

**UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR – DJELFA**  
**FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**FILIÈRE GÉNIE CIVIL**  
**REFERENCE : FST/DST/M2/GTM / 03 / 2016**



**PROJET DE FIN D'ÉTUDE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE EN GÉNIE CIVIL**  
**Option : Géotechnique et Matériaux**

**Réalisé par :**

**BOUDANA Elhadi & BEN FETTACHA Mohamed Abdou**

**THÈME :**

**COMPACITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS**  
**AUX DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES**

**Soutenu le : 04/06/2016**

**Devant le jury composé de :**

Président :	<b>SALIM GUETTALA</b>	MCA	Université de Djelfa
Encadreur :	<b>Brahim NÉCIRA</b>	MAA	Université de Djelfa
Examineur :	<b>REBIH ZAITRI</b>	MCB	Université de Djelfa

**Année Universitaire : 2015-2016**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicace

---

*Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux*

## *Spécialement*

*À notre promoteur Monsieur NÉCIRA Brahim*

### *BOUDANA ELHADI :*

*À mes très chers parents ( Dahmen-Noura ).*

*À mes deux familles : La famille BOUDANA.*

*La famille CHÉTOUH .*

*À tous mes amis .Surtout : Khaled , alaoua , Keir-eddine , Lakhder , Aïssa ,  
Attia , Abdallah , Abdelkader, cherif.*

### *BEN FETTACHA MOHAMED ABDOU :*

*À mes très chers parents (TAYEB-ZINEB).*

*À mes deux familles : petite famille : Aïcha , zineb ,noura .*

*Grande famille : La famille BEN FETTACHA .*

*La famille DOUDOU .*

*La famille DJERIDANE .*

*À mes freres : mohamed (1-2) , abdî , aïssa ,kouider ,et les deux mohamed (s)*

*À mes sœurs : tira (1-2) , zhîra ,fatima , et djamila .*

*Et plus spécialement au nom de NADJI Qui m'aide dans tous ma vie .*

# *Remerciements*

---

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le Clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur NÉCIRA Brahim pour les orientations et les conseils qu'il a su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

*Nous voudrions remercier tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.*

*Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de nos profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner le manuscrit.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

# RÉSUMÉ

---

Les bétons autoplaçants sont généralement fabriqués avec des sables alluvionnaires. Les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, l'épuisement des gisements alluvionnaires sont des facteurs qui encouragent à une utilisation plus large du sable de dune ou du sable concassé.

Le présent mémoire examine l'effet de l'incorporation de sable de carrière et le sable de dune, en remplaçant le sable alluvionnaire, sur la compacité de la formulation de BAP. Ces formulations développées doivent avoir un meilleur comportement rhéologique vis-à-vis de l'étalement (fluidité), la capacité de remplissage (déformabilité) et la résistance à la ségrégation (stabilité). Elles doivent aussi posséder de meilleures performances mécaniques.

Les résultats obtenus montrent la possibilité de fabriquer des bétons autoplaçants à hautes performances de la résistance à la compression en 28 jour égal 55MPa en se basant sur les sables concassés de carrières 100%.

## **Mot clés :**

béton autoplaçant – compacité – sable alluvionnaire – sable de carrière – sable de dune – formulation – fluidité – déformabilité – stabilité – résistance à la compression

## ملخص

---

الخرسانة ذاتية القوالبه عموما يتم صنعها برمال الوديان إلا أن لذلك تأثير سيئ على : البيئة من جهة ،ومن جهة ثانية التكاليف المادية المعتبرة إضافة إلى التخوف من انقراض تربة الوديان ،كل هذه العوامل تحث إلى استعمال واسع للرمل الكلسية و لرمل الكثبان .

في مذكرتنا نقوم بدراسة تأثير إدراج الرمال الكلسية و رمال الكثبان لتحل محل رمال الوديان على عامل الاكتناز في تشكيل الخرسانة ذاتية القوالبه ،من اجل إيجاد أفضل الخصائص الريولوجية : انتشار (سيولة ) ، القدرة على الملاء ( التشوه) و مقاومة التعشش (الاستقرار) كما يجب أن يكون الأداء الميكانيكي أفضل .

أثبتت نتائج الدراسات إمكانية تصنيع الخرسانة ذاتية القوالبه بأداء عالي مقاومة ضغطه 55MPa في 28 يوم المشكلة من الرمل الكلسي بنسبة 100% .

### كلمات مفتاحية :

خرسانة ذاتية القوالبه / اكتناز / رمل الودان / الرمل الكلسي / رمل الكثبان / تشكيل / سيولة / التشوه / الاستقرار / مقاومة الضغط .

# ABSTRACT

---

Self-compacting concrete are usually made with alluvial sand. Environmental requirements, the impact on costs, depletion of alluvial deposits are factors that encourage at wider use dune sand or crushed sand.

This paper examines the effect of the incorporation of crushed sand and dune sand, replacing alluvial sand on the compactness of the formulation of BAP. These formulations developed must have better rheological behavior vis-a-vis sprawl (flow), the filling capacity (deformability) and the segregation resistance (stability). They must also have better mechanical performances.

The results show the possibility of manufacturing self-compacting concretes in its high performance compressive strength 55MPa at 28 day based on the crushed sands of quarries 100%.

**Keywords :**

Self-compacting concrete - compactness - alluvial sand - crushed sand - dune sand - formulation - flow - deformability - stability – compressive strength

# SOMMAIRE

<i>Dédicace</i> .....	i
<i>Remerciements</i> .....	ii
<b>RÉSUMÉ</b> .....	iii
<b>ملخص</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>SOMMAIRE</b> .....	vi
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	viii
<b>LISTE DES PHOTOS</b> .....	ix
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	x
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : CONCEPT DE BAP</b> .....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Création de BAP .....	3
1.3 Cahier de charges de BAP .....	4
1.4 Structure de BAP .....	6
1.5 Caractérisation de BAP à l'état frais.....	8
1.5.1 Essais de fluidité.....	9
1.5.2 Essais de déformabilité .....	11
1.5.3 Essais de stabilité.....	15
1.6 Propriétés des BAP à l'état durci.....	17
1.6.1 Résistances mécaniques .....	17
1.6.2 Déformations .....	18
1.6.3 Adhérence acier-béton .....	18
1.7 Bilan .....	19
<b>CHAPITRE 2 : COMPACTITÉ ET SABLES</b> .....	20
2.1 Introduction.....	20
2.2 Méthodes de mesure de la compacité .....	20
2.2.1 Méthode de versement simple .....	20
2.2.2 Méthode de Piquage .....	21
2.2.3 Méthode de vibration avec compression : .....	21
2.2.4 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses : .....	22
2.3 Facteurs influant l'empilement granulaire .....	22
2.3.1 Effet de la taille et la forme des grains .....	22
2.3.2 Effet de la paroi du récipient .....	23
2.3.3 Effet de la paroi des gros granulats .....	23
2.3.4 Effet de desserrement.....	24
2.3.5 Effet du mode de mise en place (l'énergie de serrage) .....	24
2.3.6 Effet de la ségrégation .....	25
2.3.7 Effet de l'étendue granulaire .....	25
2.4 Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires .....	26
2.4.1 Modèle linéaire de compacité (MLC) .....	26
2.4.2 Mélanges binaires sans interactions .....	27
2.4.3 Modèle d'empilement virtuel .....	28
2.4.4 Modèle de suspension solide (MSS) .....	30
2.4.5 Modèle d'empilement compressible (MEC) .....	31
2.5 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	32
2.6 Sables .....	33
2.6.1 Classification .....	33
2.6.2 Types de sable .....	34
2.7 Effets de types de sables sur les BAP .....	37

2.7.1	Effet sur la composition .....	37
2.7.2	Effet sur les propriétés rhéologiques.....	38
2.7.3	Effet sur les propriétés mécaniques .....	41
2.8	Bilan .....	43
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS .....</b>		<b>44</b>
3.1	Introduction.....	44
3.2	Caractéristiques des matériaux .....	44
3.2.1	Sable.....	44
3.2.2	Graviers .....	45
3.2.3	Ciment.....	46
3.2.4	Fillers calcaires .....	47
3.2.5	Superplastifiant .....	48
3.2.6	Eau de gâchage.....	48
3.3	Essais réalisés .....	49
3.3.1	Essais de la compacité .....	49
3.3.2	Essais réalisés à l'état frais .....	50
3.3.3	Essai de compression réalisé à l'état durci.....	51
3.4	Bilan .....	52
<b>CHAPITRE 4 : OPTIMISATION DES BAP PAR COMPACITÉ ET TYPES DE SABLES .....</b>		<b>53</b>
4.1	Introduction.....	53
4.2	Problématique .....	53
4.3	Objectif de la recherche.....	54
4.4	formulations des BAP .....	54
4.5	Compacité des graviers.....	55
4.6	Compacité des sables.....	56
4.7	Compacité des BAP .....	57
4.8	Optimisation des BAP .....	58
4.8.1	Influence des sables sur la fluidité .....	58
4.8.2	Influence des sables sur la déformabilité.....	59
4.8.3	Influence des sables sur la stabilité .....	60
4.8.4	Influence des sables sur la résistance à la compression.....	61
4.9	Bilan .....	62
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		<b>64</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>66</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>CHAPITRE 1 : CONCEPT DE BAP</b> .....	<b>03</b>
Figure 1.1 : Blocage des gravillons au droit des obstacles [T. SEDRAN 1995] .....	05
Figure 1.2 : Comparaison des structures de BAP et BO .....	07
Figure 1.3 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams .....	09
Figure 1.4 : Essai de la boîte LCPC .....	10
Figure 1.5 : Essai de la boîte en L .....	11
Figure 1.6 : Essai de la boîte en U .....	12
Figure 1.7 : Essai du caisson de Kajima .....	13
Figure 1.8 : Essai de l'entonnoir en V .....	14
Figure 1.9 : Essai de la stabilité au tamis .....	16
<b>CHAPITRE 2 : COMPACITÉ ET SABLES</b> .....	<b>20</b>
Figure 2.1 : Essai de mesure de la compacité .....	21
Figure 2.2 : valeur des compacités pour des grains roulé et concassé [F DE LARRARD, 2000] ..	23
Figure 2.3 : Effet de la paroi du récipient [F. DE LARRARD] .....	23
Figure 2.4 : Effet de paroi entre granulats [F. DE LARRARD] .....	23
Figure 2.5 : Effet de desserrement [F. DE LARRARD] .....	24
Figure 2.6 : Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés [F. DE LARRARD] .....	24
Figure 2.7 : Rôle du rapport $d_2/d_1$ sur la compacité [Kechkar & al.] .....	26
Figure 2.8 : Mélange binaire sans interaction gros grains dominants [T. SEDRAN] .....	27
Figure 2.9 : Mélange binaire sans interaction grains fins dominants [T. SEDRAN] .....	28
Figure 2.10 : Deux classes ont le même diamètre [T. SEDRAN] .....	28
Figure 2.11 : Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires [F. DE LARRARD] .....	32
Figure 2.12 : Proportion des sables .....	38
Figure 2.13 : Étalement au cône d'Abrams pour différents combinaisons de sable et pourcentages de SP .....	39
Figure 2.14 : Temps écoulement à l'entonnoir en V pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP .....	39
Figure 2.15 : Capacité de remplissage à la boîte en U pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP .....	40
Figure 2.16 : Capacité de remplissage à la boîte en L pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP .....	40
Figure 2.17 : Résistance à la compression des BAP sélectionnés (R = SR, C = SC, D = SD) .....	41
Figure 2.18 : Résistance à la traction des BAP sélectionnés (R = SR, C = SC, D = SD) .....	42
Figure 2.19 : Résistances mécaniques des BAP retenus et des BO témoins .....	42
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS</b> .....	<b>44</b>
Figure 3.1 : Analyse granulométrique des sables .....	45
Figure 3.2 : Analyse granulométrique des graviers .....	46
Figure 3.3 : Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires .....	48
<b>CHAPITRE 4 : OPTIMISATION DES BAP PAR COMPACITÉ ET TYPES DE SABLES</b> .....	<b>53</b>
Figure 4.1 : Compacité en fonction des combinaisons granulaires des gravillons .....	56
Figure 4.2 : Compacité en fonction des combinaisons granulaires des types de sables .....	57
Figure 4.3 : Compacité des BAP en fonction de types de sables .....	58
Figure 4.4 : Effet des types de sables sur la fluidité des BAP .....	59
Figure 4.5 : Effet des types de sables sur la déformabilité des BAP .....	60
Figure 4.6 : Effet des types de sables sur la stabilité des BAP .....	60
Figure 4.7 : Effet des types de sables sur la résistance à 7 jours des BAP .....	62
Figure 4.8 : Effet des types de sables sur la résistance à 28 jours des BAP .....	62

## LISTE DES PHOTOS

<b>CHAPITRE 1 : CONCEPT DE BAP</b> .....	<b>03</b>
Photo 1.2 : Étapes de l'essai d'étalement au cône d'Abrams [HOLCIM] .....	09
Photo 1.3 : Déroulement de l'essai de boîte LCPC [N. Roussel] .....	10
Photo 1.4 : Déroulement de l'essai de boîte en L [HOLCIM] .....	11
Photo 1.5 : Étapes de l'essai de boîte en U .....	12
Photo 1.6 : Dispositif de l'essai de caisson de Kajima .....	13
Photo 1.7 : Déroulement de l'essai d'entonnoir en V .....	14
Photo 1.8 : Déroulement de l'essai de stabilité au tamis [Z. ABIB & al.] .....	16
<b>CHAPITRE 2 : COMPACTÉ ET SABLES</b> .....	<b>20</b>
Photo 2.1 : Dispositif de l'essai de mesure de la compacité [EL BARRAK] .....	22
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS</b> .....	<b>44</b>
Photo 3.1 : Échantillons des sables .....	45
Photo 3.2 : Fillers calcaires .....	47
Photo 3.3 : Superplastifiant .....	48
Photo 3.4 : Essai de la compacité des sables .....	49
Photo 3.5 : Essai de la compacité des graviers .....	49
Photo 3.6 : Essai de la compacité des bétons .....	49
Photo 3.7 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams .....	50
Photo 3.8 : Essai de la boîte LCPC .....	50
Photo 3.11 : Essais de compression .....	51
Photo 3.10 : Essai de la résistance à la ségrégation au tamis .....	51
Photo 3.9 : Essai de la capacité de remplissage à la boîte en L .....	51

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>CHAPITRE 2 : COMPACITÉ ET SABLES .....</b>	<b>20</b>
Tableau 2.1 : Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place .....	25
Tableau 2.2 : Classification de sables en fonction de sa composition (teneurs en % massique).....	34
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS .....</b>	<b>44</b>
Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques des sables.....	45
Tableau 3.2 : Propriétés physiques des gravillons .....	46
Tableau 3.3 : Analyse chimique de ciment .....	47
Tableau 3.4 : Propriétés physiques des ciments .....	47
Tableau 3.5 : Analyse chimique de fillers calcaires .....	47
Tableau 3.6 : Caractéristiques du superplastifiant.....	48
Tableau 3.7 : Programme des essais réalisés à l'état frais .....	50
<b>CHAPITRE 4 : OPTIMISATION DES BAP PAR COMPACITÉ ET TYPES DE SABLES .....</b>	<b>53</b>
Tableau 4.1 : Compositions des BAP destinés à l'optimisation .....	55

# INTRODUCTION

---

Le progrès actuel relatif aux structures modernes qui se caractérisent par la complexité de leurs géométries telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables.

L'idée de produire des bétons très maniabiles qui s'étalent, sans aucune vibration, dans les coffrages, est une solution intéressante. C'est ainsi que l'idée de produire des bétons autoplaçants est née. Cette nouvelle génération de béton n'est plus prioritairement valorisée par sa seule résistance à la compression, mais par l'ensemble de toutes ses nouvelles propriétés rhéologiques.

Les BAP se caractérisent par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage tout en étant stables et garantissent aussi de bonnes performances mécaniques et de durabilité. De telles caractéristiques sont directement liées à sa composition. En effet, les recherches menées, au cours des dernières années, montrent que les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent plus d'éléments fins qui doivent comporter au moins une addition minérale, moins de gravillons, un dosage élevé en superplastifiant et assez souvent un agent colloïdal. L'expérience Japonaise a mis en évidence la faisabilité de ces bétons sur des chantiers importants ainsi que leurs intérêts technico-économique.

Les BAP se développent aujourd'hui partout dans le monde. Cependant, les données disponibles à leur sujet montrent que leur formulation est encore différente d'un pays à un autre. Par ailleurs, les chercheurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à ce sujet. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de formulation généralisée permettant d'arranger les divers constituants de BAP, au nombre minimal de six, en fonction d'un cahier des charges donné. Par conséquent, les formulateurs ont actuellement conçu leurs BAP de manière empirique.

Par ailleurs, la majorité des méthodes de formulation de BAP demande une compacité optimale du mélange granulaire afin de réduire la quantité de pâte et d'eau nécessaires pour fluidifier le mélange global.

En Algérie, la plupart des bétons sont exclusivement fabriqués avec de sable alluvionnaire. Cependant, beaucoup de régions du pays souffrent d'un manque remarquable en sable alluvionnaire approprié. En outre, les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, l'épuisement des gisements alluvionnaires et l'éloignement des chantiers par rapport à ces gisements sont également des facteurs qui encouragent à chercher d'autres types de sables. En effet, le sable concassé produit énormément par les carrières ainsi que le sable de dunes disponible de quantités inépuisables dans le sud du pays ne sont pas encore exploités sérieusement dans la formulation des bétons. Ces sables, qui contiennent normalement des teneurs élevées en fines, se présentent comme une alternative attirante du point de vue technique, économique et écologique pour la formulation des bétons.

Pour ces raisons, le présent mémoire examine l'effet de l'incorporation de sable de carrière et le sable de dune, en remplaçant le sable alluvionnaire, sur la compacité de la formulation de BAP. Ces formulations développées doivent avoir un meilleur comportement rhéologique vis-à-vis de l'étalement (fluidité), la capacité de remplissage (déformabilité) et la résistance à la ségrégation (stabilité). Elles doivent aussi posséder de meilleures performances mécaniques.

Le présent mémoire s'articule en deux parties :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique approfondie et critique sur l'état de l'art relatives aux BAP. Elle comporte deux chapitres ;
  - le chapitre 1 expose un aperçu sur les BAP en tant que nouveau matériau, décrit leurs caractérisations à l'état frais et leurs propriétés à l'état durci.
  - le chapitre 2 présente un certain nombre de connaissance de base sur la compacité, expose les techniques de détermination la compacité, et décrit finalement un état de l'art de l'effet des types de sables sur la compacité et les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.
- La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale qui nous a permis de développer un certain nombre de formulation des BAP aux différents types de sables. Elle contient aussi deux chapitres ;
  - le chapitre 3 regroupe les caractéristiques des matériaux utilisés durant notre étude, les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués.
  - le chapitre 4 présente la problématique évoquée dans la recherche bibliographique, l'objectif visé dans cette étude ainsi que les différents paramètres étudiés, et enfin, il expose en détail les résultats obtenus et leurs discussions.
- Finalement, la conclusion générale propose les résultats obtenus dans notre étude.

# CHAPITRE 1 : CONCEPT DE BAP

---

## 1.1 Introduction

Les spécialistes du béton utilisent des termes comme *béton à haute performance* ou *béton compacté au rouleau* pour désigner différents types de bétons. Ces termes signifient ce qui peut être attendu comme caractéristiques. Ces dernières années, avec l'avènement de **béton autoplaçant (BAP)**, c'est maintenant la maniabilité qui attire l'attention.

Avec l'apparition du BAP dont le point d'intérêt principal est la maniabilité, il n'est donc pas surprenant que plusieurs chercheurs se tournent vers la science de la rhéologie pour tenter de se donner de meilleurs outils pour évaluer, comprendre et prédire la maniabilité des bétons. Par ailleurs, Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes, principalement du fait de l'utilisation de nouveaux constituants tels que les additions minérales, les superplastifiant, ou les agents colloïdaux, qui sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

Ce chapitre présente un aperçu détaillé sur les BAP en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord l'historique de leur développement ainsi que leur définition. Après avoir décrit le cahier des charges d'un BAP, ce chapitre fait une synthèse sur la spécificité de sa structure, en suite, il donne une description critique sur les différents essais utilisés en pratique pour caractériser les BAP à l'état frais. Finalement, il fait un survol sur leurs propriétés à l'état durci.

## 1.2 Création de BAP

Le béton est le premier matériau de construction au monde. Depuis sa création, il ne cesse de se développer afin de répondre aux exigences des concepteurs et usagers. En effet, les structures modernes se caractérisent par une architecture complexe, telle que les formes variables et enlacées, nécessitant des coffrages très confinés et fortement ferrailés. Ces complications ne permettent pas de mettre correctement en place le béton frais et de réaliser aisément l'opération de serrage. Par ailleurs, le Japon, au début des années 1980, souffrait de manque de main d'œuvre qualifiée dans le secteur de génie civil ce qui a affecté la maîtrise de la qualité du béton.

L'idée de produire un béton très maniable, qui ne nécessite pas de vibration pour la mise en œuvre, est apparue comme une solution intéressante. C'est ainsi que l'idée de produire de bétons autoplaçant est née.

Cette idée de BAP a été d'abord proposée par le Professeur H. OKAMURA à l'Université de Kochi – Tokyo en 1986. Ensuite et après des recherches profondes sur la maniabilité ce béton, les chercheurs K. OZAWA et K. MAEKAWA, de la même Université, 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 [K. OZAWA & al.]. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard, en 1991, dans la construction d'un pont. En mai 1992, au 4<sup>ème</sup> Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. OZAWA a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [K. OZAWA & al.].

Le Béton autoplaçant est un béton très fluide qui peut se mettre et se serrer dans les coffrages même très ferrailés sans aucun apport d'énergie extérieure tout en restant homogène et en possédant des résistances mécaniques au moins de celles de béton ordinaire (Pho. 1.1).



Photo 1.1 : Coulage de BAP dans une dalle très encombrée [HOLCIM,2004]

### 1.3 Cahier de charges de BAP

Le BAP se distingue des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons spéciaux vibrés, par son comportement à l'état frais. Sa mise en place se fait par le simple versement sous son poids propre seulement, sans aucune énergie de serrage (ni vibration, ni piquage, ni compression). Ce béton spécial, qualifié à haute maniabilité ou à hautes performances rhéologiques, doit avoir le cahier des charges suivant ;

- Un BAP doit être d'abord très fluide pour s'écouler avec un débit suffisant en milieu infini libre (une dalle par exemple). Ceci se traduit dans la pratique par un étalement important et une grande vitesse d'étalement.
- Un BAP doit être également très déformable pour se faufiler sans peine au travers des zones confinées (coffrage très ferrailé ou étroit). Ceci se traduit dans la pratique par une capacité de remplissage très élevée. Pour cela, une grande fluidité n'est pas une condition suffisante. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement (Fig. 1.1). Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines et interrompre l'écoulement [T. SEDRAN 1995].

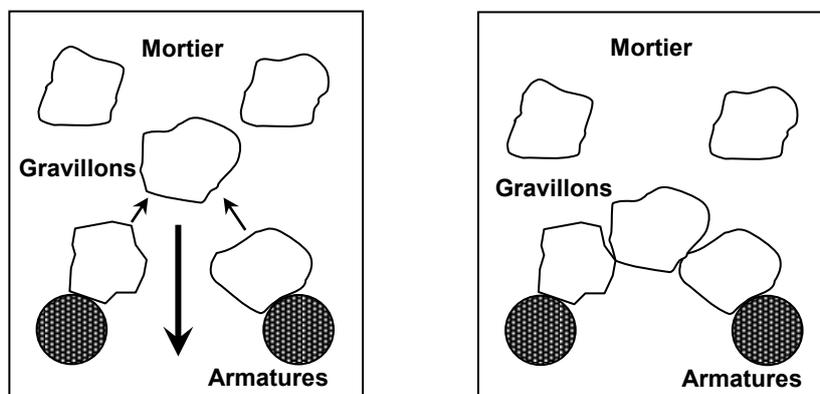


Figure 1.1 : Blocage des gravillons au droit des obstacles [T. SEDRAN 1995]

- Un BAP doit être aussi stable pour rester homogène une fois mis en place et pendant son écoulement jusqu'à sa prise. Il doit avoir donc des bonnes résistances aux ségrégations statique et dynamique, qui offrent d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un ressuage trop fort car ceci peut diminuer l'adhérence des armatures en parties hautes du béton, ainsi que l'apparition de fissures.
- Un BAP doit finalement avoir, à l'état durci, une résistance à la compression au moins égale à celle de BO.

En conclusion, la principale difficulté, à laquelle les formulateurs de BAP sont confrontés, est de pouvoir concilier des propriétés *a priori* contradictoires ; d'une part, une grande fluidité (étalement), et d'autre part, une stabilité suffisante (résistance à la ségrégation et au ressuage), tout en assurant une bonne déformabilité (capacité de remplissage) pour obtenir finalement un béton à haute maniabilité.

## 1.4 Structure de BAP

Pour parvenir au cahier des charges précédent, le BAP est formulé différemment de BO (Fig. 1.2). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange de ciment, eau, addition minérale et air, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, le BAP possède un même dosage en ciment et en eau que le BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la haute maniabilité, il est donc nécessaire d'ajouter au BAP un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée [P. TURCRY]. D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dits aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité. En revanche, leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils engendrent un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

De manière plus approfondie, les recherches consacrées au BAP nous permettent de souligner cinq particularités de sa structure dont le détail est décrit ci-dessous.

### **a. Un faible volume de gravillons :**

Comme les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en milieu confiné, il faut en limiter leur volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet de diminuer le volume de vides du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir la maniabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport massique (gravillons/sable) de l'ordre de 1 dans le BAP. Bien évidemment, ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (ouvrage peu ferrailé) ou à la baisse dans le cas contraire [AFGC].

### **b. Un volume de pâte élevé :**

Les frottements entre les gravillons limitent l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, le BAP contient un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres [AFGC].

### **c. Une quantité importante de fines :**

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieures à celle des BO. Toutefois,

pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [M. YURUGI & al.], voire ternaire [S. TANGTERMSIRIKUL & al.] ; ciment portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, ou fumée de silice.

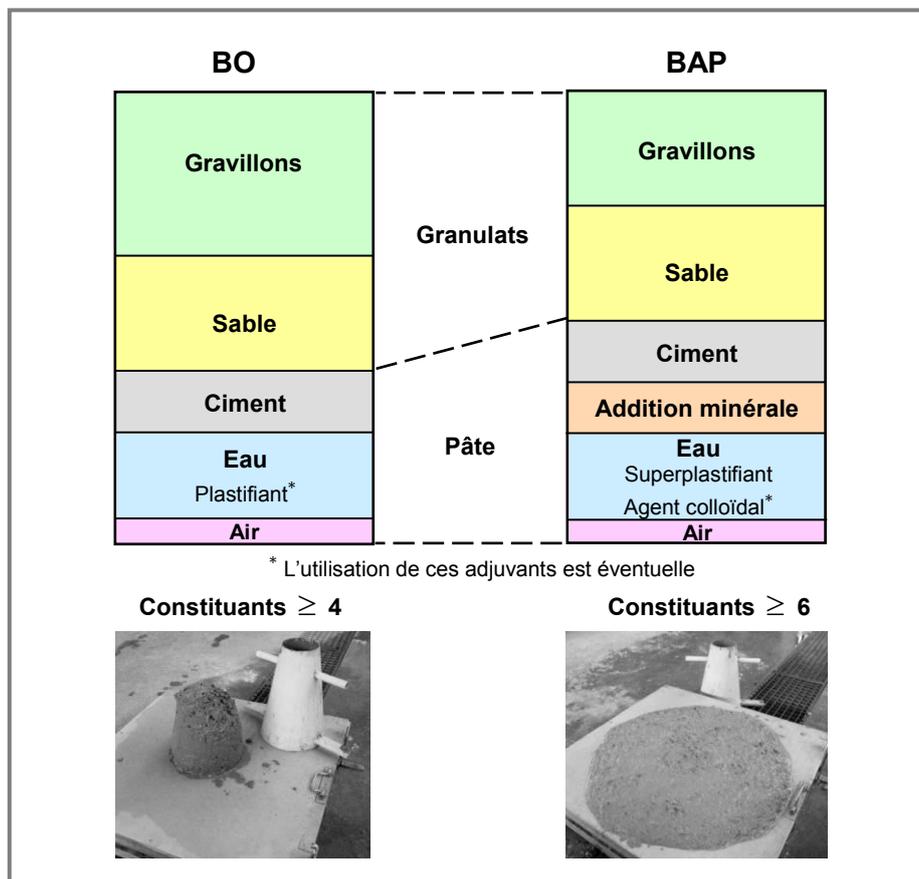


Figure 1.2 : Comparaison des structures de BAP et BO

#### d. Un fort dosage de superplastifiant :

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [F. DE LARRARD & al.] peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

#### e. Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal :

Bien que ce ne soit pas systématique, les BAP contiennent la plus part du temps un agent colloïdal [T. SEDRAN]. Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce produit semble se justifier dans le cas des bétons

ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de BAP ayant des rapports massique eau/liant faible (BAP de résistance supérieure à 50 MPa). Pour la gamme des bétons intermédiaire, leur utilité est à étudier au cas par cas. L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis aux problèmes ségrégation et ressuage [S. KUROIWA & al.] & [T. SHINDOH & al.].

## 1.5 Caractérisation de BAP à l'état frais

Les formulateurs de BAP se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à caractériser leur comportement à l'état frais, car il n'existe pas, à l'heure actuelle, des critères intrinsèques pour s'assurer qu'un béton est effectivement "autoplaçant".

Pratiquement, les laboratoires ont développée leurs propres essais qui permettent d'évaluer la grandeur de fluidité, déformabilité, stabilité. Comme le BO, ces essais appelés empiriques ou technologiques qualifient l'ouvrabilité de BAP par des grandeurs à un seul paramètre et permettent de contrôler les propriétés à l'état frais par des manipulations simple et peu coûteuses [A. R'MILI]. Cependant, la voie aujourd'hui la plus prometteuse semble être de caractériser le BAP par le rhéomètre qui détermine ses propriétés rhéologiques fondamentales (viscosité plastique et seuil de cisaillement). Malheureusement, ce grand nombre des différents essais normalisés et non normalisés complique grandement l'analyse des résultats de la littérature.

Les prochaines tentatives présentent les principaux de ces essais suivant un classement définissant les paramètres rhéologiques :

- **Fluidité** : La capacité du BAP de s'écouler et de remplir les coffrages infinis. C'est la mobilité en milieu libre (non confiné et sans obstacles).
- **Déformabilité** : La capacité du BAP de s'écouler à travers des obstacles et de remplir les coffrages très ferrailés. C'est la mobilité en milieu confiné.
- **Stabilité** : La capacité du BAP de rester homogène pendant la mise en œuvre. C'est la résistance à la ségrégation et au ressuage.

## 1.5.1 Essais de fluidité

### 1.5.1.1 Étalement au cône d'Abrams (Slump Flow)

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la fluidité de BAP. Il s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Fig. 1.3) et (Pho. 1.2). Cependant, l'affaissement est toujours supérieur à 250 mm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [T. SEDRAN]. Les valeurs ciblées d'étalement SF, pour obtenir un BAP, sont généralement fixées dans la fourchette 600 à 750 mm [AFGC].

Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Par exemple, avec un béton peu stable, on remarque une séparation de la pâte et des granulats. Cependant cette observation est difficilement quantifiable.

Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 500 mm (noté  $T_{500}$ ), ce qui donne la vitesse de l'écoulement et une indication sur la viscosité du béton. Le temps  $T_{50}$  indique une grande fluidité s'il est faible et vis versa.

Cet essai est très facile à réaliser et ne nécessite qu'un petit échantillon de béton, environ 6 litres. En revanche, il ne met pas en relief l'importance du caractère hétérogène du béton, il s'est donc avéré nécessaire de développer une autre famille d'essais [T. SEDRAN].

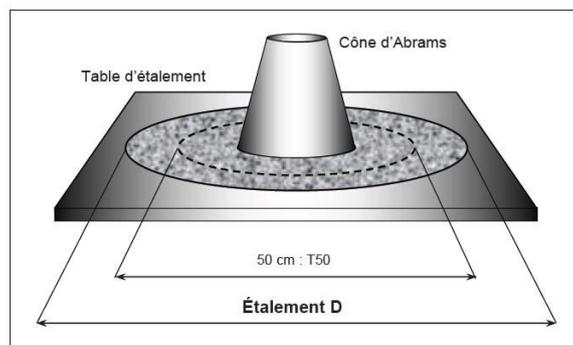


Figure 1.3 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams [HOLCIM 2004]



Photo 1.2 : Étapes de l'essai d'étalement au cône d'Abrams [HOLCIM 2004]

La norme (NF EN 12350-8) classe le BAP en trois catégories selon l'étalement :

- $550 \leq SF1 \leq 650$  mm : BAP convient structures en béton non renforcées ou légèrement renforcées.
- $660 \leq SF2 \leq 750$  mm : BAP convient aux applications courantes (murs, colonnes).
- $760 \leq SF3 \leq 850$  mm : BAP convient aux applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes.

Des valeurs de  $SF > 850$  mm peuvent être spécifiées dans quelques cas spéciaux mais le grand soin devrait être pris concernant la ségrégation et la taille maximum.

En plus, la norme (NF EN 12350-10) classe la viscosité de BAP selon le temps  $T_{500}$  en deux classes :

- VS1 :  $T_{500} < 2$  sec.
- VS2 :  $T_{500} \geq 2$  sec.

#### 1.5.1.2 Boite LCPC (LCPC Box)

L'essai de la boîte LCPC est conçu par N. ROUSSEL au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Il consiste de verser un seau contenant 6 litres de béton dans un canal de forme parallélépipède et de mesurer la longueur de l'écoulement après son arrêt (Fig. 14) (Photo. 1.3).

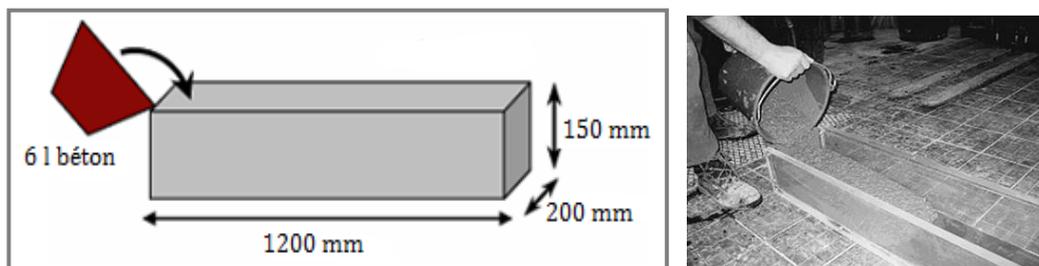


Figure 1.4 : Essai de la boîte LCPC Photo 1.3 : Déroulement de l'essai de boîte LCPC [N. Roussel 2007]

Cet écoulement purement bidimensionnel fournit la même information sur l'étalement que celle apparaissant sur un rayon de la galette formée par le béton dans l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. Il permet cependant pour un même volume testé de 6 litres de considérer, dans le cas des BAP, des épaisseurs de matériaux à l'arrêt de l'ordre de 6 cm. Mais dans l'essai du cône d'Abrams, l'épaisseur finale de la galette étant du même ordre de grandeur que le diamètre maximal du plus gros granulat, qui empêche par la suite toute corrélation analytique entre les paramètres rhéologique et l'étalement [N. Roussel & al.] [N. Roussel].

## 1.5.2 Essais de déformabilité

### 1.5.2.1 Boite en L (L-Box)

L'essai de la boîte en forme L permet de tester la capacité de remplissage du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le principe de cet essai est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte en béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale de la boîte à travers deux ou trois barres armatures de diamètre 14 mm, selon le confinement choisi. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités ( $H_1$  à l'extrémité de la partie verticale et  $H_2$  à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat par un taux de remplissage  $PL = H_2/H_1$  qui renseigne sur la mobilité de BAP en milieu confiné. Ce taux de remplissage doit être supérieur à 0,80 pour obtenir un BAP [AFGC].

Dans cet essai, la norme (NF EN 12350-10) classe l'aptitude de l'écoulement de BAP en deux catégories selon l'intervalle de l'écoulement, qui est désigné par le nombre des barres :

- PL1  $\geq 0,80$  : BAP pour 02 barres d'armatures.
- PL2  $\geq 0,80$  : BAP pour 03 barres d'armatures.

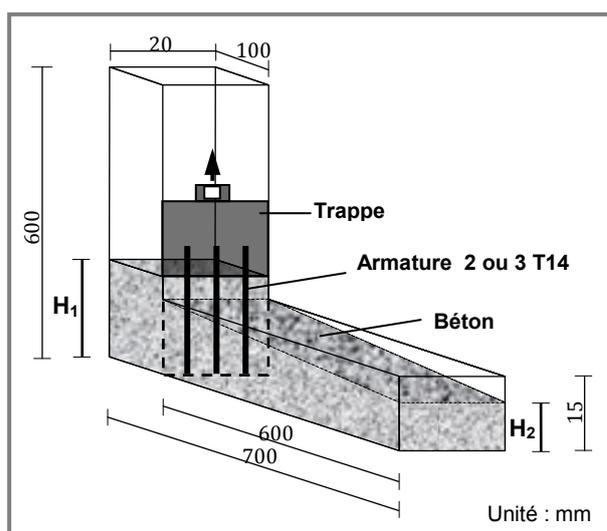


Figure 1.5 : Essai de la boîte en L



Photo 1.4 : Déroulement de l'essai de boîte en L [HOLCIM 2004]

### 1.5.2.2 boîte en U (U-box)

L'essai de la boîte en forme U sert à mesurer la capacité de remplissage du BAP dans un coffrage confiné et fortement ferrillé. La boîte est divisée, en deux compartiments symétriques R1 et R2, par une cloison centrale dont le fond est doté d'une trappe coulissante qui peut libérer la grille d'armatures (Fig. 1.6) (Pho. 1.5).

Cet essai nécessite 16 litres de béton et s'appuie sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R2, après remplissage de la partie R1 et ouverture de la trappe. Cette hauteur de remplissage H doit être supérieure à 30 cm pour obtenir un BAP.

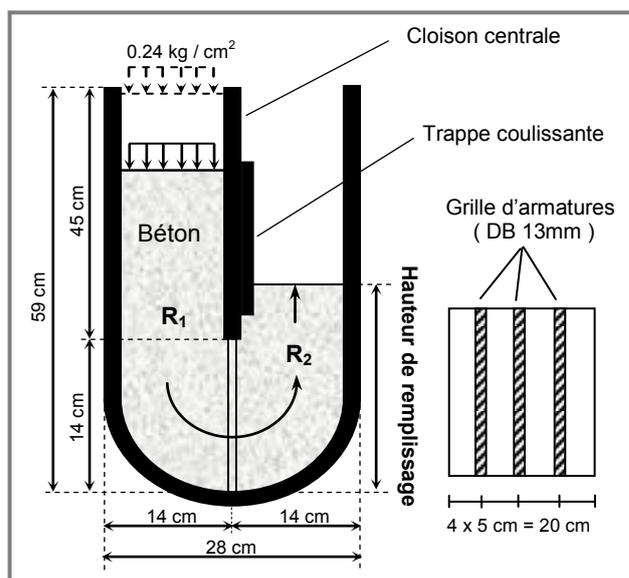


Figure 1.6 : Essai de la boîte en U



Photo 1.5 : Étapes de l'essai de boîte en U

### 1.5.2.3 Étalement à l'anneau (J-Ring)

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône d'Abrams disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures de diamètre compris entre 16 et 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. On mesure le diamètre moyen d'étalement du béton à travers le ferrailage dans deux directions perpendiculaires et la différence de hauteur entre le béton à l'intérieur des barres et en dehors des barres et calcule la moyenne de la différence de hauteur à quatre endroits de la galette de béton [A. R'MILI].

Dans cet essai, la norme (NF EN 12350-12) classe le BAP en deux catégories selon la valeur maximale pour le palier d'écoulement à l'anneau, qui désigné par le nombre de barres :

- PJ1  $\geq$  100 mm : BAP pour 12 barres d'armatures.
- PJ2  $\geq$  100 mm : BAP pour 16 barres d'armatures.

#### 1.5.2.4 Caisson de Kajima (Fill- Box Kajima)

L'essai de caisson sert à mesurer l'aptitude de déformabilité qui tente d'évaluer la facilité d'écoulement du béton dans les coffrages très ferrailés. Ce teste requiert 35 litres de béton et consiste à remplir la partie X de la cuvette transparente avec le béton jusqu'à une hauteur de 220 mm avec un débit constant à travers un entonnoir, le béton s'écoule ensuite entres des tuyaux de diamètre 16 mm. L'aptitude de déformabilité est définie comme étant le ratio  $A/(A+B)$  avec A ; la surface remplie par le béton et B ; la surface vide. Dans ce cas, l'auteur estime qu'un béton sera autoplaçant s'il atteint un ratio de remplissage supérieur à 60 %.

Dans les faits, la hauteur de 220 mm varie plutôt entre 200 et 240 mm selon la viscosité du béton. Certains bétons s'immobilisent rapidement après avoir transvidé tandis que d'autres s'affaissent tranquillement sous leur propre poids. Le ratio de déformabilité n'est plus donc calculé en fonction d'une valeur fixe de 220 mm, mais bien à partir de la hauteur réelle du béton après son immobilisation (Fig. I.7) (Pho.1.6).

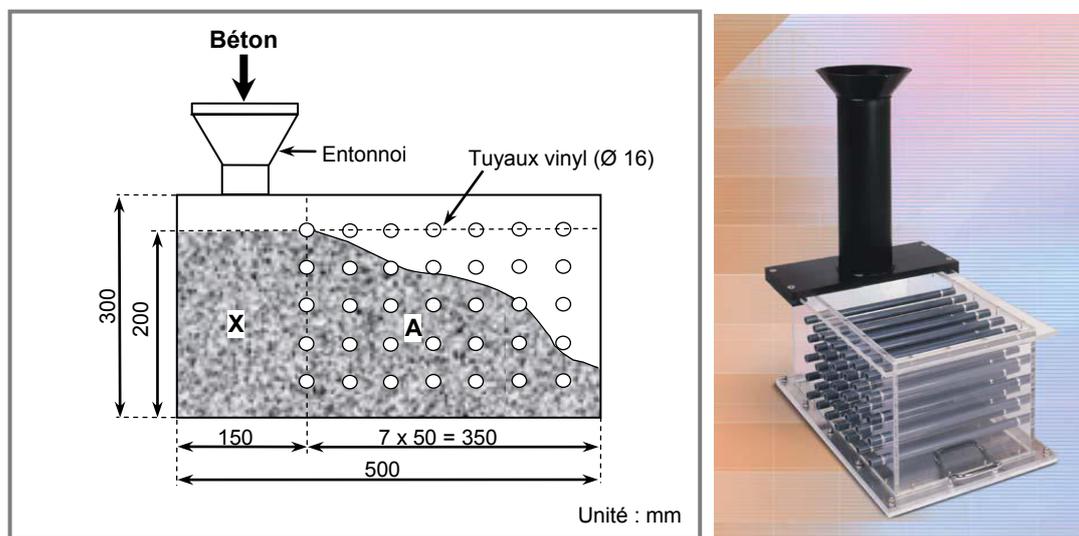


Figure 1.7 : Essai du caisson de Kajima

Photo 1.6 : Dispositif de l'essai de caisson de Kajima

#### 1.5.2.5 Entonnoir en V (V-funnel)

L'essai de l'entonnoir en forme V permet d'évaluer la capacité de remplissage en fonction du temps, et il indique également la fluidité et la viscosité de BAP.

L'entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut dont le volume est d'environ 10 litres (Fig. 1.8). Au départ de l'essai, l'entonnoir est fermé à son extrémité inférieure par un clapet. Après avoir ouvert le clapet, ce qui provoque l'écoulement du béton sous son poids propre, le temps de vidange totale est mesuré. Lors de l'écoulement, l'entonnoir confine le béton en deux dimensions ce qui simule un coffrage fortement armé (Pho. 1.7). Pour obtenir un BAP, un temps inférieur à 25 secondes est nécessaire. Par ailleurs, Un temps élevé de l'écoulement signifie le béton ayant une faible déformabilité due à une viscosité élevée.

La difficulté principale de cet essai en laboratoire est de mesurer de manière adéquate et impartiale le temps d'écoulement du béton. Le chronomètre est activé précisément dès que le clapet est ouvert, mais le temps d'arrêt est plus difficile à déterminer puisque les bétons testés n'ont pas tous la même viscosité. Certains bétons très fluides (peu visqueux) passent à travers l'entonnoir sans laisser de dépôts derrière eux, cependant, les bétons plus visqueux n'ont pas une fin d'écoulement si démarquée ce qui prête à interprétation entre différents manipulateurs [K.H. KHAYAT & al.].

Dans cet essai, la norme (NF EN 12350-9) classe le BAP en deux catégories selon la viscosité, qui est désignée par le temps :

- VF1 :  $0 < t < 9 \text{ sec}$  : BAP de bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses.
- VF2 :  $9 \text{ sec} \leq t \leq 25 \text{ sec}$  : BAP pour autres cas.

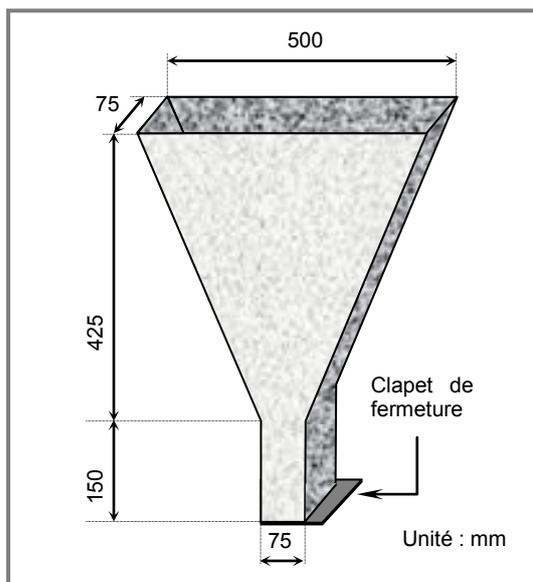


Figure 1.8 : Essai de l'entonnoir en V [K. KHAYAT] Photo 1.7 : Déroulement de l'essai d'entonnoir en V

### **1.5.2.6 Critique des essais de déformabilité**

Le principal défaut de tous les essais présentés précédemment est de ne caractériser le comportement du béton que pour un seul mode de sollicitation. Or, ces essais sollicitent le béton de façon quasi-statique où la gravité intervient seul pour provoquer l'écoulement tandis que la mise en place peut dans certains cas se faire de façon dynamique (pompage du béton). En plus, ces essais ne fournissent que des grandeurs technologiques, dépendantes de la géométrie des montages. Ils permettent donc de comparer des bétons entre eux, mais ne sont pas extrapolables à des prédictions pour des structures réelles [T. SEDRAN]. Un dernier type d'essai a donc été développé afin de déterminer le comportement propre du béton frais pour tous les modes de sollicitation possibles.

Ajoutons, enfin, que l'Association Française de Génie Civil a préconisé de caractériser les BAP à l'état frais à l'aide de trois essais simultanés, à savoir ; mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis.

## **1.5.3 Essais de stabilité**

Il est indispensable de caractériser la résistance des BAP à la ségrégation car leur grande fluidité peut conduire à une mauvaise suspension des gravillons [AFGC]. Toutefois, il est inutile de mesurer le ressuage puisque le volume important des fines dans les BAP réduit considérablement la quantité d'eau remontante à la surface. La caractérisation de stabilité par des mesures sur béton durci s'avère assez lourde et prend beaucoup de temps, comme (comptage des gravillons sur des éprouvettes sciées en deux, auscultation sonore à différentes hauteurs d'un mur, etc.). Pour cela, des essais faciles à exécuter ont été développés afin d'évaluer la résistance à la ségrégation.

### **1.5.3.1 Stabilité au tamis**

peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. La procédure de cet essai est la suivante ; À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur un tamis de maille 5 mm (Fig. 1.9) et (Pho. 1.8). Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation SR qui doit être inférieur à 20% dans le BAP.

Dans cet essai, la norme (NF EN 12350-11) classe le BAP en deux catégories selon l'indice de ségrégation :

- $SR1 \leq 20\%$  : BAP applicable aux dalles de faible épaisseur, applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 m et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- $SR2 \leq 15\%$  : BAP mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 m et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm et dans les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80 mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 m.

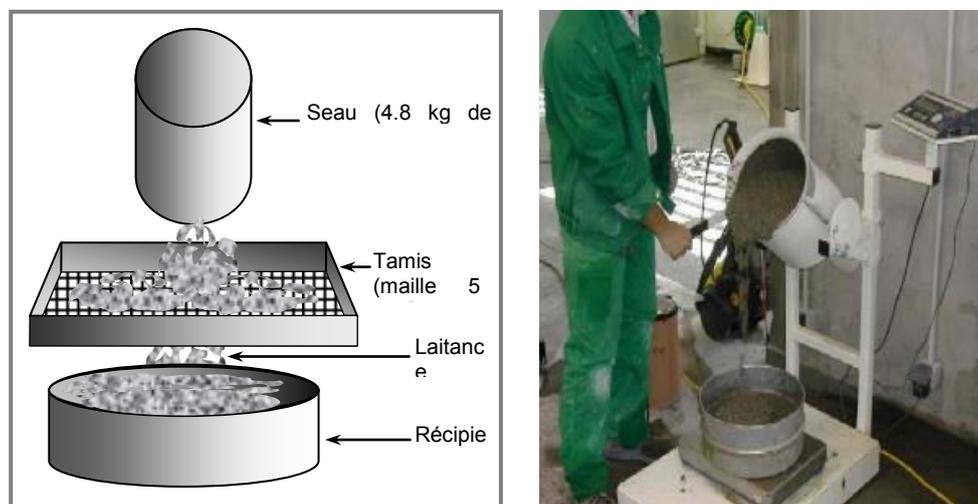


Figure 1.9 : Essai de la stabilité au tamis Photo 1.8 : Déroulement de l'essai de stabilité au tamis [Z. ABIB & al.]

### 1.5.3.2 Stabilité à la colonne

L'essai de la stabilité à la colonne permet d'évaluer l'indice de ségrégation statique. Il consiste à remplir le béton un tube en PVC de diamètre 11 cm et de hauteur 40 cm. Le tube est préalablement scié en deux sur sa hauteur facilitant ainsi l'extraction du béton, des colliers de serrage sont placés sur la périphérie du moule afin de le maintenir bien fermé. La colonne est placée verticalement sur une base métallique et un joint en silicone est appliqué pour garantir une étanchéité parfaite du dispositif. La séparation des sections se fait après la prise du béton, le squelette granulaire est ainsi figé dans la matrice cimentaire. Ceci offre une grande facilité à l'opérateur étant donné que le béton ne risque pas de s'écouler, réduisant ainsi les erreurs dues aux pertes de matériau lors des opérations de séparation et de pesage.

Une fois la colonne démoulée, elle sera séparée en trois parties plus ou moins égales (partie inférieure, partie médiane et partie supérieure). Chaque partie est pesée puis lessivée sur un tamis d'ouverture 5 mm afin de ne garder que les gros granulats. Ces derniers, après séchage superficiel, seront à leur tour pesés. On calcule ainsi la teneur en granulats de chaque partie inférieure, médiane et supérieure ( $G_{inf}$ ,  $G_{med}$  et  $G_{sup}$ ), qui correspond au rapport de la masse des granulats secs sur la masse totale de la partie considérée [T. ALI-BOUCETTA].

L'indice de ségrégation statique ISS est déterminé par le pourcentage du rapport :

$$ISS = (G_{inf} - G_{sup}) 100\%$$

## **1.6 Propriétés des BAP à l'état durci**

Les facteurs qui dictent les propriétés mécaniques des BAP sont les mêmes que ceux qui gouvernent celles des BO. Le défi est donc d'utiliser ce savoir-faire pour obtenir des BAP possédant des bonnes caractéristiques satisfaisantes à l'état durci. Faisons un tour d'horizon des données disponibles relatives aux performances mécaniques des BAP.

### **1.6.1 Résistances mécaniques**

#### **1.6.1.1 Résistance à la compression**

Les BAP peuvent présenter une gamme étendue de résistances à la compression en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport E/L [T. SEDRAN]. Il faut, toutefois, s'attendre à des résistances au jeune âge modérées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions ou lorsque l'usage d'un agent colloïdal nécessite un fort dosage en superplastifiant.

#### **1.6.1.2 Résistance à la traction**

Les spécificités de composition des BAP permettent d'anticiper une légère différence de rapport entre la résistance à la traction et celle à la compression par rapport aux BO [T. FUKUTE & al.]. En effet, les résultats obtenus confirment que pour les mêmes résistances à la compression les BAP possèdent des résistances à la traction légèrement supérieures à celles des BO [J.C. GIBBS & al.] [C. HU & al.].

## **1.6.2 Déformations**

### **1.6.2.1 Module d'élasticité**

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des BO de mêmes résistances mais. De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montre qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance [B. PERSSON] & [E. PROUST].

### **1.6.2.2 Retrait total**

L'influence du volume de la matrice de la pâte sur le retrait total du béton conduit à penser que ce type de déformation sera augmenté pour les BAP par rapport aux BO, et ce d'autant plus que la proportion granulaire s'éloigne des valeurs courantes des BO [AFGC]. Cependant, Les données sur le retrait total, et donc sur le retrait de séchage, sont très partagées ; d'un côté, le retrait total est trouvé équivalent pour les BAP et BO [B. PERSSON] & [E. PROUST] ; de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP [J. AMBROISE & al.] & [C. HU & al.].

## **1.6.3 Adhérence acier-béton**

Bien que l'absence de vibration et le changement de compositions du béton aient une influence non négligeable sur la liaison acier-béton, plusieurs études montrent que l'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des BO [J.C. GIBBS & al.]. Dans certaines configurations (nappes supérieures de pièces épaisses), la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis au ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains BO et peut améliorer l'enrobage des armatures.

## 1.7 Bilan

Les BAP, une nouvelle génération de béton venant du Japon est apparue ces dernières années. Ce sont des bétons très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration, même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène.

La principale difficulté de fabriquer de tels bétons est que l'on recherche à concilier des propriétés a priori contradictoires ; d'une part, une grande fluidité et déformabilité et, d'autre part, une haute stabilité afin d'obtenir finalement un béton très maniable. Pour satisfaire ces exigences rhéologiques, la formulation des BAP doit renfermer une forte teneur en pâte au détriment de celle des gravillons. De plus, il est nécessaire d'ajouter, à cette formulation, au moins une addition minérale et un superplastifiant en proportions bien précises. Ajoutons, enfin, que l'utilisation des agents colloïdaux est éventuelle.

Afin d'apprécier les propriétés rhéologiques des BAP, les normes NF EN 12350 exigent trois essais (l'étalement au cône d'Abrams, la boîte en L et la stabilité au tamis). Cependant, la voie aujourd'hui la plus prometteuse semble être de caractériser ces bétons par leur viscosité plastique et leur seuil de cisaillement.

Grâce à leur formulation, les BAP possèdent généralement de bonnes résistances mécaniques et de durabilité, et dépendent bien sûr de la teneur en eau et de la nature du liant. En revanche, il faut prévoir un module élastique plus faible que pour des BO de même résistance à la compression. À l'opposé, les déformations différées, retrait et fluage sont susceptibles d'être augmentées.

L'optimisation de la formulation des BAP nécessite un réglage minutieux de plusieurs paramètres. En effet, la nature et le dosage d'additions minérales et la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal sont des paramètres clés pouvant avoir une influence significative sur les performances des BAP.

# CHAPITRE 2 : COMPACITÉ ET SABLES

---

## 2.1 Introduction

Les BAP se développent aujourd'hui partout dans le monde. Cependant, les données disponibles à leur sujet montrent que leur formulation est encore différente d'un pays à un autre. Par ailleurs, les chercheurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à ce sujet. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de formulation généralisée permettant d'arranger les divers constituants de BAP, au nombre minimal de six, en fonction d'un cahier des charges donné. Par conséquent, les formulateurs ont actuellement conçu leurs BAP de manière empirique.

En effet, la manière de formulation formulé de ce matériau composite, béton, a une incidence directe sur ces propriétés intrinsèques. A ce titre, une bonne composition est conditionné par plusieurs paramètres et notamment par le choix judicieux de la phase inerte car elle occupe plus de 70% du volume total du béton ce qui constitue par conséquent le squelette résistant de ce matériau.

Dans ce chapitre nous présentons d'une part, les différents facteurs ayant une influence sur les empilements granulaires secs induisant un volume des vides minimal, et d'autre part un état de l'art sur les différents bancs d'essais utilisés pour la mesure de la compacité du mélange granulaire. Nous présentons également les modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires. Enfin, Nous étudions et valorisons les différents types de sables (alluvionnaire, concassé et de dunes) dans la formulation de BAP.

## 2.2 Méthodes de mesure de la compacité

### 2.2.1 Méthode de versement simple

C'est une méthode qui consiste, à remplir un récipient de volume  $V$  connu, en laissant s'écouler le matériau sous l'effet de la gravité, sans aucune autre sollicitation, puis en pesant la masse  $M$  du récipient après arasement.  $M_0$  étant la masse du récipient à vide, et  $\rho$  la masse volumique réelle de l'échantillon alors, la compacité  $C_{exp}$  s'écrit :

$$C_{exp} = \frac{M - M_0}{\rho \cdot V}$$

Dans cette méthode décrite dans la norme NF EN 1097-3, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 200 mm et d'un volume égal à 3,98 l pour les gravillons, tandis que pour les sables, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 80 mm et son volume est égal à 0,56 l.

### 2.2.2 Méthode de Piquage

Pour cet essai, les cylindres utilisés sont identiques à ceux du précédent mode opératoire. Pour améliorer le compactage du matériau dans le cylindre, nous utilisons une tige, que nous enfonçons plusieurs fois dans l'échantillon (méthode inspirée de la méthode (ASTM C29-78). Pour les gravillons, la tige utilisée est en acier elle est à tête hémisphérique et à 600 mm de long avec un diamètre de 16 mm. En revanche, pour les sables, la longueur utile est de 130 mm avec un diamètre de 6 mm.

### 2.2.3 Méthode de vibration avec compression :

Dans cette méthode, la masse de l'échantillon  $M_s$  prise pour les graviers est de 7.5 kg et pour les sable 3 kg. Le cylindre utilisé à un diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm. Le cylindre est équipé d'un disque interne de même diamètre et qui permet d'appliquer une charge uniformément répartie sur toute la surface des granulats. L'ensemble est solidarisé à une table vibrante. Un poids (P) est solidarisé avec le cylindre interne, appliquant une pression totale de 10 KPa sur l'échantillon compacté. Une masse  $M_s$  de granulats est malaxée à sec de manière à homogénéiser l'ensemble, puis versée dans le cylindre. La vibration est lancée après l'application de la pression (10 KPa) [El Barrak]. Cet échantillon est soumis à une vibration de 150 Hz pendant une minute et la compacité est donnée par la moyenne (sur un minimum de deux échantillons) [F. DE Larrard] :

$$C_{\text{exp}} = \frac{M_s}{\rho}$$

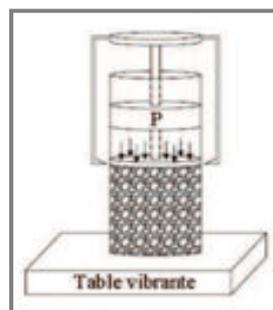


Figure 2.1 : Essai de mesure de la compacité [EL BARRAK, 2005]



Photo 2.1 : Dispositif de l'essai de mesure de la compacité [EL BARRAK, 2005]

## 2.2.4 Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses :

C'est un nouveau mode opératoire apparu en juillet 2004 développé par François de LARRAD et sont équipé dans le but de mesurer la compacité des fractions granulaires. La seule différence entre cet essai et l'essai précédent, est le mode de vibration qui est modifié par des secousses sans alimentation électrique.

Ce matériel est simple, peu coûteux, et ayant des probabilités de présenter une reproductibilité acceptable. Il devait également fournir un résultat utilisable dans les nouvelles approches d'optimisation de la granularité des matériaux de génie civil.

## 2.3 Facteurs influant l'empilement granulaire

### 2.3.1 Effet de la taille et la forme des grains

La distribution des tailles et la forme des grains sont les deux principales propriétés qui affectent l'empilement. Pour des particules sphériques unimodales supérieures à 100 microns, la compacité est indépendante du diamètre moyen et ne dépend que de l'énergie de serrage. En revanche, pour des particules inférieures à 100 microns, la compacité diminue avec la diminution du diamètre moyen. Ceci est causé par la prépondérance des forces cohésives par rapport aux forces gravitationnelles [CUMBERLAND] [GERMAN].

Pour un mélange de grain de même taille, les granulats roulés avec leurs formes sont plus compacts que les grains concassés [F. DE LARRARD]. La figure 2.2 montre bien que pour les grains roulés, la compacité réelle est comprise entre 0,6 et 0,64, tandis qu'elle est plus faible pour les grains concassés et elle est de l'ordre de 0,53 à 0,58 selon l'intensité de serrage.

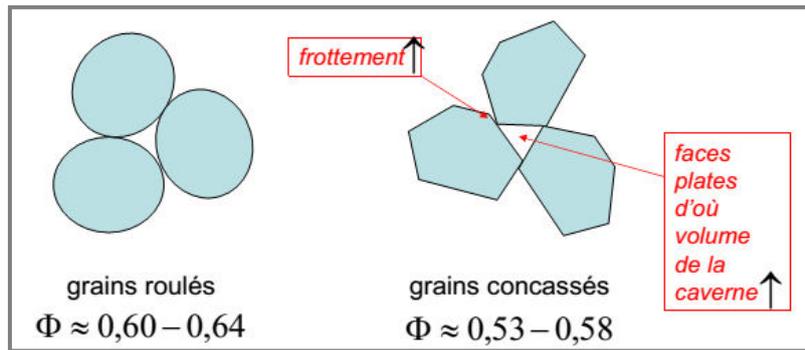


Figure 2.2 : valeur des compacités pour des grains roulé et concassé [F DE LARRARD, 2000]

### 2.3.2 Effet de la paroi du récipient

Contre et près de la paroi du récipient, le positionnement des particules n'est pas libre et des irrégularités dans l'empilement apparaissent. La compacité y est donc plus faible qu'au milieu du récipient. Cet effet, plus prononcé au niveau des coins du récipient ou pour des particules irrégulières, disparaît pour un rapport de diamètre du récipient  $d_r$  sur le diamètre des particules  $d > 10$ .

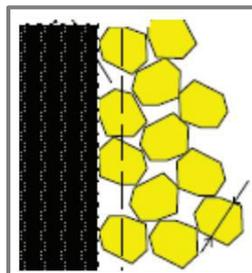


Figure 2.3 : Effet de la paroi du récipient [F. DE LARRARD, 2000]

### 2.3.3 Effet de la paroi des gros granulats

Traduit le fait qu'à la proximité d'un grain de taille supérieure, l'empilement de grains de taille inférieure est relâché.

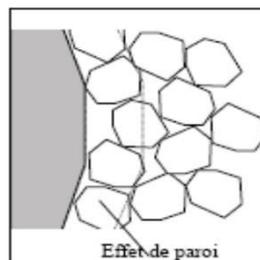


Figure 2.4 : Effet de paroi entre granulats [F. DE LARRARD, 2000]

### 2.3.4 Effet de desserrement

Traduit le fait que lorsqu'un grain de taille inférieure n'est pas suffisamment fin pour s'introduire dans la porosité de l'empilement des grains de taille supérieure, il déstructure ce dernier. En effet, en venant s'intercaler entre les gros, il induit un relâchement de la structure [F. DE LARRARD].

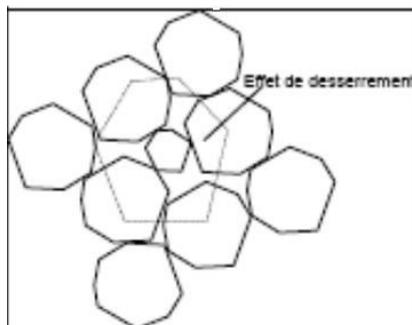


Figure 2.5 : Effet de desserrement [F. DE LARRARD, 2000]

### 2.3.5 Effet du mode de mise en place (l'énergie de serrage)

Le fait d'appliquer une énergie de serrage sur l'empilement, par exemple à l'aide de vibrations ou de chocs appliqués sur le récipient, permet d'augmenter la compacité. Ceci favorise la migration des fines particules dans les interstices formés entre les grosses [GERMAN]. Dans la figure 2.6 nous remarquons que la compacité varie d'une façon croissante avec l'augmentation de l'énergie de serrage.

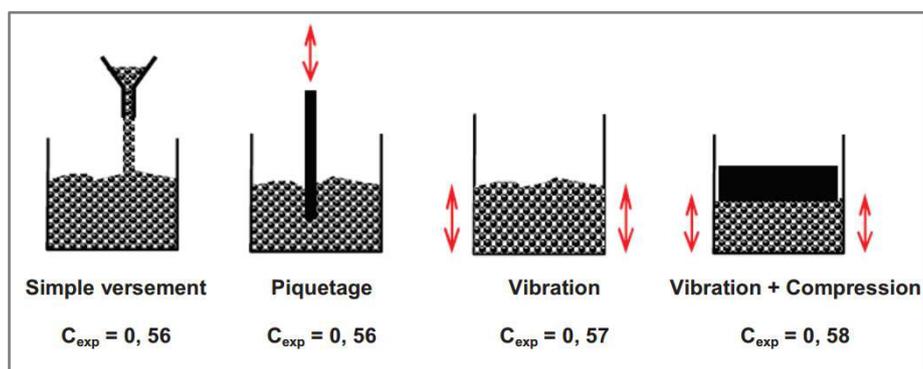


Figure 2.6 : Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés [F. DE LARRARD, 2000]

Bouterfas a réalisé en 2012, des essais de compacité sur des granulats concassés où il a utilisé plusieurs méthodes : méthode de versement simple, méthode de la tige et la méthode vibration+compression (voir Tableau II.1). Les granulats utilisés proviennent de

la carrière de l'ENG de Sidi Abdelli (wilaya de Tlemcen) : sable 0/4, et graviers de carrière 4/8, 8/16, 16/25. Les résultats trouvés montrent que les valeurs des compacités les plus grandes sont obtenues grâce à la table à secousses dont l'énergie des chocs répétés offre à l'échantillon le meilleur arrangement des grains. [BOUTERFAS].

**Tableau 2.1 : Compacités des granulats concassés pour différents modes de mise en place**

Calibre granulats	Sable 0/4	Gravier 1 4/8	Gravier 1 8/16	Gravier 3 16/25
$\rho(\text{g/cm}^3)$	2.55	2.52	2.53	2.54
Cexp(versement)	0.588	0.524	0.518	0.520
Cexp(Tige)	0.600	0.536	0.530	0.535
Cexp(table à choc)	0.655	0.591	0.577	0.579

### 2.3.6 Effet de la ségrégation

La ségrégation est principalement causée par des différences de tailles (à partir d'un rapport de tailles supérieur à 6) et de masses volumiques réelles entre particules. Ceci se traduit par une séparation entre les grosses qui migrent à la surface de l'empilement, et les plus fines qui se retrouvent au fond du récipient en passant à travers le squelette granulaire formé par les grosses. Ce phénomène est cependant moins marqué pour des particules cohésives ( $d < 100\mu\text{m}$ ) et de formes irrégulières [German, 1989].

### 2.3.7 Effet de l'étendue granulaire

KECHKAR & al. 2008 ont effectué une étude systématique sur des mélanges binaires obtenus par une combinaison de deux classes unimodales, préalablement séparées. Pour la réalisation des mélanges, ils ont procédé à une homogénéisation manuelle. Sept classes ont été préparées (a-b-c-d-e-f-g) du granulat, les tailles des grains au sens des tamis étaient les suivantes :  $0.3 < a < 0.425 < b < 0.6 < c < 1.18 < d < 2 < e < 3.35 < f < 5 < g < 6.63$  mm. Neuf mélanges, d'étendue variable, ont été préparés de 0.13 à 0.74. Pour la réalisation des mélanges, les auteurs ont choisi des proportions de petits grains  $y_2$  par incrément successif de 10%. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 2.7.

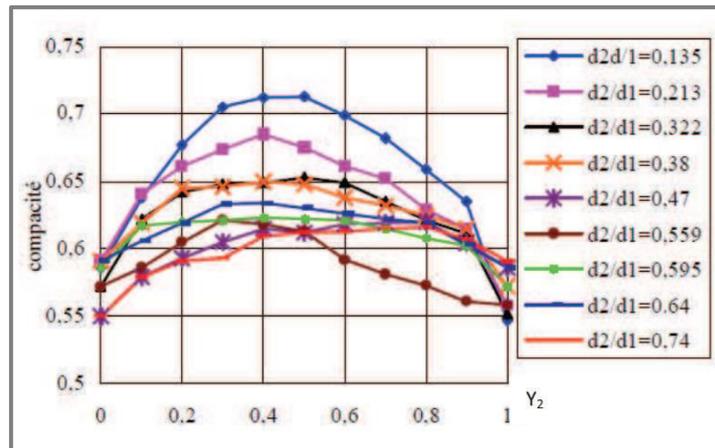


Figure 2.7 : Rôle du rapport  $d_2/d_1$  sur la compacité [Kechkar & al.2008]

La figure 2.7 montre bien que la compacité diminue lorsque le rapport  $d_2/d_1$  augmente. Ce fait expérimental confirme les travaux de Caquot sur les mélanges granulaires. Nous remarquons aussi que la variation de la compacité est plus rapide du côté des gros dominants (petits pourcentages de grains fins  $\gamma_2 \leq 0.4$ ) que du côté des petits.

## 2.4 Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires

La prévision de la compacité (ou de la porosité) d'un mélange de grains secs est une vieille question, commune à bien des domaines techniques et scientifiques. Dans le domaine de la formulation des matériaux granulaires, on se restreint généralement à la question de la détermination des granularités conduisant aux compacités les plus fortes. Devant les difficultés théoriques qu'elle soulève, l'approche générale consiste à rechercher, par l'expérience, des distributions granulaires compactes et à tenter de s'en rapprocher en combinant les matériaux dont on dispose [Sedran, 1999].

### 2.4.1 Modèle linéaire de compacité (MLC)

La prévision de la compacité maximale des mélanges granulaires a occupé plusieurs générations de chercheurs et devant la complexité de ce problème un modèle théorique fondé sur une approche essentiellement géométrique a été développé au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) appelé « modèle linéaire de compacité »,

dont l'objectif est de prévoir la compacité d'un mélange de grains sec d'étendu fini à Partir des données suivantes [STOVA & al.] :

- La granularité du mélange et les compacités propres des tranches monodimensionnelles.
- Les fonctions d'interactions entre grains (effets de paroi et d'interférence).

### 2.4.2 Mélanges binaires sans interactions

Dans un empilement de grains 1 et 2 de diamètres  $d_1$  et  $d_2$ , les deux classes de grains sont dites sans interaction si :  $d_1 \gg d_2$ , c'est à dire que l'arrangement local d'un ensemble des grains n'est pas perturbé par la présence des grains de l'autre taille [Stova ll et col, 1986]. Pour calculer la compacité  $c$  d'un mélange de ces grains, il faut tout d'abord connaitre les compacités  $\alpha_1$  et  $\alpha_1$  de chaque classe prise isolément. Par définition,  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les volumes partiels de chaque classe dans un volume unité et,  $y_1$  et  $y_2$  les proportions volumiques soit :

$$y_1 + y_2 = 1$$

$$y_1 = \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \text{ et } y_2 = \frac{\phi_2}{\phi_1 + \phi_2}$$

Le premier cas auquel on s'intéresse est celui des mélanges binaires sans interactions, c'est-à-dire pour lesquels on peut écrire :

$$d_1 \gg d_2$$

Dans le cas des gros dominants (figure III.13) on a :

$$CMLC = CMLC1 = \phi_1 + \phi_2 = \alpha_1 + \phi_2 = \frac{\alpha_1}{1 - Y_2}$$

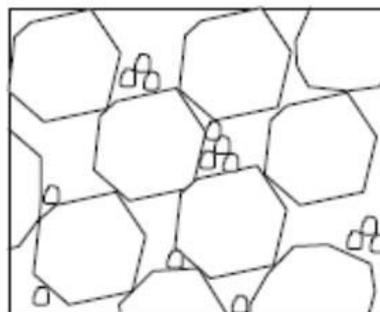


Figure 2.8 : Mélange binaire sans interaction gros grains dominants [T. SEDRAN 1999]

De celui des petits dominants (Fig. 2.9), où il vient :

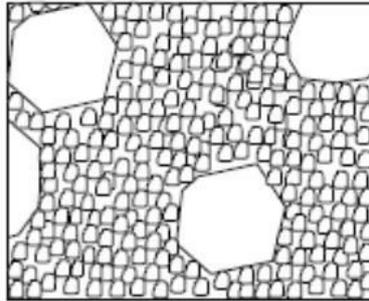


Figure 2.9 : Mélange binaire sans interaction grains fins dominants [T. SEDRAN 1999]

$$C_{MLC} = C_{MLC2} = \phi_1 + \phi_2 = \phi_1 + \alpha_2(1 + \phi_1) = \frac{\alpha_2}{1 - (1 - \alpha_2)\phi_1}$$

Le cas général est donné par :

$$C_{MLC} = \inf(C_{MLC_i}); 0 \leq i \leq 1$$

Avec :

$$C_{MLC_i} = \frac{\alpha_i}{1 - y_i \dots - y_{i-1} - (1 - \alpha_i)(y_{i+1} \dots + y_n)}$$

### 2.4.3 Modèle d'empilement virtuel

Le modèle d'empilement virtuel est une version raffinée du modèle de compacité linéaire. Il est développé au LCPC par F. DE LARRARD (1988). La différence entre ce modèle et le modèle linéaire est la prise en compte dans les calculs, le cas d'un mélange de grain de même taille mais de compacités propres différentes (Fig. 2.10), il est utilisé pour prédire les compacités virtuelles.

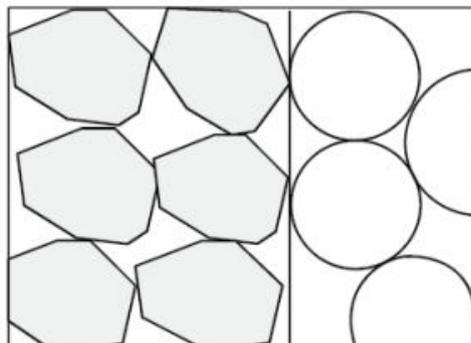


Figure 2. 10 : Deux classes ont le même diamètre [T. SEDRAN 2000]

Si on revient à la première étape de construction du modèle linéaire et en remplaçant de compacité, on se souvient que pour  $d_1 \gg d_2$  (mélange sans interactions), on a :

– Cas de gros grains dominants :

$$y_1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2}$$

– Cas de petits grains dominants :

$$y_2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \alpha_2)}$$

Donc, de Larrard a intégré les trois cas précédents et il a écrit une formulation générale :

$$y_1 = \frac{\beta_1}{1 - (1 - a_{12}\beta_1/\beta_2)y_2}$$

et

$$y_2 = \frac{\beta_2}{1 - [(1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2(1 - 1/\beta_1))y_1]}$$

Le coefficient  $\alpha_{12}$  exprime le desserrement exercé par les grains 2 sur l'empilement des grains 1. Il est égal à 0 pour une interaction nulle ( $d_1 \gg d_2$ ) et à 1 pour une interaction totale ( $d_1 = d_2$ ). De même, le coefficient  $b_{21}$  illustre l'effet de paroi subi par l'empilement des grains 2 au voisinage d'un grain 1. Il admet les mêmes conditions aux limites que le coefficient  $a_{12}$ . D'un point de vue pratique, leurs expressions sont déterminées en utilisant des données expérimentales pour des mélanges binaires.

Finalement, pour le cas d'un mélange de  $n$  classes, l'expression de la compacité virtuelle d'un empilement s'écrit comme suit :

$$\gamma = \min(\gamma_i) \quad \text{avec } 1 \leq i \leq n$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left(1 - \beta_j + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right)}$$

Avec :

$\gamma_i$  : compacité virtuelle du mélange pour la classe "i" dominante.

$n$  : nombre de classes granulaires.

$\beta_i$ : compacité propre virtuel de la classe "i".

$y_i$  : proportions volumiques (par rapport au volume solide total).

$a_{ij}$ : effet de desserrement.

$b_{ij}$ : effet de paroi.

Ce modèle doit donc être complété par la détermination des fonction  $a_{i,j}$  et  $b_{i,j}$ .

### 2.4.4 Modèle de suspension solide (MSS)

Le Modèle de Suspension Solide est une première tentative de prédiction de compacités réelles (expérimentales) [Sedran et col., 1994]. Il est dérivé des travaux de Mooney, sur la viscosité de suspensions concentrées de particules solides [MOONEY]. Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse que la viscosité relative de référence ( $\eta^*r$ ) d'un arrangement de grains consolidé est une valeur finie.

La viscosité de référence est définie comme étant l'indice de l'énergie requise pour bien consolider le béton. Plus la technique de mise en place est énergétique, plus la viscosité de référence du béton est grande. Pour un arrangement unimodal de grains de diamètre  $d_i$ , la viscosité de référence peut être calculée par l'équation suivante :

$$\eta_r^* = \exp\left(\frac{2.5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}}\right)$$

Avec :

$\beta_i$  représente la compacité virtuelle d'une classe de grains (i).

$\alpha_i$  : compacité propre de la classe "i".

Pour des sphères, en prenant  $\alpha_i = 0,64$  et  $\beta_i = 0,74$ , on trouve  $\eta_r^* = 1,36 \cdot 10^5$ . La compacité d'un empilement multimodal est alors donnée par l'équation implicite suivante :

$$\eta_r^* = \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{2.5y_i}{\frac{1}{C_{MSS}} - \frac{1}{\gamma_i}}\right)$$

Où  $\gamma_i$ , est la compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i, de compacité propre virtuelle  $\beta_i$ , est dominante et  $C_{MSS}$  est la compacité réelle de l'empilement.

#### Calibration du modèle :

Pour le calcul de la compacité réelle  $C_{MSS}$ , il convient à présent de déterminer les coefficients d'interaction  $a_{ij}$ , et  $b_{ij}$  par voies expérimentales, puis d'évaluer la précision du modèle par comparaison de ses prévisions avec l'expérience. Pour ce faire 5 classes élémentaire ont été choisie pour deux familles des granulats roulés ( $0.5 < R_05 < 0.63$ ,  $1 < R_1 < 1.25$ ,  $2 < R_2 < 2.5$ ,  $4 < R_4 < 5$  et  $8 < R_8 < 10$ ) et concassés ( $0.5 < C_05 < 0.63$ ,  $1 < C_1 < 1.25$ ,  $2 < C_2 < 2.5$ ,  $4 < C_4 < 5$  et  $8 < C_8 < 10$ ). T. SEDAN & al. (1994) ont montré que l'hypothèse selon laquelle les coefficients d'interaction ne dépendent que du rapport des tailles n'était qu'une approximation commode [T. SEDRAN].

### 2.4.5 Modèle d'empilement compressible (MEC)

Le modèle d'empilement compressible (MEC), est la troisième génération des modèles développés au LCPC [de Larrard et col, 2000]. Grâce à ce modèle, la compacité réelle d'un mélange (noté CMEC) à plusieurs classes est prédite à partir de la connaissance des compacités de chaque classe unidimensionnelle, de la distribution granulaire du système et de l'énergie de la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle. La compacité virtuelle ( $Y$ ) est inaccessible à l'expérience.

#### Calibration du modèle :

Ce modèle a été validé sur de nombreux mélanges de matériaux utilisés dans le génie civil : mélange binaire, ternaire, pour des granulats roulés ou concassés et avec le procédé de mise en place : vibration associée à une force de compression de 10 kPa. À partir des résultats expérimentaux sur des mélanges binaires, deux formules pour déterminer les coefficients d'interaction ont été proposées par Larrard .

Concernant les granulats concassés, de Larrard a trouvé la même tendance que lors des expériences d'étalonnage, avec toutefois une erreur moyenne supérieure à celle des granulats roulés, égale ici à 1,31%. L'optimum expérimental est obtenu pour le mélange 0,32/0,15/0,53, avec une compacité de 0,7993. L'optimum théorique est obtenu pour les proportions 0,29/0,15/0,56, avec une valeur optimale égale à 0,7854 et la compacité expérimentale correspondante, calculée par interpolation linéaire, est de 0,7826. L'erreur est ici égale à 1,67%.

Pour les séries correspondant aux grains roulés, l'erreur moyenne est de 0,76%, valeur comparable à celle des expériences d'étalonnages sur mélanges binaires. Le mélange 0,22/0,25/0,53 conduit à la valeur expérimentale optimale de 0,7945 tandis que la valeur théorique de cette combinaison est de 0,7897. D'après le modèle, l'optimum doit être obtenu pour le mélange 0,20/0,19/0,61, avec une compacité de 0,7959 ; la valeur expérimentale correspondante, obtenue par interpolation linéaire, est de 0,7764. On peut ainsi juger la fiabilité du modèle qui n'a "manqué" la compacité réelle que de 0,0179 points.

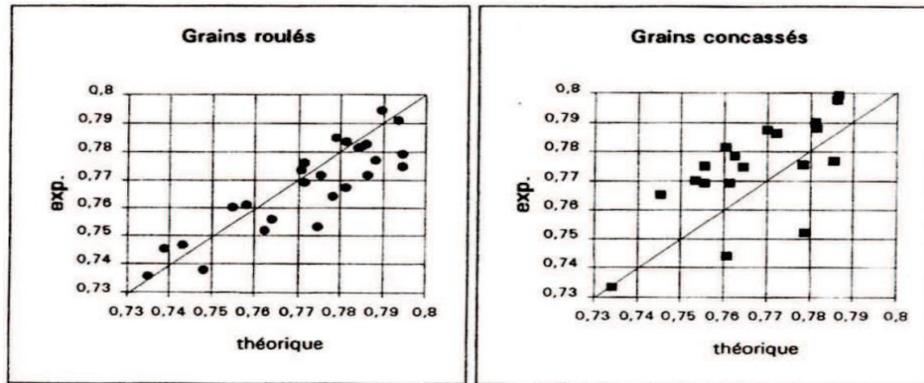


Figure 2.11 : Comparaison entre prévision et mesures pour les mélanges ternaires  
[F. DE LARRARD 1996]

## 2.5 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

Baron et Ollivier ont montré que la formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux graviers. Il est connu que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte [Baron & al.]. De même l'ouvrabilité d'un béton est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. À quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

T. SEDRAN et F. DE LARRARD ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le principe de formulation se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante [T. SEDRAN & al.].

Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage.

à l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton-Lab Pro2 et 3), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.). Ses

auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

Dans la même idée, ROSHAVELOV a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

## **2.6 Sables**

Selon la norme NF EN 12620+A1 de juin 2008, le sable, destiné à la confection de béton, mortier et enduit, est un ensemble des granulats grains minéraux dont la dimension maximale  $D$  n'excédant pas à 4 mm. Le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage ou du traitement des granulats artificiels.

### **2.6.1 Classification**

#### **a. Selon son origine ;**

Le sable, en fonction de son origine, peut être classé en quatre catégories ;

- Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières), de roches massives (sédimentaire, éruptives, métamorphique, etc.) ou de dunes. Le sable naturel n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition.

#### **b. Selon sa composition ;**

En fonction de sa composition minéralogique (teneurs en silice, alumine et chaux), le sable peut être classé en quatre catégories (tableau 2).

**Tableau 2.2 : Classification de sables en fonction de sa composition (teneurs en % massique)**

Composition	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Siliceux	70 à 90	0,1 à 1	1 à 10
Silico-alumineux	50 à 70	1 à 5	10 à 25
Silico-calcaires	15 à 20	15 à 30	3 à 10
Calcaires	2 à 10	30 à 50	0,5 à 2

**c. Selon sa densité ;**

Selon la densité de sable, on distingue trois types ;

- Léger : de masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m<sup>3</sup>, et le plus usuel est à base d'argile expansée, de schiste expansés ou de laitier expansé.
- Courant : de masse volumique entre 2000 et 3000 kg/m<sup>3</sup>, et il est généralement les basaltes, quartzites, grès, porphyre, diorite, granites, schistes, laitier.
- Lourd : de masse volumique varie de 4000 à 8000 kg/m<sup>3</sup>, et le plus utilisé est la barytine (d'une densité absolue de 4,2 à 4,7), la magnétite (d'une densité absolue de 4,5 à 5,1), les riblons (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8) et la grenaille (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8).

**d. Selon sa forme ;**

Selon la forme de sable, on peut désigner deux grands types ;

- Roulé : dont la forme a été acquise par l'érosion de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières) ou des dunes.
- Angulaire ou Concassé : dont la forme a été obtenue par abattage et concassage de roches massives et dures.

**2.6.2 Types de sable****2.6.2.1 Sable alluvionnaire**

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux.

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin ;

- $1,8 \leq MF \leq 2,2$  ; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2,2 < MF \leq 2,8$  ; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2,8 < MF \leq 3,2$  ; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations.

#### **2.6.2.2 Sable de carrière**

Le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires.

Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de leurs taux élevés en fines qui varient de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers et bétons. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sables roulés, ce qui offre plus de résistances au béton.

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux.

#### **Instruction interministérielle :**

La présente instruction a pour objet de définir les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux.

On entend par sable de concassage le produit obtenu à partir de roches massives après les opérations de concassage et de criblage dans une station de production de granulats.

Le sable de concassage peut être utilisé seul dans le béton ou en mélange avec un autre sable. L'ensemble du mélange doit répondre aux spécifications de la présente instruction.

Les caractéristiques des sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux doivent satisfaire aux exigences suivantes :

**A.** La dimension maximale  $D$  du granulat doit être ;  $D \leq 3 \text{ mm}$

**B.** La teneur en fines TF, définie comme le passant à 0,063 mm, doit être ;

- $TF \leq 18 \%$  pour le béton hydraulique de classes inférieures à 20MPa,
- $TF \leq 15 \%$  pour le béton hydraulique de classes comprises entre 20 et 35 MPa,
- $TF \leq 12 \%$  pour le béton hydraulique de classes supérieures à 35 MPa,
- $TF \leq 15 \%$  pour l'enrobé bitumineux ;

**C.** Le module de finesse MF doit être compris dans l'intervalle suivants ;

- $2,15 \leq MF \leq 3,15$  pour le béton hydraulique de classes supérieures à 20 MPa,
- $1,8 \leq MF \leq 3,2$  pour le béton hydraulique de classes inférieures à 20 MPa et l'enrobé bitumineux.

**D.** La propreté du sable déterminée par la mesure de l'équivalent de sable (ES) doit avoir les valeurs spécifiées suivantes :

- $ES \geq 45$  pour les enrobés bitumineux,
- $ES \geq 60$  pour les bétons hydrauliques de classes inférieures ou égales à 35 MPa,
- $ES \geq 65$  pour les bétons hydrauliques de classes supérieures à 35 MPa,
- Si le ES du sable est inférieur aux valeurs spécifiées, il est recommandé de faire l'essai au bleu de méthylène. La valeur au bleu de méthylène doit être inférieure ou égale à 1.

### 2.6.2.3 Sable de dune

Le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du

quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir.

## 2.7 Effets de types de sables sur les BAP

### 2.7.1 Effet sur la composition

Une recherche des A. R'mili, en 2009, a étudié l'incorporation de sable concassé (SC) de nature calcaire et de sable de désert (SD) de nature silico-calcaire dans la formation des BAP. Ces sables ont été remplacés par un sable roulé (SR) siliceux. Cette étude consiste à analyser l'influence de plusieurs combinaisons de sables sur les paramètres de la composition du BAP. Le procédé de formulation de BAP adopté est basé sur le remplissage du vide de la pâte granulaire. La substitution de SC par SR permet, pour toutes les proportions, à diminuer les vides granulaires, à augmenter la compacité du mélange et à diminuer l'eau et l'addition de proportion de fillers. Ces résultats ont été obtenus pour une substitution modérée de SD/SC (<40%) et un taux faible de SD/SR (20%). Pour des proportions plus élevées, l'ajout de SD à SC ou à SR n'a pas amélioré les caractéristiques physiques du mélange granulaire de BAP. Les proportions optimales sont données sur les courbes de la figure 2.1. On peut monter les combinaisons optimales des sables suivantes :

- 30% de SR et 70 % de SC (figure 2.1(a)),
- 15% de DS et 85% de CS (figure 2.1(b)),
- les proportions de SD et de SR ne montrent pas un minimum net ; la porosité augmente linéairement avec la SD ce qui indique que le SD n'a pas amélioré la compacité des mélanges en raison de leurs finesses élevées.

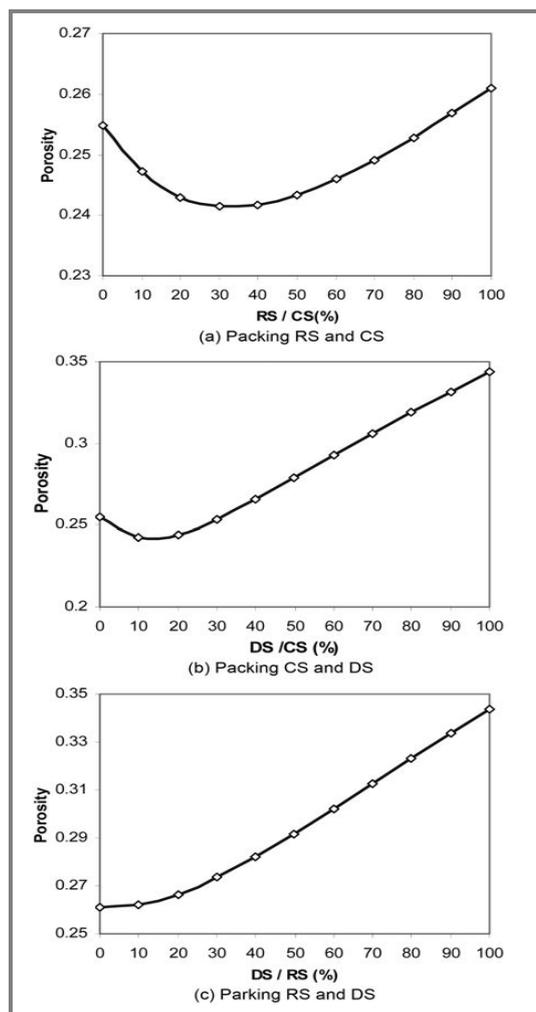


Figure 2.12 : Proportion des sables [A. R'MILI, 2009]

## 2.7.2 Effet sur les propriétés rhéologiques

Plusieurs recherches ont été menées afin d'avoir l'influence des taux de substitution en sables de carrière et de dune sur les comportements des BAP à l'état frais.

La recherche de A. R'mili, en 2009, a étudié également le comportement des BAP contenant différents types de sables aux états frais et durcis. Ces sables, avec différentes tailles, se composent de plusieurs combinaisons de sable roulé (SR), sable concassé (SC) et sable du désert (SD). Les résultats des essais expérimentaux ont montré une amélioration de la maniabilité de BAP frais par la combinaison de différents sables de granulométrie variée. L'addition de SD à CS ou à SR a permis l'augmentation de la viscosité du mélange.

Dans cette étude, la formulation de BAP était basée sur le remplissage des vides intergranulaires par la pâte de liant afin d'obtenir une compacité maximale de la mixture.

Le mélange granulaire est constitué de gravier et de plusieurs combinaisons des trois sables (SR, SR et SD). Ces combinaisons seront comparées avec les mélanges optimaux qui sont déterminés par l'emballage de modèle compressible. Les matériaux utilisés pour la composition de ces BAP sont :

- un sable roulé (SR) 0/2,5 siliceux et de teneur en fines de 1,8%,
- un sable concassé (SC) calcaire 0/5 et des amendes contenu de 12,44%,
- un sable de désert (SD) 0/0,4 siliceux de teneur en fines de 14,4%,
- un gravier concassé (G) de calcaire 4/16 (de la même carrière de SC),
- une filler de calcaire (F) 0/0,112 avec 96,6% <0,080 mm,
- un superplastifiant (SP) : un haut réducteur d'eau de nouvelle génération,
- un ciment (C) de type CEM I 42,5 conformes à la norme tunisienne NT 47.01.

Les BAP formulés sont soumis à des tests de maniabilité à l'état frais pour différents dosages de SP (0,7, 1, 1,3 et 1,5%). Les figures (2.2), (2.3), (2.4) et (2.5) présentent respectivement les résultats des essais d'étalement au cône d'Abrams, d'écoulement à l'entonnoir en V et des capacités de remplissage à la boîte en L et à la boîte en U.

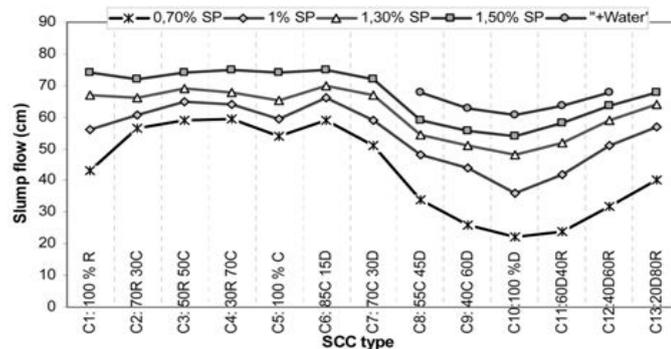


Figure 2.13 : Étalement au cône d'Abrams pour différents combinaisons de sable et pourcentages de SP

[A. R'MILI, 2009]

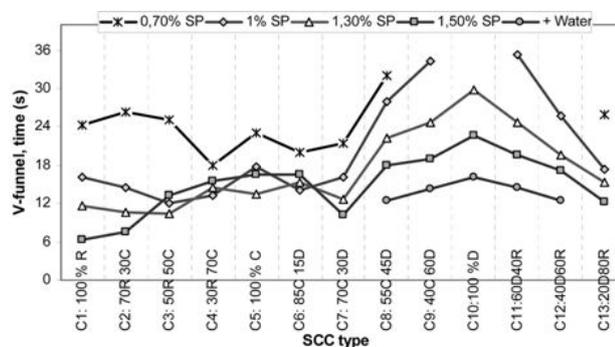


Figure 2.14 : Temps écoulement à l'entonnoir en V pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP [A. R'MILI, 2009]

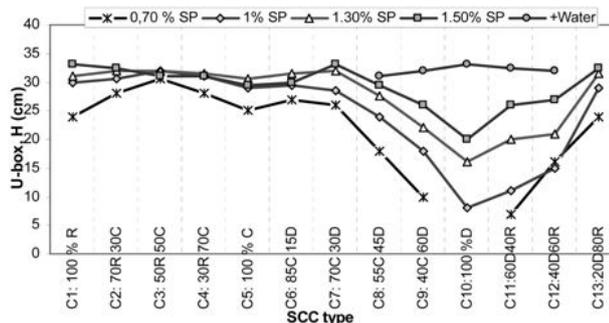


Figure 2.15 : Capacité de remplissage à la boîte en U pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP [A. R'MILI, 2009]

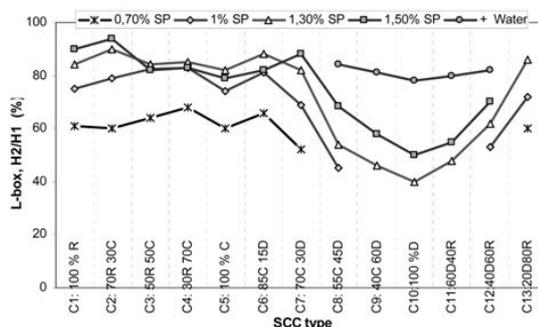


Figure 2.16 : Capacité de remplissage à la boîte en L pour différentes combinaisons de sable et pourcentages de SP [A. R'MILI, 2009]

A. R'mili & al., en 2011, ont fait une autre étude sur l'effet du remplacement progressif du sable de concassage (SC) par le sable du désert (SD) sur le comportement à l'état frais et durci des BAP. Dans cette étude, ils ont confectionné différents mélanges de BAP en utilisant des matériaux et produits fabriqués en Tunisie ; un ciment de type CPA-CEM I 42,5, un superplastifiant SIKA (SP), un gravier (4/16), un filler calcaire et deux types de sables SC (0/6,3) et SD (0/0,315). Le sable de concassage, à granularité étalée, est un sous-produit de concassage des roches massives. Le sable du désert est un sable extra-fin qui est caractérisé par une distribution serrée de grosseur des grains. Renfermant naturellement des teneurs importantes en fines, ces deux sables peuvent être des composants intéressants pour la confection des BAP. Les chercheurs ont montré que les paramètres d'ouvrabilité (fluidité, viscosité et capacité de remplissage) des BAP sont améliorés lorsque le SC est partiellement (< 30%) remplacé par le SD. Cependant, à une teneur élevée (> 30%) en SD, des quantités supplémentaires en eau et en superplastifiant sont nécessaires, pour répondre aux exigences des BAP.

L. Zeghichi & al., en 2012, ont comparé les propriétés aux états frais et durci des BAP fabriqués à la base de sable concassé et sable de dune. Le sable de dune est un matériau fin caractérisé par une forte porosité intergranulaire, grande surface et ayant un module de

finesse faible, d'autre part, le sable concassé possède un taux élevé de fine et ayant des grains de formes minces et irrégulières, ce qui influent sur l'ouvrabilité du béton. La quantité de sable de dune varie de (0, 50 et 100%) par poids. Les résultats montrent que les propriétés rhéologiques sont favorables avec l'utilisation de sable de dune.

### 2.7.3 Effet sur les propriétés mécaniques

La recherche des A. R'mili, en 2009, a montré que l'addition des SD à SC ou à SR a diminué les résistances mécaniques de BAP. Cependant, les combinaisons SC-SR a augmenté la résistance à l compression et à la traction de BAP. Dans cette étude, le critère utilisé pour le choix des formulations, est de telle sorte que les BAP ont un étalement presque identique (65 cm). Les figures 5 et 6 présentent les points forts de ces BAP.

La figure 2.7 montre que les résistances à la compression les plus élevés sont obtenues pour le BAP contenant SC, en particulier pour le mélange optimal C4 et C5 (48,6 et 47.02 MPa respectivement). Ces résistances résultent de la grande taille des grains de SC. Les BAP ayant une quantité élevée de SD possèdent des faibles résistance à la compression, et ceci est dû à une grande quantité d'eau ( $0,57 < E / C < 0,62$ ) et à une grande quantité de matière de remplissage ( $F/C > 0,5$ ) . Pour les dosages modérés en DS ( $\leq 30\%$ ), ces résistances sont satisfaisants (ex : 38 MPa à C7 contenant 30% de SD et de 70% de CS).

La figure 2.8 montre que les résistances à la traction sont élevées pour le BAP contenant de SC (6,55 et 6,43 MPa pour C4 et C5 respectivement). Cela est dû à l'adhérence de la pâte sur les granulats concassés et à la nature calcaire identique des agrégats et des fillers. Pour les BAP à dosage élevé en SD, les résultats de résistance à la traction sont attirants (ex : 3,5 MPa pour C10 ayant 100% de SD). Ces résistances élevées sont dues probablement à l'absence des vides intergranulaires en raison de la présence de quantités élevées de pâte de liant.

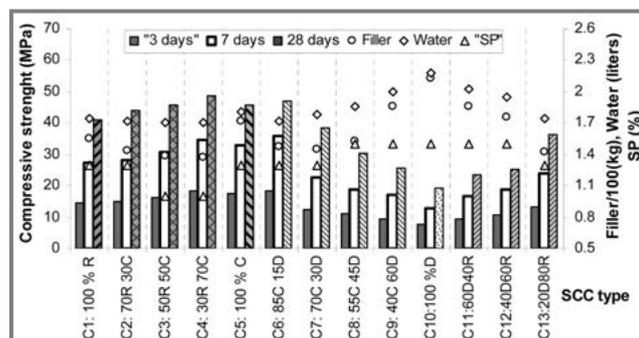


Figure 2.17 : Résistance à la compression des BAP sélectionnés (R = SR, C = SC, D = SD) [A. R'MILI, 2009]

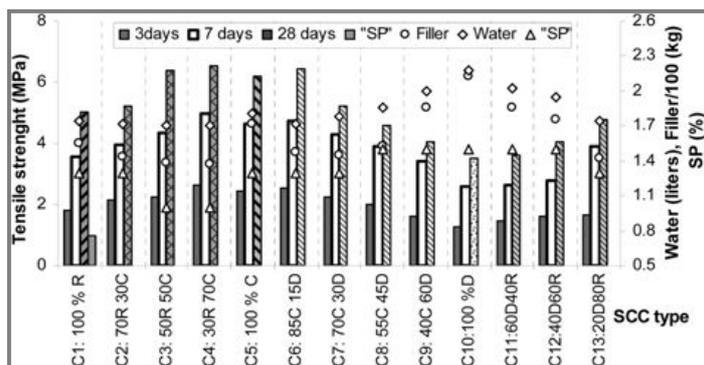


Figure 2.18 : Résistance à la traction des BAP sélectionnés (R = SR, C = SC, D = SD) [A. R'MILI, 2009]

L'autre étude des A. R'mili, en 2011, a montré que les résistances à la compression et à la traction à 7 et 28 jours sont diminuées en ajoutant le SD, et elles atteignent des valeurs élevées pour des teneurs faibles en SD et décroissent au delà de ce pourcentage (figure 2.9). Les résistances les plus élevées sont obtenues pour les BAP à fort dosage en SC. Les résistances des BAP sont meilleures que celles des BO confectionnés avec les mêmes matériaux.

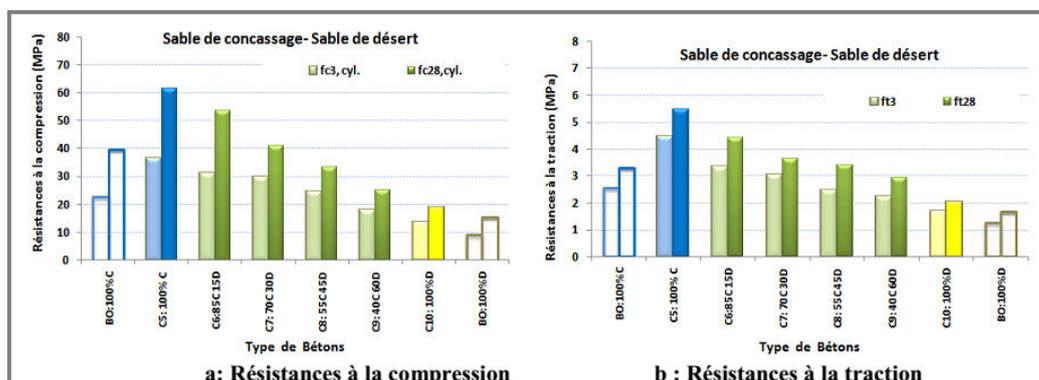


Figure 2.19 : Résistances mécaniques des BAP retenus et des BO témoins [A. R'MILI, 2009]

D'après la recherche des L. Zeghichi & al., en 2012, le sable concassé a une meilleure contribution au développement des résistances mécanique par rapport au sable de dune, et en particulier à la résistance à la traction. En effet, les essais de la résistance à la compression des formulations montrent que le BAP de 100% de sable de dune possède des résistances plus faibles que celles de BAP substitué partiellement de sable concassé (50% SR et 50% SC) et le BAP formulé avec 100% de sable concassé offre les meilleures résistances. La résistance à la traction mesurée à 28 jours pour les différents BAP est proportionnelle à la résistance à la compression au même âge, à l'exception de BAP de 100% de sable concassé qui offre des meilleures résistances à la compression.

## 2.8 Bilan

Les recherches antérieures ont montré que la combinaison de plusieurs types de sables permet d'augmenter de la compacité du mélange granulaire, et par conséquent de réduire les vides intergranulaires. Par ailleurs, cette combinaison contribue à l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BAP. En effet, avec un dosage donné en le superplastifiant, les propriétés à l'état frais sont optimales pour une proportion de 30% de sable de dune ou des proportions de 30 à 40% de sable concassé. Les résistances mécaniques de BAP sont augmentées par l'ajout de sable concassé au sable roulé et leur optimum est atteint pour 70% de sable concassé. Cependant, ces résistances à la compression sont diminuées par l'addition de sable de dune au sable concassé et leur optimum est obtenu pour 15% de sable de dune. De la même manière, les résistances à la compression sont diminuées lorsque le sable roulé est remplacé par le sable de dune. Par ailleurs, les résistances à la traction sont élevées pour le BAP contenant de sable de carrières. Pour les BAP à dosage élevé en sable de dune, les résultats de résistance à la traction sont attirants.

# CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS

---

## 3.1 Introduction

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination [A. GUETTALA]. Par ailleurs, pour évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques des formulations confectionnées, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

Ce chapitre, présente les caractéristiques de matériaux utilisés dans ce projet, ainsi que les différents essais expérimentaux. Ajoutons que ce travail expérimental a été effectué suivant les normes Européennes en vigueur, sauf les essais de la boîte LCPC les BAP frais, qui ne sont pas normalisés.

## 3.2 Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de cette étude, nous avons confectionné les BAP en se basant sur les matériaux locaux suivants :

### 3.2.1 Sable

Nous avons utilisé trois types des sables de même classe granulaire 0/3 et prélevés tous de la région de Djelfa ;

- sable alluvionnaire (SA), roulé, de nature siliceuse et issu de gisement de rivière,
- sable de carrière(SC), concassé et de nature calcaire,
- sable de dune (SD), roulé et de nature siliceuse.

Les échantillons de différents types de sables ainsi que leurs analyses granulométriques et leurs caractéristiques physiques sont représentées à sont représentés respectivement dans la photo 3.1, la figure 3.1 et le tableau 3.1.



Photo 3.1 : Échantillons des sables

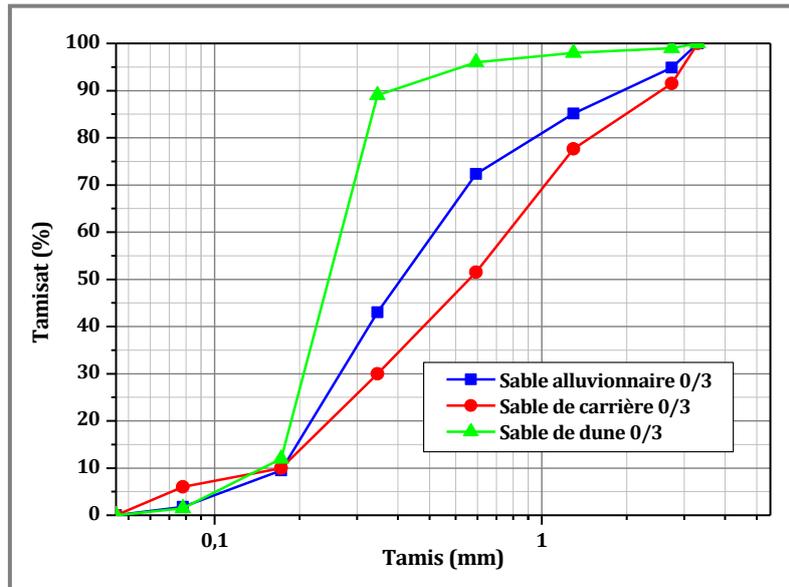


Figure 3.1 : Analyse granulométrique des sables

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques des sables

Caractéristiques physiques	SA	SC	SD
Densité apparente	1,44	1,41	1,45
Densité absolue	2,54	2,59	2,50
Degré d'absorption [%]	0,32	0,35	0,29
Module de finesse	1,85	2,40	1,06
Équivalent de sable [%]	77	76	79
Équivalent de sable [%]	77	76	79

### 3.2.2 Graviers

Nous avons utilisé des graviers concassé d'origine calcaire et ayant deux classes granulaires différentes 3/8 et 8/15 provenant de la carrière de Zaccar à Djelfa.

Afin d'obtenir une bonne adhérence entre la pâte du liant et les graviers, nous avons procédé à leur lavage et qui, une fois séchés, ont été conservés dans des sacs bien fermés.

L'analyse granulométrique et les propriétés physiques des graviers sont représentées respectivement dans la figure 3.2 et le tableau 3.1.

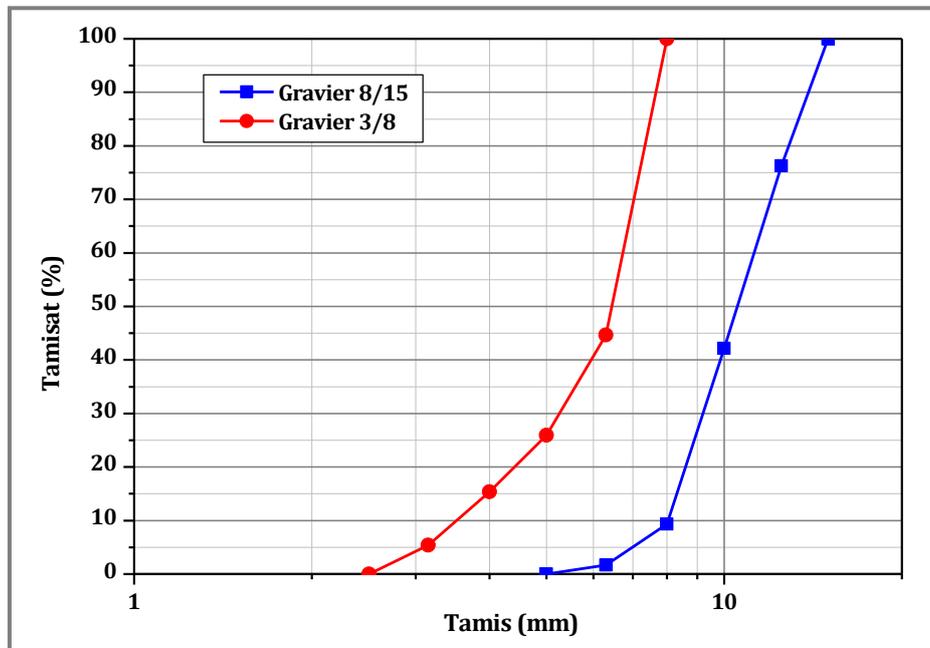


Figure 3.2 : Analyse granulométrique des graviers

Tableau 3.2 : Propriétés physiques des gravillons

Caractéristiques physiques	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Densité apparente	1.26	1.26
Densité absolue	2.59	2.59
Coefficient Los Angeles [%]	23	23
Degré d'absorption [%]	0,41	0,41

### 3.2.3 Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment Portland CPA-CEM I 42,5 provenant d'une unique livraison de la cimenterie LAFARGE à M'sila. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude. Ses analyses chimiques et physiques communiquées par le producteur sont données respectivement par les tableaux 3.3 et 3.4.

**Tableau 3.3 : Analyse chimique de ciment**

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	L.O.I
Teneur [%]	21.36	4.98	3.63	65.86	2.06	0.93	0.08	0.77	0.02	2.48

**Tableau 3.4 : Propriétés physiques des ciments**

Caractéristique physique	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1130
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	3100
Surface spécifique du ciment (cm <sup>2</sup> /g)	3917
Consistance normale (%)	27.48
Début de prise	2 h 20 mn
Fin de prise	3 h 23 mn

### 3.2.4 Fillers calcaires

Nous avons utilisé des fillers calcaires broyés provenant de laboratoire Génie civil (Université de Laghouat). Ils possèdent les propriétés physiques suivantes ; densité absolue de 2,70, densité apparente de 1,14 et surface spécifique de 4180 cm<sup>2</sup>/g (photo 3.2). Ses analyses chimiques sont données par la photo 3.2, le tableau 3.5 et la figure 3.3.



**Photo 3.2 : Fillers calcaires**

**Tableau 3.5 : Analyse chimique de fillers calcaires**

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	PAF
Teneur [%]	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3

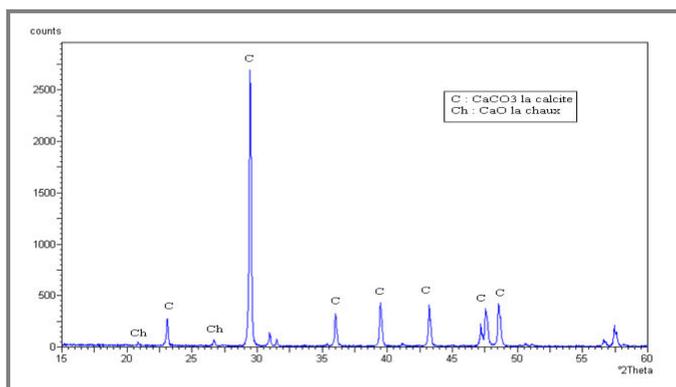


Figure 3.3 : Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires

### 3.2.5 Superplastifiant

Nous avons utilisé un superplastifiant sous forme de liquide brune, conçu à base de polycarboxylates Ce haut réducteur d'eau est produit par SIKA sous le nom commercial Viscocrete Tempo 10 (Photo. 3.3). Le tableau 3.6 indique ses caractéristiques physiques et chimiques.



Photo 3.3 : Superplastifiant

Tableau 3.6 : Caractéristiques du superplastifiant

SIKA Viscocrete TOMPO 10	Densité	pH	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Extrait sec	Cl-
	1.08 ± 0.005	6 ± 1	≤ 1%	30.2 ± 1.3 %	≤ 0.1%

### 3.2.6 Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau utilisée robinet de l'Université de Djelfa, qui contient peu de sulfate er dont la température est de et 20°± 1°C. Nous supposons que sa qualité répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

### 3.3 Essais réalisés

Durant notre étude, nous avons réalisé trois familles d'essais pour caractériser les bétons au laboratoire ;

- Essais de la compacité des granulats et béton.
- Essais de caractérisation des bétons à l'état frais.
- Essais de la résistance à la compression des bétons

#### 3.3.1 Essais de la compacité

La compacité des granulats (graviers et sables) et des bétons est mesuré par une moule cylindrique rigide de 5 litres de volume (Pho. 3.4 & 3.5 & 3.6). Le mode de versement est réalisé sans aucune énergie extérieure.



Photo 3.4 : Essai de la compacité des sables



Photo 3.5 : Essai de la compacité des graviers



Photo 3.6 : Essai de la compacité des bétons

### 3.3.2 Essais réalisés à l'état frais

Comme rapporté au chapitre 1, il existe dans la littérature plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des BAP. Cependant, dans notre étude, nous nous basons seulement sur les essais résumés au tableau 3.7. Le programme de ces essais est représenté aux photos 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10.

**Tableau 3.7 : Programme des essais réalisés à l'état frais**

Type d'essais	Paramètre	Valeur mesurée	indice	cible
étalement au cône d'Abrams	fluidité	diamètre de l'étalement	SF	$\geq 660$ mm
boite LCPC	fluidité	longueur de l'étalement	L	$\geq 330$ mm
boite en L	déformabilité	taux de remplissage	PL	$\geq 0,8$
stabilité au tamis	stabilité	indice de ségrégation	SR	$\leq 15\%$



**Photo 3.7 : Essai de l'étalement au cône d'Abrams**



**Photo 3.8 : Essai de la boîte LCPC**



Photo 3.9 : Essai de la capacité de remplissage à la boîte en L



Photo 3.10 : Essai de la résistance à la ségrégation au tamis

### 3.3.3 Essai de compression réalisé à l'état durci

Il est réalisé, conformément à la norme EN 12390-3, sur des éprouvettes cubiques de (10x10x10 cm<sup>3</sup>) mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 7 et 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uniaxial des cylindres est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500 kN en compression (photo 3.11).



Photo 3.11 : Essais de compression

### **3.4 Bilan**

Bien que les caractéristiques relatives aux matériaux utilisés ne soient pas tous disponibles, celles en notre disposition sont suffisantes pour réaliser notre étude expérimentale. De plus, il semble que la qualité de ces matériaux se classe parmi les meilleures dans le marché Algérien. D'autre part, les essais réalisés au cours de notre recherche permettent d'évaluer l'essentiel des propriétés des bétons confectionnés.

# CHAPITRE 4 : OPTIMISATION DES BAP PAR COMPACITÉ ET TYPES DE SABLES

---

## 4.1 Introduction

Le BAP est un mélange de granulats, de ciment, d'addition minérale, d'eau, de superplastifiant et éventuellement d'un agent colloïdal. On peut obtenir une infinité de bétons, en faisant varier les proportions de ces constituants, et il est certain que, parmi ces bétons, tant par leur nature propre qu'en raison du travail à exécuter, certains seront mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin, les moins nombreux, seront bons.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, du dosage en liant, d'eau, ainsi que d'adjuvants afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Ce chapitre présente la problématique soulevée dans les chapitres précédents concernant le développement des formulations des BAP. Aussi, il énonce l'objectif visé au cours de ce projet de recherche ainsi que les paramètres étudiés pour l'atteindre. Finalement, les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés en détail pour faire ressortir les meilleures formulations de BAP.

## 4.2 Problématique

Le problème de la formulation des bétons s'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe du superplastifiant et de l'agent colloïdal d'une part et des additions minérales d'autre part.

De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes, relativement peu précises et essentiellement basées sur les résultats empiriques. Elles permettent généralement d'obtenir un BAP possédant les propriétés mécaniques désirées mais elles ne permettent pas toujours d'atteindre la maniabilité souhaitée. C'est pourquoi les

chercheurs ont, par tâtonnement, optimisé les BAP par leur expérience acquise. Donc, l'optimisation de la formulation d'un BAP est encore plus un art qu'une science.

Par ailleurs, la plupart des bétons, en Algérie, sont exclusivement fabriqués avec de sable alluvionnaire. Cependant, beaucoup de régions du pays souffrent d'un manque remarquable en sable alluvionnaire approprié. En outre, les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, l'épuisement des gisements alluvionnaires et l'éloignement des chantiers par rapport à ces gisements sont également des facteurs qui encouragent à chercher d'autres types de sables. En effet, le sable concassé produit énormément par les carrières ainsi que le sable de dunes disponible de quantités inépuisables dans le sud du pays ne sont pas encore exploités sérieusement dans la formulation des bétons. Ces sables, qui contiennent normalement des teneurs élevées en fines, se présentent comme une alternative attirante du point de vue technique, économique et écologique pour la formulation des bétons.

### **4.3 Objectif de la recherche**

Pour ces raisons, le présent mémoire examine l'effet de l'incorporation de sable de carrière et le sable de dune, en remplaçant le sable alluvionnaire, sur la compacité de la formulation de BAP. Ces formulations développées doivent avoir un meilleur comportement rhéologique vis-à-vis de l'étalement (fluidité), la capacité de remplissage (déformabilité) et la résistance à la ségrégation (stabilité). Elles doivent aussi posséder de meilleures performances mécaniques.

### **4.4 formulations des BAP**

Les formulations des BAP sont basées sur le remplissage des vides intergranulaires par la pâte de liant afin d'obtenir une compacité maximale de mélange. Le tableau 4.1 décrit les constituants des BAP confectionnés.

**Tableau 4.1 : Compositions des BAP destinés à l'optimisation**

Constituants	Dosage [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [l/m <sup>3</sup> ]
Sables 0/3	786	300,00
Gravier 3/8	393	150,00
Gravier 8/15	393	150,00
Ciment	400	126,98
Filler Calcaire	150	60,00
Eau Efficace	190	190,00
Superplastifiant	8,25	7,71
Air		15,31
Liant	550,00	186,98
Pâte	748,25	384,69
Dosage Superplastifiant		1,50%
Rapport massique : Superplastifiant/Liant		0,015
Rapport massique : Eau/Liant		0,35
Rapport massique : Sable/Gravier		1,00
Rapport volumique : Sable/Pâte		0,78

## 4.5 Compacité des graviers

Durant cette étape, nous visons à optimiser la compacité des graviers par combinaison massique des classes granulaires 3/8 et 8/15. Cette combinaison permet la correction de la distribution granulométrique des proportions des grains. Pour cet objectif, 11 mélanges de graviers ont été établis. Nous avons donc varié la granulométrie des gravillons en combinant les classes granulométriques (3/8) et (8/15) en proportions variables de 0 à 100 % de la masse totale des gravillons, par pas de 10 %.

### Résultats et discussions

La mesure de la compacité pour les 11 combinaisons granulaires des gravillons est présentée dans la Fig. 4.1. Il est possible de remarquer l'évolution de la compacité avec l'augmentation des proportions des classes secondaires jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 0.515 pour les combinaisons contenant 50 % et 60% de GC 8/15. Au-delà, la compacité diminue avec l'excès de ces proportions et elle ne peut pas prendre des valeurs inférieures à la compacité de la classe granulométrique GC 3/8). En fait, lors de la combinaison de deux classes granulométriques différentes, les plus petits grains des gravillons peuvent se placer entre les plus gros, ce qui diminue par conséquent le volume des vides intergranulaires (augmentations de la compacité). Néanmoins, avec un excès de

ces grains de petites dimensions, il est facile que le surplus de ces grains est expulsé hors de la combinaison granulaire et il forme donc entre eux d'autres volumes des vides.

La technique de combiner des gravillons de classes granulométriques différentes a été recommandée par plusieurs recherches afin d'augmenter la compacité. K.H. KHAYAT par exemple a trouvé la compacité maximale en combinant trois classes de gravier (11 % de 5/10, 62 % de 5/14 et 27 % de 5/20), mais cette combinaison n'a pas donné les meilleures propriétés rhéologiques de BAP.

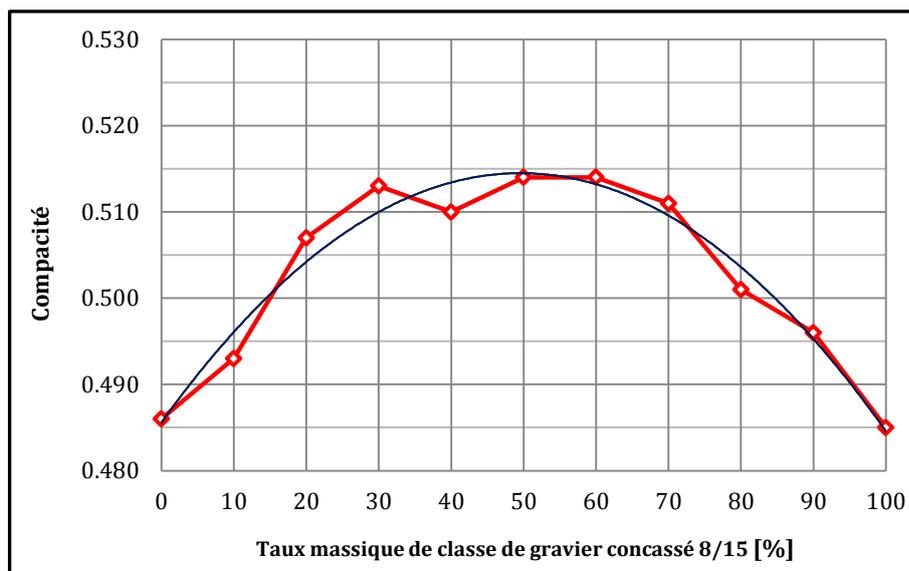


Figure 4.1 : Compacité en fonction des combinaisons granulaires des gravillons

## 4.6 Compacité des sables

Durant cette étape, nous visons à optimiser la compacité des sables par combinaisons massique de leurs différents types SA, SC et SD. Pour cet objectif, 11 mélanges de graviers ont été établis

Nous avons d'abord remplacé le SA par le SC et le SD par proportion de 20% et puis nous avons replacé le SD par le SC par la même proportion de 20%.

### Résultats et discussions

La Fig. 4.2 représente la mesure de la compacité pour les combinaisons granulaires des différents types de sables SA, SC et SD.

Il est possible de remarquer l'amélioration de la compacité par la combinaison des sables. Par ailleurs, il est important de signaler que la combinaison granulaire de 40%SD + 60%SC donne la meilleure compacité et puis celle de 60%SA + 40%SD.

Cependant, la combinaison de SA+SC n'offre pas une amélioration claire de la compacité.

En fait, lors de la combinaison de deux types de sables différents, les plus petits grains des peuvent se placer entre les plus gros, ce qui diminue par conséquent le volume des vides et augmente de la compacité. Néanmoins, avec un excès de ces grains de petites dimensions, il est facile que le surplus de ces grains est expulsé hors de la combinaison granulaire et il forme donc entre eux d'autres volumes des vides.

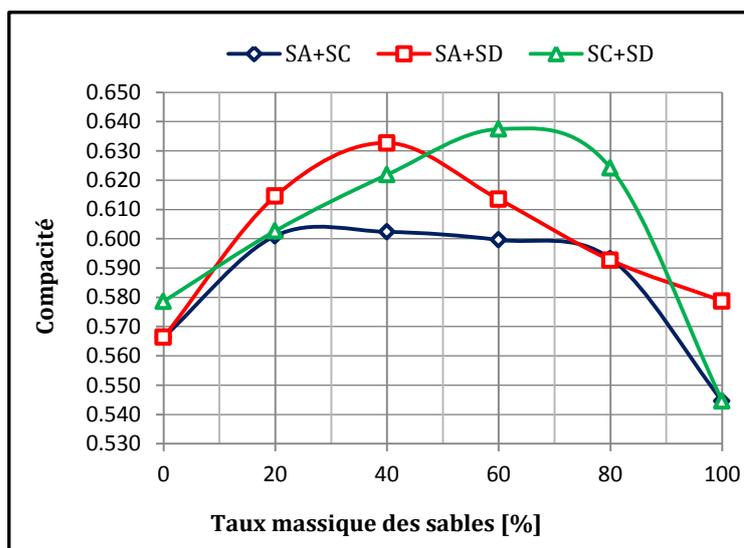


Figure 4.2 : Compacité en fonction des combinaisons granulaires des types de sables

## 4.7 Compacité des BAP

Durant cette étape, nous visons à optimiser la compacité des BAP à l'état frais. Pour cet objectif, 10 mélanges du BA ont été établis possédant tous les mêmes dosages de constituants et se différencient uniquement par la combinaison des sables.

La méthode adoptée, dans cette étude, pour la formulation de BAP se base sur le remplissage des vides granulaires par de la pâte liante afin d'éliminer les frottements intergranulaires et de garantir des propriétés autoplaçantes suffisantes [N. SU & al.] [H.J.H. BROUWERS & al.].

### Résultats et discussions

La mesure de la compacité pour les 10 mélanges du BA en fonction des types de sables est présentée à la Fig. 4.3.

Il est possible de remarquer que le sable alluvionnaire SA offre la compacité maximale pour le BAP et le sable de dune donne la minimale. En plus, l'introduction de SA dans les autres sables SC et SD peut améliorer la compacité.

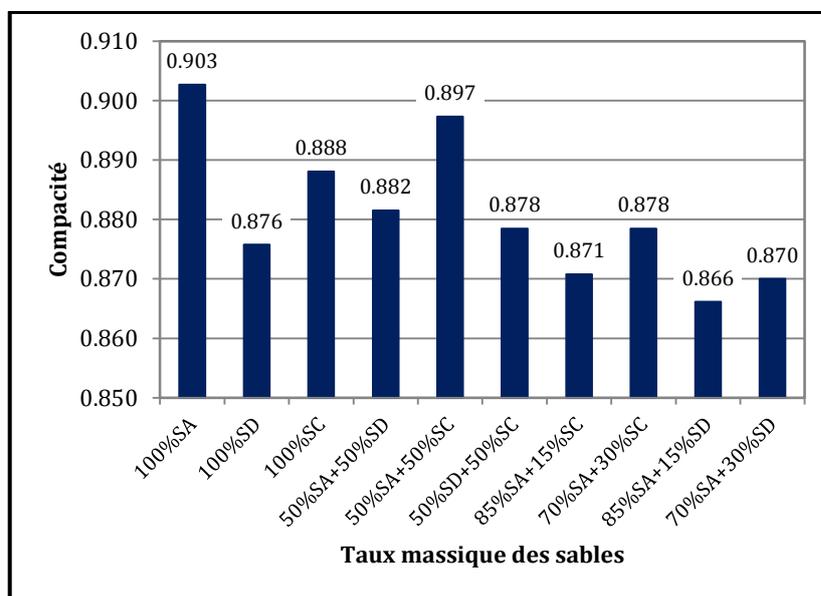


Figure 4.3 : Compacité des BAP en fonction de types de sables

## 4.8 Optimisation des BAP

### 4.8.1 Influence des sables sur la fluidité

La figure 4.4 illustre l'influence de types de sable sur la fluidité des BAP. Cette fluidité est mesurée par deux essais ; l'étalement au cône d'Abrams et la boîte LCPC.

Nous remarquons d'abord que les résultats de deux essais sont homogènes et ne présentent aucune contradiction. Cependant, l'étalement de la boîte LCPC ne présente dans aucun cas le rayon de l'étalement au cône d'Abrams comme il a estimé l'auteur de la boîte LCPC [N. Roussel & al.] [N. Roussel].

Par ailleurs, le BAP constituant de 100% SA, qui possède la compacité maximal, offre le meilleur étalement. L'écart de cette fluidité est bien évident. Donc, la substitution de sable alluvionnaire par autre sable concassé ou de dune n'améliore pas la fluidité. Néanmoins, toutes les substitutions par ces sables garde le critère autoplaçant, ce qui implique l'utilisation de ces sables pour des raisons économiques.

De plus, nous constatons une légère diminution même dans la substitutions de sable concassé par le sable de dune.

Ces résultats s'expliquent par les grains fins de SC et SD ne peuvent combler les vides intergranulaires et par contre elle augmente les vides.

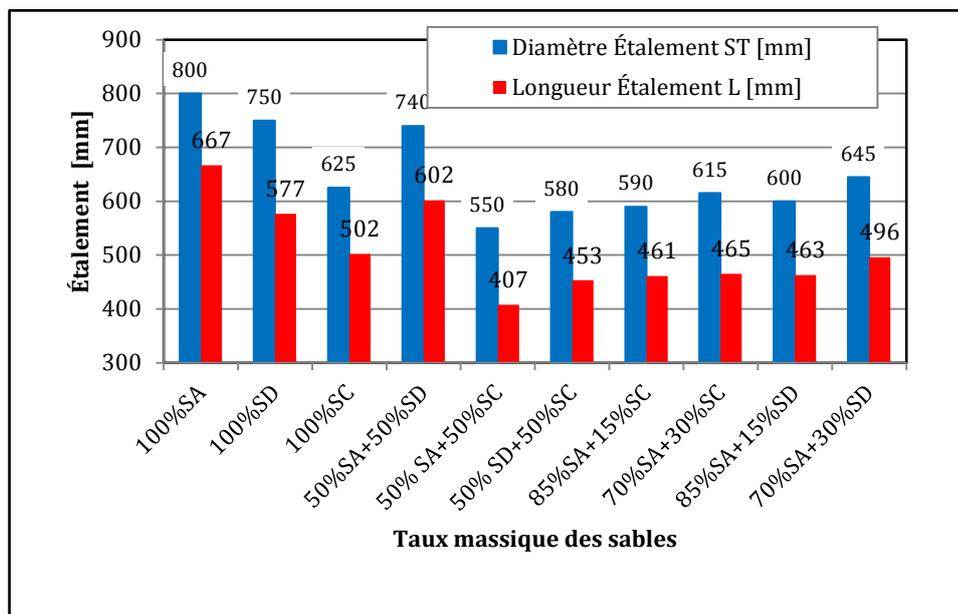


Figure 4.4 : Effet des types de sables sur la fluidité des BAP

## 4.8.2 Influence des sables sur la déformabilité

La figure 4.5 illustre l'influence de types de sable sur la déformabilité des BAP. Cette déformabilité est mesurée par l'essai de la boîte en L.

Nous remarquons l'effet positif de la combinaison granulaire des sables sur la déformabilité. En effet, le taux de remplissage est une fonction croissante à la substitution de sable SA par SC ou SD jusqu'à 30 %. Au-delà de cette teneur, la déformabilité a tendance à diminuer. Cependant, il semble que cette évolution n'est pas régulière. Les proportions de 50% SC ne donne pas le critère autoplaçant.

Ces résultats s'avèrent logiques en se basant sur la sensibilité de la capacité de remplissage à la texture des grains de sables. En effet, le SD a une texture très lisse qui peut limiter la friction entre eux et favorise un meilleur glissement contrairement au SC qui possède une texture rugueuse provoquant des blocages entre les armatures. Par ailleurs, bien que la combinaison de 100% SA offre la compacité maximale et la meilleur fluidité, elles n'offrent pas le meilleur taux de remplissage qui est donné par 50% SA + 50% SC.

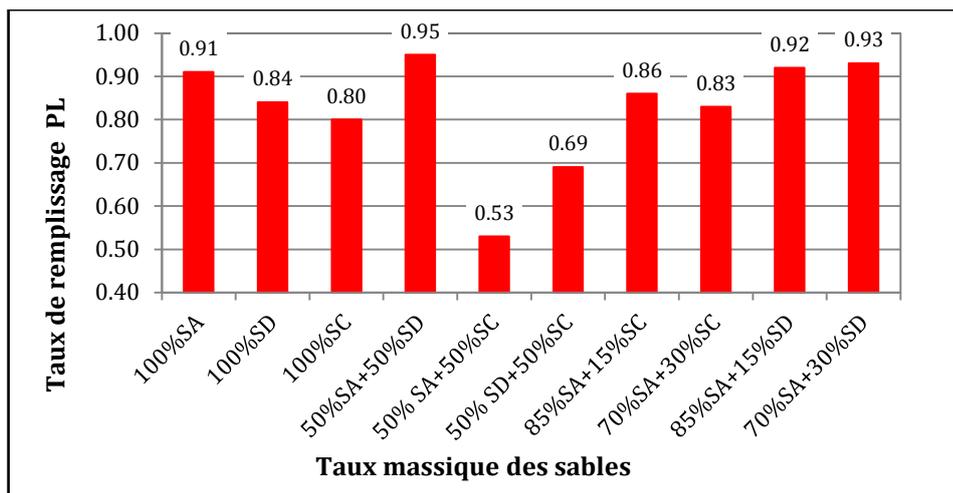


Figure 4.5 : Effet des types de sables sur la déformabilité des BAP

### 4.8.3 Influence des sables sur la stabilité

L'influence de types de sables sur la stabilité des BAP est donnée dans la Fig. 4.6. L'analyse de ce graphique montre l'effet bénéfique de sable concassé sur stabilité. En effet, l'indice de ségrégation est diminué systématiquement avec l'introduction de SC.

Donc, l'introduction de SC empêche bien la ségrégation des BAP. Ce résultat s'explique du fait que les grains de SC améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue. Également, ces grains peuvent augmenter la cohésion et la viscosité des BAP, ce qui rend très difficile de dissocier les constituants les uns des autres.

Par ailleurs, cette figure montre que la stabilité des BAP est diminuée par l'augmentation de teneurs de SD. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'ajout de SD peut modifier la tendance des grains à se déplacer ou se compacter dans les BAP.

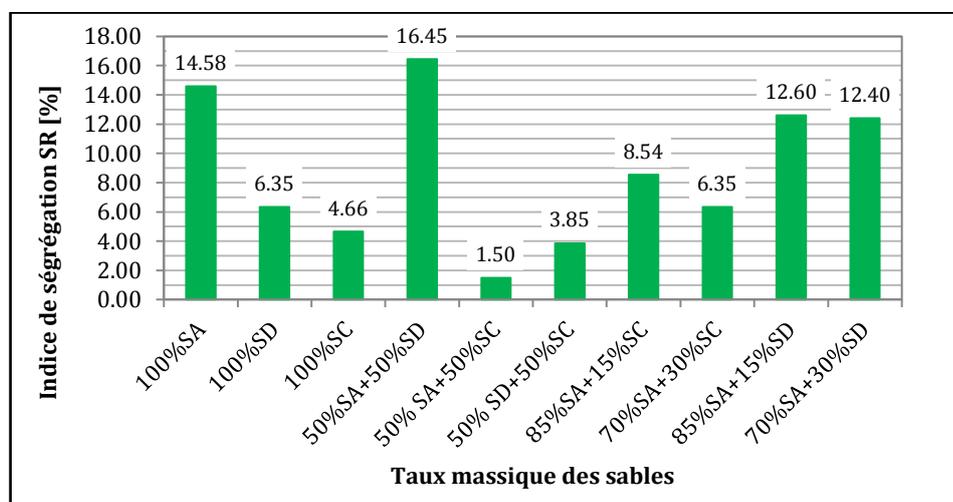


Figure 4.6 : Effet des types de sables sur la stabilité des BAP

#### **4.8.4 Influence des sables sur la résistance à la compression**

Les Fig. 4.7 & 4.8 représentent l'effet des types de sables sur la résistance à la compression de 7 et 28 jours.

Nous remarquons d'abord que la substitution de sable alluvionnaire SA par un autre type de sable détériore la résistance. L'utilisation d'un seul type de sable dans la formulation des BAP offre des résistances satisfaisantes.

Par ailleurs, toutes les résistances à la compression, quel que soit l'âge, sont améliorées proportionnellement à l'introduction de sable de concassé SC qui offre seul de BAP à hautes performances. Cette amélioration se traduit par l'augmentation de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire ; effet physique, physico-chimique et l'activité chimique des fillers. Les fillers calcaires, de même nature que les granulats, modifient le comportement mécanique du composite, en améliorant notamment l'adhérence entre la pâte et le granulat. Certes que l'adhérence est une propriété qui n'est pas forcément évaluée par la résistance mécanique mais cette dernière permet d'en avoir une idée d'après l'approche de F. DE LARRARD à travers le coefficient d'effet d'adhérence. Le SC influe sur leur contribution à l'amélioration de la résistance en compression qui semble être le résultat d'un effet structurant améliorant la solidité mécanique des liaisons pâte/granulats (l'adhérence entre la pâte et les granulats) que le résultat d'un effet quantitatif sur le volume des produits hydratés formés (le remplissage de la porosité).

Il est souvent avancé que l'adhésion entre la pâte et les granulats conditionne la résistance mécanique des bétons. L'utilisation du SC améliore globalement la structure poreuse des bétons et contribue aussi à la densification de l'interface pâte/granulats. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique et environnemental. L'introduction de SC dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat.

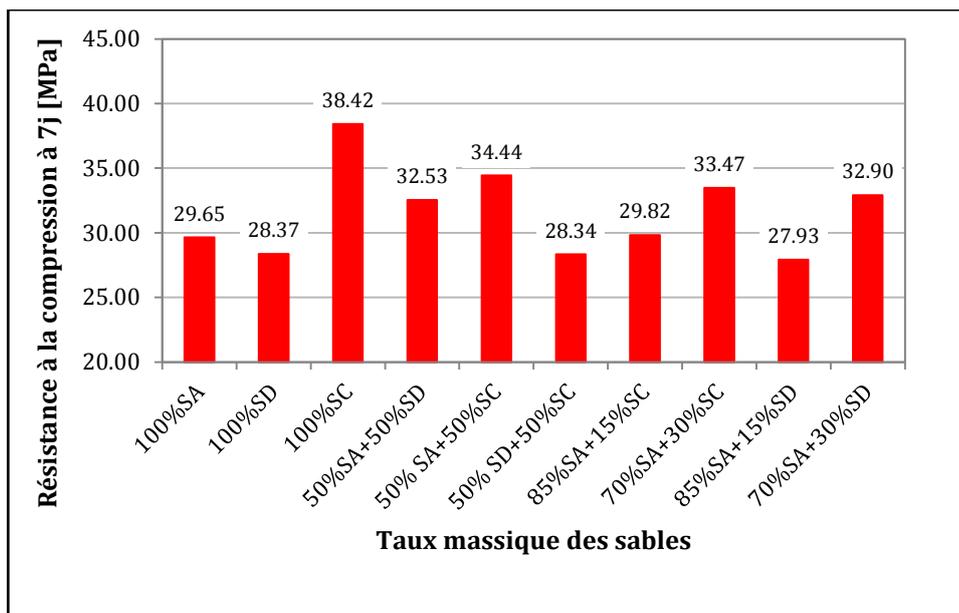


Figure 4.7 : Effet des types de sables sur la résistance à 7 jours des BAP

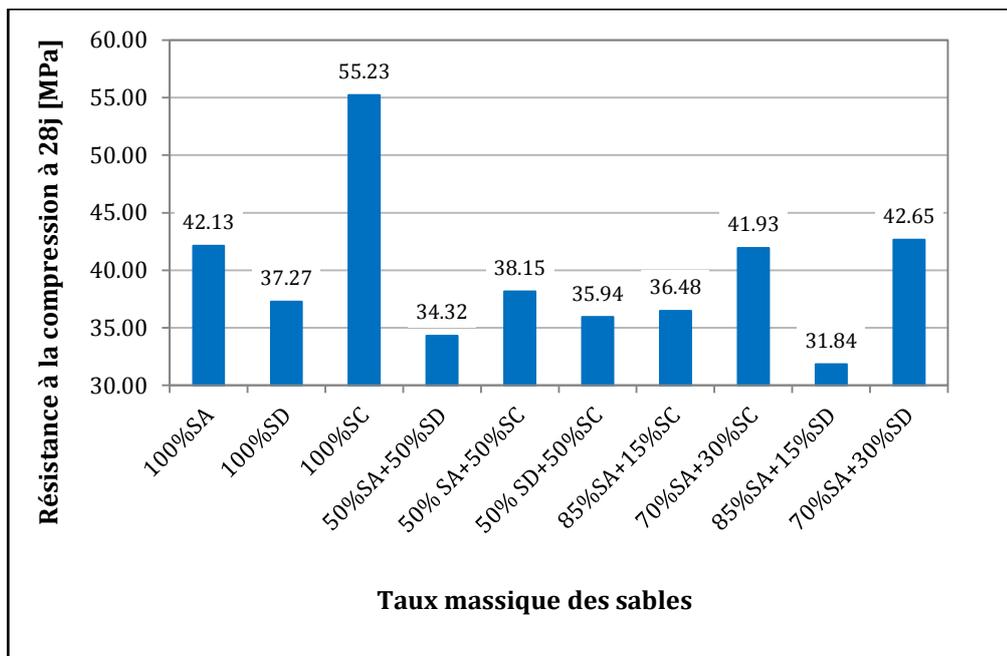


Figure 4.8 : Effet des types de sables sur la résistance à 28 jours des BAP

## 4.9 Bilan

L'objectif de ce programme expérimental était de développer un certain nombre de formulations des BAP se caractérisant par de meilleures performances rhéologiques et mécaniques. Ce programme a également fait le point sur l'effet de la compacité des différents types de sables sur la maniabilité (fluidité, déformabilité et stabilité) ainsi que les résistances à la compression des BAP.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'évolution de la compacité avec l'augmentation des proportions des classes secondaires jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 0.515 pour les combinaisons contenant 50 % et 60% de GC 8/15. Au-delà, la compacité diminue avec l'excès de ces proportions et elle ne peut pas prendre des valeurs inférieures à la compacité de la classe granulométrique GC 3/8).
- L'amélioration de la compacité par la combinaison des sables. La combinaison granulaire de 40%SD + 60%SC donne la meilleure compacité et puis celle de 60%SA + 40%SD. Cependant, la combinaison de SA+SC n'offre pas une amélioration claire de la compacité.
- Le sable alluvionnaire SA offre la compacité maximale pour le BAP et le sable de dune donne la minimale. En plus, l'introduction de SA dans les autres sables SC et SD peut améliorer la compacité.
- Les résultats de l'essai d'étalement au cône d'Abrams et celui de la boîte en LCPC sont homogènes et ne présentent aucune contradiction. Cependant, l'étalement de la boîte LCPC ne présente dans aucun cas le rayon de l'étalement au cône d'Abrams comme il a estimé l'auteur de la boîte LCPC.
- Le BAP constituant de 100% SA, qui possède la compacité maximal, offre le meilleur étalement.
- La substitution de sable alluvionnaire par autre sable concassé ou de dune n'améliore pas la fluidité. Néanmoins, toutes les substitutions par ces sables garde le critère autoplaçant, ce qui implique l'utilisation de ces sables pour des raisons économiques.
- La combinaison granulaire des sables ayant un effet positif sur la déformabilité. En effet, le taux de remplissage est une fonction croissante à la substitution de sable SA par SC ou SD jusqu'à 30 %. Au-delà de cette teneur, la déformabilité a tendance à diminuer.
- L'introduction de sable concassé SC empêche bien la ségrégation des BAP et améliore leur stabilité.
- La stabilité des BAP est diminuée par l'introduction de sable de dune SD.
- les résistances à la compression sont améliorées systématiquement avec l'introduction de CS qui offre des BAP à haute performances. Cette propriété est très intéressante du point de vue économique et environnemental. L'introduction de SC dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Venant du Japon en milieu des années 1980, les BAP se vulgarisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. Grâce à leur haute maniabilité, les BAP offrent à leurs utilisateurs une mise en œuvre sans aucune vibration et même dans des coffrages complexes et très encombrés. Cette maniabilité très élevée est le résultat de la conciliation entre des propriétés contradictoires ; une grande fluidité et déformabilité d'une part, et une haute stabilité, d'autre part. Pour satisfaire ces exigences rhéologiques, les BAP sont formulés différemment au BO : ils contiennent moins de gravillons, plus d'éléments fins et de superplastifiant et dans certains cas un agent colloïdal.

Les formulateurs se heurtent à une difficulté lorsqu'ils s'intéressent aux BAP. Il n'existe pas de méthodes de formulation généralisées permettant de choisir exactement les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées. La majorité des méthodes de formulation de BAP demande une compacité optimale du mélange granulaire afin de réduire la quantité de pâte et d'eau nécessaires pour fluidifier le mélange global.

Par ailleurs, la plupart des bétons, en Algérie, sont exclusivement fabriqués avec de sable alluvionnaire. Cependant, beaucoup de régions du pays souffrent d'un manque remarquable en sable alluvionnaire approprié. En outre, les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, l'épuisement des gisements alluvionnaires et l'éloignement des chantiers par rapport à ces gisements sont également des facteurs qui encouragent à chercher d'autres types de sables. En effet, le sable concassé produit énormément par les carrières ainsi que le sable de dunes disponible de quantités inépuisables dans le sud du pays ne sont pas encore exploités sérieusement dans la formulation des bétons. Ces sables, qui contiennent normalement des teneurs élevées en fines, se présentent comme une alternative attirante du point de vue technique, économique et écologique pour la formulation des bétons.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la problématique générale d'amélioration et de maîtrise des propriétés des BAP. En effet, nous avons visé dans le programme expérimental à développer une série de BAP à hautes performances destinée aux ouvrages complexes et fortement armés, suivant une optimisation poussée de leurs paramètres clés de composition.

Nous avons également examiné l'effet de l'incorporation de sable de carrière et le sable de dune, en remplaçant le sable alluvionnaire, sur la compacité de la formulation de BAP.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'évolution de la compacité avec l'augmentation des proportions des classes secondaires jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 0.515 pour les combinaisons contenant 50 % et 60% de GC 8/15. Au-delà, la compacité diminue avec l'excès de ces proportions et elle ne peut pas prendre des valeurs inférieures à la compacité de la classe granulométrique GC 3/8).
- L'amélioration de la compacité par la combinaison des sables. La combinaison granulaire de 40%SD + 60%SC donne la meilleure compacité et puis celle de 60%SA + 40%SD. Cependant, la combinaison de SA+SC n'offre pas une amélioration claire de la compacité.
- Le sable alluvionnaire SA offre la compacité maximale pour le BAP et le sable de dune donne la minimale. En plus, l'introduction de SA dans les autres sables SC et SD peut améliorer la compacité.
- Les résultats de l'essai d'étalement au cône d'Abrams et celui de la boîte en LCPC sont homogènes et ne présentent aucune contradiction. Cependant, l'étalement de la boîte LCPC ne présente dans aucun cas le rayon de l'étalement au cône d'Abrams comme il a estimé l'auteur de la boîte LCPC.
- Le BAP constituant de 100% SA, qui possède la compacité maximal, offre le meilleur étalement.
- La substitution de sable alluvionnaire par autre sable concassé ou de dune n'améliore pas la fluidité. Néanmoins, toutes les substitutions par ces sables garde le critère autoplaçant, ce qui implique l'utilisation de ces sables pour des raisons économiques.
- La combinaison granulaire des sables ayant un effet positif sur la déformabilité. En effet, le taux de remplissage est une fonction croissante à la substitution de sable SA par SC ou SD jusqu'à 30 %. Au-delà de cette teneur, la déformabilité a tendance à diminuer.
- L'introduction de sable concassé SC empêche bien la ségrégation des BAP et améliore leur stabilité.
- La stabilité des BAP est diminuée par l'introduction de sable de dune SD.
- les résistances à la compression sont améliorées systématiquement avec l'introduction de CS qui offre des BAP à haute performances. Cette propriété est très intéressante du point de vue économique et environnemental. L'introduction de SC dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

## CHAPITRE 1 : CONCEPT DE BAP

**K. OZAWA, K. MAEKAWA, M. KUNISHIMA & H. OKAMURA 1992:** *Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*. Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2). Chiangmai. V 1, pp 445-450. January 1989.

**K. OZAWA, S. TAGTERMSIRIKUL & K. MAEKAWA 1992 :** *Role of materials on the filling capacity of fresh concrete*. Proceedings of the 4th CANMET & ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Istanbul, pp 121-137. May 1992.

**HOLCIM 2004 :** *Le béton autocompactant*. Recommandation étudiée par la société Holcim. Suisse. 26 Novembre 2004.

**T. SEDRAN 1995 :** *Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars-Avril 1995.

**P. TURCRY 2004 :** *Retrait et fissuration des bétons autoplacants : Influence de la formulation*. Thèse de Doctorat. École Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil (Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes). Février 2004.

**ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL AFGC 2008 :** *Groupe de Travail - Recommandations pour l'emploi es bétons auto-plaçants*. Documents scientifiques et techniques. 2<sup>ème</sup> Édition. Janvier 2008.

**M. YURUGI, N. SAKATA, M. IWAI & G. SAKAI 1993 :** *Mix proportion for highly workable concrete*. Conference Concrete 2000. Dundee. 7-9 September 1993.

**S. TANGTERMSIRIKUL, J. SAKAMOTO, T. SHINDOH & Y.H. MATSUOKA 1991 :** *Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent*. Taisei Technical Research Report. N° 24, pp 369-376. December 1991.

**F. DE LARRARD, F. BOSCH, C. CATHERINE & F. DE FLORENNE 1996 :** *La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 202, pp 61-69. Mars-Avril 1996.

- S. KUROIWA, Y. MATSUOKA, M. HAYAKAWA & T. SHINDOH 1993** : *Application of super workable concrete to construction of a 20-story building*. American Concrete Institute SP140 (High Performance Concrete in Severe Environments). Detroit, Michigan. pp 147-161. 1993.
- T. SHINDOH, Y. MATSUOKA, S. TANGTERMSIRIKUL & J. SAKAMOTO 1992** : *Effect of variation of material quality on properties of super workable concrete*. Transactions of Japan Concrete Institute. V 14, pp 71-78. 1992.
- A. R'MILI 2010** : *Étude de formulation et de comportement des BAP Incorporation du sable de concassage et du sable du désert*. Thèse Doctorat. École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 13 janvier 2010.
- N. ROUSSEL & P. COUSSOT 2006** : *Écoulements d'affaissement et d'étalement – modélisation, analyse et limites pratiques*. Revue Européenne de Génie Civil. V 10, N° 1, pp 25-44. 2006.
- N. ROUSSEL 2007** : *The LCPC BOX a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC*. RILEM Materials and Structures. V 4, pp 889–896. 2007.
- K.H. KHAYAT, A. GHEZAL & M. HADRICHE 1999** : *Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete*. RILEM Materials and Structures. 1999.
- Z. ABIB, F. KHARCHI & H. GAHER 2004** : *Bétons autoplaçants : optimisation de la composition*. 1er Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton. Université Houari Boumediene. Alger. pp 1–8. 24–26 Mai 2004.
- T. ALI-BOUCETTA 2014** : *Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances*. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle. Université BADJI Mokhtar à Annaba. 2014
- T. FUKUTE, A. MORIWAKE, K. SANO & K. HAMASAKI 1995** : *Development of superworkable concrete for multi-functional port structures*. 2<sup>nd</sup> International Symposium of CANMET/ACI. Las Vegas. pp 335–336. 1995.
- J.C. GIBBS & W. ZHU 1999** : *Strength of hardened of self-compacting concrete*. Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.

**C. HU & B. BARBIERI 1998** : *Comparaison des retraits des ban et d'un béton fluide traditionnel*. Science des matériaux et propriétés des bétons - Premières Rencontres Internationales. INSA. 1998.

**B. PERSSON 1999** : *Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting*. Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.

**E. PROUST 2002** : *Retraits et fluages des bétons autoplacants : vers une meilleure compréhension des comportements différés*. Thèse de l'INSA de Toulouse. 2002.

**J.C. GIBBS & W. ZHU 1999** : *Strength of hardened of self-compacting concrete*. Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Stockholm. 13-15 September 1999.

**J. AMBROISE, J. PERA & S. ROLS 1997** : *Les bétons autonivelants*. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. V 1, pp 37-41. 1997.

## **CHAPITRE 2 : COMPACITÉ ET SABLES**

**M. EL BARRAK 2005** : *Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Juillet, p. 229.

**German R. M., (1989)** "Particle packing characteristics", Metal Powder Industries Federation.

**Joisel A. (1952)**, « Composition des bétons hydrauliques », Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 5<sup>ième</sup> année, N° 58, Série : Béton, béton armé, Octobre, France.

**Kechkar.C et Cherait.Y. (2008)**, « Contribution a l'étude des empilements granulaires », laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH), Université 08 mai 45, Guelma, Algérie. Lédée V., de Larrard F., Sedran T., Brochu F. (2004), « Essais de compacité des fractions granulaires à la table à secousses », Méthode d'essai N° 61, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 13.

**Lesage R. (1974)**, « Etude Expérimentale de la mise en place du béton frais », Rapport de recherche des LCPC, N°37, Juin, Paris, France.

**Mooney.M. (1951)** "The Viscosity of concentrated Suspension of Spherical Particles", Journal of Colloids and Interfaces Science, vol 6, p.162.

**Ngoc Dong Le (2007)**, « Amélioration de la régularité du béton en production », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 248.

**Pietsch W., (2002)** "Agglomeration Processes", John Willey VCH.

Pouliot N., Sedran.T., de Larrard F., Marchand J. (2001) « Prédiction de la compacité des bétons compactés à rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire », Bulletin des laboratoires de ponts et chaussées, 233, Juillet-Aout, pp. 23-36.

**Sedran T. et de Larrard F. (1994)**, « RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil », Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 194, Novembre-Décembre. 78

**Sedran T. (1999)**, « Rhéologie et rhéométrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars.

**Sedran.T et de Larrard.F. (2000)** « Manuel d'utilisation de René-LCPC version 6.1d Logiciel d'optimisation granulaire », Septembre, p. 20.

**Sedran.T., de Larrard.F., Angot.D. (1994)** : « Préviation de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. Fondements théoriques et étalonnage du modèle », Bulletin des laboratoires de ponts et chaussées, 194, Novembre-décembre.

Stovall.T, de Larrard F., Buil.M. (1986) "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures", Powder Technology", vol 48.

**Tchemiakin A. (1988)** « Projet / Agrégats Tlemcen-2, Gisement Djebel Abiod, Rapport géologique final », Boumerdes, Juin.

**R'mili A. , Ben Ouezdou M.** : Incorporation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants. INVACO2 : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GÉNIE CIVIL & MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION N° : 10-271. Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.

**Abdelhamid Rmili, Mongi Ben Ouezdou, Mhamed Added, and Elhem Ghorbel** : Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes. Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics.

International Journal of Concrete Structures and Materials. Vol.3, No.1, pp. 11~14, June 2009.

**Leila Zeghichi, Zeid Benghazi and Laid Baali** : Comparative Study of Self-Compacting Concrete with Manufactured and Dune Sand. Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359, USA. Volume 6, No. 10 (Serial No. 59), pp. 1429–1434. Oct. 2012.

### **CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX UTILISÉS ET ESSAIS RÉALISÉS**

**A. GUETTALA, B. NÉCIRA February 2015:** effect of the viscosity modifying agent and the different mineral additions on rheology and compressive strength of self-compacting concrete Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)vol. 16(1), pp.111-126

### **CHAPITRE 4 : OPTIMISATION DES BAP PAR COMPACITÉ ET TYPES DE SABLES**

**N. SU & K.C HSU & H.W. CHAIC 2001** : *A simple mix design method for self-compacting concrete.* Cement and Concrete Research. 31 1799–180. 2001.

**H.J.H. BROUWERS & H.J. RADIX 2007:** *Self-Compacting Concrete : Theoretical and experimental study.* Cement and Concrete Research. N. 29, 1-12. 2007.