

---

### IV.3.1.3. Béton avec 55 % d'addition (BAP3)

Le BAP3 avec le dosage optimum en addition où tous les critères (étalement, stabilité au tamis et L-Box) recommandés par l'AFGC ont été respectés, présente une très bonne répartition granulaire, alors que si on compare entre sa répartition granulaire avec celle du BO on remarque que les BAP ont un volume en pâte plus élevé par rapport aux bétons vibrés (figure IV.9).



*Figure IV.9 : Observation de la répartition du squelette granulaire du (BAP3)55% LG[48]*

### IV.3.2. Résistance en compression

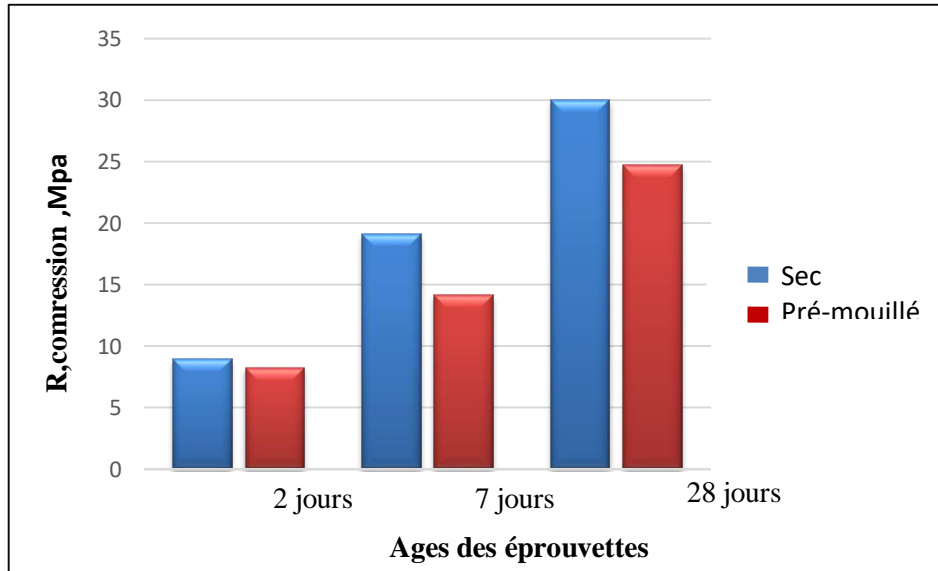
*Tableau IV.2 : Essai de compression. [48]*

	2 jours	7 jours	28 jours
<b>Unités</b>	<b>Mpa</b>		
<b>BO 0% GLC sec</b>	9	19.13	30
<b>BO 0% GLC pré</b>	8.25	14.13	24.7
<b>BAP 35% LG</b>	14.25	22.5	35.03
<b>BAP 45% LG</b>	14.5	26.06	37.26
<b>BAP 55% LG</b>	14.82	26.3	38.9
<b>BAP 55% FC</b>	15.87	19.27	31

## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

### IV.3.2.1. Béton sans addition (BO)

Le graphique ci-dessous illustre dans l'ensemble une faible résistance en compression marquée dans le nombre d'éprouvettes en béton vibré à base des granulats de LC sec écrasées après 3 âges de durcissement par rapport aux éprouvettes d'un béton vibré à base des granulats de LC pré mouillés



**Figure IV.10 : Influence du prémouillage des granulats sur la résistance à la compression des bétons ordinaires à base des granulats de laitier cristallisé. [48]**

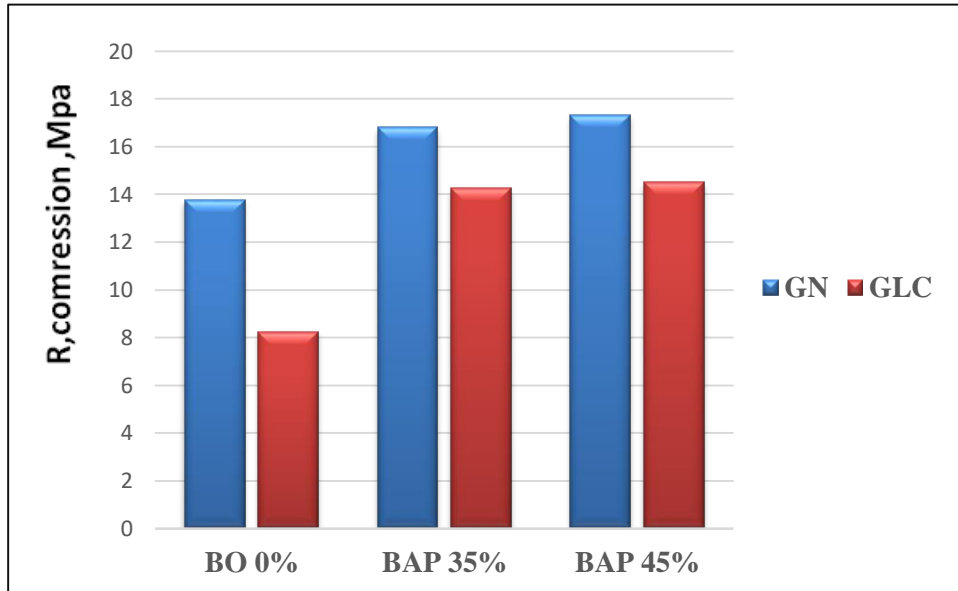
Les résistances à la compression des deux types de béton à 2 jours sont très proches et supérieures à 8Mpa. À 7 jours, l'écart entre les résistances obtenues devient de l'ordre de 8Mpa, où la croissance de la résistance du BO avec les granulats sec devient un peu plus grande pour le BO avec les granulats humides. Cependant, cet écart de résistance commence à augmenter encore plus vite à l'âge normal du béton (28 jours) jusqu'à 30 Mpa (figure IV.10). La différence du comportement mécanique à la compression est due à l'état de saturation des granulats de laitier cristallisé de chaque type de béton et pour bien préciser c'est le réseau poreux développer après séchage dans la matrice cimentaire des béton avec les granulats prémouillé.



## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

### IV.3.2.2. Béton avec addition (BAP)

- **Comparaison entre les résistances en compression des bétons à base des GN et des GLC**



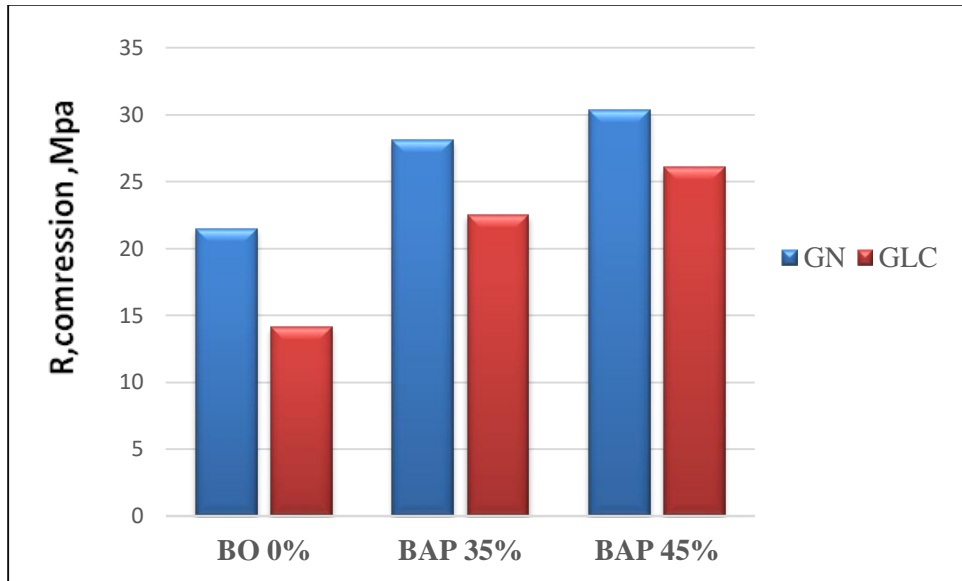
**Figure IV.11 : Évolution de la résistance à la compression des bétons GN et GLC avec 0%, 35% et 45% d'addition à 2 jours. [48]**

Pour un même dosage en eau, on remarque que la résistance à la compression sera plus grande avec les BAP que pour un béton à un dosage nul en addition (0 %). Les figures IV.11 et IV.12 montrent l'évolution de cette résistance au moyen âge. Elle augmente lorsqu'on augmente les proportions des additions minérales de 0 à 45 % LG dans les deux âges de durcissement (2 et 7 jours) jusqu'à 30,36 Mpa pour les BAP à GN et 28,10 Mpa pour les BAP à GLC.

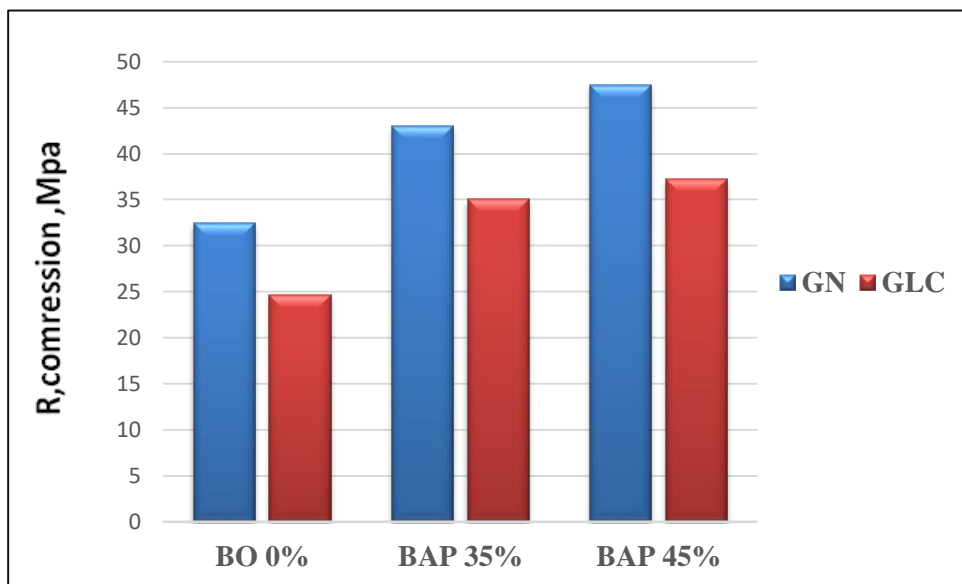
L'effet de remplissage (effet filler, et d'autres effets) du laitier granulé a entraîné l'augmentation de la résistance. Il satisfait à la fois aux exigences de la résistance et de la maniabilité.

Globalement et si on veut comparer entre la résistance de tous les BAP avec les deux natures des granulats (GN et GLC) on déduit que les BAP à base des granulats de laitier cristallisé prémouillé ont une performance mécanique inférieure à celle d'un BAP à base des granulats naturels. Toute cette faiblesse se traduit par le fait de prémouillage des granulats, de sorte qu'ils absorbent de l'eau jusqu'à la saturation c'est pour cette raison qu'on remarque un excès d'eau qui fait à son tour perdre la résistance mécanique du béton à base des granulats de laitier cristallisé.

## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS



*Figure IV.12 : Évolution de la résistance à la compression des betons GN et GLC avec 0%, 35% et 45% d'addition à 7 jours[48].*

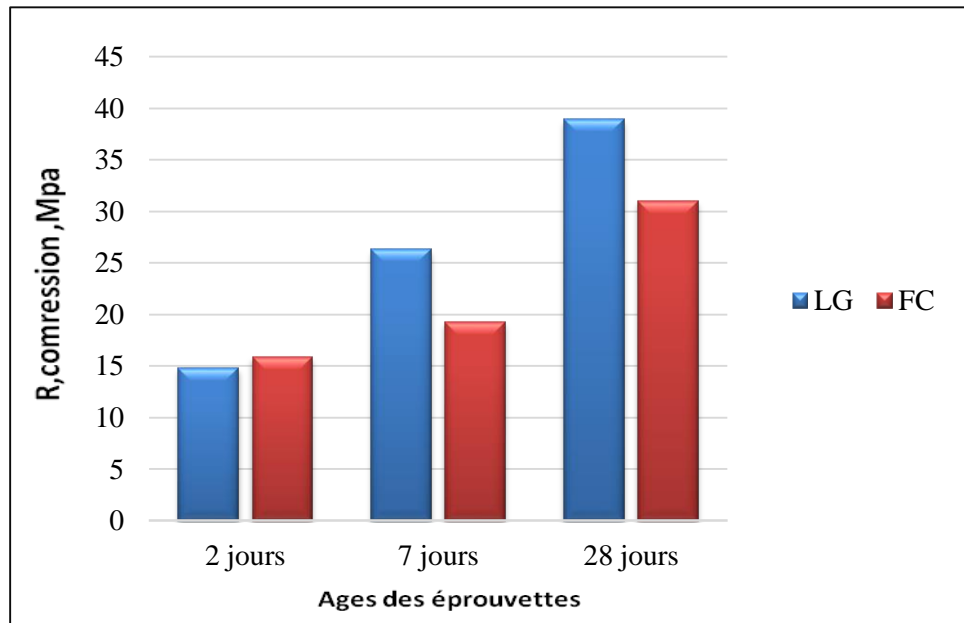


*Figure IV.13: Évolution de la résistance à la compression des betons GN et GLC avec 0 %, 35 % et 45 % d'addition à 28 jours. [48]*

En revanche, la figure IV.13 montre le comportement des BAP avec les deux types des granulats dans l'âge normal du béton. On remarque que malgré la perte en résistance des bétons avec les granulats LC, les résultats de la résistance après 28 jours de durcissement montrent des valeurs qui ont dépassé la résistance visée ( $\sigma'_{28} = 23$  Mpa) pour tous les dosages proposés où elle se développe jusqu'à 37,26 Mpa pour 45% de LG.

## CHAPITRE IV PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

- **Influence du type d'addition sur la résistance à la compression des BAP à 55 % filler**



**Figure IV.14 : Influence du type d'addition sur la résistance à la compression des BAP à base des granulats de laitier cristallisé. [48]**

Lorsqu'on a trouvé que le dosage optimum en addition dans les BAP à base des granulats de laitier cristallisé est de 55 % LG on a voulu homogénéiser notre travail par l'utilisation du même dosage en changeant le type d'addition au filler calcaire ce qui a entraîné la réussite des BAP et le bon contrôle de tous les critères du béton à l'état frais et durci.

La figure IV.14 nous aide à faire une comparaison entre l'évolution de la résistance mécanique des deux bétons avec 55% FC et LG à différents âges de béton.

En effet, la première remarque qu'on peut relever c'est qu'à 2 jours de durcissement les BAP avec 55% FC ont eu une meilleure résistance par rapport au BAP avec 55 % LG, mais au-delà de la première semaine, on remarque une reprise dans la résistance à la compression des BAP avec 55% LG et une grande augmentation de la résistance jusqu'à 38,9 Mpa malgré la saturation en eau des granulats de laitier cristallisé.

Tout ce changement est lié au caractère *pouzzolanique des fillers de laitier granulé*.

### CONCLUSION

- Le prémouillage des granulats de laitier cristallisé intervient positivement sur la rhéologie des bétons autoplaçants mais il réduit leurs résistances mécaniques.
- Les granulats de laitier cristallisé nécessitent un plus grand volume de pâte à cause de leur porosité et leur texture rugueuse.

## CHAPITRE IV

### PRÉSENTATION ET DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

---

- Malgré la résistance des BAP avec granulats naturels qui est un peu plus grande que celle des granulats artificiels qui ont une résistance qui dépasse la résistance cible.
- La résistance à la compression des BAP à base des granulats de laitier cristallisé sera très améliorée avec 55 % de LG.

---

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

### CONCLUSION GÉNÉRALE

La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) pose de nombreux aléas en termes d'écoulement, de stabilité et de pouvoir de remplissage. Ces paramètres de formulation dépendent non seulement des méthodes de formulation, mais aussi de nature des matériaux.

De façon classique les BAP sont formulés le plus souvent avec des granulats naturels pour des raisons de disponibilité, d'économie et de qualité. Or il se trouve justement que les granulats naturels qui ne sont pas disponibles localement à cause de pineraie ou de qualité.

C'est dans ce contexte que notre travail s'inscrit notamment par l'emploi des granulats de laitier cristallisé en remplacement des granulats naturels dans les BAP.

En effet le laitier cristallisé est un sous-produit de l'élaboration de la fonte, peu valorisé, utilisé principalement comme remblai. Son emploi comme granulats dans le BAP peut être viable économiquement et écologiquement.

Sur le plan technique les granulats de laitier cristallisé se caractérisent par une morphologie rugueuse et une porosité ouverte.

La formulation des BAP est basée sur les critères recommandés par l'AFGC, en adaptant la méthode graphique de DREUX pour les dosages des granulats.

Les résultats de l'étude expérimentale qui nous ont permis de réaliser des BAP avec des granulats artificiels ont montré que les granulats de laitier cristallisé peuvent remplacer les gravillons et les graviers naturels dans les bétons autoplaçants, nécessitant cependant un remouillage et une plus grande quantité de pâte pour garantir le caractère autoplaçant du béton.

Dans une deuxième étape, le filler calcaire a été remplacé par le laitier granulé comme addition fine dans les BAP composés de granulats de laitier cristallisé. Les essais ont montré la nécessité d'augmenter le volume de pâte, en majorant le dosage de laitier granulé jusqu'à 55 %, en conservant les dosages en eau et en superplastifiant constants.

Si l'emploi des granulats de laitier cristallisé est intéressant sur plusieurs plans, il serait primordial de valider ces résultats par des études de durabilité vis-à-vis de certains milieux naturellement ou artificiellement agressifs.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

---

### REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M'HAMED I.M, BEN BRAHIM.O, «Durabilité du Béton Autoplaçant à base de sable de dune finement broyé vis-à-vis des attaques chimiques ». Mémoire de Master ACADEMIQUE. Université De Ziane Achour de Djelfa , 2016.
- [2] TURCRY.P,«Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation».Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.Février 2004.
- [3] SEDRAN.T, «Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants».Thèse de Doctorat. L'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, p 220,1999.
- [4] KHAYAT.K.H, «Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete», ACI Materials Journal, May, vol. 96, n° 3, p. 346-353, 1999.
- [5] *Okamura, 2003.*
- [6] Khélifa R., Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.
- [7] Projet national de recherche 1 développement sablocrete « Béton de sable - caractéristique et pratiques d'utilisation » presses de l'école nationale des ponts et chaussées novembre 1994.
- [8][http://ofrir.lcpc.fr/article\\_produit/19/4/752/produit\\_joined\\_file/fiche\\_LHF\\_critallise.PDF](http://ofrir.lcpc.fr/article_produit/19/4/752/produit_joined_file/fiche_LHF_critallise.PDF)
- [9] ALEXANDRE.J, SEDILEAU.J.L, livre (le laitier de haut fourneau élaboration, traitement, propriétés emplois).
- [10] DREUX G. et FESTA J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [11] Journée d'Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d'utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [12] CHOPIN D., Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants – Optimisation du temps de fabrication , Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juin 2003.
- [13] BUL M, OLLIVIER J-P (1993), conception des bétons: structure poreuse, dans la durabilité des bétons. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, p 106.
- [14] M. NEHDI, Pourquoi certaines charges de carbonate de provoquer une augmentation rapide de la viscosité dans dispersés à base de ciment, des matériaux Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669, juin 2000.
- [15] MENAI KHALED, Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre, 1995.
- [16] GHAZEL A. Modelisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation, Mémoire de maitrise en génie civil, Université de Sherbrooke, pp 88-889, pp 155-156, 1999.
- [17] PARC. NOH, propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires contenant des additifs minéraux, Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp 842-849.
- [18] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre, 2006.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [19] NASRI.S, «Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d'un béton autoplaçant(BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable) ». Mémoire de magister. Université de Mohamed Boudiaf-M'sila , 2016.
- [20] HASNI , «Béton Autoplaçant»,rapport de recherche N°98-004/98-006,fédération française du bâtiment 1999
- [21] BENADDAD .S, BENATSOU. N, «Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master.
- [22] JIN, "Properties of mortar for self compacting concrete", thèse de 93 l'Université de Londres, 2002.
- [23] LOUKILI.A, "effect of a viscosity agent on mechanical proprietes of self-compacting concrete ", in proceeding of conference ICPCM a new era of building, 18-20 February 2003.
- [24] CHANVILLARD G, "Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées", ancrées dans une matrice cimentaire. Etude et recherches des LPC, séries ouvrage d'art, OA12, 1993.
- [25] HAIFI M.R,2011. Formulation des béton autoplaçant, thèse de magistère de l'université Mentouri Constantine,2011,101p.
- [26] BOUCETTA TAHAR-ALI thèse doctorat en génie civil « contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés découlement et de durabilité des bétons autoplaçant et de hautes performances » 2014.
- [27] TURCRY.P,«Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation».Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.Février 2004.
- [28] AFGC document scientifiques et techniques, juillet 2000.
- [29] LEGRAND.C, « La structure des suspensions de ciment». Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.
- [30] NF EN 206-1, AFNOR. Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Indice de classement, p18-455,2003.
- [31] AFGC document scientifiques et techniques, juillet 2000.
- [30] NF EN 206-1, AFNOR. Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Indice de classement, p18-455,2003.
- [32] HOLCIM «Le béton autocompactant». Recommandation étudiée par la société Holcim.Suisse. 26 Novembre 2004.
- [33] EFNARC, specification and guidelines for self-compacting concrete, février 2002, P32.
- [34] FERRARIS, Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete : State of the Art Report, Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 1999, vol 104, n°5, pp461-478.
- [35] KHAYAT.K.H, «Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete», ACI Materials Journal, May, vol. 96, n° 3, p. 346-353, 1999.
- [36] *Laboratoire de Polytech" Orléans.*
- [37] BENKECHKACHE GHFRANE etude de comportement différé des bétons autoplaçant influence des paramètres de composition et de chargement thèse de magister novembre 2007 université mentouri Constantine 1998.2008.



## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [38] OZAWA.K « role des matériaux en poudre sur la capacité de remplissage du béton frais », actes du premier colloque international de cendres volantes, fumées de silice pouzzolanes, les laitiers et naturel dans le béton, Istanbul, La Turquie 1992.
- [39] ASSIE. S, « Durabilité des bétons autoplaçants ».Thèse de doctorat. Institut national des Sciences Appliqués de Toulouse, le 29 Octobre 2004.
- [40] GIBBS.J « strength of hardend self compacting concrete » proceedings of the first international RILEM symposium on self compacting concrete, stockholm, suède, pp.199-209, 1999.
- [41] PERA.J « influence of finely ground limestone on cement hydration » cement and concrete composite, 21, 2, pp.99 105,1999.
- [42] : El Barrak. M, 2005, contribution a l'etude de l'aptitude a l'ecoulement des betons autoplaçants a l'etat frais Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil Université Toulouse III - Paul Sabatier LMDC, INSA/UPS, 228p
- [43] : Okamura H and Masahiro O., 2003. Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1,5-15
- [44] : Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F. 1999. Toward mix design for rheology of self compacting concrete", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 361-37
- [45] : Diederich, 10)
- [46] : Kara Ali R.,2002. Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise,
- [47] : Boudchicha A., 2007. Utilisation des additions minerales et des adjuvants Fluidifiants pour l'amelioration des proprietes Rheologiques et mecaniques des betons. Thèse de doctorat de l'Universite Mentouri, 294p
- [48] : Boudour Zahra ; mémoire master promo 2012.



## SUPERIOR 126

SUPERPLASTIFIANT POUR BÉTON - HAUT RÉDUCTEUR D'EAU - MAINTIEN RHÉOLOGIQUE - AVEC EFFET RETARD



### DESCRIPTION

**SUPERIOR 126** est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits.

Il est compatible avec tous les types de ciment.

Par son action dispersante et la bonne synergie de ses composants, il confère au béton un maintien prolongé de l'ouvrabilité avec des bonnes caractéristiques de compacité et de résistances mécaniques.

### PROPRIETES CHIMIQUES ET PHYSIQUES

Etat physique : .....Liquide  
 Couleur : .....Brun  
 Densité (g/cm<sup>3</sup>, à 20 °C) : .....1,13 (± 0,03)  
 PH (20 °C) : .....5,5 (± 1)  
 Extrait sec : .....38 % (± 2 %)  
 Teneur en chlorures : .....≤ 0,1 %

### CARACTERISTIQUES

Le **SUPERIOR 126** est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton à faible rapport E/C, à très long maintien d'ouvrabilité. Il présente une excellente imperméabilité aux bétons.

Le **SUPERIOR 126** a été formulé pour un long maintien de l'ouvrabilité avec des résistances élevées à la compression et flexion à 28 jours. Il diminue le retrait hygrométrique, avec des parements parfaits et une meilleure durabilité.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons transportés sur de longues distances.
- Bétons de fondations (parois moulés, pieux...).
- Bétons pompés.
- Bétons de Génie- Civil (ouvrages d'art, tunnels).
- Béton prêt à l'emploi.

### DOSAGE

- Le dosage de **SUPERIOR 126** varie entre 0,6 à 2 % du poids du ciment soit de 0.6 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.

- Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton. Des essais d'optimisation sur site sont conseillés.

- **SUPERIOR 126** présente un léger effet retardateur, quand le dosage est supérieur à 1,2 %.

### MODE D'EMPLOI

- L'addition du **SUPERIOR 126** ne doit jamais se faire sur un béton sec avant l'ajout de l'eau (Il serait adsorbé par les agrégats et le sable d'où une inefficacité avec le ciment).

- Il est conseillé d'ajouter le **SUPERIOR 126** après l'ajout des composants du béton et environ 90 % de l'eau de gâchage nécessaire.

- Terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restante (10 %) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. Les dosages sont évalués au poids du ciment.

### CONDITIONNEMENT

- Bidon de 20 Litres.
- Fût de 216 Litres.
- Cubitainer de 1000 Litres.

### VALIDITE

12 mois dans son emballage hermétiquement fermé, stocké entre 5°C et 35°C et à l'abri du soleil.

### PRECAUTION D'EMPLOI

Se référer à la fiche de données de sécurité.

### DOCUMENT DE REFERENCES

PV d'essais établi par le CNERIB.

## ABACQUE 1

**NA.5.2.5.2.1 Généralités**

Le concept de coefficient  $k$  et de liant équivalent autorise la prise en compte des additions de type II et de certaines additions de type I :

- en remplaçant le terme « rapport eau/ciment » par celui de « rapport eau/(ciment +  $k \times$  addition) », l'eau étant par définition l'eau efficace (voir 3.1.30 et NA.3.1.30) ;
- en remplaçant l'exigence relative au dosage minimal en ciment par la même exigence appliquée au liant équivalent.

Le liant équivalent est constitué de ciment de type CEM I 42,5 N ou CEM I 42,5 R ou CEM I 52,5 N ou CEM I 52,5 R et d'une des additions normalisées mentionnées ci-après à l'exclusion d'autres ciments ou d'autres additions.

Pour tenir compte des apports respectifs des constituants vis-à-vis de la durabilité, la quantité de liant équivalent est définie par la formule :

$$\text{Liant équivalent} = C + kA$$

où :

$C$  est la quantité de ciment par mètre cube de béton (en  $\text{kg/m}^3$ ) ;

$A$  est la quantité d'addition par mètre cube de béton prise en compte dans le liant équivalent (en  $\text{kg/m}^3$ ) et dont la valeur maximale est définie par le rapport  $A/(A + C)$  précisée dans le Tableau NA.F.1 pour les différentes classes d'exposition. Si une plus grande quantité d'addition est utilisée, l'excédent ne doit être pris en compte ni pour le calcul du rapport eau/(ciment +  $k \times$  addition), ni pour le dosage minimal en liant équivalent ;

$k$  est le coefficient de prise en compte de l'addition considérée (voir NA.5.2.5.2.2).

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons utilisés en France est établie pour les additions normalisées suivantes pour la substitution partielle du ciment et pour la détermination de la teneur minimale en liant équivalent :

- les cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450, puis à la norme NF EN 450-1 ;
- les fumées de silice, conformes à la norme NF P 18-502, puis à la norme NF EN 13263-1 ;
- les laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau de classe B, conformes à la norme NF P 18-506 ;
- les additions calcaires, conformes à la norme NF P 18-508 ;
- les additions siliceuses de catégorie A conformes à la norme NF P 18-509.



## ABAQUE 2

**NA.5.2.5.2.2** *Concept du coefficient k pour les additions prises en compte*

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons dont le lieu d'utilisation est la France, est établie pour les valeurs suivantes du coefficient k données dans le Tableau NA.3.

**Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient k**

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k	Conditions supplémentaires à remplir
<b>Additions de type II</b>		
Cendres volantes pour béton	0,60	Si $i_{28} \geq 0,83$ et $i_{90} \geq 0,95$
	0,50	Si $i_{28} \geq 0,80$ et $i_{90} \geq 0,90$
	0,40	Si $i_{28} \geq 0,75$ et $i_{90} \geq 0,85$
Fumées de silice	2,00	Si dans les expositions XA $E/C \leq 0,45$ et $C \geq 295 \text{ kg/m}^3$ Si dans les expositions différentes de XA $E/C \leq 0,45$ et $C \geq 290 \text{ kg/m}^3$
	1,00	Dans les autres cas ou sur prescription particulière
Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau, de classe B	0,90	$h_{3/7} \geq 0,70$ $h_{3/28} \geq 0,85$

**Tableau NA.3 — Valeurs du coefficient k (fin)**

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k	Conditions supplémentaires à remplir
<b>Additions de type I</b>		
Additions calcaires	0,25	$i_{90} \geq 0,71$
Additions siliceuses de classe A	0,25	$i_{28} \geq 0,71$
<b>Toutes additions</b>		
Pour les quantités d'additions dépassant les valeurs indiquées au Tableau NA.F.1 ou au Tableau NA.F.2 et pour les autres ciments ou les autres additions que celles mentionnées dans NA.5.2.5.2.1	0,00	

NOTE  $i_{28}$ ,  $i_{90}$ ,  $h_{3/28}$  et  $h_{3/7}$  sont des indices d'activité ou de pouvoir hydraulique déterminés selon les normes d'essais de l'addition considérée.



**ABOQUIS ET TABLEUX**  
**METHODE C.E.S. DRUX-DORRISSE**

**POSSAGE EN COURBULE ET AU**

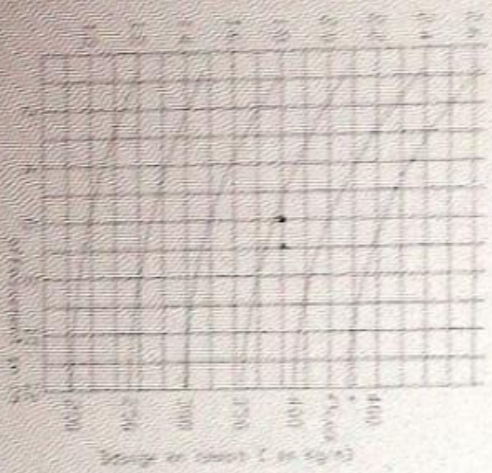
$E = (C_1 + 1) (M_1 + 1)$

$E = (C_1 + 1) (C_2 + 1) (C_3 + 1)$

- AVERT :
- 1.  $E$  : résistance usée à 28 jours
  - 2. distance du ciment au kg/cm<sup>2</sup> de béton
  - 3. distance de l'eau au kg/cm<sup>2</sup> de béton
  - 4. Classe usée du ciment au m<sup>3</sup>
  - 5. coefficients granulés

Valeurs représentatives du coefficient de réduction  $\phi$

Axe	Poutres à deux travées		Sims
	En	Traverse	
Parallèle	0,12	0,10	0,40
Transverse	0,35	0,30	0,30
Suraxe	0,45	0,30	0,30
Perpendic.	0,35	0,30	0,40



Correction sur le dosage en eau

Distance en cm	20	15	10	25	10	5	10	5
Correction en %	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

Graphique indiquant approximativement la distance en centimètres en fonction de  $C_1$  et de l'hydratation théorique

**11. DROITE DE POSITIONNEMENT DES GRANULATS**

**A- EQUATION REGRESSIVE DE REGRESSION**

$Y = a + bX$

Données :  $\sum X = 100$ ,  $\sum Y = 100$

$K_1 = 100$  et  $b = 20$   
 $K_2 = \text{résidu de l'équation } (Y - a - bX) \text{ et } b = 20$   
 $K_3 = 50 - 10 \cdot 20 = -150 = -K_1 + K_2$

Moyenne	Moyenne		Moyenne		Moyenne		Moyenne	
	Proche de la moyenne	Loi	Proche de la moyenne	Loi	Proche de la moyenne	Loi	Proche de la moyenne	Loi
400	5	10	4	8	3	6	2	4
300	10	20	8	16	6	12	4	8
200	15	30	12	24	8	16	5	10
100	20	40	16	32	10	20	6	12
0	25	50	20	40	12	24	7	14
0	30	60	24	48	14	28	8	16
0	35	70	28	56	16	32	9	18
0	40	80	32	64	18	36	10	20
0	45	90	36	72	20	40	11	22
0	50	100	40	80	22	44	12	24

$K_4$  : écartement pour les tables de granulats en deux passages :  $P_1 = 2, 8$   
 $K_5 = 100 - 15 \cdot 2 = 70$  (pas possible en trois passages)

$K_6$  : écartement du dosage ne s'élève pas à cause de la variation sur les passages à savoir :  
 $K_7 = 100$  et  $K_8$  :  $100 - 15 \cdot 2 = 70$  (pas possible en trois passages)

Écartement  $B$  (avec  $P = 1,5070$ )

**B- LIGNE DE PARTAGE**

La ligne de partage sera la ligne d'empilage 95% de la norme granulats du 1000 soit granulats au-dessus de 250 de la courbe granulats du 2000 sans granulats.

**11- DOSSAGE EN MASSE DES GRANULATS**

Coef. de correction  $\gamma$

Constante	Coefficients $\gamma$ en fonction du diamètre $D$ des granulats					
	$D = 5$	$D = 10$	$D = 12,5$	$D = 20$	$D = 31,5$	$D = 50$
Serrage	0,730	0,700	0,705	0,655	0,610	0,570
	0,715	0,700	0,695	0,645	0,600	0,560
Moyenne	0,700	0,685	0,690	0,640	0,595	0,555
	0,685	0,670	0,675	0,625	0,580	0,540
Moyenne normale	0,775	0,760	0,765	0,715	0,670	0,630
	0,760	0,745	0,750	0,700	0,655	0,615
Moyenne faible	0,735	0,720	0,725	0,675	0,630	0,590
	0,720	0,705	0,710	0,660	0,615	0,575
Moyenne normale	0,705	0,690	0,695	0,645	0,600	0,560
	0,690	0,675	0,680	0,630	0,585	0,545
Moyenne normale	0,715	0,700	0,705	0,655	0,610	0,570
	0,700	0,685	0,690	0,640	0,595	0,555

Les valeurs sont corrigées pour les granulats situés sous la courbe de 2500 et au-dessus de 2500.  
 Les valeurs sont corrigées pour les granulats situés sous la courbe de 2500 et au-dessus de 2500.  
 Les valeurs sont corrigées pour les granulats situés sous la courbe de 2500 et au-dessus de 2500.