

# Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Numéro de série :.....

Numéro d'inscription :.....

## Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

### DOCTORAT EN SCIENCES

**Spécialité :** Génie Civil

**Option :** Matériaux

THEME

## AMÉLIORATION DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE MATÉRIAUX LOCAUX

Présenté par :

**Zied BENGHAZI**

Soutenue le : 16/12/2021

Devant le jury composé de :

<b>Messaoud TITOU</b>	<b>Prof.</b>	<b>Univ. De M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Leila ZEGHICHI</b>	<b>Prof.</b>	<b>Univ. De Biskra</b>	<b>Promotrice</b>
<b>Miloud BEDDAR</b>	<b>Prof.</b>	<b>Univ. De M'sila</b>	<b>Examineur</b>
<b>Bachir TAALLAH</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. De Biskra</b>	<b>Examineur</b>
<b>Larbi BELAGRAA</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. De M'sila</b>	<b>Invité</b>

Année Universitaire : 2021/2022

## *Dédicace*

*« Je dédie ce travail à mes chers parents, mes sœurs et ma femme ;  
ainsi qu'à mes amis,  
à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réussite de ce  
travail, à tous ceux qui croient au droit du savoir. »*

*Zied Benghazi*

# Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice, Professeur Leila ZEGHICHI pour avoir accepté de diriger ma thèse et mes travaux, pour ses conseils et sa grande patience au cours de ces années.

Je tiens aussi à remercier les honorables membres du jury : Professeur Messaoud TITOUM, Professeur Miloud BEDDAR, Docteur Bachir TAALLAH et Docteur Larbi BELAGRAA, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Une opportunité pour recevoir leurs conseils et profiter de leur expérience dans le domaine.

C'est un devoir agréable d'exprimer ma reconnaissance sincère envers tous les enseignants du département du génie civil de l'université de M'sila, au sein duquel j'ai eu l'occasion de poursuivre mes études de post-graduation en magister puis en doctorat.

Je remercie également Professeur H. J. H. BROUWERS (Université de Technologie d'Eindhoven, Pays-Bas), pour m'avoir fourni des documents très utiles sur les BAP ; ainsi que Docteur A. Chabbi et l'université de Guelma, pour m'avoir accordé l'opportunité d'utiliser le logiciel Design-Expert.

Un grand merci à l'équipe du laboratoire de génie civil de l'université de Tébessa, et mes co-auteurs, Docteur Adel DJELLALI et Docteur Abdelhak HAFDHALLAH pour leur aide et leur support.

Un remerciement spécial pour ma famille et surtout mes parents, pour leur grand soutien constant et inconditionnel, non seulement au cours de ma préparation de cette thèse, mais aussi depuis le début de mon parcours scolaire et jusqu'à aujourd'hui.

En fin, pour tous mes amis qui m'ont supporté et encouragé de près ou de loin, merci à vous.

## ملخص

يعتبر استخدام الخرسانة ذاتية التقعيد حديث العهد نسبيا في الجزائر، ومن هنا تأتي أهمية دراسة خصائصها الريولوجية والميكانيكية واستمثالها، بناء على المواد والظروف المحلية. هذه الأطروحة تعرض نتائج دراسة حول تأثير نوعية الرمال على خصائص الخرسانة ذاتية التقعيد في الحالة الطرية والصلبة. بما أن هذا المكون يضمن استمرارية التوزيع الحبيبي ما بين الاسمنت والحصى، والحصول على خرسانة أكثر تماسكا. إن الرمال ذات الشكل الدائري (رمال الكثبان والوديان) هي مواد ذات حبيبات جد رفيعة، تتميز بمعامل فراغ بيني كبير، ومساحة كبيرة ومعامل نعومة صغير. بينما تتميز الرمال ذات الشكل الزاوي (المجروشة) بنسبة كبيرة من الحبيبات ذات الشكل المستدق وغير المنتظم، مما يؤثر على قابلية الخرسانة للتشكيل.

تم انجاز الدراسة التجريبية عن طريق الاستبدال التدريجي للرمال المجروش بالرمال ذات الحبيبات الدائرية، بمقدار (0 %، 25 %، 50 %، 75 % و 100 %) من كتلة الرمال المستخدمة، ثم القيام بملاحظة تأثير هذه التغيرات على الخصائص الريولوجية والميكانيكية للخرسانة ذاتية التقعيد. تم القيام أيضا بوضع نماذج رياضية للتمكن من القيام بتحسين هذه الخصائص، بالأخذ بعين الاعتبار التوزيع الحبيبي ومعامل النعومة للرمال.

كما تم الاعتماد في عملية الاستمثال على منهجية سطح الاستجابة، واستخدام تحليل التباين لتحديد الدلالة الاحصائية للتوزيع الحبيبي على خصائص الخرسانة ذاتية التقعيد. من أجل ذلك، تم إعداد أربعة وعشرين مزيجا من الخرسانة ذاتية التقعيد، باستخدام ثلاثة أنواع من الرمال ذات معاملات نعومة وأشكال حبيبات مختلفة: رمال الكثبان، رمال الوديان والرمال المجروشة.

أظهرت النتائج أن خصائص التوزيع الحبيبي للرمال المستخدمة هي مؤشرات جيدة لتوقع خصائص الخرسانة ذاتية التقعيد في الحالة الطرية، ولكنها أقل فعالية كمؤشر على مقاومة الضغط. سمح لنا الاستمثال متعدد الاستجابة بتقدير قيم خصائص التوزيع الحبيبي للرمال التي تسمح بالحصول على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المثلى للخرسانة ذاتية التقعيد، بنسبة رغبة اجمالية قيمتها 0,923.

## كلمات مفتاحية

الخرسانة ذاتية التقعيد، الخصائص الريولوجية، الخصائص الميكانيكية، التوزيع الحبيبي للرمال، معامل النعومة، الاستحسان متعدد الاستجابة.

# Résumé

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) en Algérie est relativement récente, d'où vient l'intérêt d'étudier ses propriétés rhéologiques et mécaniques et de les optimiser, en fonction des matériaux et des conditions locales. Cette thèse présente les résultats d'une étude portant sur l'influence de la qualité du sable sur les propriétés des BAP frais et durci. Du fait que ce constituant assure une continuité granulaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Les sables roulés (de dunes ou de rivières) sont des matériaux très fins caractérisés par une porosité intergranulaire élevée, une grande surface et un faible module de finesse; d'autre part, les sables angulaires (concassés) ont un taux élevé de formes minces et irrégulières qui influencent la maniabilité du béton.

L'étude expérimentale est faite en substituant le sable concassé par des sables roulés avec un taux variable de (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) du poids d'agrégats fins, et d'observer l'effet de cette variation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP. Des modèles mathématiques sont alors construits, afin de pouvoir optimiser ces propriétés, en tenant compte de la distribution granulométrique et du module de finesse (Mf) du sable.

L'optimisation est basée sur la méthodologie de la surface de réponse. L'analyse de la variance est exploitée pour déterminer la signification statistique de la granulométrie sur les propriétés étudiées du BAP. Pour cela, nous avons étudié vingt-quatre mélanges de BAP, préparés avec trois types de sables avec différents Mf et formes de grains: sable de dune, sable de rivière et sable concassé.

Les résultats montrent que les propriétés granulométriques des sables utilisés sont de bons prédicteurs des propriétés fraîches du BAP, mais moins significatives de la résistance à la compression. L'optimisation multiréponse a permis d'estimer les paramètres granulométriques du sable qui donnent les propriétés physiques et mécaniques optimales du BAP, avec une désirabilité globale de 0,923.

## Mots clés

Béton autoplaçant, Propriétés rhéologiques, Propriétés mécaniques, Granulométrie du sable, Module de finesse, Optimisation multiréponse.

# Abstract

The use of self-consolidating concrete (SCC) in Algeria is relatively recent, hence the interest in studying its rheological and mechanical properties and optimizing them, depending on the local materials and conditions. This thesis presents the results of a study on the influence of sand quality on fresh and hardened SCC properties. This constituent ensures the granular continuity between the cement and the gravel, giving a better cohesion of concrete. Rolled sands (from dunes or rivers) are very fine materials characterized by high intergranular porosity, high surface area and low fineness modulus. On the other hand, the angular (crushed) sands have a high rate into thin and irregular shapes that affect the workability of concrete.

The experimental study was done by substituting the crushed sand by rolled sands with a variable rate of (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) of the weight of fine aggregates and observing the effect of this variation on the rheological and mechanical properties of BAP. Mathematical models are then built to optimize these properties, considering the particle size distribution and the fineness modulus (FM) of the sand.

The optimization is based on the response surface methodology. The analysis of variance is used to determine the statistical significance of the particle size distribution on the studied properties of the SCC. For this, we studied twenty-four mixtures of SCC, made of three kinds of sand with different Mf and grain shapes: dune sand, river sand, and crushed sand.

The results show that the particle size properties of the sands used are good predictors of the fresh properties of the SCC but minor predictors of the compressive strength. The multi-response optimization made it possible to estimate the particle size parameters of the sand, which give the optimal physical and mechanical properties of SCC, with overall desirability of 0.923.

## Keywords

Self-compacting concrete, Rheological properties, Mechanical properties, Particle size distribution of sand, Fineness Modulus, Multi-response optimization.

# Table des matières

	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
	ملخص	iii
	Résumé	iv
	Abstract	v
	Table des matières	vi
	Liste des tableaux	x
	Liste des figures	xii
	Notations et abréviations	xv
	Introduction générale	1
	Partie I : Revue Bibliographique	4
	Chapitre I: Les bétons autoplaçants	5
	1. Introduction	5
	2. Les constituants solides	5
	2.1. La poudre	5
	2.2. Les granulats	10
	3. Les constituants liquides	13
	3.1. L'eau de gâchage	13
	3.2. Les adjuvants	14
	4. Les bétons spéciaux	17
	4.1. Les bétons de haute et très haute performance	17
	4.2. Les bétons autoplaçants	18
	4.3. Composition des BAP	20
	4.4. Domaines d'utilisation des BAP	20
	4.5. Les avantages offerts par les BAP	21
	4.6. Méthodes de mise en œuvre des BAP	22
	4.7. Rhéologie des BAP	23
	4.8. Durabilité des BAP	23
	5. Effets des différents constituants des BAP sur ses propriétés	25
	5.1. Effets du ciment	25
	5.2. Effets des fillers	27

5.3. Effets des granulats grossiers	28
5.4. Effets des granulats fins	28
5.5. Effets des adjuvants chimiques	29
5.5.1. Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau	29
5.5.2. Les agents modificateurs de viscosité	29
6. Conclusion	29
Chapitre II : Exigences techniques et formulation des BAP	30
1. Introduction	30
2. Exigence techniques à l'état frais	30
2.1. Etalement (SF)	31
2.2. Viscosité	32
2.3. Ecoulement en milieu confiné (PL)	33
2.4. Résistance à la ségrégation (RS)	35
3. Exigence techniques à l'état durci	36
4. Principes de formulation des BAP	37
4.1. Théorie de densité de remplissage	38
4.2. La théorie de la pâte en excès	39
4.3. Comparaison et critique des méthodes	41
5. Modèle de formulation hydrodynamique développé	42
6. Méthode de formulation proposée des BAP	44
7. Conclusion	46
Partie II : Travail expérimental et optimisation des propriétés des BAP	48
Chapitre III: Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.	49
1. Introduction	49
2. Matériaux utilisés	49
2.1. Le ciment	49
2.2. Le filler	49
2.3. Le sable	50
2.4. Le gravier	53
2.5. L'eau de gâchage	53
2.6. Les adjuvants	53
3. Méthodes expérimentales	55

3.1. Etude de la pâte autoplaçante	55
3.1.1. Préparation de la pâte autoplaçante	55
3.1.2. Le plan d'expérience	55
3.1.3. Programme expérimental	56
3.2. Etude du BAP	57
3.2.1. Préparation du BAP	57
3.2.2. Programme expérimental	59
4. Précision des résultats expérimentaux	61
5. Module d'élasticité des BAP	62
6. Conclusion	63
Chapitre IV: Étude expérimentale des BAP à base de matériaux locaux.	64
1. Introduction	64
2. Résultats des essais sur la pâte autoplaçante	64
2.1. Étalement de la pâte autoplaçante	64
2.2. Écoulement de la pâte autoplaçante	66
2.3. Détermination du point de saturation en superplastifiant	69
3. Résultats des essais sur les BAP	71
3.1. Ecoulement en milieu confiné	71
3.2. Etalement	72
3.3. Résistance à la ségrégation	73
3.4. Résistance à la compression	74
4. Synthèse des résultats expérimentaux	75
5. Estimation du module de Young	78
6. Conclusion	79
Chapitre V: Modélisation et optimisation des propriétés des BAP	80
1. Introduction	80
2. Propriétés granulométriques des sables	80
3. La méthode des plans d'expériences	82
3.1. Utilité des plans d'expériences	82
3.2. Espace expérimental	82
3.3. Méthodologie de la surface de réponse (MSR)	84
3.4. L'analyse de la variance (ANOVA)	86
4. Matériaux et méthodes utilisés	86

4.1. Plan d'expérience utilisé	88
4.2. Emploi de la méthodologie de la surface de réponse (MSR)	88
4.3. Choix du modèle mathématique	89
5. Résultats et discussions	90
5.1. Analyse de la variance (ANOVA)	90
5.2. Analyse de régression	94
6. Optimisation des réponses par l'approche de la fonction de désirabilité	95
7. Conclusion	99
Conclusion générale	100
Perspectives	103
Références bibliographique	104

# Liste des tableaux

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1 – Effets principaux des ajouts les plus utilisés.	9
Tableau I.2 – Les effets bénéfiques des différents types d’adjuvants sur les propriétés des bétons.	16
Tableau II.1 – Critères de conformité des BAP frais selon leur étalement.	32
Tableau II.2 – Critères de conformité des BAP frais selon leur viscosité.	33
Tableau II.3 – Critères de conformité des BAP frais selon leur écoulement.	34
Tableau II.4 – Critères de conformité des BAP frais selon leur résistance à la ségrégation.	36
Tableau III.1 – Composition chimique des matériaux utilisés.	50
Tableau III.2 – Propriétés physiques des granulats utilisés.	52
Tableau III.3 – Plan d’expérience adopté pour l’étude de la pâte autoplaçante.	55
Tableau III.4 – Mélanges de BAP pour le travail expérimental en fonction des types de sables utilisées.	58
Tableau III.5 – Composition des mélanges de BAP utilisés.	58
Tableau III.6 - Répétabilité et reproductibilité des résultats d’essai de l’écoulement (essai de la boîte en L).	61
Tableau III.7 - Répétabilité et reproductibilité des résultats d’essai d’étalement.	61
Tableau III.8 - Répétabilité et reproductibilité des résultats d’essai de la résistance à la ségrégation.	61
Tableau III.9 – Formules de calcul du module de Young selon les différentes normes et réglementations.	62
Tableau IV.1 - Comparaison des résultats sur les mélanges de BAP étudiés.	76
Tableau IV.2 – Valeurs du module de Young des mélanges de BAP utilisés.	78
Tableau V.1 – Plan d’expérience des BAP en fonction des propriétés granulométriques.	87
Tableau V.2 – Plan d’expérience de Bouziani présenté en fonction des propriétés granulométriques.	87
Tableau V.3 – Résultats de l’analyse de la variance pour les modèles de troisième ordre des propriétés étudiées.	90

Tableau V.4 - Intervalles des objectifs et des facteurs, pour l'optimisation de la qualité du BAP.	96
Tableau V.5 - Solutions Calculées par Design-Expert pour l'optimisation combinée du BAP.	97

## Liste des figures

Titre	Page
Figure I.1 – Situation des ciments Portland dans le système CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	6
Figure I.2 – Produits d’hydratation du ciment (CSH et CH), par microscope électronique à balayage (MEB).	7
Figure I.3 – Les principaux facteurs liés au ciment, influant sur les propriétés des bétons.	8
Figure I.4 – Fuseau proposé pour la granularité des sables à béton.	11
Figure I.5 – Les différentes formes basiques des granulats.	13
Figure I.6 – Mode d’action des superplastifiants hauts réducteurs d’eau sur l’hydratation du ciment.	18
Figure I.7 – Les principaux facteurs influençant les propriétés des BAP.	19
Figure I.8 – Schématisation de la composition des BAP (d’après Brouwers et Radix).	20
Figure I.9 – Mise en œuvre des BAP.	22
Figure I.10 – Absorption des chlorures en fonction du temps par des mélanges de BAP contenant des fillers calcaires et/ou fumée de silice, exprimée par le coefficient d’immigration non stationnaire des chlorures ( $D_{nssm}$ ).	24
Figure I.11 – Relation entre le coefficient de migration non stationnaire des chlorures ( $D_{nssm}$ ) et le coefficient d’absorption capillaire (Abs Coef) pour les mélanges de BAP binaires.	25
Figure I.12 – Relation entre le volume de pâte et l’étalement des BAP.	26
Figure I.13 – Relation entre le rapport eau/poudre de pâte et la résistance à la compression des BAP.	27
Figure II.1 – Facteurs de malaxage influents sur les propriétés du BAP frais.	30
Figure II.2 – Essai d’étalement au cône d’Abrams.	31
Figure II.3 – Effet de la vitesse de malaxage sur l’étalement des BAP.	32
Figure II.4 – Schéma de l’entonnoir en V.	33
Figure II.5 – Essai d’écoulement à la boîte en L.	34
Figure II.6 – Principe de l’essai de stabilité au tamis.	35
Figure II.7 – Module d’élasticité des BAP en fonction de la résistance à la compression à 28 jours.	37

Figure II.8 – Schématisation de particules sphériques à remplissage dense, contenant des particules grossières, moyennes, et fines.	39
Figure II.9 – Couche de pâte en excès et distance moyenne entre les granulats.	40
Figure II.10 – Courbe granulométrique volumétrique des constituants solides du BAP, pour $\alpha = 0,19$ et $d_{\max} = 16$ mm, selon le modèle modifié d'Andreasen et Andersen et le nouveau modèle hydrodynamique.	43
Figure II.11 – Étapes de formulation des BAP selon la méthode hydrodynamique.	44
Figure II.12 – Détermination des volumes de constituants du BAP, à partir de la courbe granulométrique volumétrique théorique, pour $d_{\max} = 15$ mm.	46
Figure III.1 – Filler de calcaire obtenu.	50
Figure III.2 – Sables utilisés: (a) sable de dunes de Bou Saada ; (b) Sable de dunes d'Elma Labiod ; (c) Sable de rivière d'Elkouif; (d) Sable concassé d'Elma Labiod.	51
Figure III.3 – Courbes granulométriques des granulats utilisés.	52
Figure III.4 – Gravier utilisés : (a) Gravier 3/8; (b) Gravier 8/15.	53
Figure III.5 – Dimensions du mini-cône.	56
Figure III.6 – Etalement de la pâte autoplaçante.	56
Figure III.7 – Dimensions du cône de Marsh.	57
Figure III.8 – Méthode de malaxage utilisée.	59
Figure III.9 – Moules cylindriques utilisés pour la fabrication des éprouvettes.	59
Figure III.10 – Essai de compression simple sur éprouvette de BAP.	60
Figure III.11 – Comparaison entre les valeurs expérimentales du module de Young et celles calculées selon l'ACI 318-05.	63
Figure IV.1 – Effet du dosage des superplastifiants utilisés sur le diamètre d'étalement de la pâte autoplaçante à 5 et à 60 minutes.	65
Figure IV.2 – Effet du dosage des superplastifiants utilisés sur le temps d'écoulement de la pâte autoplaçante à 5 et à 60 minutes.	67
Figure IV.3 – Différents comportements rhéologiques de la pâte autoplaçante.	68
Figure IV.4 – Détermination de la dose de saturation selon la méthode AFREM.	68
Figure IV.5 – Détermination du point de saturation pour les superplastifiants utilisés.	70
Figure IV.6 – Ressuage de la pâte autoplaçante contenant le SikaPlast - 40 Pro: (a) à 5 minutes ; (b) à 60 minutes.	71

Figure IV.7 – Ecoulement des BAP (essai de boîte en L à trois barres).	72
Figure IV.8 – Etalement des BAP (essai au cône d’Abrams).	73
Figure IV.9 – Résistance à la ségrégation des BAP (essai de stabilité au tamis).	74
Figure IV.10 – Résistance normale à la compression des BAP ( $R_{C28}$ ).	75
Figure IV.11 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SD1.	76
Figure IV.12 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SD2.	77
Figure IV.13 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SR.	77
Figure IV.14 – Variation des valeurs du module de Young selon les différentes formules de calcul.	79
Figure V.1 – Définition de l’espace expérimental.	83
Figure V.2 – Définition d’un point expérimental.	83
Figure V.3 – Introduction des données dans le logiciel Design-Expert.	89
Figure V.4 – Diagramme normal des résidus pour l’écoulement en milieu confiné.	91
Figure V.5 – Diagramme normal des résidus pour la résistance à la ségrégation.	91
Figure V.6 – Diagramme normal des résidus pour l’étalement.	92
Figure V.7 – Diagramme normal des résidus pour la résistance à la compression.	92
Figure V.8 – Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées des BAP: (a) Écoulement en milieu confiné, (b) Résistance à la ségrégation, (c) Étalement, (d) Résistance à la compression.	93
Figure V.9 – Fonction rampe de l’optimisation combinée de PL, RS, SF et $R_{C28}$ .	98
Figure V.10 – Diagramme des barres analogiques des désirabilités des propriétés des BAP en fonction des paramètres liés à la granulométrie des sables.	99

## Notations et abréviations

A	: Degré d'absorption [%].
ACI	: American Concrete Institute.
AFREM	: Agence française de recherche et des essais sur les matériaux et les constructions.
b	: Distance moyenne entre les granulats [ $\mu\text{m}$ ].
B	: Epaisseur de l'excès en pâte entre les granulats [mm].
BAEL 91-99	: Règlement du béton armé aux états limites 91, modifié en 99.
BAP	: Béton autoplaçant.
BHP	: Béton de haute performance.
BTHP	: Béton de très haute performance.
CPJ-CEM	: Ciment Portland avec un pourcentage d'ajouts $\leq 20$ %.
II/A	
C/S	: Rapport Carbonates de Calcium/Silicates.
$C_u$	: Coefficient d'uniformité de Hazen
$C_c$	: Coefficient de courbure
d	: Diamètre d'ouverture des tamis [mm]
$d_i (Y_i)$	: Fonction de désirabilité.
$d_{\text{max}}$	: Diamètre Maximal des grains [mm]
$d_{\text{min}}$	: Diamètre minimale des grains [mm] ou [ $\mu\text{m}$ ].
$D_{10}$	: Diamètre qui correspond à 10 % des passants [mm].
$D_{30}$	: Diamètre qui correspond à 30 % des passants [mm].
$D_{60}$	: Diamètre qui correspond à 60 % des passants [mm].
e	: Indice des vides.
E	: Module de Young [MPa].
$E_j$	: Module de Young à j jours [MPa].
$E_c$	: Module de Young de compression (ACI 318-05) [MPa].
$E_{\text{cm}}$	: Module de Young de compression (Eurocode 2) [MPa].
E/C	: Rapport Eau/Ciment.
E/L	: Rapport Eau/Liant.
ENG	: Entreprise nationale de granulats.
ESV	: Equivalant de sable visuel [%]

F	: Coefficient de Fisher.
GC	: Gravier concassé.
h	: Hauteur [mm].
H1 et 2	: Hauteurs du béton autoplaçant frais dans la boîte en L [mm].
LA	: Coefficient Los Angeles [%].
M <sub>f</sub>	: Module de finesse des sables.
M <sub>G total</sub>	: Masse totale du gravier [kg].
M <sub>P</sub>	: Masse de la poudre (ciment + filler) [kg].
M <sub>SP</sub>	: Masse du superplastifiant [kg].
MSR	: Méthodologie de la surface de réponse.
M <sub>S total</sub>	: Mass totale du sable [kg].
M <sub>w</sub>	: Masse de l'eau [kg].
n	: Nombre de réponses.
NF EN	: Norme française/ Norme Européennes.
p	: Coefficient de Pearson.
P	: Pourcentage des passants à travers un tamis d'ouverture d [ % ].
pH	: Potentiel hydrogène, utilisé pour mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution.
PL	: Ecoulement en milieu confiné du béton autoplaçant frais.
PL1 et 2	: Classes d'écoulement du béton autoplaçant frais par l'essai de la : boîte en L.
R <sup>2</sup>	: Coefficient de détermination.
R <sub>cm</sub>	: Résistance à la compression (Eurocode 2) [MPa].
R <sub>cj</sub>	: Résistance à la compression à j jours [MPa].
R <sub>c28</sub>	: Résistance mécanique à la compression à 28 jours [MPa].
Re	: Pourcentages des refus [%].
RS	: Résistance à la ségrégation du béton autoplaçant frais [%].
RS1 et 2	: Classes de résistance à la ségrégation du béton autoplaçant frais.
SC	: Sable concassée.
SCE	: Somme des carrés des écarts
SD	: Sable de dunes.
SF	: Etalement du béton autoplaçant frais [mm].
SF1 à 3	: Classes d'étalement du béton autoplaçant frais.

SP	: Superplastifiant.
SR	: Sable de rivière.
SSB	: Surface spécifique de Blaine.
tv	: Temps d'écoulement du béton autoplaçant frais à travers l'entonnoir en V [s].
T <sub>500</sub>	: Temps nécessaire pour que le béton frais s'étale à 500 mm [s].
V	: Variance.
V <sub>air</sub>	: Volume de l'air [m <sup>3</sup> ].
V <sub>béton</sub>	: Volume du béton [m <sup>3</sup> ].
VF1 et 2	: Classes de viscosité du béton autoplaçant frais par essai l'entonnoir : en V.
V <sub>fluide</sub>	: Volume de la fraction fluide du béton [m <sup>3</sup> ].
V <sub>G</sub>	: Volume du gravier [m <sup>3</sup> ].
V' <sub>G</sub>	: Volume cumulé éventuel des particules inférieures à d <sub>min</sub> du gravier [m <sup>3</sup> ].
V'' <sub>G</sub>	: Volume cumulé éventuel des particules de gravier inférieures à 0,125 mm [m <sup>3</sup> ].
V <sub>G total</sub>	: Volume total du gravier [m <sup>3</sup> ].
V <sub>liquide</sub>	: Volume du liquide (eau + superplastifiant) [m <sup>3</sup> ].
V <sub>P</sub>	: Volume de la poudre [m <sup>3</sup> ].
V <sub>S</sub>	: Volume du sable [m <sup>3</sup> ].
V' <sub>S</sub>	: Volume cumulé des particules de sable inférieures à 0,125 mm [m <sup>3</sup> ].
VS1 et 2	: Classes de viscosité du béton autoplaçant frais par essai d'étalement.
V <sub>solide</sub>	: Volume de la fraction solide [m <sup>3</sup> ].
V <sub>SP</sub>	: Volume du superplastifiant [m <sup>3</sup> ].
V <sub>S total</sub>	: Volume total du sable [m <sup>3</sup> ].
V <sub>v</sub>	: Volume des vides [m <sup>3</sup> ].
V <sub>w</sub>	: Volume de l'eau [m <sup>3</sup> ].
X <sub>i</sub>	: Facteurs étudiés.
Y, Y <sub>i</sub>	: Paramètre étudié (réponse).
$\bar{y}$	: Valeur moyenne de toutes les observations (moyenne globale).
$\hat{y}_i$	: Valeur prédite par régression pour la i <sup>ème</sup> expérience.
α	: Module de distribution des particules solides.

$\beta_0$	: Le terme indépendant de l'équation de régression.
$\beta_i$	: Termes linéaires l'équation de régression.
$\beta_{ii}$	: Termes quadratiques l'équation de régression.
$\beta_{iii}$	: Termes cubiques l'équation de régression.
$\dot{\gamma}$	: Taux de cisaillement du béton frais [ $s^{-1}$ ].
$\Delta$	: La désirabilité globale.
$\mu$	: Viscosité dynamique ou viscosité apparente $\mu$ [Pa.s]
$\pi$	: Porosité.
$\rho$	: Masse volumique absolue [ $kg/m^3$ ].
$\rho_{app}$	: Masse volumique apparente [ $kg/m^3$ ].
$\rho_G$	: Masse volumique du gravier [ $kg/m^3$ ].
$\rho_S$	: Masse volumique du sable [ $kg/m^3$ ].
$\rho_{SP}$	: Masse volumique du superplastifiant [ $kg/m^3$ ].
$\rho_P$	: Masse volumique de la poudre [ $kg/m^3$ ].
$\rho_W$	: Masse volumique de l'eau [ $kg/m^3$ ].
$\sigma$	: Ecart type.
$\tau$	: Contrainte de cisaillement du béton frais [Pa].
$\tau_0$	: Seuil d'écoulement du béton frais [Pa].
$\Phi$	: Fraction de volume remplie par les granulats.
$\Phi_m$	: Fraction de volume maximale remplie par les granulats.
$\Phi/\Phi_m$	: Volume relatif des grains solides.
$\emptyset$	: Diamètre (ou section) [mm].

## Introduction générale

L'utilisation bétons spéciaux et les bétons autoplaçants (BAP) en particulier, date vers la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. De nos jours, plusieurs ouvrages sont réalisés en BAP (e.g. Bordj Khalifa, Dubai). Son importance dans le domaine de l'industrie de construction est due à l'économie du temps et d'argent qu'il offre, ainsi qu'à ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Ces propriétés permettent aux ingénieurs et aux concepteurs de réaliser des structures complexes, avec une meilleure qualité de parement et qui durent dans le temps.

L'obtention d'un BAP qui répond aux exigences techniques recherchées dépend de ses constituants, ainsi que des conditions de température et d'humidité lors de la confection du béton et de sa cure.

En Algérie, l'utilisation des BAP est relativement récente, avec le lancement des grands projets construits principalement par des entreprises étrangères. L'expérience des entreprises locales reste modeste dans ce domaine. La qualité des BAP fabriqués en Algérie est liée à la qualité des matériaux locaux et à leur compatibilité avec les superplastifiants qui existent sur le marché algérien (choix limité).

Plusieurs études ont été menées sur les BAP en Algérie, datant elles aussi presque du même âge que l'introduction de cette technologie au pays. Ces études restent limitées par les propriétés des matériaux locaux utilisés. Ce qui rend l'amélioration, ou voir même l'optimisation des propriétés des BAP, un travail délicat et difficile.

L'industrie locale des matériaux de construction fournit une faible variété de ciments dont on ne déclare pas le type d'ajout utilisé; et des granulats grossiers qui ont des propriétés relativement semblables à l'échelle régionale (dus à la nature des formations géologiques régionales). Par contre, on peut trouver sur chaque marché régional, une certaine variété de sables que ce soit dans leur origine (dunes, rivière ou carrière) ou leur forme (arrondie ou angulaire).

L'amélioration du comportement rhéologique et mécanique des BAP à base des matériaux locaux nécessite soit une optimisation de la matrice cimentaire (ciment et

fillers), soit une optimisation du squelette granulaire (sable et graviers), deux approches qui sont utilisés dans plusieurs études.

La question qui se pose : Est ce que les propriétés granulométriques du sable (module de finesse, coefficients de courbure et d'uniformité) conditionnent-elles le comportement rhéologique et mécanique des BAP et parviennent-elles à être utilisées pour améliorer ces comportements?

Dans la littérature, on trouve que les propriétés des BAP à l'état frais et durci sont influencées par la granulométrie et la forme des grains de sable utilisé. Il est donc intéressant de jouer sur ce facteur pour essayer de fabriquer des BAP répondants aux exigences techniques des normes en vigueur.

Il existe une variété de méthodes de formulation, dont certaines sont basées sur la distribution granulométrique des constituants solide, et d'autres sur l'excès en pâte ou en eau de gâchage; mais aucune n'est vraiment efficace en dehors des laboratoires, de point de vu temps et cout, comme étant le cas des bétons conventionnels. Car chaque changement de constituants nécessite une nouvelle formulation convenable.

L'objectif de ce travail est double, il nous sera utile tout d'abord de mettre au point une méthode robuste de formulation, et de vérifier l'hypothèse de l'influence positive des propriétés granulométriques des sables sur celles des BAP. On suppose que le comportement de ces derniers à l'état frais et durci est conditionné par la distribution granulométrique des sables utilisés et leur finesse.

On vise ici à améliorer les propriétés des BAP; qui veut dire l'assurance d'un comportement hydrodynamique lui permettant de remplir les conditions les plus strictes de fluidité avec une résistance élevée à la ségrégation et des propriétés mécaniques satisfaisantes. L'optimisation est alors l'obtention de meilleures valeurs possibles des propriétés recherchées en fonction des conditions (ou facteurs) considérés. Ces facteurs dans la présente étude sont les propriétés de la courbe granulométrique des sables.

Dans une première étape, cette thèse propose une approche de formulation assurant un comportement hydrodynamique du BAP. Une étude expérimentale est faite pour comprendre l'effet de la granulométrie des sables sur les propriétés des BAP. Dans une seconde étape, on fait appel aussi à des méthodes statistiques pour prédire et optimiser

les propriétés des BAP à l'état frais et durci, en se basant seulement sur les propriétés granulométriques des sables utilisés.

Dans ce cadre, la thèse structurée en cinq chapitres:

- Le premier chapitre est une étude bibliographique des bétons en général et les BAP en particulier, de leurs constituants et leurs l'influence sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons.
- Le deuxième chapitre présente les différentes propriétés et exigences techniques pour la fabrication des BAP, et les essais utilisés pour la mesure et le contrôle de ces propriétés, selon les normes en vigueur. Le chapitre parle aussi des méthodes de formulations existantes et propose un nouveau modèle de formulation hydrodynamique des BAP.
- Le troisième chapitre est une présentation des matériaux locaux utilisés dans la partie expérimentale de ce travail, ainsi que les méthodes utilisées et les propriétés étudiées.
- Le quatrième chapitre est l'étude expérimentale sur les propriétés fraîches de la pâte autoplaçante, dans le but de déterminer le point de saturation en superplastifiant (SP) et donc son dosage pour la formulation des BAP. Puis, l'étude des mélanges de BAP formulés, en fonction des propriétés des sables utilisés.
- Le cinquième chapitre emploie les résultats de l'étude expérimentale sur les BAP du chapitre IV, pour la modélisation et l'optimisation de ses propriétés rhéologiques et mécaniques, en fonction de la distribution granulométrique du sable et de son module de finesse.

L'intérêt de ce travail trouve ces origines dans l'idée de pouvoir améliorer la qualité des BAP fabriqués à base des matériaux locaux, en se basant sur les propriétés du matériau qui présente plus de variété sur le marché local, en comparaison avec les autres composants utilisés dans la formulation des BAP. D'autre part, la possibilité de prédire le comportement de ces derniers est d'un grand intérêt de point de vue économique.

Partie I :  
Revue  
bibliographique

# Chapitre I: Les bétons autoplaçants (BAP).

## 1. Introduction

Les des bétons conventionnels et les bétons autoplaçants (BAP) sont des matériaux de construction très réponsus, dont les propriétés dépendent de celles de leurs constituants, ainsi que des conditions liées à l'environnement. C'est-à-dire, les conditions de température et d'humidité lors de la confection du béton et de sa cure.

Dans ce chapitre, on va présenter les différents constituants communs des bétons en général, et leur influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Ensuite, on parlera sur les BAP leurs avantages et domaines d'emploi, ainsi que leurs méthodes d'exécutions.

## 2. Les constituants solides

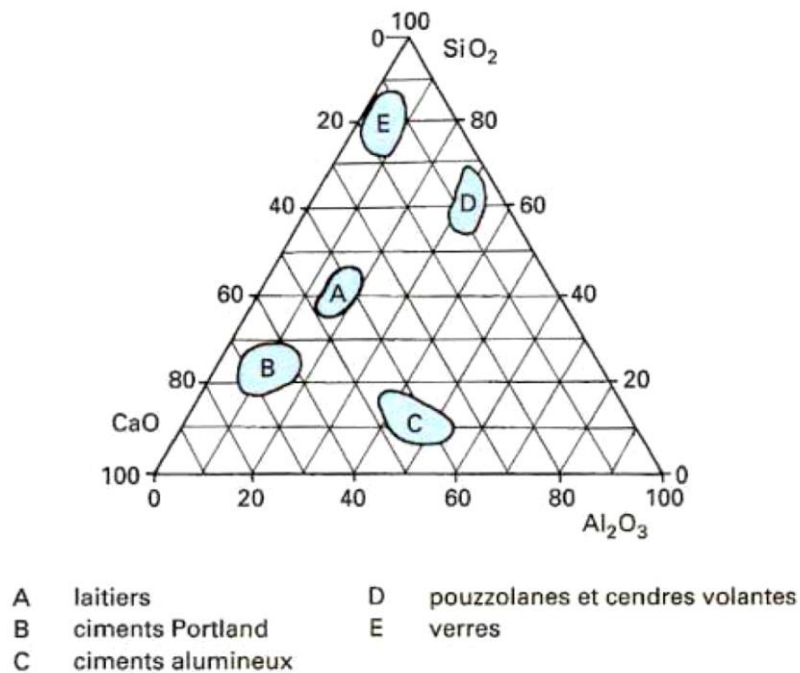
Les constituants qui forment le squelette solide d'un béton varient des particules les plus fines (poudre), passant par les particules moyennes (sable) jusqu'au plus grosses (gravillon). Cette variété dimensionnelle garantit une distribution granulométrique continue, ce qui permet d'avoir une bonne compacité des grains solides et ainsi de bonnes propriétés mécaniques.

### 2.1. La poudre

Les particules fines dans un béton sont principalement celles du liant (le ciment dans notre cas). Cependant, elles peuvent aussi inclure des particules d'additions (ajouts) minérales. Pour cela, on va utiliser le terme général: poudre.

#### a. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique ternaire, composé principalement de silico-aluminates de calcium ( $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ ), ainsi que d'autres oxydes minéraux (figure I.1).



**Figure I.1** - Situation des ciments Portland dans le système CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1].

Cette composition chimique du ciment influe sur les propriétés physico-mécaniques du ciment, et par suite celle du béton formulé par ce ciment.

Dans un ciment Portland, le rapport entre le pourcentage des silicates et d'oxyde de calcium (C/S) généralement supérieur à 2, garantie au ciment un pH basique  $\approx 13$ . C'est ce qui permet aux réactions d'hydratation d'avoir lieu lors du contact avec l'eau.

Le besoin d'eau d'un ciment est principalement réciproque au rapport C/S: plus ce rapport est grand, plus est la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale d'une pâte de ciment [2-4].

Un autre facteur influant sur la quantité d'eau nécessaire ainsi que la vitesse d'hydratation, qui est la finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine (SSB). Une grande SSB augmente le besoin d'eau à cause de l'augmentation de la surface de contact entre l'eau et les particules du ciment [5]. La vitesse d'hydratation est aussi accélérée et plus complète.

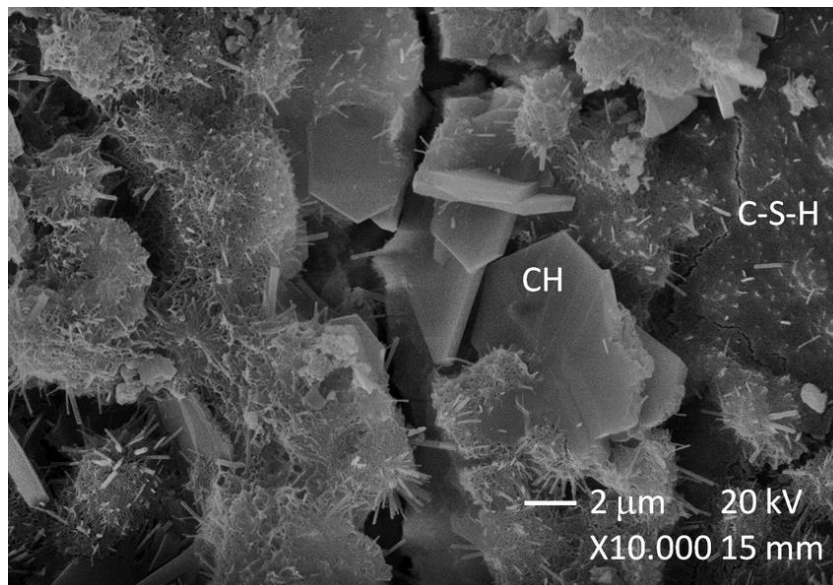
Le ciment Portland contient quatre constituants principaux, appelés minéraux de Bogue [6]:

- le silicate tricalcique  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$  (ou, par abréviation,  $\text{C}_3\text{S}$ );
- le silicate bicalcique  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$  (ou  $\text{C}_2\text{S}$ );
- l'aluminate tricalcique  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  (ou  $\text{C}_3\text{A}$ );
- l'alumino-ferrite tétracalcique  $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$  (ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ).

Dans un processus d'hydratation très complexe et continu dans le temps, le  $\text{C}_3\text{S}$  et le  $\text{C}_2\text{S}$  donnent du silicate monocalcique hydraté (CSH), ainsi que de la chaux libre hydratée CH (portlandite), selon la réaction d'hydratation globale suivante [7]:



Ces produits sont responsables du phénomène de prise, par la formation d'un gel microcristallin (figure I.2) [6].



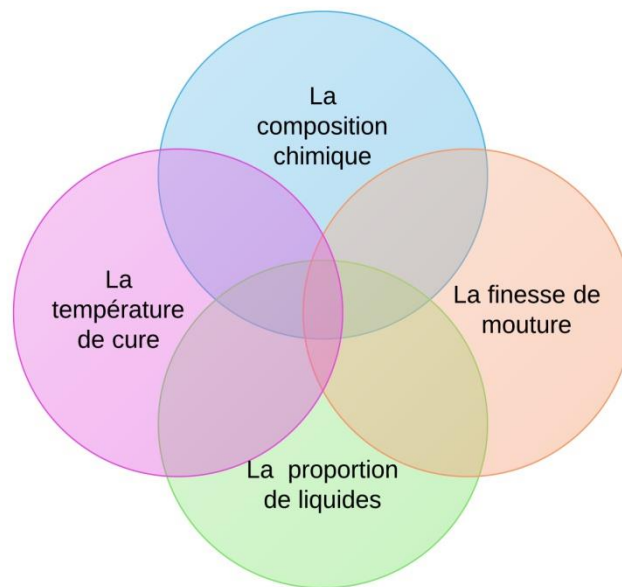
**Figure I.2** – Produits d'hydratation du ciment (CSH et CH), par microscope électronique à balayage (MEB) [8].

On peut donc résumer les principaux facteurs influant sur la qualité et les propriétés du ciment dans quatre paramètres (figure I.3):

- la composition chimique;

- la finesse de mouture;
- la quantité de liquides (eau + adjuvants éventuels);
- les conditions de cure.

La composition chimique d'un ciment provient de la composition du clinker et des ajouts minéraux éventuels, au cours du processus de fabrication du ciment. Les ajouts peuvent aussi être additionnés lors de la préparation d'un béton.



**Figure I.3** – Les principaux facteurs liés au ciment, influant sur les propriétés des bétons.

La norme EN 197-1 [9] définit 27 principaux types de ciments. Ces ciments ne sont pas tous disponibles en un lieu donné. Sauf pour quelques rares exceptions près, le choix du ciment devra faire appel aux ressources locales. Le choix ne sera pas uniquement dû aux propriétés intrinsèques du ciment mais aussi à d'autres critères (prix, quantité de fines dans la formulation) [10].

En Algérie, la majorité des cimenteries fabriquent principalement le CPJ-CEM II/A, avec une classe de résistance de 42,5 MPa.

**Tableau I.1** - Effets principaux des ajouts les plus utilisés [10].

Constituant ajouté		Effets principaux du constituant ajouté au clinker
S	Laitier de haut fourneau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminue la réactivité à court terme. Diminue le retrait;</li> <li>- Montée en résistance moins rapide;</li> <li>- Adapté aux ouvrages en contact avec le sol.</li> </ul>
Z	Pouzzolane naturelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminue la réactivité à court terme et ses effets;</li> <li>- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.</li> </ul>
Q	Pouzzolane calcinée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminue la réactivité à court terme et ses effets;</li> <li>- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.</li> </ul>
V	Cendres volantes siliceuses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apporte une résistance complémentaire à long terme;</li> <li>- Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité;</li> <li>- Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.</li> </ul>
W	Cendres volantes calciques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.</li> </ul>
T	Schiste calcinée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminue la réactivité à court terme et ses effets;</li> <li>- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.</li> </ul>
L et LL	Calcaire broyé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7 jours);</li> <li>- Complete le squelette granulaire.</li> </ul>
M	Mélange de constituants	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Associe les effets des différents constituants;</li> <li>- Diminue le prix du ciment. Couleur et propriétés variables.</li> </ul>

## **b. Les ajouts**

Les additions minérales sont ajoutées aux ciments, pour but de réduire leur coût et de leur donner de nouvelles propriétés, telles que des résistances mécaniques plus élevées ou la bonne durabilité aux milieux agressifs [11].

Cependant, une quantité excessive de certains ajouts peut causer une baisse de résistance considérable, surtout dans le cas des ajouts avec un taux important de SiO<sub>2</sub> (pouzzolanes, fumée de silice, ...etc.). La somme des proportions du CaO et du SiO<sub>2</sub> doit être d'au moins 50 % en masse, dans les ciments [9]. Le tableau I.1 résume les effets principaux des ajouts les plus utilisés.

### **2.2. Les granulats**

Du fait que le ciment est un matériau relativement coûteux, il est plus économique de lui substituer partiellement par d'autres matériaux moins chers. Il s'agit des granulats (de démentions  $\leq 125$  mm), qui ne doivent pas affecter négativement les propriétés physico-mécaniques du béton. Cette condition est garantie en respectant des exigences techniques spécifiques, concernant la dureté des granulats, leur granulométrie, leur propreté, ...etc.

Les particules de granulats inférieurs à 0,125 mm sont considérées comme faisant partie des fines (poudre) de la fraction solide des bétons [12].

Il existe deux types de granulats naturels:

- les granulats roulés: obtenus par criblage et lavage des matériaux alluvionnaires;
- les granulats concassés: obtenus pas concassage, criblage et lavage des roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques.

Les granulats artificiels sont obtenus à partir des sous-produits industriels, ou du recyclage des déchets, des débris de démolition des d'anciennes constructions... etc.

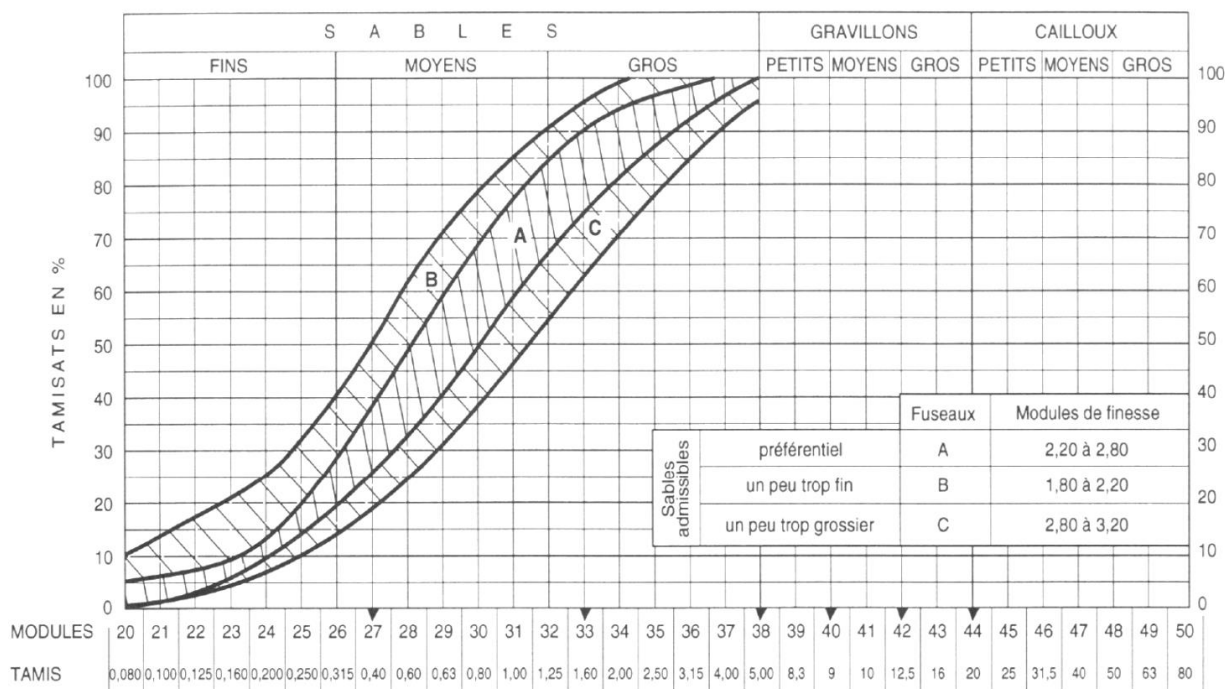
Les granulats forment approximativement trois-quarts du volume du béton. Il est inévitable donc qu'ils influencent les propriétés de ce dernier, à l'état frais comme à l'état durci. Les granulats ne sont pas vraiment inertes, puisque leurs propriétés chimiques (ainsi que physiques et thermiques) peuvent influencer les performances du béton [13, 14]

**a. Le sable**

Le sable est un composant clé, assurant la continuité de la granulométrie entre la poudre (liant) et les granulats grossiers du mélange sec du béton. De ce fait, un sable pour béton doit répondre à certaines conditions techniques assurant sa qualité, et par suite la qualité du béton.

Il y a sept facteurs influant sur la qualité du sable [11]:

- La granulométrie;
- La forme et la texture des grains;
- La présence d'argile/matière organique;
- Les impuretés chimiques;
- La présence des particules fragiles;
- L'absorption d'eau;
- La présence de mica.



**Figure I.4** – Fuseau proposé pour la granularité des sables à béton [16].

La granulométrie est considérée comme le facteur le plus important du sable, qui peut être le critère décisif pour juger un sable comme étant exploitable ou non. Un sable est

classé selon sa granulométrie en calculant son module de finesse (Mf), qui est la somme de pourcentages des refus (Re) cumulés pour les tamis de modules [15]: 22, 25, 28, 31, 34, 37.

d'où:

$$Mf = \frac{\sum Re \%}{100} \quad (1)$$

Un bon sable pour béton a un module de finesse:  $2,2 \leq Mf \leq 2,8$  (figure I.4). Les sables avec  $Mf > 2,8$  donnerons des bétons résistants mais moins maniables; ce qui est défavorable pour certains bétons spéciaux. Un module de finesse au-dessous de 2,2 signifie que le sable est constitué d'éléments fins et trains fins, ce qui augmente le besoin en eau.

#### **b. Le gravier**

Les propriétés des gros granulats (graviers) dépendent de celles de la roche d'origine, et du processus de concassage (s'il y a lieu), ainsi que du criblage des granulats et leurs propriétés. La plupart des roches ont une résistance adéquate pour l'utilisation en béton, à l'exception de certaines roches de sable ou calcaires [11].

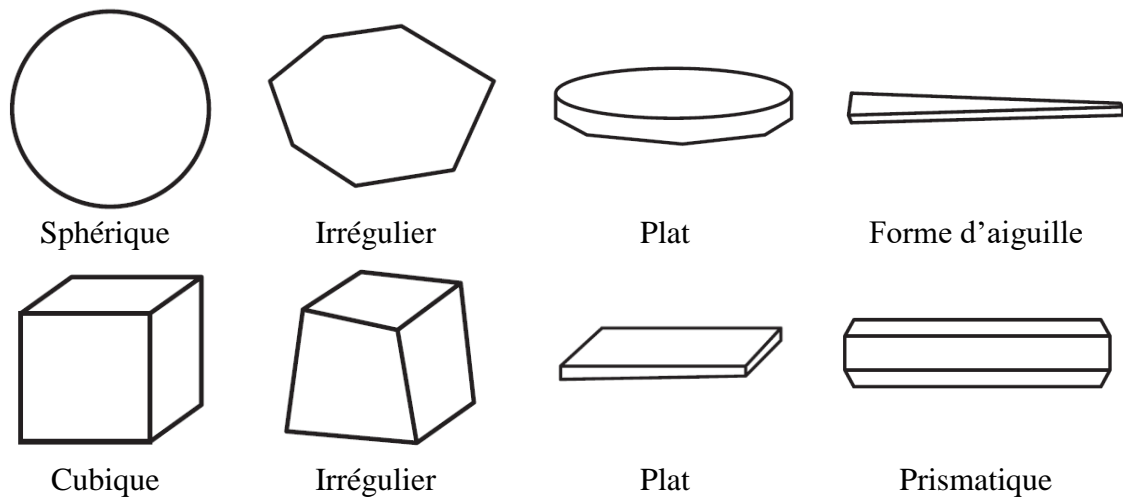
Un autre paramètre lié à la nature de la roche originelle des granulats et qui influe sur la résistance et la durabilité des bétons, est la porosité et donc l'absorption d'eau, ainsi que le degré d'alcalinité. Des granulats qui présentent un degré d'absorption excessif augmenteront le retrait du béton.

Généralement, le diamètre des gros granulats est  $\geq 5$  mm. Dans un béton courant, le diamètre maximal des graviers utilisés ( $d_{max}$ ) est autour de 25 mm [14].

#### **- La forme des granulats**

Il est évident que la forme des granulats (Figure I.5) affecte l'ouvrabilité du béton dû à la surface des différentes formes particules et la friction entre elles. Les granulats de forme angulaire et irrégulière sont bénéfiques à la résistance mécanique du béton, tandis que les granulats plats sont fragiles et facilement cassés. La surface des granulats sphérique est la plus petite [11, 14].

Une quantité suffisante de pâte de ciment est nécessaire pour envelopper la totalité des granulats et pour jouer le rôle de lubrifiant entre les grains solides [13].



**Figure I.5** - Les différentes formes basiques des granulats [14].

- ***Le rapport sable/gravier***

Ce rapport (S/G) influence la densité de remplissage du béton, ainsi que son ouvrabilité à l'état frais. Un rapport sable/gravier élevé est la façon la plus favorable pour obtenir une cohésion élevée du béton, mais la consistance sera réduite [13].

- ***Le rapport granulats/ciment***

Un rapport granulats/ciment (G/C) élevé a un effet sur le coût du béton ainsi que son ouvrabilité, ses propriétés mécaniques et la stabilité de sa forme. Cependant, la consistance du béton diminuera, puisque moins de ciment sera présent pour jouer le rôle d'un lubrifiant. Alors que les propriétés mécaniques seront améliorées avec un bon compactage du béton. La stabilité de forme aussi sera améliorée par la réduction du retrait et du fluage [14].

### **3. Les constituants liquides**

#### **3.1. L'eau de gâchage**

L'eau est un composant important du béton, constituant 15 à 25 % du volume d'un béton conventionnel. Le pourcentage d'eau utilisée et le rapport eau/ciment (E/C)

peuvent être considérés comme les facteurs les plus critiques dans la production d'un béton de bonne qualité [16].

L'eau convenable à la confection des bétons ne doit pas contenir ni des éléments chimiques agressifs risquant d'attaquer l'une des composantes du béton (ciment, granulats ou armature), ni des matières en suspension dont la quantité pourrait modifier la qualité originelle de l'eau. La teneur en matière en suspension est limitée à 2 à 5 g/l, et la teneur en sel dessous à 15 ou 30 g/l, suivant la nature du béton [17].

Parmi les eaux susceptibles de convenir à l'utilisation pour le gâchage du béton, on a [14,16]:

- L'eau potable;
- Les eaux de recyclage, provenant du rinçage des bétonnières ou des camions-malaxeurs, à condition de vérifier leur aptitude dans le cas de changement des ciments ou des adjuvants.
- Les eaux de pluies ou de ruissellement, les eaux pompées tant qu'elles restent conformes aux prescriptions de la norme en vigueur.

Tandis que les catégories d'eaux non convenables à l'utilisation pour les bétons sont [13,16]:

- Les eaux usées;
- Les eaux-vannes ou contenant des détergents;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques.

### **3.2. Les adjuvants**

Il y a une trentaine d'années, presque la totalité des bétons au monde est adjuvantée [16]. Cependant, l'utilisation des adjuvants reste limitée en Algérie et ils ne sont généralement employés que par les grandes entreprises étatiques (dans les grands ouvrages) ou par les entreprises étrangères.

L'emploi des adjuvants vise la modification et l'amélioration des propriétés physiques, mécaniques et chimiques des bétons, telles que [18]:

- L'obtention des propriétés requises dans le cahier de charge des projets, notamment, le rapport E/C exigé, la résistance minimale au jeune âge et la résistance normale, et la maintenance d'une bonne ouvrabilité lorsque les matières composant le béton sont de qualité médiocre.
- L'amélioration des propriétés plastiques du béton, telles que l'ouvrabilité ou la réduction d'eau en maintenant la consistance recherchée, accélérer ou retarder le temps du début de la prise, améliorer la qualité de la finition du béton, contrôler le ressuage et la ségrégation, et améliorer la pompabilité.
- La réduction du coût des opérations du bétonnage en réduisant le coût global des ingrédients du béton, et en permettant un décoffrage rapide et facile.
- L'amélioration de la qualité du béton durci, telle que la résistance à court et à long terme et le module d'élasticité, diminuer la perméabilité et l'absorption (ce qui aide à protéger les armatures contre la corrosion), augmenter la résistance à l'abrasion et augmenter l'adhérence avec les armatures.
- Le contrôle de l'expansion due aux alcalis-réactions avec certains granulats.

Les adjuvants peuvent être classés sous quatre groupes (tableau I.2) [14]:

- ***Les agents entraîneurs d'air***

Ce type d'adjuvants est utilisé pour améliorer la résistance du béton au gel.

- ***Les adjuvants chimiques***

Un adjuvant chimique est tout additif chimique au mélange du béton pour améliorer ses propriétés à l'état frais ou durci. Ces produits chimiques incluent ceux qui réduisent le besoin d'eau pour une ouvrabilité donnée (appelés réducteurs d'eau), et ceux qui contrôlent le temps de prise et la vitesse de développement des résistances du béton (appelés accélérateurs et retardateurs de prise). À côté de ces produits chimiques, il y a aussi ceux pour d'autres buts, tels que : les agents modificateurs de viscosité, les réducteurs de retrait, et les adjuvants de contrôle des réactions alcali-silice.

- ***Les adjuvants minéraux***

Ce type d'adjuvants est constitué de solides finement broyés et ajoutés au béton pour améliorer son ouvrabilité, sa durabilité, et sa résistance. Le laitier de hauts fourneaux et la pouzzolane sont des catégories importantes des adjuvants minéraux.

- *Les adjuvants divers*

Ils incluent toutes les autres matières qui ne relèvent pas des catégories mentionnées ci-dessus, telles que les latex, qui ne relèvent pas des catégories mentionnées ci-dessus, les inhibiteurs de corrosion et les adjuvants expansifs.

**Tableau I.2** - Les effets bénéfiques des différents types d'adjuvants sur les propriétés des bétons [14].

Propriété du béton	Type d'adjuvant	Catégorie de l'adjuvant
Ouvrabilité	Réducteurs d'eau	Chimique
	Agents entraîneurs d'air	Entraîneur d'air
	Poudre minérale inerte	Minéral
	Pouzzolanes	Minéral
	Latex polymères	Divers
Contrôle de prise	Accélérateurs de prise	Chimique
	Retardateurs de prise	Chimique
Résistance	Pouzzolanes	Minéral
	Latex polymères	Divers
Durabilité	Agents entraîneurs d'air	Entraîneur d'air
	Pouzzolanes	Minéral
	Réducteurs d'eau	Chimique
	Inhibiteurs de corrosion	Divers
	Réducteur de retrait	Divers
Bétons spéciaux	Latex polymères	Divers
	Fumée de silice	Minéral
	Adjuvants expansifs	Divers
	Adjuvants colorants	Divers
	Adjuvants générateurs de gaz	Divers

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant varient en fonction de son dosage dans le béton et des divers composants de celui-ci, en particulier le ciment. C'est pourquoi il convient de réaliser avant le début des travaux des essais de convenance de

l'adjuvant avec les autres ingrédients du béton, ainsi que les conditions réelles de mise en œuvre (température, pompage, transport, etc.) [16].

## 4. Les bétons spéciaux

Les bétons spatiaux différents du béton conventionnel par les matériaux employés ou les techniques de mise en œuvre. On peut distinguer:

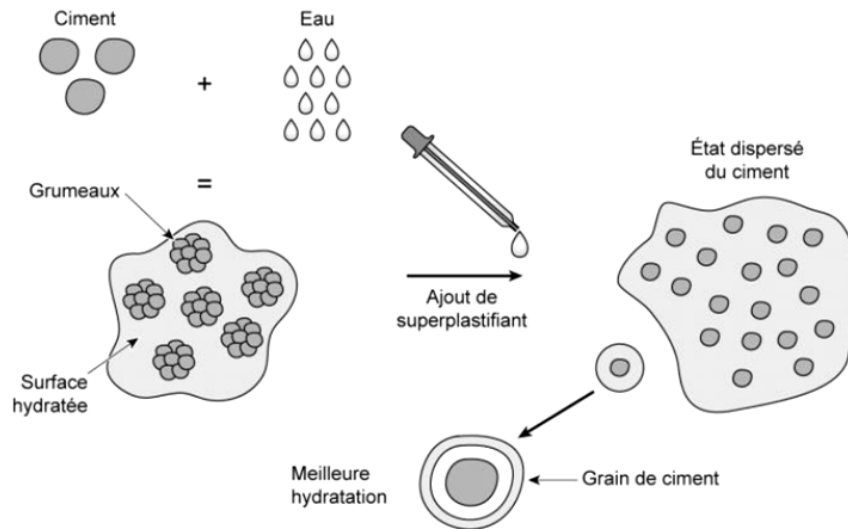
- Les bétons légers: les bétons caverneux, les bétons cellulaires, les bétons de granulats légers;
- Les bétons lourds (de granulats lourds);
- Les bétons précontraints;
- Les bétons de haute et de très haute performance;
- Les bétons prêts à l'emploi;
- Autres bétons: les bétons autoplaçants, les bétons de fibres, les bétons de résines, les bétons colorés, les bétons cyclopiens,... etc.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser sur les bétons autoplaçants et les bétons de haute et de très haute performance.

### 4.1. Le bétons de haute et très haute performance

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (entre 50 et 80 MPa) [14, 19] du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de superplastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante (figure I.6). De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité [20]. De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs [21]. Les BHP possèdent aussi une bonne résistance à l'abrasion et une meilleure tenue aux cycles gel/dégel [16].

Les bétons à très hautes performances (BTHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées, entre 80 et 100 MPa. D'autres produits comme les bétons fibrés ultra-performants (BFUP) peuvent développer des résistances mécaniques, entre 150 et 800 MPa [19].



**Figure I.6** – Mode d’action des superplastifiants hauts réducteurs d’eau sur l’hydratation du ciment [22].

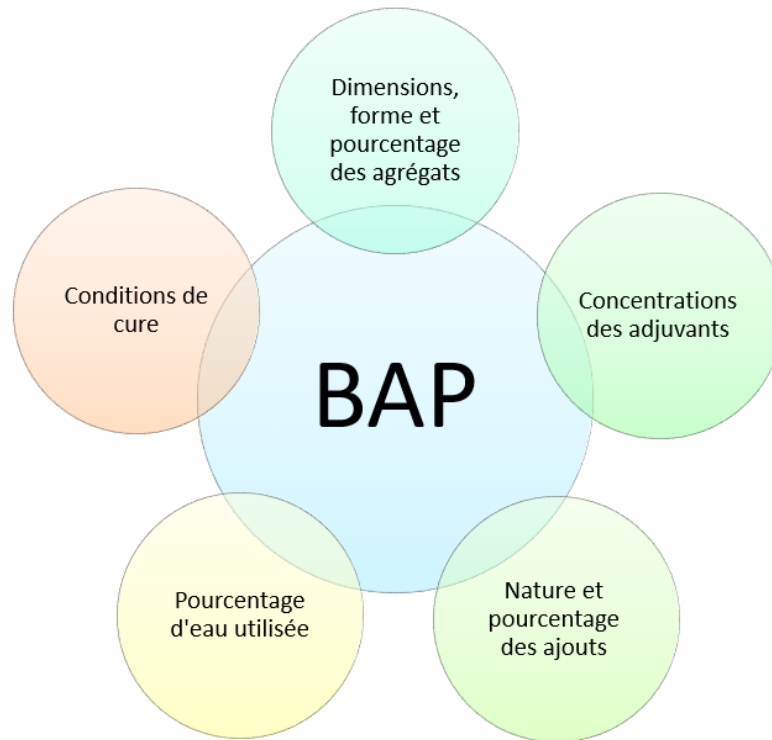
Les propriétés de ces types de bétons ne peuvent être atteintes que grâce à plusieurs dispositions simultanées [14, 16]:

- Les granulats doivent être de très bonne qualité, la résistance du béton peut être limitée par celle des granulats eux-mêmes;
- Le  $d_{\max}$  des granulats est généralement limité à 20 mm, pour obtenir un matériau plus homogène;
- L’utilisation des adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiants réducteurs d’eau ainsi que des fumées de silice, ces derniers s’avèrent indispensables dès que la résistance recherchée est supérieure à 80 MPa;
- Le rapport eau/ciment (E/C) ou eau/liant (E/L) est réduit à 0,3 ou moins;
- L’emploi des ciments de classe élevée (52,5 MPa) à des doses généralement entre 400 et 600 kg/m<sup>3</sup>;
- La durée du malaxage doit être généralement prolongée par rapport à celle des bétons ordinaires.

#### 4.2. Les bétons autoplaçants

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton qui a la capacité de couler et de faire prise dans les formes les plus compliquées à la présence de ferraillasses dense, sous l’effet de

son propre poids. Il est important de noter que le matériau ne doit présenter aucune forme de ségrégation, et doit avoir des qualités similaires à celles du béton vibré conventionnel [12, 23-25].



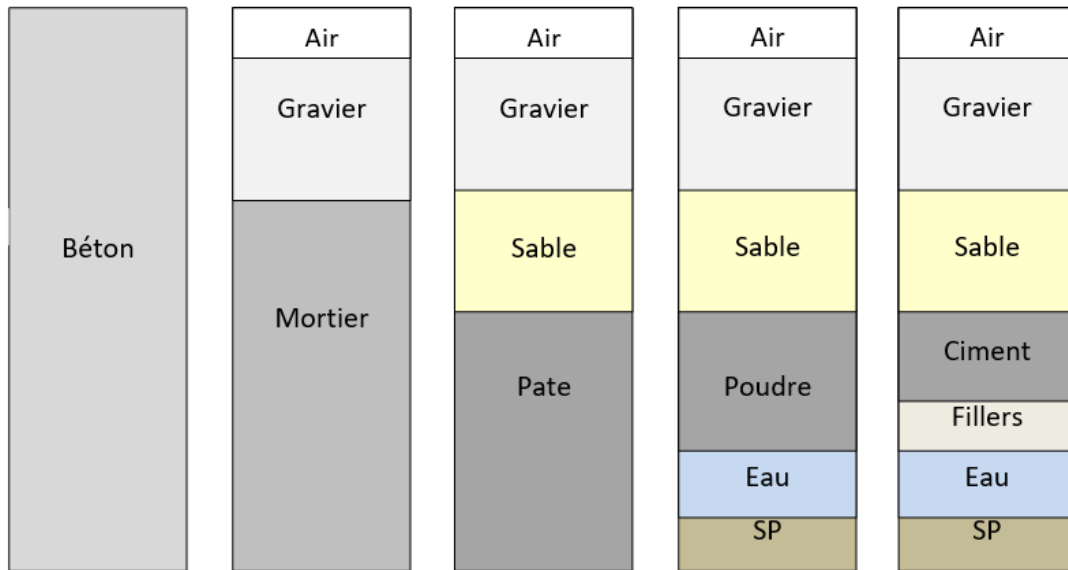
**Figure I.7** - Les principaux facteurs influençant les propriétés des BAP.

Il est peut-être intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil: ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement. Dans ce cadre, selon Wallevik [26], un BAP correspond à un béton dont le seuil d'écoulement est inférieur à 200 Pa. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm.

Les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP sont influencées par plusieurs facteurs: les proportions des différents constituants (solides et liquides), la distribution granulométrique et la forme des agrégats utilisée, ainsi que les conditions de cure (figure I.7).

D'une part, les granulats sphériques (roulés) ont un effet positif sur les propriétés du BAP frais, en comparaison avec les granulats angulaires, malgré qu'ils laissent plus de

vide intergranulaire; ce qui nécessite plus de poudre pour remplir les vides. Les grains sphériques présentent moins de friction et travaillent ensemble comme un roulement mécanique. D'une autre part, les granulats angulaires donnent de meilleures résistances mécaniques, mais ils demandent plus d'eau pour atteindre l'ouvrabilité visée [27]. Il est donc recommandé d'associer les deux types de granulats chaque fois qu'il est possible [28].



**Figure I.8** - Schématisation de la composition des BAP (d'après Brouwers et Radix) [29].

### 4.3. Composition des BAP

En effet, un BAP est souvent un BHP avec une capacité d'écoulement élevée. Les deux types de bétons sont caractérisés par un pourcentage élevé de liant et d'adjuvants, l'utilisation des adjuvants, et moins de granulats que dans les bétons conventionnels (surtout les gros granulats) [24, 30]. La figure I-8 illustre la composition d'un BAP.

### 4.4. Domaines d'utilisation des BAP

Grâce à leurs propriétés rhéologiques et mécaniques, les BAP sont utilisés dans une grande variété d'ouvrages horizontaux et verticaux, pour laquelle la mise en œuvre des bétons ordinaires est délicate. C'est-à-dire, dans les cas où nous faisons face à [31, 32]:

- Des densités de ferrailage importantes;

- Des formes et des géométries complexes: voiles, courbes, ...etc.;
- Des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ...etc.;
- Des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures;
- Des exigences architecturales et de qualité des parements particulière;
- Des accès difficiles, voire impossibles, pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

#### **4.5. Les avantages offerts par les BAP**

L'utilisation des BAP offre une multitude d'avantages du point de vue technique et économique [31]:

- Réduction des temps de bétonnage (grâce à la mise en œuvre possible du béton à la pompe);
- Facilité de mise en œuvre et gain sur les postes de travail, obtenu par le pompage du béton et la suppression de la vibration;
- Amélioration de la sécurité des ouvriers, en supprimant des postes de travail à risque (en partie haute des coffrages au moment du bétonnage en particulier);
- Réduction des délais de réalisation du chantier et des éléments préfabriqués en usine;
- Économie sur les coûts de la main-d'œuvre nécessaire à la vibration;
- Réduction des besoins en matériel;
- Amélioration de la productivité et des cadences;
- Optimisation de la charge d'utilisation de la grue de chantier;
- Réduction des coûts d'entretien des coffrages et des moules; ces derniers ne sont pas sollicités par les effets de la vibration;
- Réduction de l'encombrement sur chantier;
- Optimisation de l'organisation des chantiers;
- Réduction des nuisances sonores pour l'environnement du chantier et sur le chantier;
- Meilleure qualité des parements;
- Possibilité de résoudre des contraintes techniques, générées par la complexité des formes des structures, la densité du ferrailage, la réalisation des réservations complexes.



**Figure I.9** - Mise en œuvre des BAP [32].

#### **4.6. Méthodes de mise en œuvre des BAP**

Pour obtenir les résultats souhaités, les BAP sont moins exigeants dans leur mise en œuvre (figure I.9), mais ils nécessitent aussi certaines précautions [33]:

- Les BAP tolèrent des hauteurs de chute jusqu'à 5 m et des déplacements horizontaux dans le coffrage de 5 à 10 m (selon la résistance à la ségrégation du béton frais);
- Il faut vérifier l'étanchéité des coffrages (ouvertures < 3 mm), pour éviter de vider ces derniers;
- Le temps de recouvrement entre les couches de BAP doit être suffisamment faible, dans le cas des applications horizontales (certaines formulations peuvent faire une prise rapide);
- Pour les applications verticales, la mise en œuvre par le haut (à la benne ou à la pompe) ou par le bas (injection par pompage);
- Il convient de limiter la hauteur de chute, voire même de bétonner par la méthode du tube plongeur, lorsque le béton reste brut de décoffrage et que le parement doit être peu bullé.

#### 4.7. Durabilité des BAP

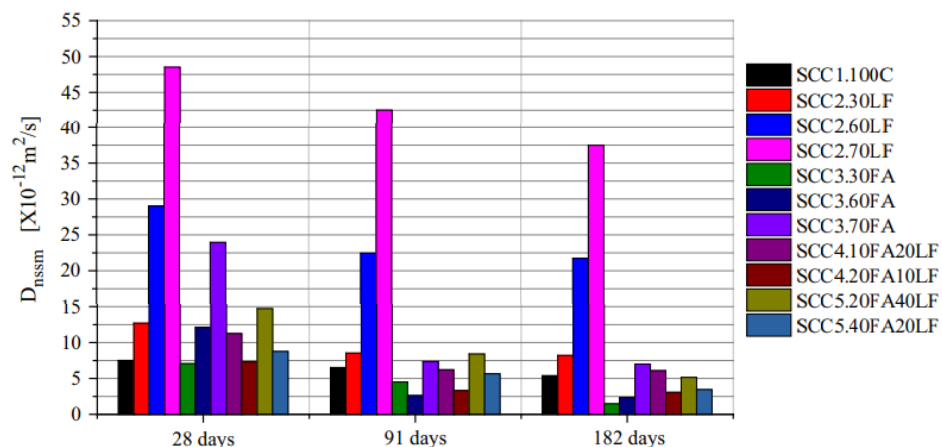
La durabilité des bétons est un paramètre très important, du point de vue économique ainsi que de la performance et la stabilité des ouvrages. Cette durabilité est influencée par les altérations dues aux [34]:

- Agressions externes: attaques sulfatiques, cycles gel/dégel, ...etc. ;
- Agressions internes: carbonatation, pénétration des chlorures, ... etc.

Les BAP doivent donc présenter une durabilité au moins égale à celle des bétons vibrés conventionnels. Puisqu'ils sont, à la base, constitués par les mêmes composants. Leur capacité d'écoulement et de remplissage leur donne une meilleure compacité et homogénéité. Ce qui assure une grande durabilité [12, 33].

Les attaques sulfatiques et la pénétration des chlorures sont très néfastes pour les bétons, et s'accroissent par les conditions climatiques agressives (forte pluviométrie, gel, ... etc.), ce qui conduit à une expansion du volume du béton et une dégradation de ses propriétés mécaniques.

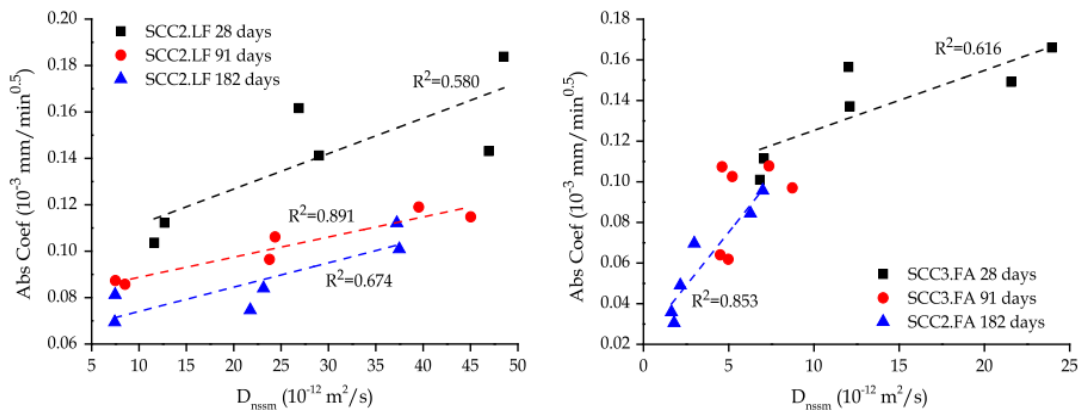
Les études expérimentales ont montré que la porosité est le facteur principal influant négativement sur la résistance des BAP vis-à-vis des différentes agressions [35].



**Figure I.10** – Absorption des chlorures en fonction du temps par des mélanges de BAP contenant des fillers calcaires et/ou fumée de silice, exprimée par le coefficient d'immigration non stationnaire des chlorures ( $D_{nssm}$ ) [36].

Cette porosité résulte de la consommation de l'eau de gâchage par les réactions d'hydratation, ainsi que l'évaporation de l'eau non combinée. Cela conduit à la formation d'une porosité capillaire [13]. Or que le rapport E/L est faible dans les BAP, dû à l'utilisation des SP hauts réducteurs d'eau. Cette réduction d'eau augmente la compacité et rend le BAP presque imperméable face à la pénétration.

Cependant, la consommation d'eau est aussi influencée par le type d'ajout utilisé dans la fabrication du ciment et le filler choisi pour la formulation des BAP. Les fillers calcaires consomment davantage d'eau que les fillers avec un rapport C/S faible, pour la même SSB [2, 35]. Cela se traduit par une absorption de plus de molécules agressives, telles que les sulfates, les chlorures et le CO<sub>2</sub> (Figures I.10 et I.11).



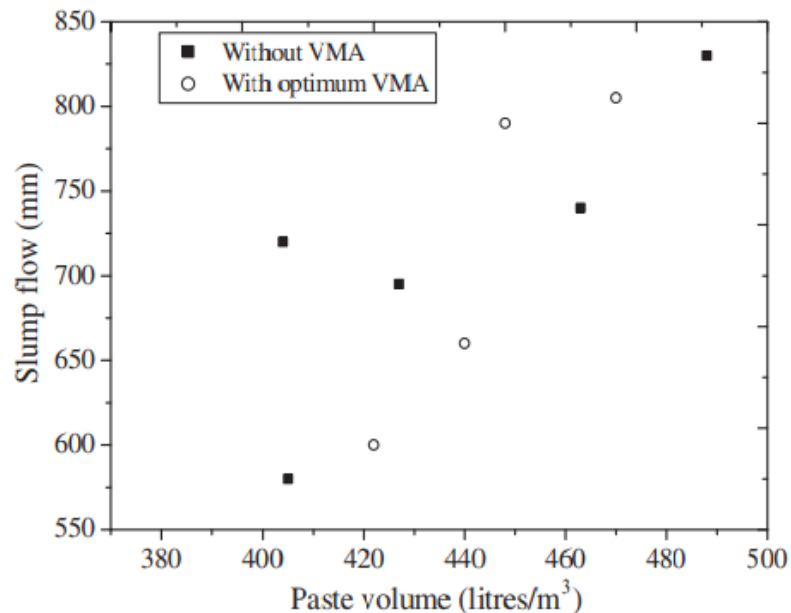
**Figure I.11** – Relation entre le coefficient de migration non stationnaire des chlorures ( $D_{nssm}$ ) et le coefficient d'absorption capillaire (Abs Coef) pour les mélanges de BAP binaires [36].

## 5. Effets des différents constituants des BAP sur ses propriétés

Depuis l'invention du BAP au Japon au début des années 1980s, puis son introduction au secteur de l'industrie de construction dans les années 1990s [37, 38], plusieurs travaux de recherche ont été menés pour comprendre l'effet des différents constituants des BAP sur leurs propriétés, notamment à l'état frais.

### 5.1. Effets du ciment

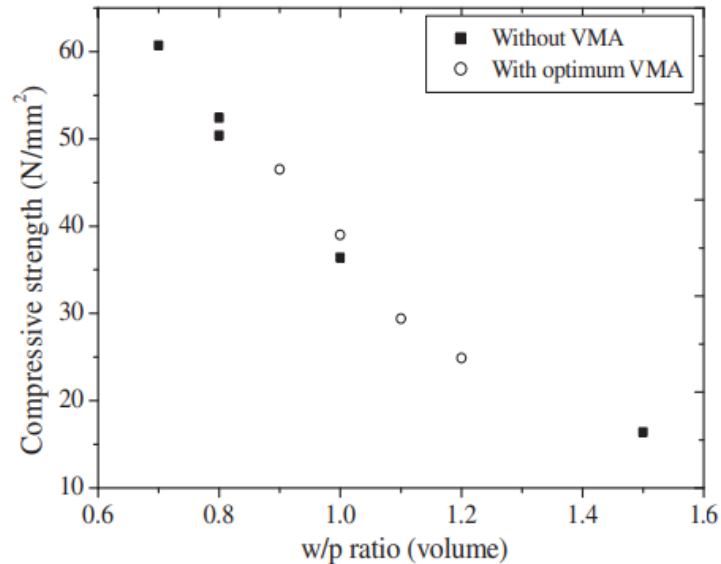
Le ciment, avec les fillers et les fines de sables, forme la phase liquide du BAP (la pâte) qui lui donne sa fluidité et ses propriétés rhéologiques à l'état frais [25]. Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont exothermiques (dégageant de la chaleur). Ce qui favorise l'utilisation des ciments Portland avec ajouts, notamment ceux de classe CEM II/B au laitier de haut fourneau comme ajout (jusqu'à 35 %), ou aussi des ciments spéciaux tels que les ciments bélitiques et les ciments ternaires caractérisés par leur faible température d'hydratation [39]. La formation de plus de gel de CSH et moins de portlandite à partir du bélite sont des paramètres clés pour l'amélioration de la résistance mécanique du BAP, ainsi que sa durabilité [40, 41].



**Figure I.12** – Relation entre le volume de pâte et l'étalement des BAP [42].

Selon Nanthagopalan et Santhanam [42], il faut au moins 370 à 390 l (environ 500 kg/m<sup>3</sup>) de pâte avec un taux de remplissage en granulats  $\approx 0,70$  pour obtenir un étalement  $\geq 550$  mm. Il est donc évident qu'une quantité de pâte supplémentaire est nécessaire pour attendre un étalement supérieur (figure I.12).

Pour atteindre des résistances à la compression supérieure à 40 MPa, il faut avoir un rapport eau/poudre  $E/P < 1$  (en volume). C'est-à-dire que la valeur du  $E/P$  (en masse) ne doit pas excéder 0,4 (figure I.13).



**Figure I.13** – Relation entre le rapport eau/poudre de pâte et la résistance à la compression des BAP [42].

En Algérie, les ciments destinés pour les structures sont généralement de classe CEM II/A (avec un taux d'ajouts minéraux ne dépassant pas le 20 %). Ce qui pose le problème de retrait et de fissuration du béton, puisque la quantité nécessaire de liant pour donner au BAP ses propriétés fluides à l'état frais est élevée.

## 5.2. Effets des fillers

Le problème de l'effet négatif de la quantité élevée du ciment dans les BAP est résolu par la substitution partielle du ciment par des fillers inertes tels que le calcaire, ou actifs comme le laitier. Les fillers actifs participent de leur part aussi au développement des distances mécaniques, grâce à leur propriété pouzzolanique. Mais, pour certains projets, les résistances élevées ne sont pas exigées, ce qui permet d'augmenter le taux de filler et de diminuer la quantité de ciment utilisé, et par conséquent de réduire l'impact négatif du BAP sur l'économie et l'environnement [38].

L'introduction de ces aditions minérales conduit donc à la modification des propriétés physiques et chimiques des BAP, en fonction du pourcentage utilisé de ces aditions pour remplacer les ciments [43]. La finesse des additions influe aussi sur ces propriétés: une grande SSB (telle que celle de la fumée de silice) augmente la résistance mécanique du BAP, mais son effet sur la rhéologie est négatif à cause de l'augmentation de la quantité d'eau demandée [44].

Le filler calcaire offre des avantages techniques qui ne peuvent pas être obtenus par exemple avec le laitier ou les cendres volantes [45], en plus de leur coût réduit. Ces avantages sont: l'augmentation de la résistance à la ségrégation, faible chaleur d'hydratation, réduction du retrait et de la carbonatation [46, 47]. Mais, le choix d'une addition ou d'une autre reste lié aussi à sa disponibilité sur le marché local.

### **5.3. Effets des granulats grossiers**

Bien qu'il est recommandé que la taille des granulats grossiers ne dépasse pas 20 mm de diamètre pour les BAP [16], plusieurs travaux de recherche se limitent à un  $d_{\max} = 16$  mm. Domone [48] suppose que la distribution granulométrique de l'ensemble des grains solides est plus importante que leur  $d_{\max}$ . Alors que selon Brouwers et Radix [29], l'utilisation des granulats avec un  $d_{\max} = 16$  mm donne un BAP capable de s'écouler à travers un ferrailage dense avec 37 mm d'espacement entre les armatures. Ce qui fait qu'on doit choisir la taille des grains selon la densité du ferrailage de l'ouvrage.

### **5.4. Effets des granulats fins**

Il est bien évident que le sable joue un rôle important dans la continuité du squelette solide du BAP. Le sable, avec une quantité suffisante de pâte, diminue le frottement entre les granulats grossiers. D'après Su et al. [49], l'augmentation de la quantité du sable influence positivement les propriétés rhéologiques. Le sable doit être propre pour éviter le problème de retrait excessif du béton, causé par les fines argileuses.

La distribution granulométrique des granulats fins influencent largement la résistance mécanique des BAP. Tandis que l'effet des granulats grossier sur cette propriété est faible. Mais son dosage doit être contrôlé pour maintenir une bonne fluidité à l'état frais [42, 50].

En Algérie, des études ont été faites sur les différents types de sables et leurs effets sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP, depuis le début des vingt dernières années, telles que les travaux de Bédérina et al. [51], de Zeghichi et al., [52] et de Sahraoui et Bouziani [53] sur l'effet de la substitution des sables concassés par le sable roulé sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci ; vu que le sable roulé (notamment le sable de dunes) est le constituant le plus abondant dans notre pays. Ces études ont montré que l'association des deux types de sables a le même effet sur les BAP que celui sur les bétons conventionnels.

### **5.5. Effets des adjuvants chimiques**

Les deux adjuvants principaux utilisés dans la fabrication des BAP sont les superplastifiants et les agents modificateurs de viscosité.

#### **5.5.1. Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau**

Ce type d'adjuvant est très important pour la formulation des BAP, surtout avec l'apparition des SP hauts réducteurs d'eau de troisième génération, permettant la réduction de la quantité d'eau et le gain de résistance à court terme. Un taux de croissance annuel de 4,5 milliards de dollars a été atteint dans le marché mondial des superplastifiants en 2020 [54].

Sur le marché national, on trouve principalement, les SP de troisième génération de la société nationale GRANITEX et de Sika Algérie. Dont il convient toujours de vérifier leur compatibilité avec les produits de chaque cimenterie.

#### **5.5.2. Les agents modificateurs de viscosité**

L'utilisation de ce type d'adjuvant avec un SP augmente la résistance à la ségrégation et améliore les propriétés rhéologiques du BAP [55]. Mais, on peut aussi réaliser de bonnes performances avec le bon choix des autres constituants [56].

## **6. Conclusion**

Les propriétés des bétons en général sont le résultat de l'interaction des constituants entre eux. Le dosage de ces constituants varie d'un type de béton à un autre, ce qui conditionne alors leur comportement à l'état frais ainsi que durci.

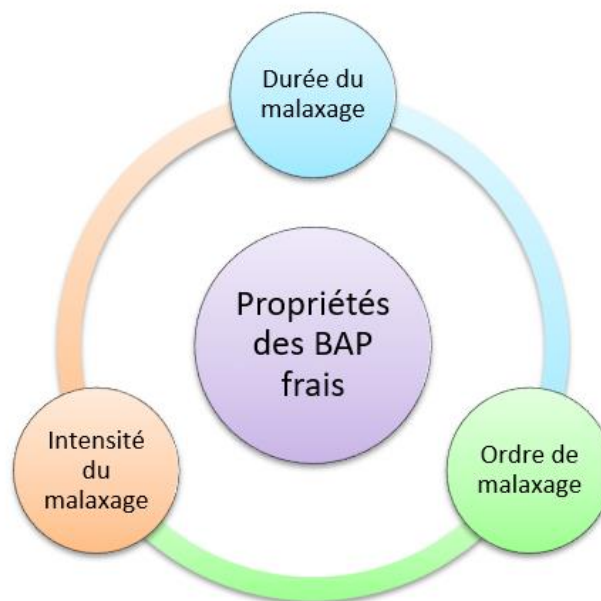
Les BAP offrent beaucoup d'avantages par rapport aux bétons conventionnels, de point de vue technique et économique. Ces avantages sont liés à la facilité de leur emploi, grâce à leur ouvrabilité, leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Cela nécessite un bon choix des constituants et de la méthode de formulation des BAP.

## Chapitre II: Exigences techniques et formulation des BAP.

### 1. Introduction

Les recommandations et les normes en vigueur liées au BAP exigent certaines spécifications techniques qui garantissent l'obtention des propriétés recherchées. Ces propriétés sont contrôlées par des essais décrits par ces normes.

Il existe une variété de méthodes de formulation, mais aucune n'est vraiment efficace en dehors des laboratoires, de point de vue du temps et du coût. Puisqu'on doit à chaque fois trouver la formulation convenable pour chaque changement de constituants.



**Figure II.1** – Facteurs de malaxage influents sur les propriétés du BAP frais.

### 2. Exigences techniques à l'état frais

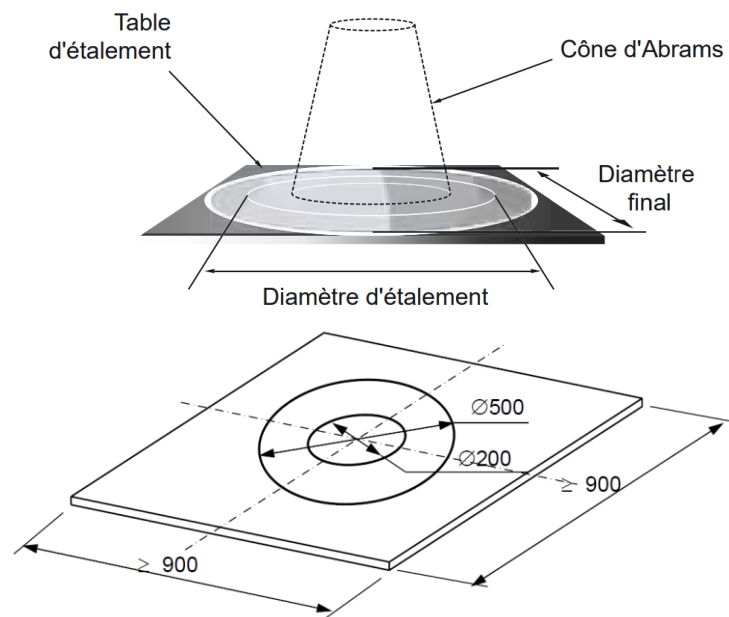
Les propriétés des BAP à l'état frais sont affectées non seulement par les conditions de l'environnement (température et humidité), mais aussi par la méthode de malaxage (figure II.1): un temps de malaxage très long peut causer une ségrégation, et

l'introduction du SP avant l'agent de viscosité améliore la fluidité, mais diminue la stabilité [57]. Tandis qu'une grande vitesse de malaxage rend le mélange plus dispersé et moins stable [58, 59].

Les principales propriétés exigées pour la fabrication des BAP à l'état frais et leurs essais de contrôle technique sont [12]:

### 2.1. Etalement (SF)

La mesure de l'étalement du béton frais (Slump-flow) permet de caractériser la fluidité et la mobilité des BAP dans des conditions non confinées (en l'absence d'obstacles). Cette propriété est mesurée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams, en versant le béton frais dans le cône. Puis, lorsqu'on enlève le cône, le béton s'étale sur la table d'écoulement (figure II.2) [60].



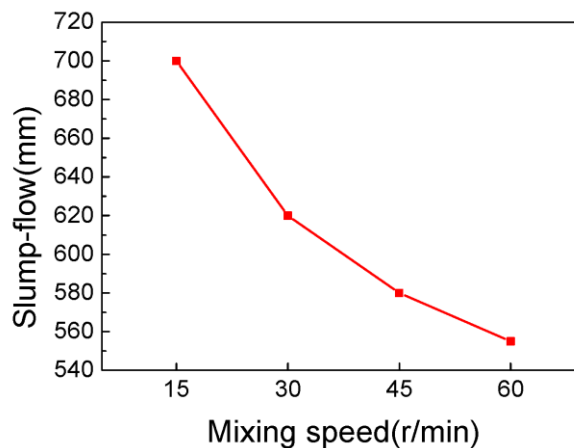
**Figure II.2** - Essai d'étalement au cône d'Abrams [12, 31].

L'étalement est donc la moyenne entre la mesure du diamètre du plus grand étalement du béton et le diamètre d'étalement perpendiculaire à lui [60]. Le tableau II.1 présente les différentes classes des BAP selon leur étalement. La tolérance des résultats est prise égale à  $\pm 80$  de la valeur recherchée.

**Tableau II.1** - Critères de conformité des BAP frais selon leur étalement [12, 61].

Classe d'étalement	Critère
Classe d'étalement SF1	$520 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 700 \text{ mm}$
Classe d'étalement SF2	$640 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 800 \text{ mm}$
Classe d'étalement SF3	$740 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 900 \text{ mm}$

Les facteurs principaux qui influent sur l'étalement du BAP frais sont: le volume de la pâte, le bon choix et dosage du superplastifiant, ainsi que la forme et la distribution des granulats, notamment le sable: plus le sable est rond est bien gradué, plus grand est l'étalement [52]. L'étalement évolue inversement avec l'augmentation de la vitesse de malaxage du béton (figure II.3).



**Figure II.3** - Effet de la vitesse de malaxage sur l'étalement des BAP [62].

## 2.2. Viscosité

La viscosité est déterminée par la mesure du temps d'écoulement du BAP frais, de deux façons [63, 64]:

- Soit par l'essai au cône d'Abrams, en mesurant le temps  $T_{500}$ , qui correspond au temps nécessaire pour que le béton frais s'étale à 500 mm (figure II.2);
- Soit en mesurant la vitesse d'écoulement par l'essai à l'entonnoir en V (figure II.4). Dans ce cas, on distingue deux classes de viscosité (tableau II.1), avec une

tolérance égale à  $\pm 3$  secondes de la vitesse d'écoulement  $t_V$  de la classe recherchée.

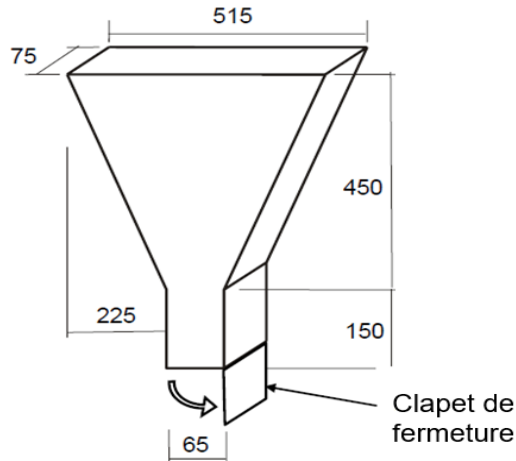


Figure II.4 - Schéma de l'entonnoir en V [12].

La détermination de la viscosité donne n'est pas exigée dans les cas courants, par les recommandations européennes des BAP.

Tableau II.2 - Critères de conformité des BAP frais selon leur viscosité [63].

Classe de viscosité: par essai d'étalement (VS) ou par essai l'entonnoir en V (VF)	Critère	
	Classe de viscosité VS1/VF1	$T_{500} \leq 2 \text{ s}$
Classe de viscosité VS2/VF2	$T_{500} > 2 \text{ s}$	$9 \text{ s} \leq t_V \leq 25 \text{ s}$

Une viscosité faible signifie un risque de ségrégation; mais aussi, une viscosité élevée diminue l'étalement et la pompabilité des BAP. Les agents de viscosité existant sur le marché, permettent de contrôler la viscosité des BAP. Cependant, ces adjuvants sont de moins en moins utilisés, grâce au développement des nouvelles générations des superplastifiants. Une distribution uniforme et étalée des granulats et une quantité suffisante de liant contribuent aussi à l'obtention de la viscosité recherchée.

### 2.3. Ecoulement en milieu confiné (PL)

En plus de sa capacité de s'étaler dans un milieu non confiné, un BAP frais doit être capable de s'écouler à travers un ferrailage dense (Passing Ability), sans blocage ou ségrégation. Cette propriété est déterminée par l'essai de la boîte en L à deux ou trois barres de ferrailage avec espacement étroit entre elles [31, 33, 65].

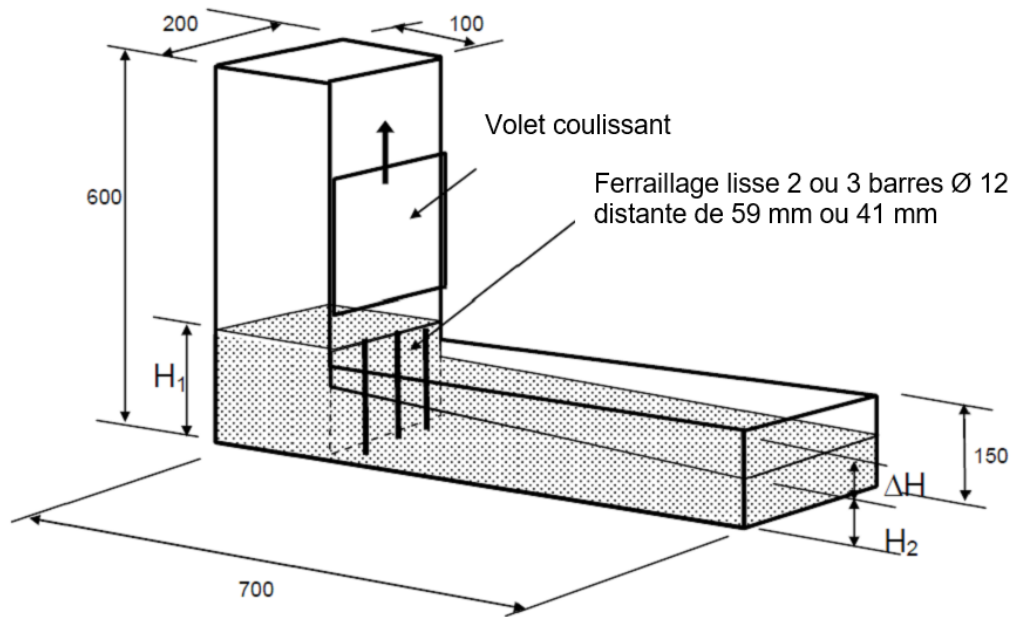


Figure II.5 - Essai d'écoulement à la boîte en L [12].

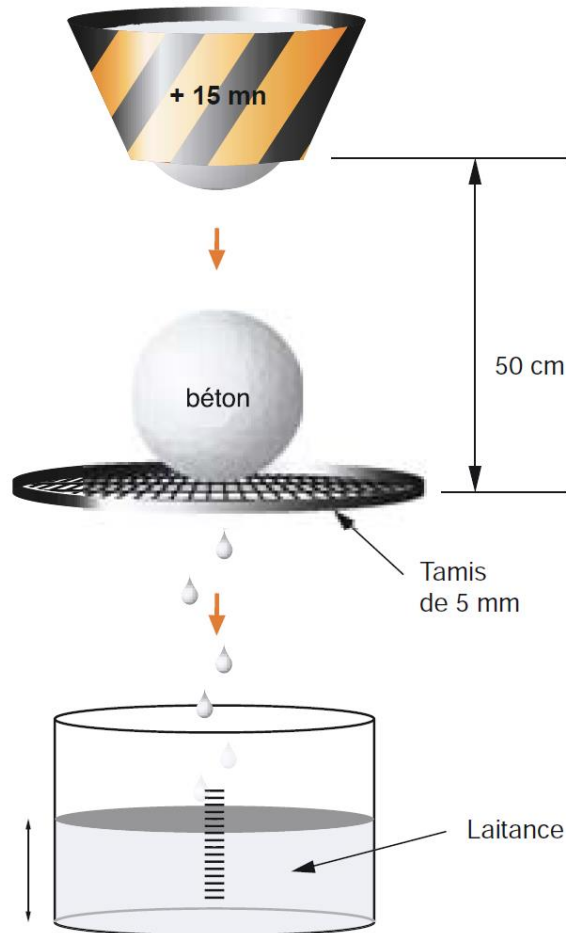
Tableau II.3 - Critères de conformité des BAP frais selon leur écoulement [65].

Classe d'étalement	Critère
Classe d'écoulement PL1 (2 barres)	$PL \geq 0,80$
Classe d'écoulement PL2 (3 barres)	$PL \geq 0,80$

L'essai consiste à ouvrir le volet coulissant de la boîte en L et laisser écouler le béton rempli en amont, à travers les barres de ferrailage; puis, mesurer les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  (figure II.5). L'écoulement est donc exprimé par l'équation (1) avec une tolérance qui ne doit pas dépasser 0,05 au-dessous de la valeur recherchée (tableau II.3).

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (1)$$

L'écoulement est lié à la viscosité du BAP frais, mais aussi au  $d_{\max}$  des granulats. Donc, le diamètre des granulats est limité à 20 mm. Mais, on souvent utilise des granulats de  $d_{\max} = 15$  ou 16 mm.



**Figure II.6** - Principe de l'essai de stabilité au tamis [31].

#### 2.4. Résistance à la ségrégation (RS)

Le contrôle de la ségrégation du béton se fait par l'essai de stabilité au tamis, qui permet d'étudier la résistance à la ségrégation statique (Segregation Resistance) et le ressuage des BAP, sous l'effet de la gravité. L'essai consiste à remplir un seau avec dix litres de béton frais et laisser reposer pendant 15 minutes. Ensuite, verser la partie supérieure du béton sur un tamis de maille 5 mm, avec une hauteur de chute de 50 cm (figure II.6) [31, 66]. Après deux minutes, On pèse le matériau (la laitance) qui est passé à travers les ouvertures du tamis.

**Tableau II.4** - Critères de conformité des BAP frais selon leur résistance à la ségrégation [12, 66].

Classe d'étalement	Critère
Classe de résistance à la ségrégation RS1	$RS \leq 20 \%$
Classe de résistance à la ségrégation RS2	$RS \leq 15 \%$

Pour que le BAP soit résistant à la ségrégation, il faut y avoir assez de fines pour absorber les liquides et maintenir la stabilité du mélange frais. Mais, cela n'est pas suffisant, car cette absorption dépend de la nature des fines et de leur composition chimique. Dans les pays développés, les superplastifiants sont souvent formulés pour être compatibles avec les propriétés des liants utilisés, notamment pour les grands projets. Cependant, dans notre pays, cette possibilité n'est pas disponible. Donc, il faut donner une attention particulière à la nature des ajouts utilisés dans le ciment ainsi que les fillers choisis, pour éviter le ressuage et la ségrégation. Une autre solution possible est d'utiliser des agents de viscosité [33].

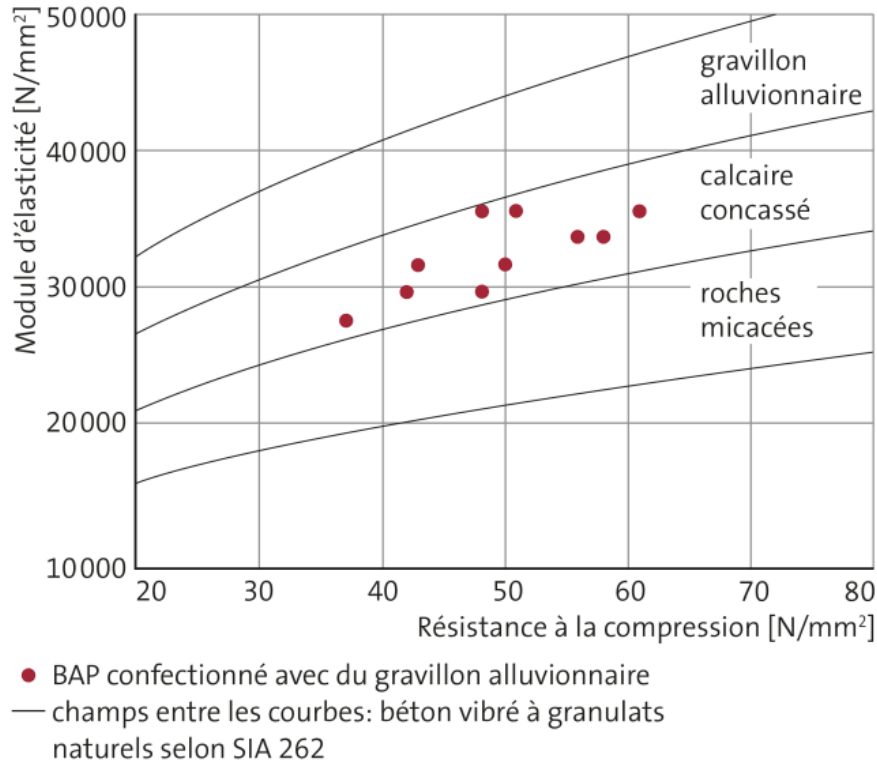
### 3. Exigences techniques à l'état durci

Les BAP durcis sont caractérisés par une proportion volumique de gravillons plus faible par rapport au béton vibré conventionnel. Ce qui affecte les propriétés dimensionnelles: déformations instantanées et différées du BAP (module d'élasticité plus faible, retrait et fluage plus forts) [33].

Les principales propriétés exigées pour la fabrication des BAP à l'état durci, à court et à long terme, ainsi que leurs essais de contrôle technique, sont:

La résistance mécanique à la compression des BAP à 28 jours ( $R_{c28}$ ), est la seule propriété couramment testée dans les travaux d'ingénierie. Elle varie généralement entre 30 et 60 MPa. Tandis que, le rapport entre la résistance en traction et la résistance en compression n'est pas significativement affecté [33]. La résistance normale à la compression est mesurée au laboratoire, en écrasant une éprouvette non confinée (de forme cylindrique ou cubique), sous l'action d'une charge verticale [67].

Le module de Young (E) des BAP est légèrement inférieur à celui des bétons. La sélection de granulats avec un module de Yong élevé contribue à l'amélioration de celui du BAP (figure II.7) [12].



**Figure II.7** - Module d'élasticité des BAP en fonction de la résistance à la compression à 28 jours [68].

#### 4. Principes de formulation des BAP

On trouve plusieurs méthodes de formulation dans la littérature. Mais, la fabrication des BAP reste encore une procédure par tâtonnement qui consomme beaucoup de temps. Car, les propriétés rhéologiques du BAP frais dépendent largement des propriétés des matériaux utilisés [69]; ce qui impose un problème de fiabilité des méthodes de production des BAP.

Les méthodes les plus utilisées dans formulation des BAP sont la méthode japonaise [69, 70] et la méthode chinoise [71]. Ces deux méthodes sont basées sur la distribution dimensionnelle des grains solides du béton (leur granulométrie).

La taille des grains des constituants des BAP varie entre grossiers, moyens et fins. Donc, il est possible d'obtenir une haute densité de remplissage des agrégats, grâce à une bonne distribution granulométrique des particules solides [29, 72, 73]. En conséquence, toute formulation des BAP doit prendre en considération leur nature multi-échelle.

#### 4.1. Théorie de la densité de remplissage

Une distribution granulométrique optimisée des particules solides d'un béton, des plus grosses aux plus fines (figure II. 8), réduit le volume des vides ( $V_v$ ), ce qui permet à plus d'eau d'agir comme agent lubrifiant et améliore ainsi les propriétés du béton frais et durci [26, 62].

Certains auteurs réfèrent la théorie de la densité de remplissage aux travaux de Powers dans les années 1960s [74]. Mais, en réalité, la première forme de cette méthode a été développée par Fuller et Thompson il y a plus de 100 ans [29, 75].

Ensuite, une étude semi-empirique de la distribution granulométrique des particules, menée par Andreasen et Andersen a permis de déterminer le remplissage le plus dense [76, 77]. Cette étude propose l'équation suivante de la distribution granulométrique des particules, pour obtenir le remplissage optimum:

$$P(d) = \left[ \frac{d}{d_{\max}} \right]^\alpha \quad (3)$$

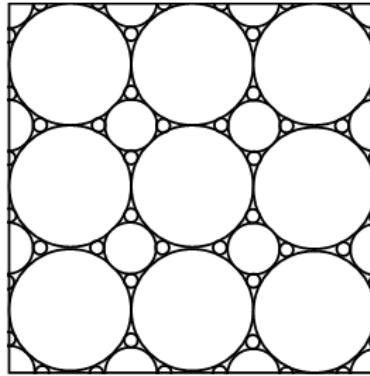
Avec,

$P$  : Pourcentage des passants à travers un tamis d'ouverture  $d$ ;

$d_{\max}$ : Diamètre maximal des particules solides dans le mélange;

$\alpha$ : Module de distribution des particules solides, prenant des valeurs de 0 à 1, en fonction de l'indice des vides ( $e$ ).

Plus il y a de poudres dans le mélange, plus petite est la valeur de  $\alpha$  qui caractérise la distribution granulométrique des particules [29]. Cela veut dire que le remplissage maximal est obtenu pour  $\alpha \approx 0$ , et donc  $P(d) \approx 1$  ( $\forall d \in [0, d_{\max}]$ ); ce qui ne peut pas être obtenu dans la réalité, pour un système multi-échelle comme le béton.



**Figure II.8** - Schématisation de particules sphériques à remplissage dense, contenant des particules grossières, moyennes, et fines.

D'une autre part, le modèle d'Andreasen and Andersen ne prend pas en considération la présence d'un diamètre minimal des particules ( $d_{\min}$ ), alors que le diamètre des particules est toujours inclus entre deux diamètres limites ( $d \in [d_{\min}, d_{\max}]$ ). Pour tenir compte de ce détail, Funk et Dinger ont proposé une version modifiée de du modèle d'Andreasen et Andersen, qui prend en considération le diamètre minimal des particules, comme suit [77]:

$$P(d) = \frac{d^\alpha - d_{\min}^\alpha}{d_{\max}^\alpha - d_{\min}^\alpha} \quad (4)$$

Actuellement, les modèles représentés par les équations (3) et (4), ne prennent en considération la fraction liquide des bétons. Pour cela, Wong et Kwan [78-80] ont développé une méthode de densité de remplissage humide, qui permet de déterminer la densité de remplissage des matériaux cimentaires à l'état humide. La méthode de densité de remplissage humide est utile dans les travaux de recherche au laboratoire; mais, elle n'est pas pratique quand il s'agit de la formulation des BAP pour des projets de construction, vu la perte de temps qu'elle peut causer.

#### 4.2. La théorie de la pâte en excès

Cette théorie est une approche multi-échelle, qui considère le béton comme étant un système solide-fluide: les grains grossiers et moyens (gravier et sable) constituent la

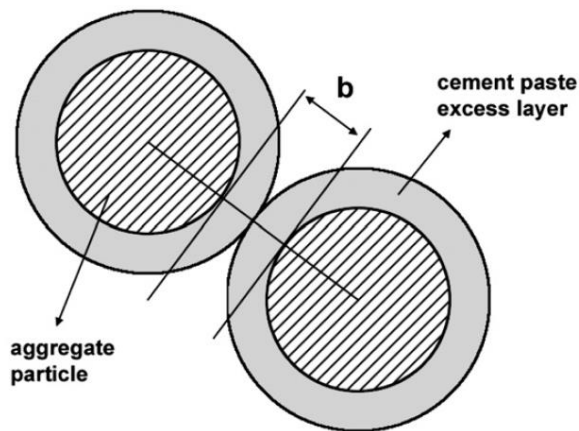
fraction solide, et les grains fins (poudre), en association avec les liquides (la matrice cimentaire) constituent la fraction fluide [25, 28]. La fraction fluide travaille comme un lubrifiant pour la fraction solide, en limitant le frottement entre les granulats, ce qui facilite leur mouvement. Pour assurer cet effet, il doit y avoir assez de pâte pour remplir les vides du mélange de BAP et former une couche qui enveloppe les granulats.

La fraction fluide peut être donc déduite à partir de la porosité ou l'indice des vides ( $\pi$  et  $e$  respectivement) [28]:

$$\pi = 1 - \Phi \quad (5)$$

$$e = \frac{\pi}{\Phi} = \frac{1}{\Phi} - 1 \quad (6)$$

Avec  $\Phi$  est la fraction de volume remplie par les granulats.



**Figure II.9** - Couche de pâte en excès et distance moyenne entre les granulats [25].

La pâte en excès est la distance entre les granulats (figure II.9), calculée comme suit [25]:

$$b = -d \left( 1 - (\Phi / \Phi_m)^{1/3} \right) \quad (7)$$

Avec  $\Phi_m$  est la fraction de volume maximale remplie par les granulats, appelée: la densité de remplissage virtuelle (égale à 0,74 pour un empilement de sphères monotailles).

Les résultats expérimentaux pour la fraction de volume maximale de mélange particules aléatoires, montrent que  $\Phi_m = 0,60$  à  $0,64$  [28]. Cette valeur est supérieure pour des mélanges polydispersés (le cas des granulats des bétons), ce qui augmente la viscosité du béton et peut causer un frottement entre les granulats [25, 81].

Ce phénomène prend place pour une fraction de volume supérieure à une valeur critique ( $\Phi_c$ ), d'une valeur  $\approx 0,5$  pour des sphères uniformes ( $\Phi_m = 0,64$ ) [82]. Le rapport volume relatif des grains solides ( $\Phi/\Phi_m$ ) pour des sphères uniformes est alors égal à 0,79, qui est plus facile à utiliser, en comparaison avec celui des mélanges polydispersés [25].

$\Phi_m$  est déterminé à partir la relation semi-empirique de Hu et de Larrard [83]:

$$\Phi_m = 1 - 0,45(d_{\min} / d_{\max})^{0,19} \quad (8)$$

Avec  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  les diamètres minimal et maximal du squelette granulaire considéré (gravier et sable).

### 4.3. Comparaison et critique des méthodes

On peut déduire que la méthode de la densité de remplissage sèche et celle de la pâte en excès se complètent entre elles. La deuxième théorie prend en considération la fraction fluide du mélange de béton, qui n'est pas présente dans la première méthode.

La théorie de la pâte en excès propose aussi un rapport de fraction de volume solide critique des granulats (ou une fraction de volume de transition entre le régime frictionnel et hydrodynamique)  $\Phi/\Phi_m = 0,79$ , qui ne doit pas être excédé, dans le but de maintenir de bonnes propriétés rhéologiques du BAP frais. Selon Yammine et al. [25], cette valeur  $\Phi/\Phi_m$  n'est pas vraiment affecté par le type l'approche multi-échelle utilisée (elle est indépendante de la valeur du  $d_{\min}$ ).

## 5. Modèle de formulation hydrodynamique développé

Pour construire un nouveau modèle qui combine le modèle de la densité de remplissage modifié exprimé par l'équation (4) avec ceux de la pâte en excès et de l'approche hydrodynamique exprimés par équations (7) et (8) respectivement, on a procédé comme suit:

On peut écrire l'équation (8) sous la forme:

$$\begin{aligned} (d_{\min}/d_{\max})^{0.19} &= -(\Phi_m - 1) / 0,45 \\ &= 2,22 - \Phi / 0,45 \end{aligned} \quad (9)$$

Nous avons aussi, à partir de l'équation (4):

$$P(d) = \frac{d^\alpha - d_{\min}^\alpha}{d_{\max}^\alpha - d_{\min}^\alpha} = \frac{d^\alpha - \frac{d_{\min}^\alpha \times d_{\max}^\alpha}{d_{\max}^\alpha}}{d_{\max}^\alpha - \frac{d_{\min}^\alpha \times d_{\max}^\alpha}{d_{\max}^\alpha}} \quad (10)$$

Plus le BAP contient de particules fines, plus est la proportion de la fraction liquide (eau + poudre), et son comportement devient hydrodynamique. Cela correspond à des petites valeurs du module de distribution des particules solides  $\alpha$ .

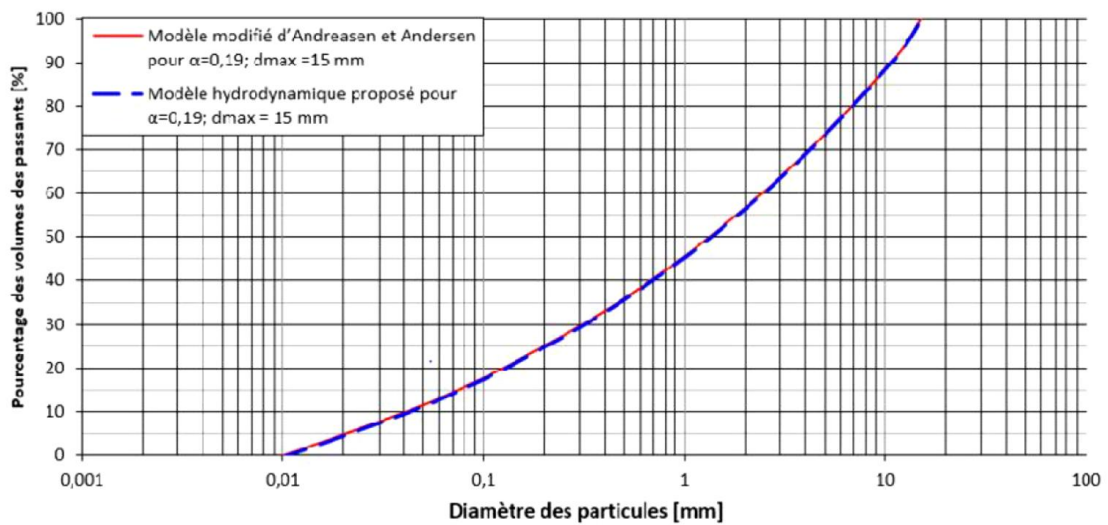
En prenant  $\alpha = 19$ , et en le substituant l'équation (10) dans (9):

$$\begin{aligned} P(d) &= \frac{d^{0.19} - d_{\max}^{0.19} \left( 2.22 - \frac{\Phi_m}{0.45} \right)}{d_{\max}^{0.19} - d_{\max}^{0.19} \left( 2.22 - \frac{\Phi_m}{0.45} \right)} = \frac{d^{0.19} - d_{\max}^{0.19} \left( 2.22 - \frac{\Phi_m}{0.45} \right)}{d_{\max}^{0.19} \left( -1.22 + \frac{\Phi_m}{0.45} \right)} \\ P(d) &= \frac{d^{0.19} - d_{\max}^{0.19} \left( 2.22 - \frac{\Phi_m}{0.45} \right)}{d_{\max}^{0.19} \left( -1.22 + \frac{\Phi_m}{0.45} \right)} = \frac{d^{0.19} - d_{\max}^{0.19} \frac{(1 - \Phi_m)}{0.45}}{d_{\max}^{0.19} \frac{(\Phi_m - 0.55)}{0.45}} = \frac{d^{0.19} + d_{\max}^{0.19} \frac{(\Phi_m - 1)}{0.45}}{d_{\max}^{0.19} \frac{(\Phi_m - 0.55)}{0.45}} \end{aligned}$$

On obtient:

$$P(d) = \frac{0.45d^{0.19} + d_{\max}^{0.19}(\Phi_m - 1)}{d_{\max}^{0.19}(\Phi_m - 0.55)} \quad (11)$$

$\Phi_m$  varie selon les valeurs de  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  prises en considération. Cependant,  $d_{\max}$  est plus petit pour les BAP, par rapport aux bétons conventionnels vibrés. Cette valeur, comme mentionné plus haut, est généralement limitée à 20 mm [77]. Dans la présente étude, on prend  $d_{\min} = 0,01$  mm.



**Figure II.10** - Courbe granulométrique volumétrique des constituants solides du BAP, pour  $\alpha = 0,19$  et  $d_{\max} = 15$  mm, selon le modèle modifié d'Andreasen et Andersen et le nouveau modèle hydrodynamique.

Si on prend la valeur  $d_{\max} = 15$  mm, on peut calculer  $\Phi_m$  et vérifier la compatibilité des courbes granulométriques du nouveau modèle hydrodynamique avec celles de l'équation (4) pour  $\alpha = 19$  et le même  $d_{\max}$ .

La figure II.10 montre que la courbe du modèle développé suit parfaitement le tracé des courbes de l'équation (4).

Les particules fines ( $d < 0,125$  mm) qui constituent la fraction liquide, présentent environ 20 % du volume total des grains solides. Ce volume garantit un comportement hydrodynamique des BAP formulés par le nouveau modèle développé.

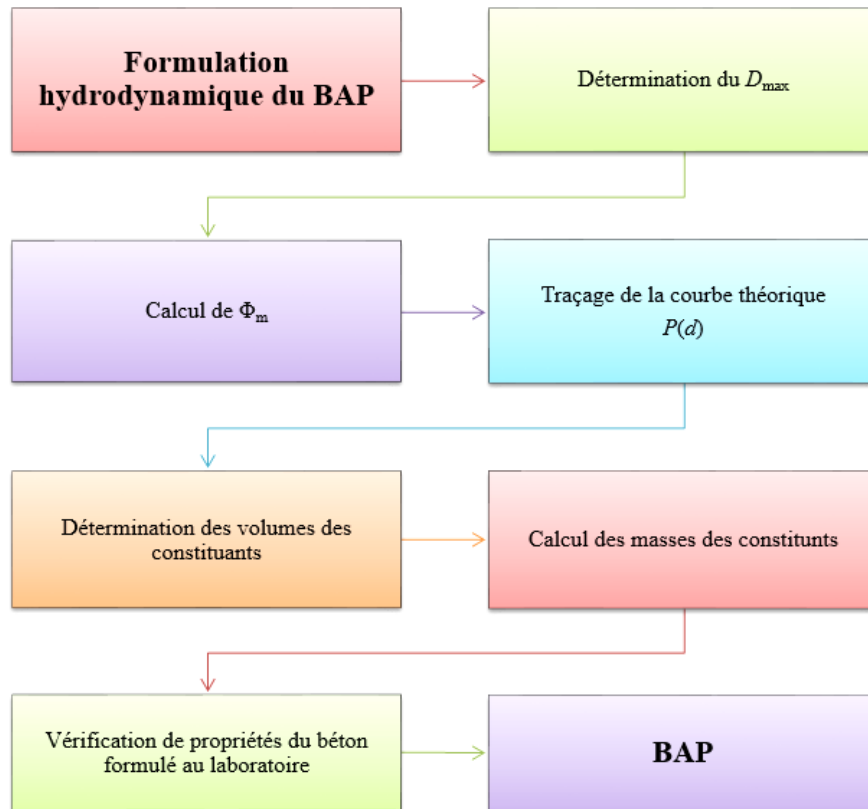


Figure II.11 - Étapes de formulation des BAP selon la méthode hydrodynamique.

## 6. Méthode proposée de formulation des BAP

La méthode de formulation présentée dans ce travail est basée sur la déduction du pourcentage de chaque fraction des constituants solides (granulats et poudre) à partir de la courbe granulométrique tracée selon le modèle hydrodynamique décrit par l'équation (11), pour un  $d_{max}$  déterminé. Cette méthode de formulations est composée de cinq étapes principales (figure II.11). Si les propriétés du BAP confectionné ne sont pas conformes aux exigences techniques des normes en vigueur, il faut revoir la nature et la qualité des constituants, et non pas la formulation.

Les volumes des constituants sont déterminés comme suit, en considérant un BAP composé d'un sable de classe (0/3) et de deux classes de gravier (3/8 et 8/15):

$$V_{béton} = V_{solide} + V_{fluide} + V_{air} = 1 \quad (12)$$

$$V_{solide} = V_{Gtotal} + V_{Stotal} \quad (13)$$

$$V_{fluide} = V_P + V_{liquide} \quad (14)$$

avec:

$$V_{liquide} = V_W + V_{SP} \quad (15)$$

$$V_{Gtotal} = V_G + V_G' \quad (16)$$

$$V_{Stotal} = V_S + V_S' - V_G' \quad (17)$$

$V_G'$  est le volume cumulé éventuel des particules inférieures à  $d_{min}$  du gravier.

$V_S'$  est le volume cumulé des particules de sable inférieures à 0,125 mm.

$$V_P = V_{Ptotal} - V_G'' - V_S' \quad (18)$$

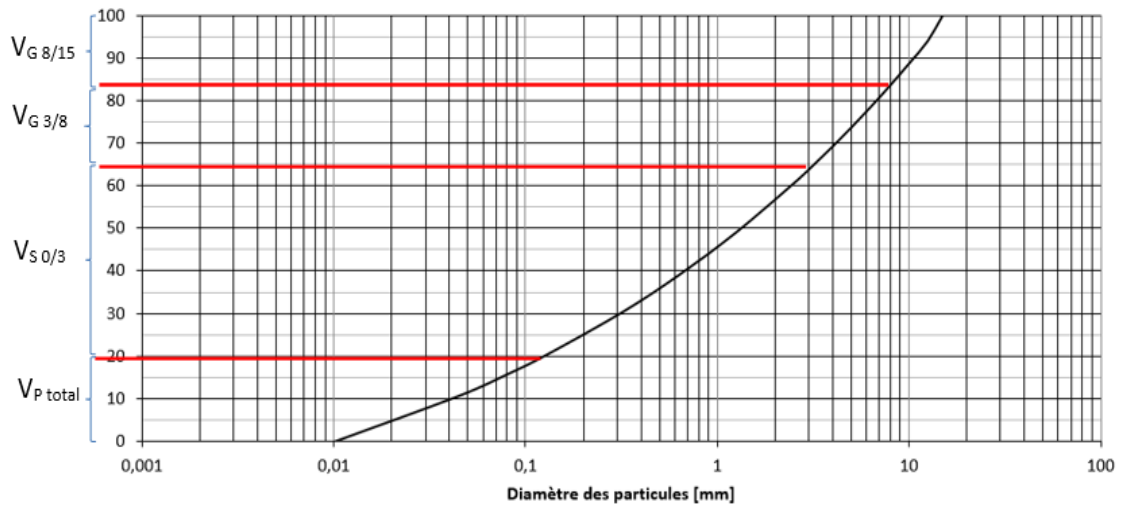
$V_G''$  est le volume cumulé éventuel des particules de gravier inférieures à 0,125 mm.

$$V_{fluide} = 1 - V_{solide} - V_{air} \quad (19)$$

En combinant les équations (14), (15) et (19), on obtient:

$$V_{liquid} = V_W + V_{SP} = 1 - V_{solid} - V_P - V_{air} \quad (20)$$

and:  $V_W = V_{liquid} - V_{SP} \quad (21)$



**Figure II.12** - Détermination des volumes de constituants du BAP, à partir de la courbe granulométrique volumétrique théorique, pour  $d_{\max} = 15$  mm.

Les quantités des constituants sont ensuite exprimées en masse, en multipliant les volumes calculés de chaque constituant par sa masse volumique.

$$M_{G \text{ total}} = V_{G \text{ total}} \times \rho_G \quad (22)$$

$$M_{S \text{ total}} = V_{S \text{ total}} \times \rho_S \quad (23)$$

$$M_P = V_P \times \rho_P \quad (24)$$

$$M_W = V_W \times \rho_W \quad (25)$$

$$M_{SP} = V_{SP} \times \rho_{SP} \quad (26)$$

## 7. Conclusion

La garantie des propriétés des BAP, présentées dans ce chapitre, est liée au bon choix des matériaux utilisés, ainsi que la méthode de formulation appropriée. Les constituants des BAP peuvent être classés en deux catégories: solides et liquides. Cependant, les méthodes de formulation les plus courantes ne prennent pas en considération ces deux catégories à la fois.

La combinaison de la méthode de la densité de remplissage sèche avec le modèle hydrodynamique (basé sur la théorie de la pâte en excès), nous a permis de développer un nouveau modèle hydrodynamique spécifique aux BAP, et qui prend en considération les fractions solides et liquides de ces derniers pour garantir des propriétés rhéologiques et mécaniques satisfaisantes.

Partie II :

Travail expérimental  
et optimisation des  
propriétés des BAP

## **Chapitre III: Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.**

### **1. Introduction**

Les propriétés fraîches des BAP, telle que l'ouvrabilité et la fluidité dépendent entre autres de la quantité de ciment et de la quantité d'eau de gâchage utilisée, ainsi que des propriétés des granulats. L'utilisation de SP permet de réduire la quantité d'eau tout en répondant aux exigences techniques pour les BAP à l'état frais.

Dans ce chapitre, on va présenter les différents constituants des BAP utilisés dans cette étude et leurs propriétés. On va aussi expliquer les méthodes expérimentales pour étudier la pâte et les bétons autoplaçants.

### **2. Matériaux utilisés**

#### **2.1. Le Ciment**

Le ciment utilisé est un ciment Portland avec ajouts (CPJ-CEM II/A 42,5) de la cimenterie d'Elma Labiod (Tébessa), dont l'ajout utilisé est la pouzzolane naturelle.

La surface spécifique du ciment est de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , et sa consistance normale est obtenue pour un rapport Eau/Ciment (E/C) égal à 0,277 ; alors que le temps du début de prise est  $> 180$  minutes, en utilisant l'appareil de Vicat. Ce retard de prise doit être dû à la présence de la pouzzolane naturelle dans la composition du ciment (riche en silice).

#### **2.2. Le filler**

Le filler choisi est un filler calcaire, préparé par séchage puis broyage du gravier concassé de l'entreprise nationale de granulats (ENG), à une finesse de  $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$  (figure III.1).

La composition chimique du ciment et du filler calcaire est présentée dans le tableau III.1. Le rapport C/S du ciment est égal à  $1,99 \approx 2$ . Cette valeur est due à l'utilisation de la pouzzolane naturelle comme ajout minéral dans le ciment.



**Figure III.1** - Filler de calcaire obtenu.

**Tableau III.1** - Composition chimique des matériaux utilisés.

Composant Matériau	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>
Ciment [%]	27,57	5,75	54,82	4,75	1,86	2,48	1,39	0,005
Filler calcaire [%]	39,80	8,30	42,51	1,57	4,40	0,75	0,10	0,004

### 2.3. Le sable

Nous avons choisi quatre types de sables (0/3) d'origines différentes (figure III.2), dans le but de confirmer notre hypothèse sur l'effet des propriétés granulométriques sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP:

- Sable de dunes (SD1): de Bou Saâda, wilaya de M'sila;
- Sable de dunes (SD2): d'Elma Labiod, wilaya de Tébessa;
- Sable de rivière (SR) : d'Elkouif, wilaya de Tébessa;
- Sable concassé (SC): de la carrière de l'ENG, Elma Labiod, wilaya de Tébessa.



**Figure III.2** - Sables utilisés: (a) sable de dunes de Bou Saada ; (b) Sable de dunes d'Elma Labiod ; (c) Sable de rivière d'Elkouif; (d) Sable concassé d'Elma Labiod.

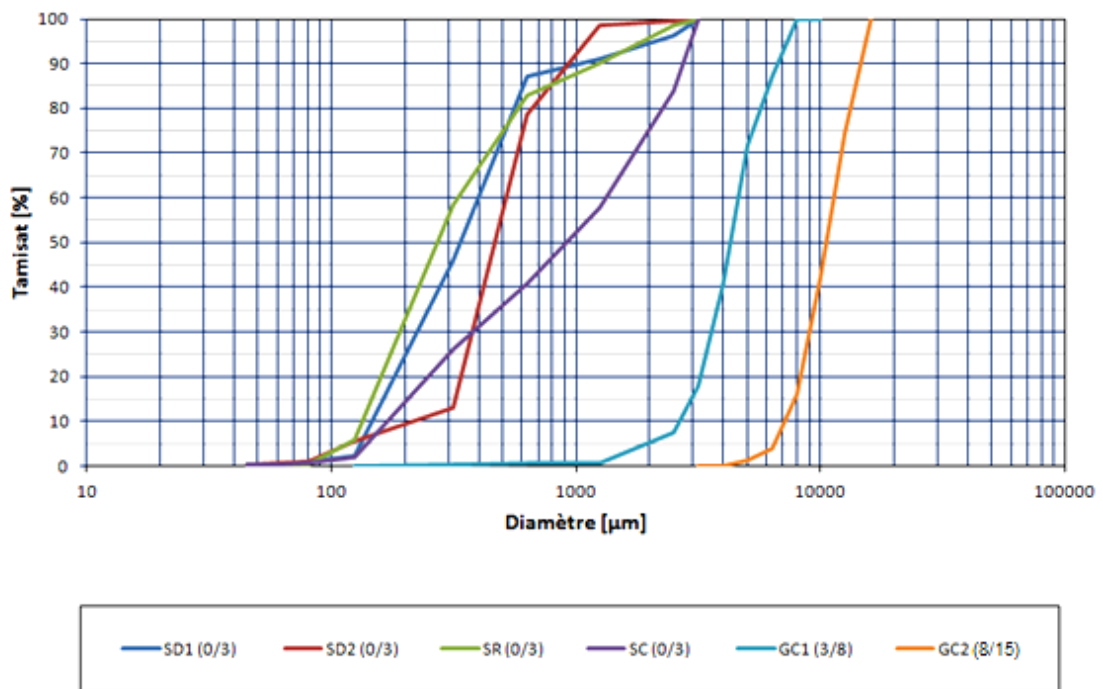
Les propriétés physiques des types de sables choisis sont présentées dans le tableau III.2. Les résultats de l'essai d'équivalent de sable visuel (ESV) montrent que les sables choisis propres à très propres ; ce qui convient à la fabrication des bétons de haute qualité.

D'après la distribution granulométrique (figure III.3), on peut voir que les sables de dunes utilisés dans ce travail sont fins ( $M_f < 2,2$ ) et ne sont pas tout à fait adaptés pour être utilisés dans le béton si l'on recherche une bonne résistance à la compression (selon les études sur les bétons conventionnels). Cependant, les travaux antérieurs [56, 57] ont montré que ces sables fins donnent de bonnes résistances pour les BAP destinés pour des applications courantes, surtout lorsqu'ils sont associés avec des sables concassés

préférentiels. Pour le sable concassé: le  $M_f$  est égale à 2,85 ; donc il peut être considéré comme un sable acceptable.

**Tableau III.2** - Propriétés physiques des granulats utilisés.

Propriété \ Matériaux	SD1	SD2	SR	SC	GC1	GC2
Classe granulométrique	0/3	0/3	0/3	0/3	3/8	8/15
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2540	2500	2610	2530	2530	2530
$\rho_{app}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1554	1546	1630	1320	1320	1320
Compacité [%]	61,18	61,84	62,45	52,17	52,17	52,17
Porosité [%]	38,82	38,16	37,55	47,82	47,82	47,82
Indice des vides (e)	0,63	0,62	0,60	0,91	0,91	0,91
Degré d'absorption (A) [%]	2,58	2,44	2,26	4,01	3,20	3,13
Equivalent de sable visuel (ESV) [%]	76,8	87,3	95,7	97,6	-	-
LA [%]	-	-	-	-	30,01	30,15

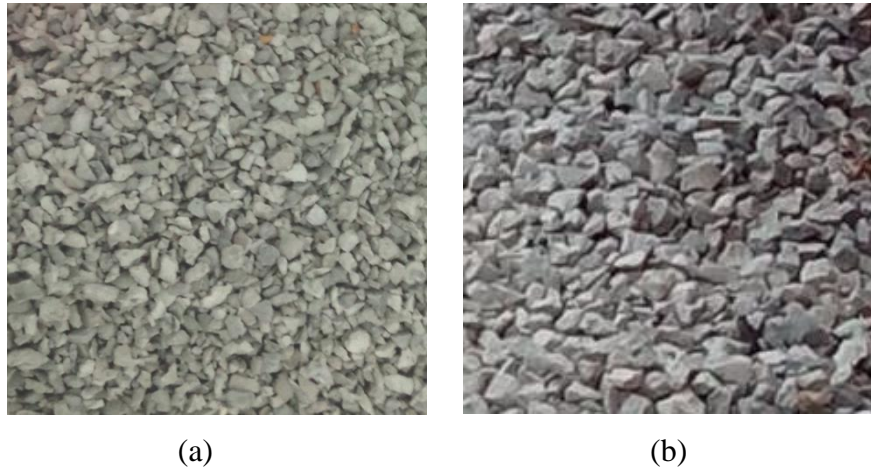


**Figure III.3** - Courbes granulométriques des granulats utilisés.

Pour le sable de rivière, il contenait à l'origine des grains de diamètre supérieur à 5 mm. Après criblage, pour obtenir un sable de classe 0/3, le module de finesse  $M_f$  devient de l'ordre de 1,18. On peut donc faire la même remarque que celle pour les SD.

#### 2.4. Le gravier

Le gravier utilisé est celui de l'ENG, Elma Labiod, wilaya de Tébessa. Ce gravier est de forme angulaire (gravier concassé) et de classes granulométriques : GC1 (3/8) et (GC2 : 8/15), comme il est illustré dans la figure III.4, et dont les propriétés physiques sont présentées dans le tableau III.2.



**Figure III.4** - Graviers utilisés : (a) Gravier 3/8; (b) Gravier 8/15.

#### 2.5. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la préparation de la pâte autoplaçante est celle du robinet, avec une dureté modérée.

#### 2.6. Les adjuvants

Dans ce travail, on a choisi de tester deux superplastifiants de troisième génération, fabriqués selon les exigences de la norme NF EN 934-2 [89], pour pouvoir choisir le plus compatible avec le mélange ciment + filler. Ces deux superplastifiants sont:

**a. MEDAFLOW 30**

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération, à base de polycarboxylates d'éther, fabriqué par la société nationale GRANITEX. Il permet de réduire la teneur en haut d'une façon considérable et d'obtenir des bétons et des mortiers de haute qualité. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

Grâce à ses propriétés, il permet de [90]:

- Réduire le rapport E/C;
- Améliorer la fluidité;
- Obtenir une très bonne rhéologie;
- Éviter la ségrégation;
- Augmenter la résistance mécanique du béton à court et à long terme;
- Diminuer la porosité;
- Diminuer la porosité, le retrait et les risques de fissuration;
- Augmenter la durabilité.

La plage de dosage du MEDAFLOW 30 est de 0,5 à 2,0 % du poids du liant.

**b. SikaPlast - 40 Pro**

C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau, à base de polycarboxylates modifiés, fabriqué par Sika. Il permet d'améliorer la stabilité, limiter les risques de ségrégation et rendre la formule plus robuste vis-à-vis des variations de dosage en eau et des propriétés des constituants. Ce qui confère aux bétons les propriétés suivantes [91]:

- Maintien prolongé de la rhéologie;
- Haute réduction d'eau;
- Robustesse vis-à-vis de la ségrégation;
- Bonnes résistances initiales et finales;
- Bel aspect de parement au décoffrage.

La plage de dosage du SikaPlast - 40 Pro est de 0,5 à 2,0 % du poids du liant.

### 3. Méthodes expérimentales

Les méthodes de préparation de la pâte et des bétons autoplaçants, ainsi que les propriétés à étudier à l'état frais et durci, sont décrites ci-dessous.

#### 3.1. Étude de la pâte autoplaçante

##### 3.1.1. Préparation de la pâte autoplaçante

La pâte autoplaçante est préparée à l'aide d'un malaxeur de laboratoire, avec un rapport Eau/Poudre (E/P) égal à 0,30, basé sur les résultats de l'essai de consistance normale par l'appareil de Vicat. Les deux superplastifiants sont ajoutés dans l'eau de gâchage, conformément aux recommandations des leurs fabricants [90, 91].

##### 3.1.2. Le Plan d'expérience

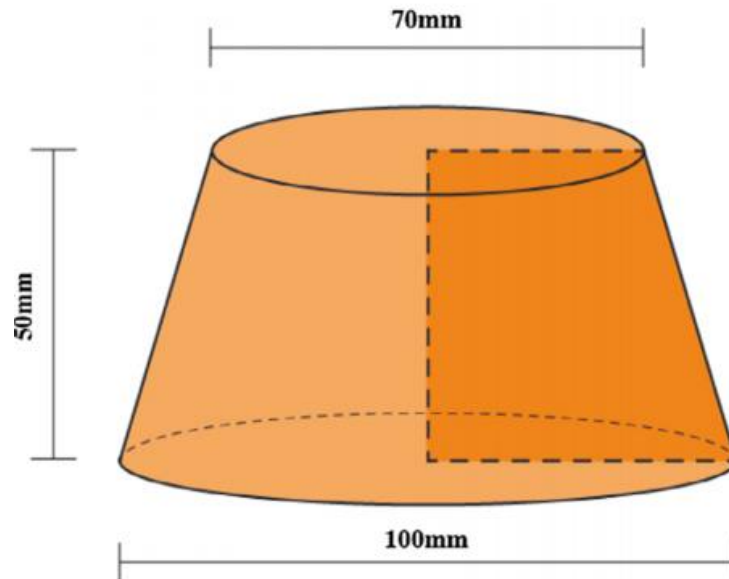
Dans cette partie d'étude expérimentale, quatorze mélanges ont été préparés (tableau III.3). Le dosage des superplastifiants est varié graduellement avec un pas de 0,2 %, dans le but d'étudier l'effet des adjuvants utilisés sur la pâte et de déterminer le dosage optimal à utiliser dans la formulation du BAP.

**Tableau III.3** - Plan d'expérience adopté pour l'étude de la pâte autoplaçante.

N°	Filler calcaire [%]	SP1 [%]	SP2 [%]
01	20	0,5	-
02	20	0,7	-
03	20	0,9	-
04	20	1,1	-
05	20	1,3	-
06	20	1,5	-
07	20	1,7	-
08	20	-	0,5
09	20	-	0,7
10	20	-	0,9
11	20	-	1,1
12	20	-	1,3
13	20	-	1,5
14	20	-	1,7

### 3.1.3. Programme expérimental

Les différents mélanges préparés sont testés à 5 et à 60 minutes après le malaxage, pour déterminer leurs propriétés autoplaçantes à l'état frais. Les essais effectués sont:



**Figure III.5** - Dimensions du mini-cône [92].



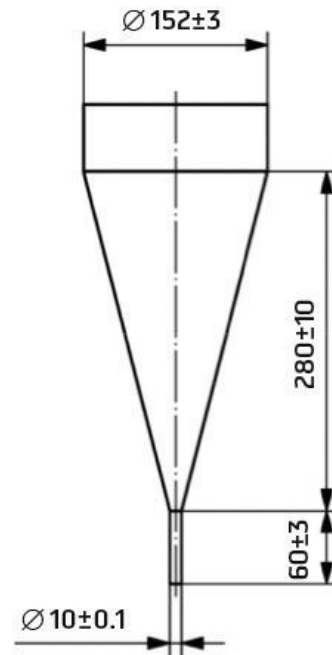
**Figure III.6** - Étalement de la pâte autoplaçante.

### a. Essai d'étalement

L'étalement de la pâte autoplaçante est déterminé par l'essai au mini-cône (figure III.5). Cet essai est inspiré de l'essai d'étalement au cône d'Abrams, et permet de mesurer le diamètre d'étalement de la pâte sur une plaque horizontale, une minute après l'enlèvement du mini-cône [93] (figure III.6).

### b. Essai d'écoulement

L'écoulement de la pâte autoplaçante est déterminé par l'essai au cône de Marsh (figure III.7). Cet essai permet de mesurer le temps d'écoulement de 500 ml de pâte fraîche, à travers un orifice d'un diamètre égal à  $10 \pm 0,1$  [57, 93, 94].



**Figure III.7** - Dimensions du cône de Marsh [57].

## 3.2. Étude du BAP

### 3.2.1. Préparation du BAP

Selon les recommandations des Directives Européennes pour le Béton Autoplaçant [9], et en appliquant le modèle modifié d'Andreasen et Andersen (équation 4), 13

mélanges ont été préparés en fonction de la nature et de la proportion de sable utilisé (tableau III. 4), en mettant  $\alpha = 0,19$  pour assurer un comportement hydrodynamique. Avec des rapports Poudre /Eau = 0,40. La composition des mélanges formulés est représentée dans le tableau III.5.

**Tableau III.4 - Mélanges de BAP pour le travail expérimental en fonction des pourcentages des types de sables utilisés.**

Facteur	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7	BAP8	BAP9	BAP10	BAP11	BAP12	BAP13
SC	100 %	0 %	0 %	0 %	75 %	50 %	25 %	75 %	50 %	25 %	75 %	50 %	25 %
SD1	0 %	100 %	0 %	0 %	25 %	50 %	75 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
SD2	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	25 %	50 %	75 %	0 %	0 %	0 %
SR	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	25 %	50 %	75 %

**Tableau III.5 - Composition des mélanges de BAP utilisés.**

Constituant [kg]	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7	BAP8	BAP9	BAP10	BAP11	BAP12	BAP13
Ciment	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Filler	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SC	850	-	-	-	637,5	425	212,5	637,5	425	212,5	637,5	425	212,5
SD1	-	850	-	-	212,5	425	637,5	-	-	-	-	-	-
SD2	-	-	850	-	-	-	-	212,5	425	637,5	-	-	-
SR	-	-	-	850	-	-	-	-	-	-	212,5	425	637,5
GC1	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425
GC2	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425	425
Eau	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

Si on exprime la quantité des constituants solides des différents mélanges, en volume, on remarque que  $\Phi_m$  est autour de 0,64 pour 1 m<sup>3</sup>. Le volume relatif des grains solides  $\Phi/\Phi_m$  est donc égal à 0,79. Ce qui assure un comportement hydrodynamique des BAP.

Le malaxage des mélanges de BAP a été effectué comme suit [95, 96] (figure III.8):



**Figure III.8** - Méthode de malaxage utilisée.

### 3.2.2. Programme expérimental

Tous les essais ont été réalisés conformément aux directives européennes pour les BAP [9], comme il est expliqué plus haut dans le chapitre II. Chaque expérience est répétée six fois pour obtenir des valeurs moyennes fiables.

#### a. Propriétés étudiées à l'état frais

Les propriétés étudiées pour le béton frais sont:

- L'écoulement en milieu confiné (essai de boîte en L à trois barres);
- L'étalement (essai au cône Abrams);
- La résistance à la ségrégation (essai de stabilité au tamis).



**Figure III.9** - Moules cylindriques utilisés pour la fabrication des éprouvettes.

**b. Propriétés étudiées à l'état durci**

La propriété étudiée pour le béton durci est la résistance à la compression.

Pour la détermination de la résistance normale à la compression (à 28 jours), nous avons utilisé des moules cylindriques de  $\varnothing$  160 mm et  $h = 320$  mm (figures III.9 et III.10). Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau, à une température de  $20 \pm 2$  °C, jusqu'au moment de l'essai [97, 98].

La compression simple est déterminée par essai de compression simple, conformément à la norme NF EN 12390-2 [97].



**Figure III.10** - Essai de compression simple sur éprouvette de BAP.

## 4. Précision des résultats expérimentaux

L'étude de la répétabilité (r) et la reproductibilité (R) est une méthode statistique pour mesurer la précision des résultats d'un processus [99]:

- *Répétabilité*: C'est la variation due à l'instrument de mesure. Elle est mesurée lorsque le même opérateur répète la même mesure avec le même instrument, dans les mêmes conditions.
- *Reproductibilité*: C'est la variation due au système de mesure. Elle est mesurée lorsque différents opérateurs répètent la même mesure avec le même instrument, dans les mêmes conditions.

**Tableau III.6** - Répétabilité et reproductibilité des résultats d'essai de l'écoulement (essai de la boîte en L).

PL = H2/H1	$\geq 0,8$	$< 0,8$
Répétabilité	$\pm 0,11$	$\pm 0,13$
Reproductibilité	$\pm 0,12$	$\pm 0,16$

**Tableau III.7** - Répétabilité et reproductibilité des résultats d'essai d'étalement.

SF [mm]	$< 600$	600 à 750	$> 750$
Répétabilité	Non applicable	$\pm 42$	$\pm 22$
Reproductibilité	Non applicable	$\pm 28$	$\pm 28$

**Tableau III.8** - Répétabilité et reproductibilité des résultats d'essai de la résistance à la ségrégation.

RS [%]	$\leq 20$	$> 20$
Répétabilité	3,7	10,9
Reproductibilité	3,7	10,9

Basé sur des essais effectués dans 16 laboratoires, les Directives Européennes pour le Béton Autoplaçant [12] fournissent des valeurs tolérables pour assurer la répétabilité et

la reproductibilité des résultats expérimentaux sur les BAP à titre informatif (tableaux III.6 à III.8).

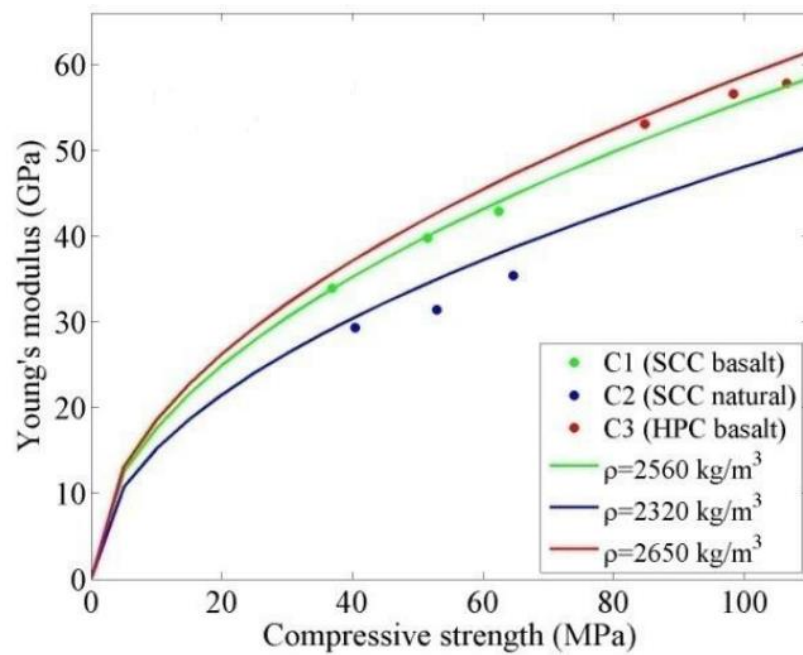
## 5. Module d'élasticité des BAP

Ils existent plusieurs formules dans la littérature pour le calcul du module d'élasticité (Module de Young), dont les plus utilisées sont mentionnées dans le tableau III.9.

Les travaux expérimentaux de Kim et al. [97] et de Jurowski et Grzeszczyk [100] ont montré que la formule d'estimation du module de Young proposé par l'ACI 318-05, est plus adéquate et donne des valeurs plus proches du réel pour les BAP (figure III.11); puisque cette formule prend aussi en considération la masse volumique du béton, en plus de sa résistance mécanique à la compression. Cette formule sera donc adaptée pour calculer le module de Young des mélanges de BAP étudiés dans cette thèse.

**Tableau III.9** - Formules de calcul du module de Young selon les différentes normes et réglementations.

Formule	Référence	Remarque
$E_j = 11000.(R_{cj})^{1/3}$	Règles BAEL 91 modifiées 99 [101]	( $R_{cj}$ et $E_j$ en MPa)
$E_{cm} = 22 [(R_{cm})/10]^{0.3}$	Eurocode 2 [102]	valeurs à réduire de 10 % pour des granulats calcaires, de 30 % pour des granulats issus de grès et à augmenter de 20 % pour des granulats issus de basalte. ( $R_{cm}$ en MPa et $E_{cm}$ en GPa)
$E_c = 43 \times 10^{-6} \times (\rho_{\text{béton}})^{1.5} \times R_c^{0.5}$	ACI 318-05 [103]	La formule est en fonction de la masse volumique du béton $\rho_{\text{béton}}$ et de la résistance à la compression. ( $R_{cm}$ en MPa et $E_{cm}$ en GPa)



**Figure III.11** - Comparaison entre les valeurs expérimentales du module de Young et celles calculées selon l'ACI 318-05 [103].

## 5. Conclusion

Les matériaux choisis sont tous des produits locaux ou disponibles sur le marché algérien (le cas des adjuvants de Sika), et servent l'objectif de ce travail de recherche.

Les méthodes de préparation des mélanges à étudier sont issues de la synthèse des travaux de renommée ; dans le but de rendre les résultats de ce travail expérimental comparables avec les autres travaux de recherche sur le sujet des BAP.

Pour les propriétés des BAP étudiées expérimentalement, il s'agit de celles recommandées par les Directives Européennes pour le Béton Autoplaçant, décrites plus haut dans le chapitre II.

## **Chapitre IV: Étude expérimentale des BAP à base de matériaux locaux.**

### **1. Introduction**

Le sable est un élément inerte essentiel dans la composition du béton; son utilisation assure une continuité granulaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton.

Les sables roulés sont des matériaux très fins caractérisés par une porosité intergranulaire élevée, une grande surface et un faible module de finesse; d'autre part, le sable concassé de forme mince et irrégulière influe sur la maniabilité du béton.

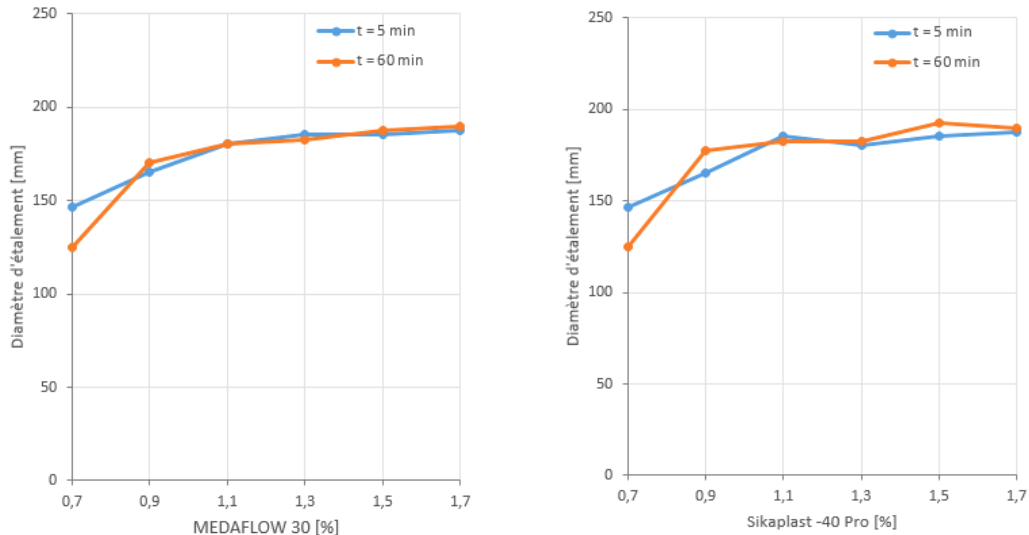
Ce chapitre présente les résultats d'une étude portée sur l'influence du sable sur les propriétés du BAP frais et durci. La détermination du dosage optimal et le SP le plus compatible avec les matériaux utilisés est faite par l'étude des différentes propriétés de la pâte autoplaçante.

### **2. Résultats des essais sur la pâte autoplaçante**

#### **2.1. Étalement de la pâte autoplaçante**

La forme des courbes représentant l'évolution du diamètre d'étalement de la pâte autoplaçante en fonction du dosage des superplastifiants utilisés montre que le diamètre évolue jusqu'à une certaine valeur, puis devient relativement stable (figures IV.1). L'étalement maximal est de l'ordre de 180 mm.

Le dosage pour lequel la pâte autoplaçante commence à se stabiliser est de 1,1 %, pour les deux superplastifiants utilisés. Par contre, l'allure des courbes d'étalement à 5 et à 60 minutes montre que le MEDAFLOW 30 est plus compatible avec le mélange (ciment + filler) utilisé dans cette étude.



**Figure IV.1** - Effet du dosage des superplastifiants utilisés sur le diamètre d'étalement de la pâte autoplaçante à 5 et à 60 minutes.

Les courbes montrent aussi que le diamètre d'étalement pour chaque dosage en superplastifiant reste considérablement le même après 60 minutes. Cela doit être dû à l'effet retardateur de prise des deux superplastifiants, à base de polycarboxylates. L'interaction entre les molécules de polycarboxylates et les ions de ( $\text{Ca}^{2+}$ ) empêche la croissance des produits d'hydratation et retarde la prise [100].

## 2.2. Écoulement de la pâte autoplaçante

Le temps d'écoulement de la pâte autoplaçante par l'essai au cône de Marsh est mesuré pour chaque mélange à 5 et à 60 minutes. La variation du temps d'écoulement en fonction du dosage des superplastifiants utilisés est représentée dans la figure IV.2.

Le temps d'écoulement diminue réciproquement avec l'augmentation du dosage des superplastifiants. Dans le cas du MEDAFLOW 30, l'écart entre le temps d'écoulement à 5 minutes et celui à 60 minutes diminue avec l'augmentation du dosage de ce dernier. Tandis que pour les mélanges formulés en utilisant le SikaPlast - 40 Pro, la pâte perd sa fluidité après 60 minutes, pour un dosage de 0,7 % en superplastifiant. L'effet retardateur de prise commence donc à avoir lieu pour des dosages suffisants en  $\text{SP} \geq 0,9$  % et la pâte reste alors fluide plus longtemps.

La figure IV.3 illustre les cas typiques lors de l'établissement de l'essai d'écoulement par la méthode du cône de marche. L'écoulement dû au MEDAFLOW 30 est plus

proche de celui de la figure IV.3(d), qui représente un cas intermédiaire de compatibilité entre le SP et le liant.

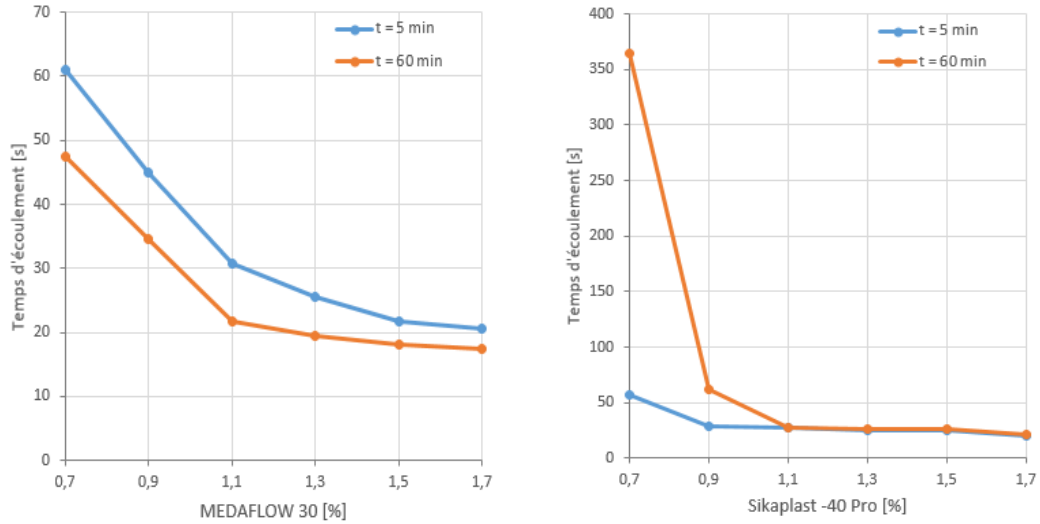


Figure IV.2 - Effet du dosage des superplastifiants utilisés sur le temps d'écoulement de la pâte autoplaçante à 5 et à 60 minutes.

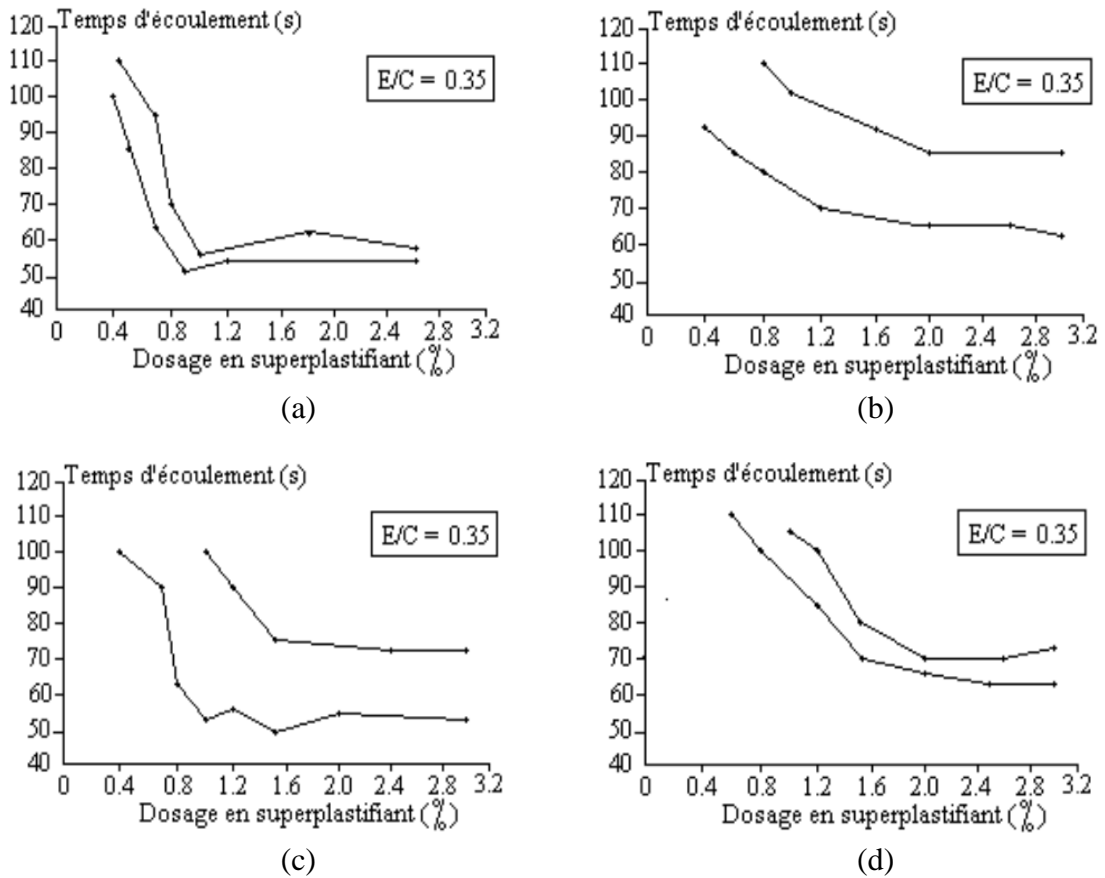


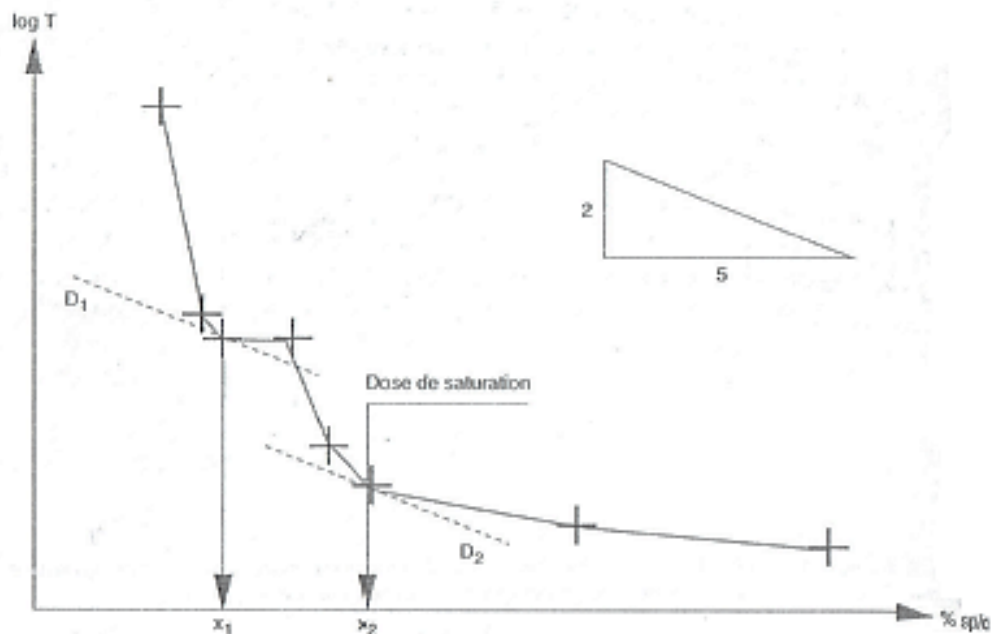
Figure IV.3 - Différents comportements rhéologiques de la pâte autoplaçante [101].

Quant à l'écoulement dû au SikaPlast - 40 Pro, la courbe est plus proche de la figure III.10(a), représentant le cas d'une combinaison de compatibilité SP/liant. Cependant, la perte de fluidité et à 60 minutes, pour un dosage en SP égale à 0,7 %, montre une certaine incompatibilité du SikaPlast - 40 Pro avec le liant utilisé. Une des solutions aux problèmes d'incompatibilité est d'ajuster la composition de SP utilisé au ciment utilisé. Ce qui n'est pas pratiqué dans notre pays, jusqu'à l'heure actuelle.

### 2.3. Détermination du point de saturation en superplastifiant

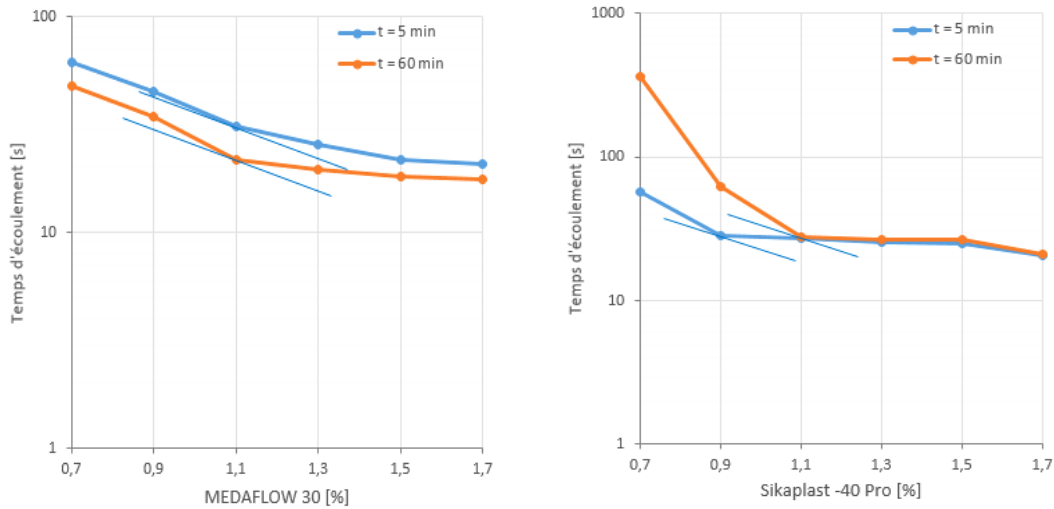
Le dosage optimal en SP est obtenu par la détermination du point de saturation. L'agence française de recherche et des essais sur les matériaux et les constructions (AFREM) propose une méthode objective pour déterminer graphiquement la dose de saturation.

Cette méthode consiste à tracer les courbes de comportement rhéologique de la pâte autoplaçante en mettant l'axe des ordonnées qui correspond au temps d'écoulement au cône de Marsh, en échelle logarithmique. Puis, on cherche le point correspondant à une pente de 2/5 (figure IV.4). La valeur de 2/5 est arbitraire ; elle a été choisie parce qu'elle conduit à des doses de SP raisonnables [101, 102].



**Figure IV.4** - Détermination de la dose de saturation selon la méthode AFREM [102].

On transforme donc l'axe des ordonnées dans la figure IV.2 en échelle logarithmique et on trace des pentes de 2/5 pour chaque courbe d'écoulement (à 5 et à 60 minutes) comme il est illustré dans la figure IV.5.



**Figure IV.5 - Détermination du point de saturation pour les superplastifiants utilisés.**

Dans le cas du MEDAFLOW 30, le point de saturation est le même à 5 et à 60 minutes, avec une valeur de 1,1 %. Par contre, les courbes d'écoulement de pâte formulée en utilisant le SikaPlast - 40 Pro présentent deux points de saturation différents pour à 5 et à 60 minutes, de valeurs égales à 0,9 et 1,1 %, respectivement.



**Figure IV.6 - Ressuage de la pâte autoplaçante contenant le SikaPlast - 40 Pro: (a) à 5 minutes ; (b) à 60 minutes.**

Le SikaPlast - 40 Pro nécessite une dose supérieure pour maintenir la même fluidité après une heure de la fabrication du mélange composé du ciment et du filler choisis pour cette étude.

Comme il est illustré dans la figure IV.6, la pâte autoplaçante formulée en utilisant le SikaPlast - 40 Pro présente un problème de ressuage (laitance qui monte à la surface de la pâte). Ce phénomène devient plus important après 60 minutes, tandis que la pâte au fond commence à faire prise et le mélange nécessite un malaxage pour réincorporer le liquide et regagner l'ouvrabilité de la pâte.

Il est donc préférable d'utiliser le MEDAFLOW 30 dans la fabrication du BAP, pour éviter tout problème de ségrégation ou de perte d'ouvrabilité.

### 3. Résultats des essais sur les BAP

#### 3.1. Ecoulement en milieu confiné

Les essais montrent que sept mélanges donnent un taux d'écoulement élevé ( $PL > 0,80$ ), ce qui signifie une bonne fluidité du BAP (figure IV.7). Il s'agit des mélanges qui contiennent un pourcentage  $\geq 50\%$  de SD. Ainsi que le mélange BAP12 avec un rapport  $SC/SR = 50/50$ . Il est évident que la forme arrondie des SD joue un rôle positif dans la fluidité des BAP, en diminuant le frottement entre les granulats [52]. La fraction fine des sables joue aussi un rôle favorable dans la diminution de ses forces de frottement [12].

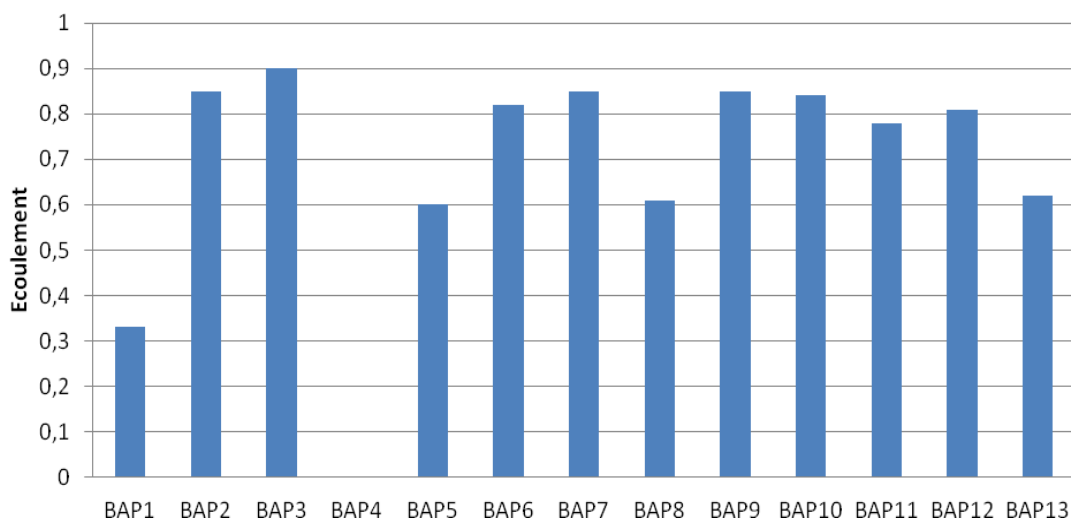


Figure IV.7 - Ecoulement des BAP (essai de boîte en L à trois barres).

Comme mentionné plus haut, l'utilisation d'une boîte en L à 3 barres signifie que la classe d'écoulement passage des trois premiers mélanges est PL2. Ce qui signifie qu'ils ont la capacité de s'écouler à travers des structures avec un espacement de ferrailage de 60 à 80 mm [9].

Les mélanges avec des taux élevés de SC ou SR donnent des valeurs très faibles, voir nulles pour le mélange BAP4 avec 100 % de SR, malgré la forme arrondie des grains de ce dernier. Il semble que la nature très fine du SR utilisé est la cause directe de ce blocage. Plus les grains sont fins, plus ils ont besoin de fluide pour garantir un écoulement satisfaisant.

Dans le cas du BAP1 (avec 100 % de sable concassé), la capacité d'écoulement est très faible, du fait de la forme angulaire du sable concassé et sa nature (forte teneur en  $\text{CaCO}_3$ ) qui absorbe l'eau de gâchage.

### 3.2. Etalement

Selon les résultats présentés dans la figure IV.8: seul le mélange BAP1 donne un étalement inférieur aux exigences techniques en vigueur. Ceci peut-être pour les mêmes raisons mentionnées ci-dessus pour lesquelles il donne un faible taux d'écoulement.

La quantité de pâte nécessaire pour obtenir un  $\text{SF} \geq 550$  mm d'un BAP avec un SC est relativement supérieure à celle dans le cas des sables roulés [42].

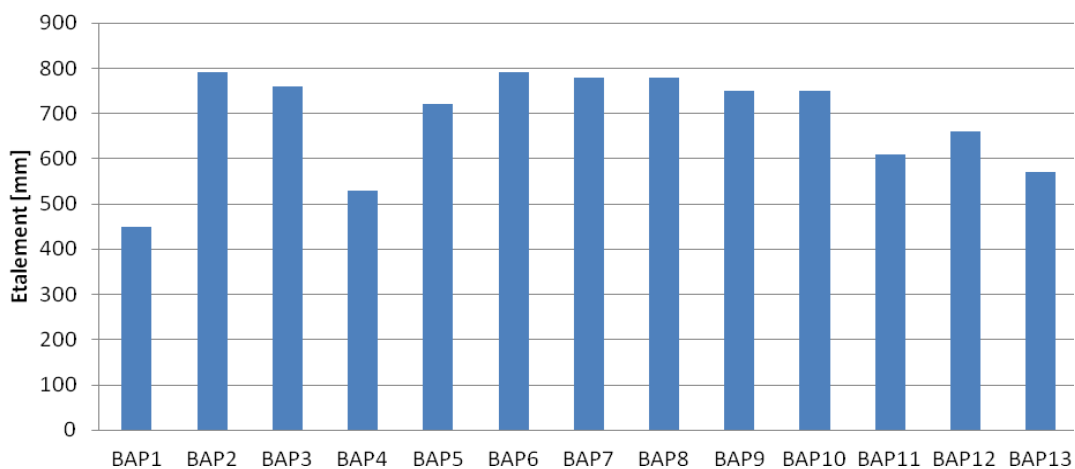
Hu et Wang [103] ont trouvé que le degré d'absorption d'eau des sables (lié à leurs nature) influent sur la fluidité des BAP. Le SC utilisé est d'origine calcaire avec un degré d'absorption supérieur à celui du SR, SD1 et SD2.

On peut classer l'étalement des autres mélanges comme suit [12]:

- SF1 pour les BAP4, 11 et 13: Convient pour les structures en béton non armé ou légèrement armé coulé par le haut (dalles de logement) ou par pompage (revêtements de tunnel), ainsi que pour les sections suffisamment petites pour empêcher un long écoulement horizontal (pieux et certaines fondations profondes).
- SF2 pour les BAP5 et 12: Convient à l'usage normal (murs, poteaux, ... etc.).

- SF3 (760 - 850 mm) pour les BAP2, 3, 6, 7, 8, 9 et 10: Convient pour les applications verticales dans les structures très encombrées, les structures de forme complexe ou pour le remplissage sous coffrage.

Ces bons résultats ont été obtenus avec une faible quantité de superplastifiant (1,2 %), tandis que certaines études ultérieures ont montré qu'un pourcentage élevé est nécessaire pour avoir une fluidité élevée [64, 96, 97]. Cela signifie que la présence des particules rondes de sable de dune et économiquement bénéfique.



**Figure IV.8** - Étalement des BAP (essai au cône d'Abrams).

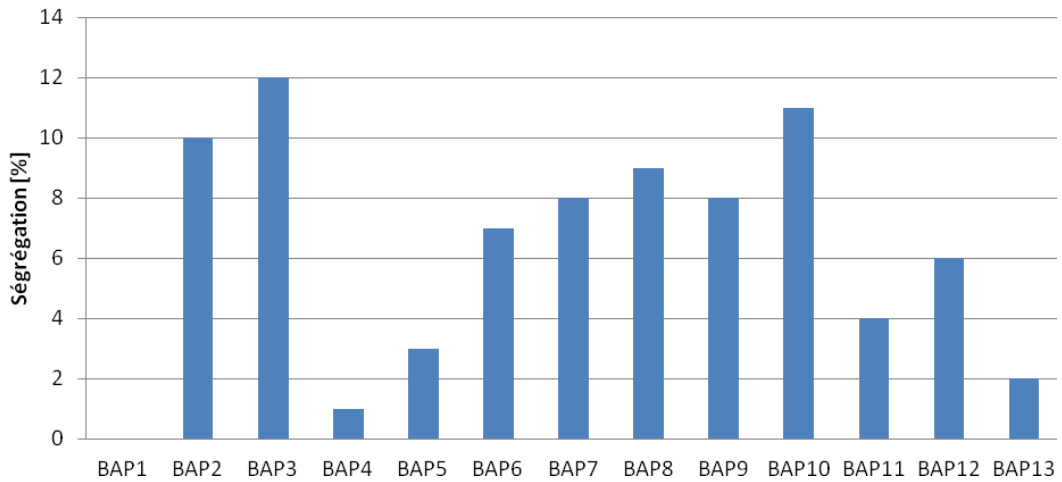
### 3.3. Résistance à la ségrégation

Tous les mélanges préparés dans ce travail présentent une résistance à la ségrégation très élevée (figure IV.9). La classe de ségrégation des mélanges préparés est SR2 <15%. Cette classe est préférée dans les applications verticales si la distance d'écoulement est supérieure à 5 m, avec un espacement de ferrailage supérieur à 80 mm, afin de prendre en charge la ségrégation pendant l'écoulement [12].

Le BAP1 ne présente aucun risque de ségrégation, pour les mêmes raisons de la nature et de la forme des particules du SC.

On fait, il y a deux types de ségrégation dans les mélanges de béton. Le premier est la ségrégation due essentiellement à la tendance des granulats grossiers à se séparer des autres constituants, sous l'effet de leur taille et leur densité. La deuxième forme de ségrégation est due se manifeste lorsque la fraction fluide se sépare des autres

constituants, à cause de sa très faible viscosité [13]. Cette deuxième forme est celle des BAP.



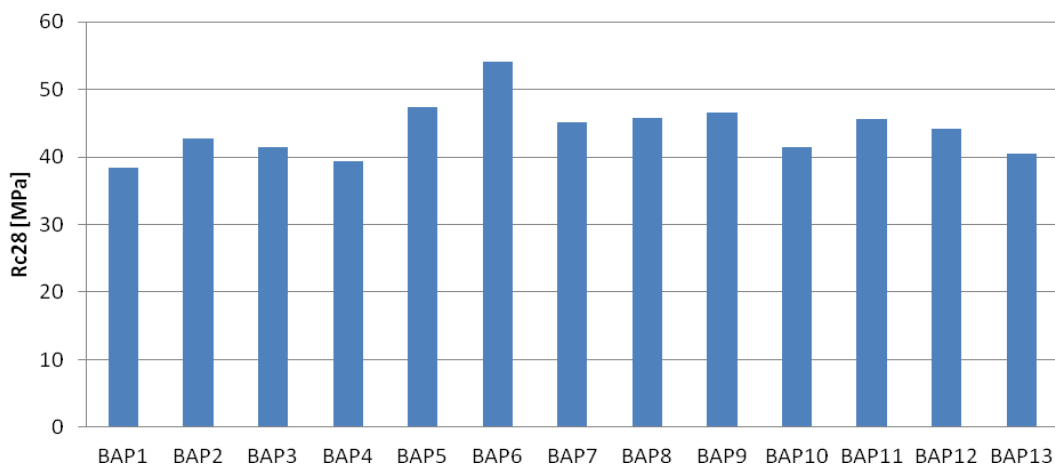
**Figure IV.9** - Résistance à la ségrégation des BAP (essai de stabilité au tamis).

Les bonnes SR obtenues pour l'ensemble des mélanges sont dues aux facteurs suivant :

- L'utilisation des granulats avec un  $d_{max}$  relativement petit (16 mm);
- La distribution granulométrique continue est étalée des grains solides;
- Le pourcentage raisonnable de poudre utilisée (ciment + filler);
- L'effet positif du filler calcaire sur la résistance à la ségrégation;
- Les efforts de frottement entre les grains solides dans les mélanges à forte teneur en SC.

### 3.4. Résistance à la compression

Les résultats des essais de résistance à la compression montrent que les mélanges avec un seul type de sable de dune donnent moins de résistance que ceux avec une substitution partielle des sables roulés avec du sable concassé. C'est le mélange BAP6, contenant un rapport SC/SD1 50/50, qui donne une résistance à la compression normale  $R_{c28} > 50$  MPa (figure IV.10). Une bonne distribution granulométrique améliore le taux de remplissage de la fraction solide des BAP est contribue positivement à leur résistance à la compression [29]. La résistance à la compression est liée réciproquement au SF des BAP [13].



**Figure IV.10** - Résistance normale à la compression des BAP ( $R_{c28}$ ).

Les valeurs de  $R_{c28}$  relativement faibles, développées par la majorité des mélanges sont dues à la faible finesse de la poudre de calcaire, ce qui ralentit la cinétique d'hydratation. Le calcaire en lui-même est un ajout ralentissant le développement des résistances à court terme.

#### 4. Synthèse des résultats expérimentaux

Les résultats à l'issue de l'étude expérimentale des BAP à l'état frais et durci, ont permis de distinguer les mélanges avec des propriétés autoplaçantes et de bonne performance mécanique comme il est présenté dans le tableau IV.1: les mélanges autoplaçants en vert et les autres en rouge. On remarque alors que les BAP contenant des proportions élevées de sable angulaire ou très fin, sont moins autoplaçants.

**Tableau IV.1** - Comparaison des mélanges de BAP étudiés.

Propriété	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7	BAP8	BAP9	BAP10	BAP11	BAP12	BAP13
PL	0,33	0,85	0,9	0	0,6	0,82	0,85	0,61	0,85	0,84	0,78	0,81	0,62
Ecart type	± 0,08	± 0,03	± 0,02	n/a*	± 0,08	± 0,10	± 0,03	± 0,05	± 0,02	± 0,06	± 0,11	± 0,05	± 0,15
RS [%]	0	10	12	1	3	7	8	9	8	11	4	6	2
Ecart type	± 1,0	± 0,1	± 1,1	± 0,5	± 0,2	± 0,3	± 0,1	± 1,9	± 1,3	± 0,3	± 1,3	± 1,5	± 0,1
SF [mm]	450	790	760	530	720	790	780	780	750	750	610	660	570
Ecart type	n/a**	± 09	± 04	n/a**	± 19	± 12	± 16	± 11	± 16	± 12	± 20	± 31	n/a**
$R_{c28}$ [MPa]	38,4	42,7	41,5	39,3	47,4	54,1	45,1	45,7	46,6	41,4	45,6	44,2	40,5
Ecart type	± 1,7	± 1,2	± 1,3	± 1,5	± 1,5	± 1,4	± 1,3	± 1,0	± 0,8	± 1,3	± 1,1	± 1,1	± 1,0

n/a : Non applicable : (\*) Mesure impossible pour le PL, (\*\*) cas de SF très faible (< 600 mm).

Les objectifs en termes d'autoplaçance et de performance mécanique sont donc pleinement atteints pour les mélanges BAP2, 3, 6, 7, 9, 10 et 12, qui ont montré des performances excellentes qui dépendent aux exigences techniques concernant les bétons à employer.

Les résultats du SF ne donnent aucune indication sur la capacité du BAP à s'écouler à travers un ferrailage sans blocage, mais ils permettent d'avoir une idée sur la SR [104].

La fluidité peut être améliorée en augmentant le pourcentage du SP, mais cela peut affecter la stabilité du BAP, puisqu'on va excéder le degré de saturation en SP.

Dans le cas des mélanges qui présentent des valeurs PL faibles, mais avec de bons résultats de SF et RS (BAP5 et BAP 8), il est peut être possible d'avoir un bon écoulement en déminant le nombre des bars de la boîte en L, de deux bars au lieu de trois. Ce qui correspond à des cas de ferrailage moins denses.

Pour le mélange BAP4, le sable très fin a augmenté la viscosité plastique, ce qui influe négativement sur la fluidité (PL et SF faibles) [12].

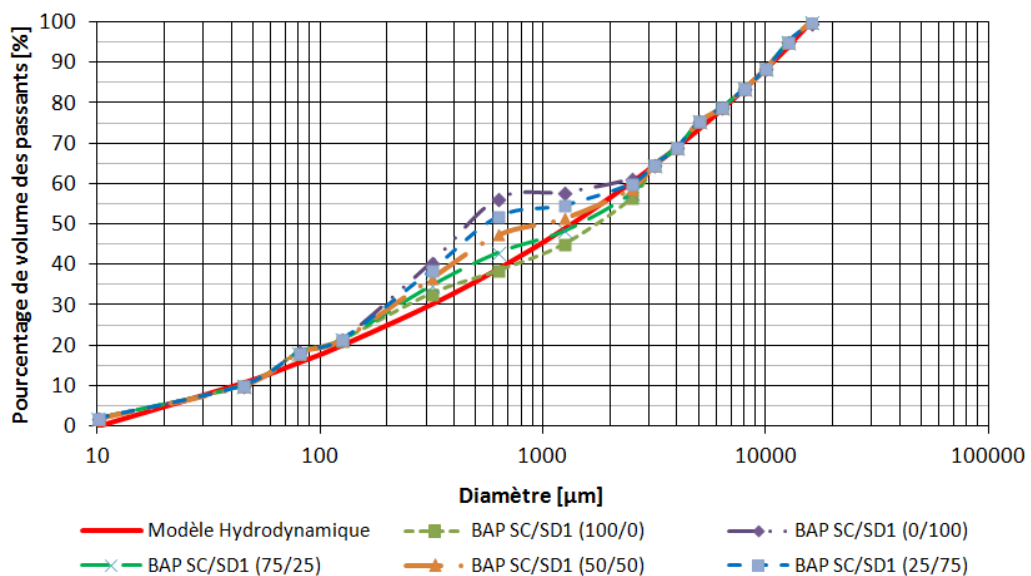


Figure IV.11 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SD1.

En examinant la distribution granulométrique des grains solides des différents mélanges par rapport au modèle hydrodynamique développé, on peut voir que le mélange avec 100 % de SC suit presque parfaitement la courbe du modèle (figures

IV.11 à IV.13). Le manque de fluidité de ce dernier est lié à la forme de ses grains et de son degré d'absorption d'eau. Tandis que pour les mélanges où on a fait une substitution partielle ou complète du SC par du SD ou SR, on remarque que la courbe granulométrique s'éloigne de celle du modèle. Cela est dû à leurs petits modules de finesses.

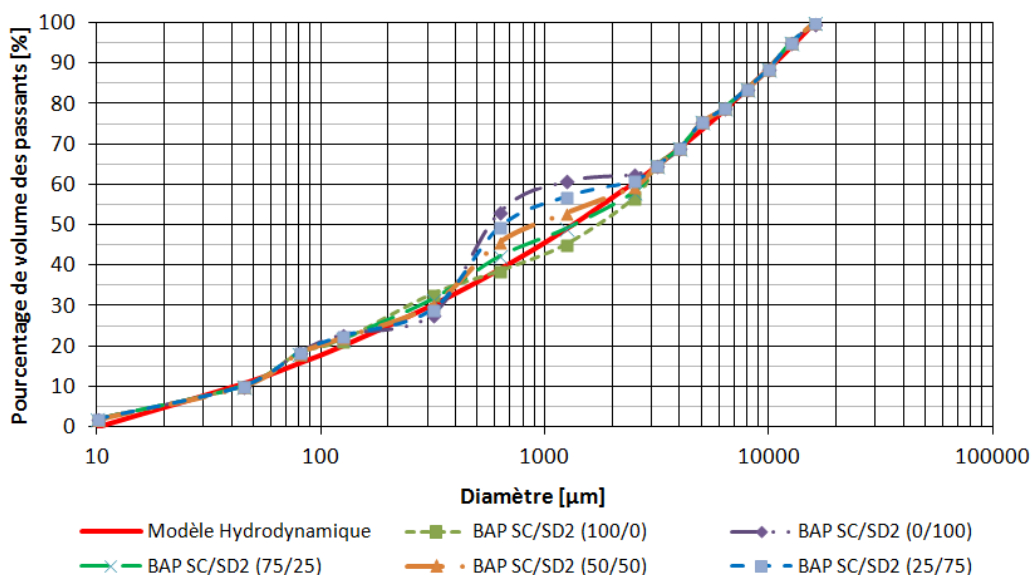


Figure IV.12 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SD2.

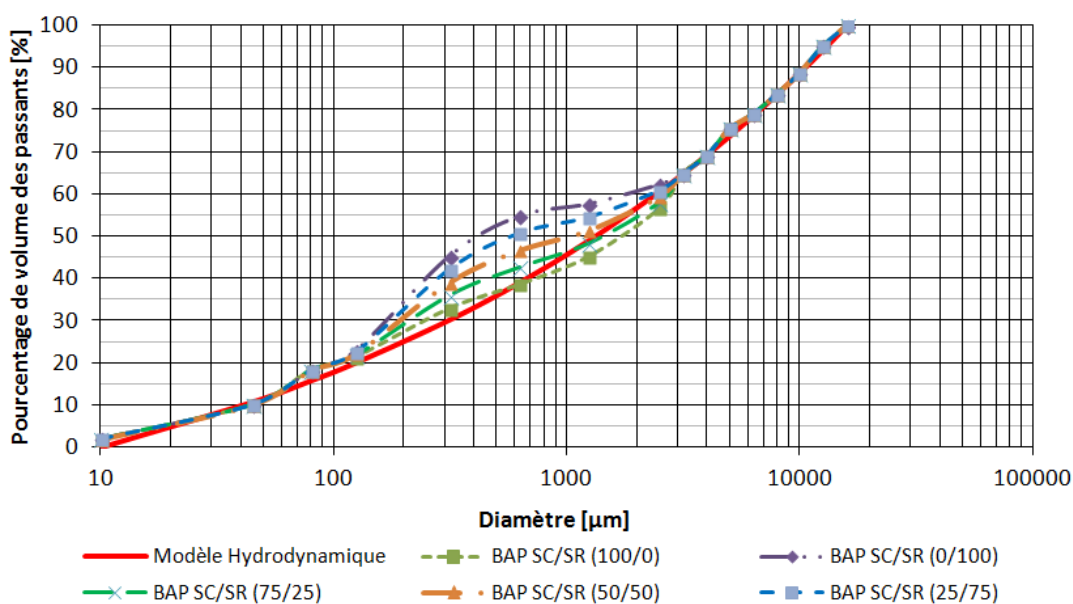


Figure IV.13 – Courbes granulométriques des mélanges de BAP dont le SC est substitué par le SR.

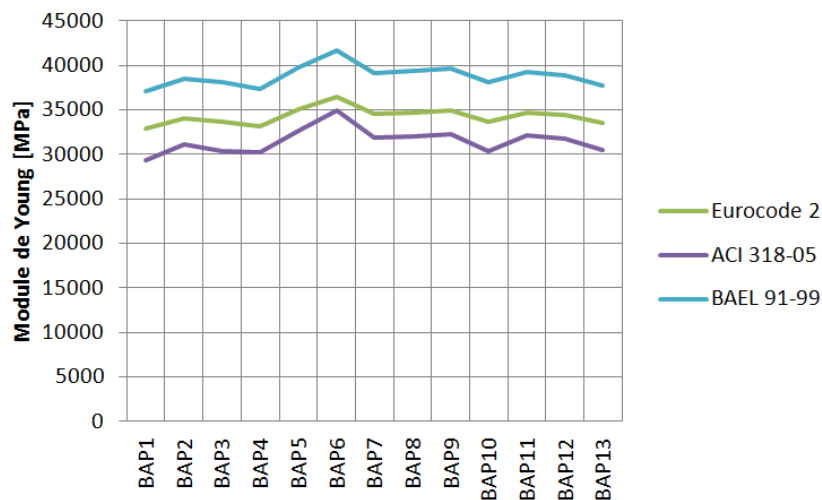
Comme il est mentionné plus haut dans ce travail, la finesse du sable contribue avec la poudre au maintien d'une viscosité plastique modéré et acceptable. Mais, la courbe granulométrique du mélange avec 100 % de SR est celle qui s'éloigne le plus vers le haut ( $M_f = 1.18$ ). Ce qui explique les résultats trouvés pour ce mélange.

## 5. Estimation du module de Young

Les valeurs du module de Young (Module d'élasticité) à la compression selon les formules du BAEL 91-99, l'Eurocode 2 et l'ACI 318-05 sont présentées dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2** – Valeurs du module de Young des mélanges de BAP utilisés.

Propriété [kg]	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7	BAP8	BAP9	BAP10	BAP11	BAP12	BAP13
$\rho_{\text{béton}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2300	2303	2291	2323	2301	2302	2302	2298	2296	2293	2306	2311	2317
$R_{C28}$ [MPa]	38	43	42	39	47	54	45	46	47	41	46	44	41
$E_{cm}$ [MPa]	32940	34006	33716	33170	35088	36507	34568	34705	34909	33692	34683	34360	33470
$E_c$ [MPa]	29393	31054	30381	30180	32672	34922	31900	32019	32287	30388	32149	31769	30524
$E_{28}$ [MPa]	37111	38448	38084	37399	39809	41603	39155	39328	39584	38053	39299	38893	37776



**Figure IV.14** – Variation des valeurs du module de Young selon les différentes formules de calcul.

On peut remarquer que ces valeurs varient presque de la même façon, en fonction de la résistance mécanique à la compression (figure IV.14). Les valeurs calculées par la

formule du BAEL 91-99 sont supérieures à celles calculées selon les deux autres normes.

Les valeurs calculées par la formule de l'ACI 318-05 sont proches des valeurs expérimentales trouvées dans la littérature pour une masse volumique de l'ordre de  $2300 \text{ kg/m}^3$  (figure III.14). On peut dire alors que la formule du BAEL 91-99 surestime le module d'élasticité des BAP.

## **6. Conclusion**

Cette étude expérimentale a permis d'obtenir des BAP de classes d'étalement allant de SF1 à SF3, et de résistance à la ségrégation de classe RS2.

Sur la base des propriétés à l'état frais et l'état durci, nous pouvons mettre l'hypothèse que ces propriétés ne sont pas seulement liées à la variation de la forme des grains de sable, mais aussi à sa finesse (sa granulométrie).

Il convient donc d'étudier l'effet de la distribution granulométrique des sables sur les propriétés des BAP pour pouvoir les optimiser sur cette base.

# Chapitre V: Modélisation et optimisation des propriétés des BAP.

## 1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation et l'optimisation des propriétés physiques et mécaniques des BAP, en tenant compte de la distribution granulométrique du sable et de son module de finesse (Mf).

L'optimisation est basée sur la méthodologie de la surface de réponse. L'analyse de la variance est exploitée pour déterminer la signification statistique de la granulométrie sur les propriétés étudiées du BAP. Pour cela, nous avons étudié vingt-quatre mélanges de BAP, en utilisant trois types de sables avec différentes formes de grains et différentes valeurs de Mf: sable de dune, sable de rivière et sable concassé.

## 2. Propriétés granulométriques des sables

Le sable assure la continuité entre la poudre (ciment + filler) et les gros granulats (gravier) dans le béton. Donc, il est important de donner une grande attention à ses propriétés, si on veut obtenir un béton avec une bonne densité de remplissage. Pour cela, la nature et la forme du sable jouent un rôle clé dans la rhéologie des bétons.

L'effet du sable sur le besoin en eau, la densité de remplissage des granulats et l'ouvrabilité des BAP, dépend non seulement de la forme des grains de sable, mais aussi de sa granulométrie [109].

Les sables roulés donnent une meilleure rhéologie pour les BAP, tandis que les sables concassés (SC) à forme angulaire sont plus bénéfiques, de point de vue résistance mécanique ; vu la variation des forces de friction entre les sables roulés et concassés dans les BAP [11, 14, 28]. Alors, comme c'est le cas de tous les bétons, il est pratiquement impossible de favoriser l'utilisation des SR ou des SC pour la fabrication

d'un BAP, mais on peut les associer pour améliorer ses propriétés physiques et mécaniques [64, 103].

Ces effets cruciaux du sable donnent la possibilité de modéliser et de prédire le comportement des BAP en se basant sur les propriétés des grains de sable utilisés. Cela peut rendre la formulation des BAP plus facile, rapide et économique, en comparaison avec les méthodes existantes. Plusieurs études ont été menées récemment, pour mieux comprendre les effets du sable sur le béton en général et sur les BAP en particulier, dont certains ont proposé des modèles mathématiques du comportement des BAP, à base des propriétés des sables [64, 110-114].

Bouziani et Sahraoui [57, 110] ont étudié l'effet de la substitution du SC par le sable roulé dans les BAP, et ont élaboré des modèles pour les différentes propriétés du BAP frais et durci, en fonction du pourcentage du SR. Ils ont substitué le SC par le sable de dunes (SD) et le sable de rivière (SR), et ils ont trouvé que le SD a un effet négatif sur l'écoulement et l'ouvrabilité du BAP frais, et que le SR a un effet positif sur ces propriétés. Tandis que les résultats trouvés par Zeghichi et al. [64] montrent qu'il s'agit du contraire.

Ces études mènent à l'hypothèse que les résultats obtenus dans les deux travaux ne sont pas dus seulement à la forme des grains de sable, mais peuvent être plutôt dus à l'effet de la distribution granulométrique du sable et le pourcentage des fines [110, 115, 116].

Trois paramètres principaux sont utilisés pour caractériser la granulométrie d'un sable, pour déterminer sa qualité comme un granulat utilisable pour la fabrication du béton. C'est paramètres sont le coefficient d'uniformité de Hazen ( $C_u$ ), le coefficient de courbure ( $C_c$ ) et le module de finesse (Mf).

Les coefficients  $C_u$  et  $C_c$  sont calculés comme suit :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (27)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (28)$$

Avec,  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$  sont les diamètres qui correspondent à 10, 30 et 60 % des passants, respectivement. On considère la courbe granulométrique du sable comme étant bien graduée, si  $C_u \geq 6$  et  $1 < C_c$  [117].

Le  $M_f$  est calculé par l'équation (1).

La densité de remplissage du mélange du BAP dépend non seulement de la méthode de formulation, mais aussi de la granulométrie des granulats [76, 77, 85]. Les conditions mentionnées ci-dessus conduisent donc à une bonne densité de remplissage des grains solides et une distribution granulométrique optimale. Ce qui donne, par conséquent, de bonnes propriétés physiques et mécaniques du béton.

### 3. La méthode des plans d'expériences

Un plan d'expériences est une organisation du travail expérimental pour des finalités de recherche scientifique ou le développement de nouveaux produits industriels. Il consiste à manipuler des variables dites « facteurs » pour examiner leur influence sur des variables appelées « effets » ou « réponse », alors que les autres variables seront maintenues constantes pour les rendre ineffectives [110]. L'objectif est d'obtenir le maximum d'informations avec un minimum d'expériences.

#### 3.1. Utilité des plans d'expériences

Il existe trois situations dans lesquelles on utilise la méthode de plans d'expériences [118]:

- *Choix entre les alternatives (Expériences comparatives)*: Il s'agit de comparer les réponses de deux alternatives pour choisir le produit ou le constituant qui donne la meilleure performance.
- *Choix du facteur clé affectant une réponse (Screening)*: Lorsqu'il y a un grand nombre de facteurs possibles, il convient d'éliminer les facteurs avec un effet faible ou nul sur le phénomène étudié. Ce qui permet de réduire le nombre des essais.
- *Modélisation d'un processus par la méthodologie de la surface de réponse*: Une fois que les facteurs significatifs sont connus, cette méthodologie permet de modéliser et optimiser le processus étudié et le rendre plus robuste.

### 3.2. Espace expérimental

Dans un travail expérimental, la valeur d'une réponse recherchée dépend d'un certain nombre de facteurs (un facteur au minimum) définis par l'expérimentateur, dont les différentes valeurs que prennent ces facteurs sont appelées « niveaux ». Lorsqu'il s'agit d'un seul facteur, on parle de domaine de variation du facteur. Ce domaine est borné par une limite inférieure appelée « niveau bas » et une limite supérieure appelée « niveau haut ». Dans le cas de discrétisation des données, ces limites prennent les valeurs (-1) et (+1) respectivement [119].

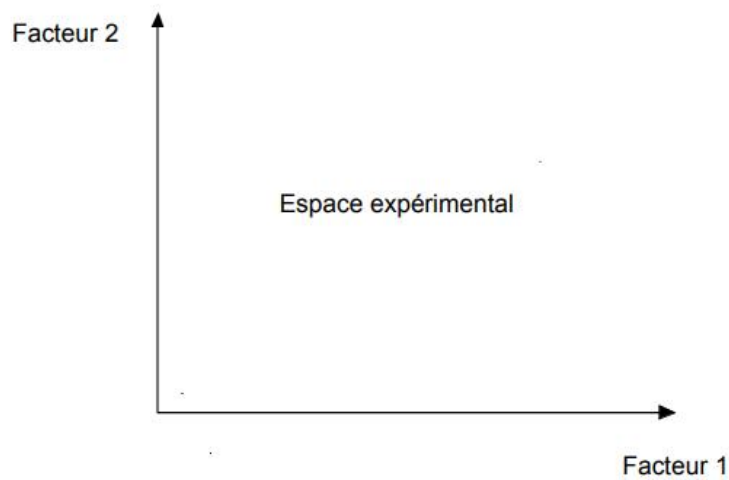


Figure V.1 - Définition de l'espace expérimental [119].

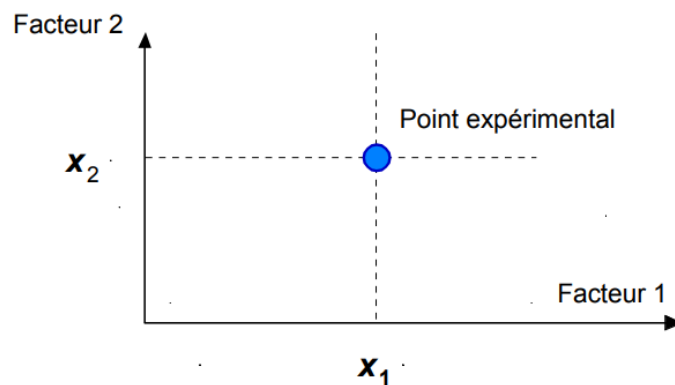


Figure V.2 - Définition d'un point expérimental [119].

Dans le cas de deux facteurs, on obtient un repère cartésien définissant l'espace expérimental (figure V.1). L'intersection de deux niveaux  $X_1$  et  $X_2$  des facteurs définit

les coordonnées d'un point expérimental, comme il est montré dans la figure V.2. Le plan d'expériences est donc l'ensemble des points expérimentaux considérés. Cette zone délimitée par l'ensemble des domaines de variation des facteurs présente le « domaine d'étude » [119, 120].

### 3.3. Méthodologie de la surface de réponse (MSR)

La technique de la MSR est une approche de modélisation empirique qui permet de déterminer la relation entre les divers paramètres (facteurs) d'un processus et une réponse ( $Y_i$ ) qu'on cherche à déterminer. Pour un plan d'expériences multifactoriel, la réponse peut s'écrire sous la forme [118]:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (29)$$

Le coefficient de détermination  $R^2$ , prend des valeurs de 1 à 0 et mesure l'adéquation à quel point le modèle et les observations expérimentales sont adéquates. Pour une régression linéaire,  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation [115]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (30)$$

Avec  $y_i$  est la valeur que prend la réponse pour la  $i^{\text{ème}}$  expérience,  $\bar{y}$  est la valeur moyenne de toutes les observations (moyenne globale), et  $\bar{y}_i$  est la valeur prédite par régression pour la  $i^{\text{ème}}$  expérience.

Dans le cas des plans multifactoriels, on ne peut pas se limiter à l'étude de  $R^2$  pour juger l'adéquation des modèles construits. Il faut donc introduire aussi la valeur P.

La valeur P est utilisée pour tester la significativité statistique d'un modèle dans le cadre de l'hypothèse nulle. Cette hypothèse nulle signifie que la probabilité que la valeur estimée par le modèle soit la même que celle observée expérimentalement ne doit pas dépasser 5 %. C'est-à-dire que le modèle est adéquat à 95 % [121].

La MSR permet d'explorer l'effet des facteurs étudiés sur les réponses pour atteindre les objectifs suivants [118-121]:

- *Atteindre une cible*

Cet objectif peut être atteint en créant un modèle à partir d'un plan d'expériences, puis utiliser ce modèle pour déterminer les valeurs nécessaires pour atteindre la cible souhaitée.

- *Modélisation de la régression*

L'emploi des méthodes statistiques telles que l'analyse de la variance (ANOVA) permet d'ajuster des modèles plus précis. Dans le cas de plusieurs facteurs, un modèle non-linéaire ou d'autres modèles complexes, il est plus utile d'avoir recours à la conception assistée par ordinateur.

- *Maximiser ou minimiser une réponse (optimisation)*

L'optimisation consiste à trouver les valeurs des paramètres qui augmentent le rendement d'un processus et/ou la qualité d'un produit. Elle suit typiquement trois étapes: la conception du plan d'expérience, le modèle de régression, et l'optimisation [122].

- *Rendre un processus robuste*

Un produit conçu et fabriqué dans des conditions contrôlées sera ensuite « testé sur terrain » entre les mains du client, puisqu'il peut être sensible à des modes de défaillance non observés en laboratoire ou envisagés par la conception.

- *Chercher plusieurs objectifs (optimisation multiréponse)*

Un produit ou un processus a généralement plusieurs caractéristiques de sortie souhaitables, et ils sont souvent interdépendants de sorte que l'amélioration de l'un entraînera une détérioration de l'autre. Il faut alors chercher un compromis entre ces diverses caractéristiques finales souhaitables. Comprendre les limites du compromis permet de faire les bons choix. Pour ce faire, on peut construire une fonction objective pondérée (fonction de désirabilité) et on l'optimise.

### 3.4. L'analyse de la variance (ANOVA)

Cette méthode statistique est utilisée pour détecter les facteurs significatifs dans un modèle multifactoriel. Le modèle multifactoriel est un modèle courant dans la méthode des plans d'expériences où l'expérimentateur définit les valeurs (niveaux) pour chacun des facteurs, puis mesure la réponse. Le nombre de niveaux peut varier selon les facteurs.

On suppose que les échantillons proviennent de la même population et suivent la loi normale. L'ANOVA consiste tout d'abord à calculer le carré moyen des écarts (CM), appelé aussi Variance (V). Pour un nombre limité d'observations, le CM est calculé comme suit:

$$CM = V = \sigma_{n-1}^2 = \frac{SCE}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (31)$$

Avec  $SCE$  est la somme des carrées des écarts, et  $\sigma$  est l'écart type.

La valeur F (ou test de Fisher) est le rapport entre la variance des facteurs et celle des résidus. Elle est calculée selon la loi de Fisher, comme suit :

$$F = \frac{V_{facteur}}{V_{résidu}} = \frac{\sigma_{facteur}^2}{\sigma_{résidu}^2} \quad (32)$$

## 4. Matériaux et méthodes utilisés

Les matériaux et les mélanges utilisés sont ceux présentés dans l'étude expérimentale du BAP.

D'après l'approche adaptée plus haut dans ce chapitre, les facteurs variables pris en compte dans la conception du plan d'expérience, sont : le Mf, le Cc et le Cu des sables utilisés. Les réponses étudiées sont le PL, le RS, le SF et le R<sub>c28</sub>.

**Tableau V.1-** Plan d'expérience des BAP en fonction des propriétés granulométriques.

N°	Pourcentage des sables [%]				Propriétés granulométriques des sables (facteurs)			Réponses			
	SC	SD1	SD2	SR	Mf (facteur A)	Cc (facteur B)	Cu (facteur C)	PL	RS [%]	SF [mm]	R <sub>c28</sub> [MPa]
01	100	0	0	0	2,85	0,61	8,84	0,33	00,0	450	38,4
02	0	100	0	0	1,70	0,89	2,58	0,85	10,0	790	42,7
03	0	0	100	0	2,03	0,42	1,53	0,90	12,0	760	41,5
04	0	0	0	100	1,18	1,34	2,34	0,00	01,0	530	39,3
05	75	25	0	0	2,74	0,62	6,74	0,60	03,0	720	47,4
06	50	50	0	0	2,26	0,68	5,31	0,82	07,0	790	54,1
07	25	75	0	0	1,97	1,04	4,79	0,85	08,0	780	45,1
08	75	0	25	0	2,64	0,66	6,38	0,61	09,0	780	45,7
09	50	0	50	0	2,43	0,75	4,80	0,85	08,0	750	46,6
10	25	0	75	0	2,23	0,91	3,44	0,84	11,0	750	41,4
11	75	0	0	25	2,50	0,59	6,93	0,78	04,0	610	45,6
12	50	0	0	50	2,17	0,58	5,52	0,81	06,0	660	44,2
13	25	0	0	75	1,84	0,60	4,00	0,62	02,0	570	40,5

#### 4.1. Plan d'expérience utilisé

Les résultats expérimentaux (réponses) des facteurs considérés sont représentés dans le tableau V.1. Les mélanges dont on a combiné le SC avec le SD ou le SR ont donné de meilleures propriétés dans l'état frais et durci aussi. La présence des sables roulés (SR et SD) a contribué à la diminution des efforts de friction dans la fraction solide des BAP [28, 64], alors que le mélange de BAP avec 100 % de SR a donné un écoulement faible, ce qui peut être dû à son Mf faible.

Les résultats expérimentaux des travaux de Bouziani [110] montrent que les mélanges des BAP avec des sables de propriétés granulométriques proches donnent des résultats similaires, à l'état frais et durci (tableau V.2). Cette similarité est aussi valide, en comparant les résultats dans les tableaux V.1 et V.2.

**Tableau V.2-** Plan d'expérience de Bouziani présenté en fonction des propriétés granulométriques [110].

N°	Pourcentage des sables [%]			Propriétés granulométriques des sables (facteurs)			Réponses			
	SR	SD	SC	Mf (facteur A)	Cc (facteur B)	Cu (facteur C)	PL	RS [%]	SF [mm]	R <sub>c28</sub> [MPa]
01	100	0	0	3,03	0,75	5,45	0,83	06,5	740	43,4
02	0	100	0	1,34	0,99	1,76	0,00	00,0	420	37,6
03	0	0	100	2,16	0,98	2,64	0,89	04,7	665	48,7
04	0	20	80	2,00	0,98	2,47	0,81	03,3	590	46,8
05	0	40	60	1,83	0,98	2,30	0,80	01,6	540	45,0
06	0	60	40	1,67	0,98	2,13	0,65	01,3	520	41,8
07	0	80	20	1,51	0,98	1,95	0,45	00,6	480	39,8
08	20	0	80	2,33	0,88	3,30	0,81	12,6	770	47,3
09	40	0	60	2,43	0,94	3,82	0,87	07,6	750	42,8
10	60	0	40	2,23	0,74	4,23	0,85	01,0	710	40,6
11	80	0	20	2,50	0,64	6,44	0,82	10,4	770	42,4

#### 4.2. Emploi de la méthodologie de la surface de réponse (MSR)

Dans ce travail, nous avons appliqué la MSR pour construire le modèle de régression, puis, nous avons utilisé l'approche de la fonction de désirabilité pour l'optimisation multiréponse. Le plan d'expérience adopté est construit en combinant les deux tableaux V.1 et V.2, dans le but d'obtenir un nombre suffisant de données, pour lesquelles on peut appliquer la MSR.

Comme il est mentionné plus haut, il est recommandé d'utiliser l'outil informatique dans le cas d'une modélisation non-linéaire. Pour cela, l'analyse et la modélisation statistiques des données sont faites à l'aide du logiciel Design-Expert (version 9).

Design-Expert est un logiciel puissant pour concevoir les plans d'expériences, qui permet d'analyser les données statistiquement, de modéliser les résultats le plus précis que possible et de les visualiser graphiquement.

La modélisation avec Design-Expert passe par les étapes suivantes:

- Choix du type de plan d'expériences;
- Définition des facteurs;

- Définition des réponses;
- Introduction des valeurs des différentes variables;
- Choix du type du modèle mathématique adopté (cubique dans notre cas);
- Analyse de la variance;
- Diagnostique des résultats.

Run	Factor 1 A:Mf	Factor 2 B:Cc	Factor 3 C:Cu	Response 1 RA	Response 2 SR %	Response 3 SF mm	Response 4 Rc28 MPa
1	2.85	0.61	8.84	0.33	0	450	38.4
2	1.7	0.89	2.58	0.85	10	790	42.7
3	2.03	0.42	1.53	0.9	12	760	41.5
4	1.18	1.34	2.34	0	1	530	39.3
5	2.74	0.82	6.74	0.6	3	720	47.4
6	2.26	0.88	5.31	0.82	7	790	54.1
7	1.97	1.04	4.79	0.85	8	780	45.1
8	2.64	0.66	6.38	0.61	9	780	45.7
9	2.43	0.75	4.8	0.85	8	750	46.6
10	2.23	0.91	3.44	0.84	11	750	41.4
11	2.5	0.59	6.93	0.78	4	610	45.6
12	2.17	0.58	5.52	0.81	6	660	44.2
13	1.84	0.6	4	0.52	2	570	40.5
14	3.03	0.75	5.45	0.83	6.5	740	43.4
15	1	0.99	1.76	0	0	420	37.6
16	2.14	0.98	2.64	0.89	4.7	665	48.7
17	2	0.97	2.47	0.81	3.3	590	46.8
18	1.83	0.98	2.3	0.8	1.6	540	45
19	1.67	0.98	2.13	0.85	1.3	520	41.8
20	1.51	0.98	1.95	0.45	0.6	480	39.8
21	2.33	0.88	3.3	0.81	12.6	770	47.3
22	2.43	0.94	3.82	0.87	7.6	750	42.8
23	2.23	0.74	4.23	0.85	1	710	40.6
24	2.5	0.64	6.44	0.82	10.4	770	42.4

Figure V.3 - Introduction des données dans le logiciel Design-Expert.

### 4.3. Choix du modèle mathématique

Si on désire modéliser la relation entre un paramètre étudié (Y) et les facteurs étudiés  $X_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), cette relation est une fonction mathématique, dite de réponse explicite ou de transfert, ou aussi de régression [123, 124].

Après l'introduction des données dans le logiciel Design-Expert (figure V.3), on choisit le type polynomial pour le modèle mathématique. Le logiciel montre que les modèles de second et troisième ordre sont plus convenables, tandis que pour les modèles d'ordre supérieurs, les facteurs sont aliasés. Il est recommandé de sélectionner le modèle qui permet d'avoir un  $R^2$  maximal, où les termes additionnels sont significants, et le modèle n'est pas aliasé. Ces critères sont remplis par le modèle du troisième ordre.

Des modèles mathématiques du troisième ordre ont été alors développés dans ce travail, pour comprendre l'effet des propriétés  $M_f$ ,  $C_c$  et  $C_u$  du sable sur les propriétés physiques et mécaniques standards des BAP (PL, RS, SF, et  $R_{c28}$ ), comme il est recommandé par Directives Européennes pour le Béton Autoplaçant [12]. L'expression générale de ce modèle mathématique est:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \beta_{iii} X_i^3 + \frac{1}{3} \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^n \beta_{iik} X_i^2 X_k + \frac{1}{6} \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^n \beta_{ijk} X_i X_j X_k + \varepsilon \quad (33)$$

Avec  $Y$  est la réponse,  $\beta_0$  est le terme indépendant de l'équation de régression, les coefficients  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ , et  $\beta_{iii}$  sont les termes linéaires, quadratiques et cubiques respectivement. Tandis que  $\beta_{ij}$ ,  $\beta_{iik}$ , et  $\beta_{ijk}$  sont les termes en interaction (pour lesquels,  $i$ ,  $j$ , et  $k$  ne doivent pas être égaux entre eux). Le terme  $\varepsilon$  représente l'erreur d'ajustement du modèle de régression.

## 5. Résultats et discussions

### 5.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Les équations de régression pour le plan d'expérience adopté sont générées par le logiciel Design-Expert, après avoir éliminé les termes insignifiants, avec des valeurs de  $p \geq 0,05$ . Où,  $p$  est le coefficient de corrélation de Pearson.

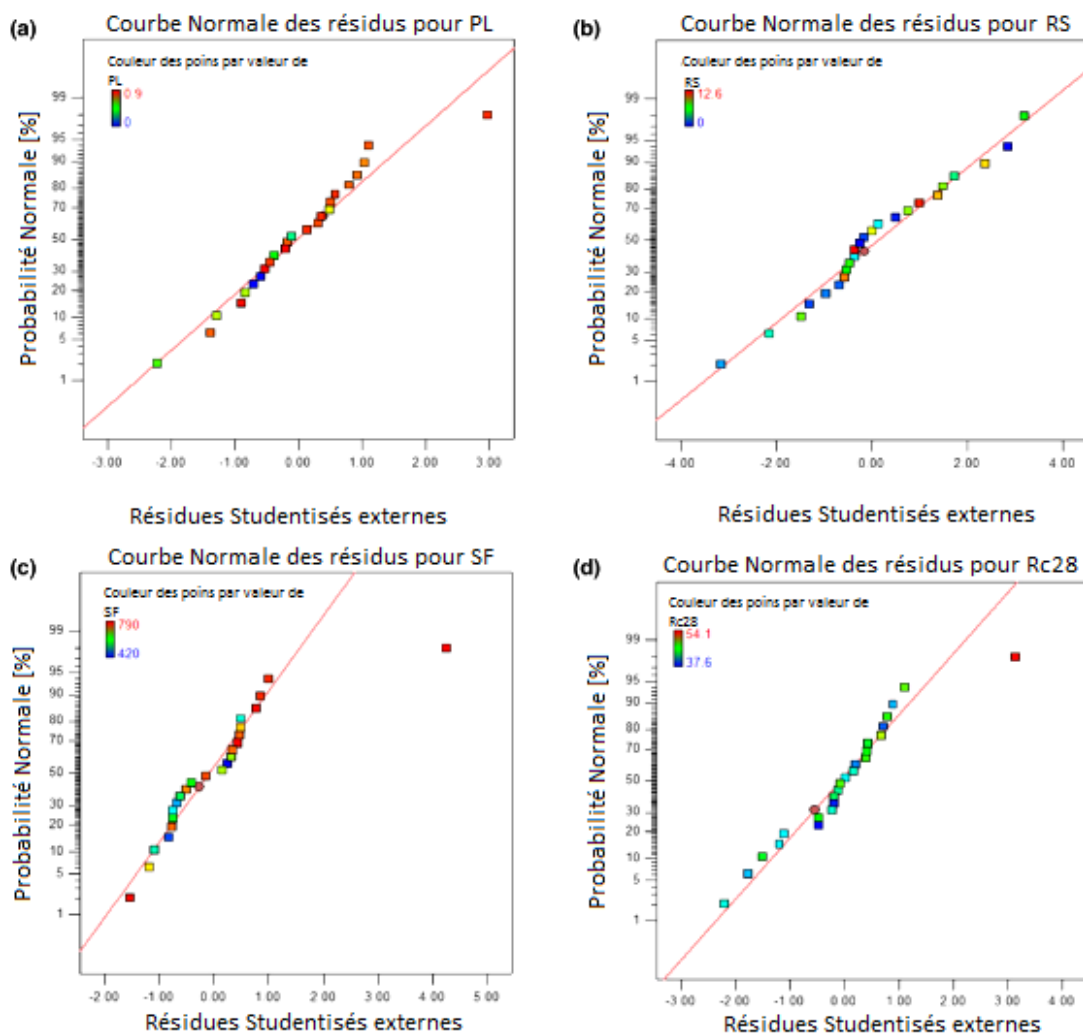
Le tableau V.3 illustre les résultats de l'analyse de la variance pour le PL, RS, SF et  $R_{c28}$ , faite à l'aide de Design-Expert pour un niveau de confiance de 95 %. Les valeurs  $F$  (loi de Fisher) indiquent que les modèles construits sont significatifs. Plus la valeur  $F$  est élevée, plus le modèle est significatif. La possibilité que les valeurs  $F$  soient si grandes, est due aux petites valeurs du bruit: 0,01 % ; 0,54 % ; 0,01 % et 2,98 %, pour PL, RS, SF et  $R_{c28}$  respectivement. Les valeurs  $P$  des modèles indiquent que leurs termes sont significatifs.

**Tableau V.3** - Résultats de l'analyse de la variance pour les modèles de troisième ordre des propriétés étudiées.

Résultats de l'analyse de la variance	$\sigma$	Valeur P	Valeur F	Précision adéquate
Modèle du PL	$\pm 00,09$	$< 0,0001$	42,87	22,398
Modèle du RS	$\pm 01,88$	0,0045	6,67	8,608
Modèle du SF	$\pm 59,47$	$< 0,0001$	12,90	13,450
Modèle du $R_{c28}$	$\pm 02,80$	0,0298	3,06	5,545

Le paramètre de la précision adéquate mesure le rapport signal/bruit, qui doit être supérieur à quatre. Tous les modèles construits répondent à ce critère, et indiquent un signal adéquat.

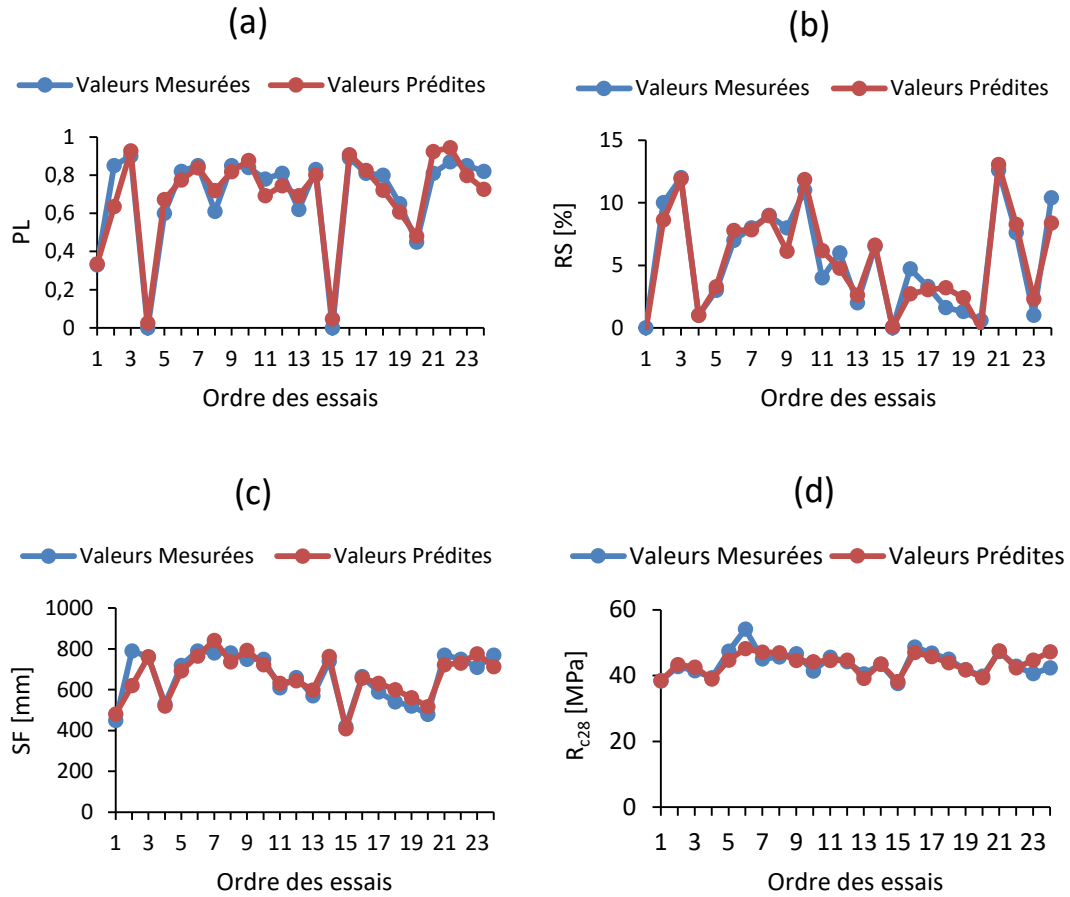
La figure V.4 montre que les résidus suivent une loi de distribution normale (l'ensemble des points suivent une ligne droite).



**Figure V.4** - Diagramme normal des résidus pour: (a) L'écoulement en milieu confiné, (b) La résistance à la ségrégation, (c) L'étalement, (d) La résistance à la compression.

Les courbes dans la figure V.5 montrent une très grande similarité entre les valeurs des propriétés mesurées des BAP et celles estimées; à l'exception de quelques valeurs. Ces écarts se situent généralement dans une plage acceptable. Ceci indique que les

modèles cubiques construits sont capables de prédire les propriétés des BAP recherchées pour le domaine d'étude considéré.



**Figure V.5** - Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées des BAP:

- (a) Écoulement en milieu confiné, (b) Résistance à la ségrégation, (c) Étalement, (d) Résistance à la compression.

## 5.2. Analyse de régression

La relation entre les facteurs et les mesures de performance est modélisée par régression cubique (équation 33). Les équations de régression obtenues sont données ci-dessous par les équations (34) à (37), avec des coefficients de détermination multiple  $R^2$  qui valent 91,03 % ; 92,60 % ; 82,00 % et 66,30 % (figure V.4).

$$PL = 1.7098 - 1.4628 \times C_c - 0.1131 \times MF \times C_u + 0.1918 \times MF \times C_c \times C_u - 8.0852 \times 10^{-4} \times C_u^3 \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
 SR = & 859.0766 - 662.7185 \times MF - 1478.9156 \times C_c - 34.6173 \times C_u + 869.5016 \times MF \times C_c \\
 & + 13.7724 \times MF \times C_u + 145.7258 \times MF^2 + 807.0984 \times C_c^2 + 5.7111 \times C_u^2 + 28.1962 \times MF \times C_c \times C_u \\
 & - 137.6558 \times MF^2 \times C_c - 9.0571 \times MF^2 \times C_u - 257.9810 \times MF \times C_c^2 - 0.03137 \times MF \times C_u^2 \\
 & - 7.1200 \times C_c \times C_u^2 - 136.6216 \times C_c^3
 \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 SF = & -132.8361 + 529.6814 \times MF + 67.3337 \times C_u - 66.1846 \times MF \times C_u \\
 & - 242.0920 \times MF \times C_c^2 + 145.4222 \times C_c^2 \times C_u - 16.9492 \times C_c^3
 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
 R_{c28} = & -24.9727 + 21.8448 \times MF + 83.2815 \times C_c - 9.1428 \times C_u + 3.7257 \times MF^2 - 30.4171 \times C_c^2 \\
 & + 2.8184 \times C_u^2 - 7.0894 \times MF^2 \times C_c - 0.5658 \times MF \times C_u^2 - 0.0682 \times C_c^3
 \end{aligned} \quad (37)$$

On peut aussi remarquer que d'une part, les sables grossiers, avec une granulométrie uniforme et étalée, influent positivement sur la résistance à la ségrégation et l'étalement des BAP, mais ils diminuent aussi leurs PL. D'autre part, l'équation (37) montre que plus le sable est bien gradué et moins fin, plus est la résistance mécanique développée.

Les valeurs de R<sup>2</sup> pour SF et R<sub>c28</sub> indiquent que ces propriétés ne puissent pas être prédites uniquement en se basant sur les propriétés granulométriques du sable utilisé. Ces modèles de régression sont utiles pour la prédiction des paramètres de réponse, en fonction des paramètres d'entrée (de contrôle) considérés.

Ces équations donnent une meilleure prédiction pour PL et SR, en comparaison avec les modèles de Bouziani [110], en se basant sur la nature du sable (SD, SR, SC) comme facteurs, pour lesquels les valeurs de R<sup>2</sup> sont: 78,00 % ; 66,00 % ; 87,00 % et 84,00 % respectivement, pour les mêmes paramètres de réponse.

## 6. Optimisation des réponses par l'approche de la fonction de désirabilité

L'optimisation multiréponse est utilisée pour déterminer les conditions sur les variables considérées qui donnent les valeurs de réponse les plus souhaitables. Pour chaque réponse Y<sub>i</sub>, une fonction de désirabilité di (Y<sub>i</sub>) prend des valeurs comprises entre 0 et 1 [125-127]. Le cas idéal est celui où la désirabilité prend des valeurs plus proches de 1.

La désirabilité globale  $\Delta$  est la combinaison de désirabilités individuelles, en utilisant la moyenne géométrique [118, 121]:

$$\Delta = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} = \left( \prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/n} \quad (38)$$

Avec  $n$  est le nombre de réponses.

Pour la désirabilité globale, chaque réponse souhaitée doit avoir une valeur inférieure et une autre supérieure.

Dans cette étude, nous avons envisagé une approche d'optimisation de qualité. Ce qui signifie obtenir la combinaison optimale des propriétés granulométriques du sable, pour obtenir les meilleures propriétés rhéologiques du BAP frais et une résistance à la compression maximale.

Les tableaux II.1, II.3 et II.4 donnent les valeurs limites des propriétés du BAP frais, selon les directives européennes des BAP et les normes en vigueur [12, 65, 69, 70]. L'optimisation des propriétés du BAP frais signifie maximiser son étalement et sa capacité d'écoulement en milieu confiné avec une ségrégation minimale. Les classes de BAP visées dans cette étude sont:

- Au moins la classe SF2, pour son étalement;
- Classe PL2, pour sa capacité d'écoulement en milieu confiné;
- Classe RS2, pour sa résistance à la ségrégation.

Les fourchettes des facteurs définies pour chaque optimisation sont résumées dans le tableau V.4, selon les critères mentionnés dans les tableaux II.1, II.3 et II.4. Les solutions calculées par Design-Expert pour l'optimisation combinée du BAP sont présentées dans le tableau V.5. Les objectifs globaux de désirabilité s'appliquent à la fois aux facteurs et aux réponses. Nous avons fixé nos objectifs pour maintenir le Mf, Cc, Cu, PL et RS dans les plages acceptables définies ci-dessus dans cet article, et pour maximiser le SF et le  $R_{c28}$  (la limite inférieure est le résultat acceptable le plus bas et la limite supérieure est le meilleur résultat possible).

**Tableau V.4** - Intervalles des objectifs et des facteurs, pour l'optimisation de la qualité du BAP.

Nom de la contrainte	objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids supérieur	importance
Mf	Dans l'intervalle	1	3,5	1,0	3
Cc	Dans l'intervalle	1	2	1,0	3
Cu	Dans l'intervalle	6	10	1,0	3
PL	Dans l'intervalle	0,8	0,9	1,0	3
RS [%]	Dans l'intervalle	0	15	1,0	3
SF [mm]	Maximiser	660	900	1,0	5
R <sub>c28</sub> [MPa]	Maximiser	37,6	54,1	1,0	5

Le poids des facteurs peut varier de 0,10 à 10. Il ajuste la manière dont le processus d'optimisation de Design-Expert recherche la meilleure solution. Un poids faible (proche de 0,10) permettra plus de solutions qui ne répondent pas tout à fait à l'objectif optimal. Un poids élevé (proche de 10) amènera l'optimisation à rechercher une solution proche ou au-delà de l'objectif déclaré. D'un point de vue pratique, il est recommandé de laisser la valeur des poids égale à 1,0.

Le paramètre « importance » spécifie l'importance relative d'un objectif par rapport à un autre. Certains objectifs peuvent être critiques, tandis que certains peuvent être d'une importance moyenne et certains sont de la moindre importance. Les valeurs du paramètre d'importance des objectifs vont de 1 à 5 dans le logiciel Design-Expert (par défaut, tous les objectifs sont définis sur 3). En partant donc des objectifs fixés pour cette optimisation, nous avons gardé l'importance fixée à une valeur de 3 et nous avons attribué 5 pour SF et R<sub>c28</sub>, comme paramètres critiques du BAP. L'ensemble des solutions possibles est présenté dans le tableau V.5.

Le graphique de la fonction de rampe de la figure V.6 montre les résultats d'optimisation sélectionnés. Les valeurs obtenues des propriétés granulométriques optimales du sable pour une qualité optimale, à la fois pour le BAP frais et durci, sont: FM = 2,173, Cc = 1,000 et Cu = 6,170.

Les paramètres de qualité optimaux du BAP sont les suivants: PL = 0,883, SR = 14,99 %, SF = 906,558 mm et R<sub>c28</sub> = 51,64 MPa.

**Tableau V.5** - Solutions calculées par Design-Expert pour l'optimisation combinée du BAP.

N°	Mf	Cc	Cu	PL	RS	SF	R <sub>c28</sub>	Désirabilité
1	<u>2,173</u>	<u>1.000</u>	<u>6.173</u>	<u>0.884</u>	<u>15.000</u>	<u>906.659</u>	<u>51.649</u>	<u>0.923</u> Sélectionnée
2	2,166	1.000	6.092	0.884	15.000	903.250	51.631	0.922
3	2,183	1.000	6.272	0.883	15.000	910.741	51.618	0.922
4	2,194	1.000	6.403	0.881	15.000	951.965	51.478	0.917
5	2,200	1.000	6.374	0.879	09.392	909.525	51.176	0.907
6	2.207	1.000	6.550	0.878	15.000	921.594	51.173	0.907
7	2.149	1.000	6.159	0.892	14.999	913.090	51.153	0.906
8	2.224	1.000	6.335	0.875	02.859	901.627	50.797	0.894
9	2.236	1.000	6.384	0.873	00.419	901.107	50.643	0.889
10	2.221	1.000	6.721	0.873	14.999	927.960	50.590	0.887
11	2.244	1.000	6.480	0.870	00.003	904.432	50.561	0.886
12	2.232	1.007	6.490	0.868	00.000	908.933	50.263	0.876
13	2.154	1.022	6.000	0.891	03.424	900.001	49.983	0.866
14	2.263	1.000	6.759	0.860	00.015	914.846	49.960	0.866
15	2.254	1.005	6.733	0.863	00.000	916.809	49.796	0.860
16	2.277	1.002	7.031	0.846	00.000	925.777	48.512	0.813
17	2.252	1.000	7.143	0.850	14.999	942.625	47.923	0.791
18	2.292	1.000	7.216	0.832	00.000	930.780	47.272	0.766
19	2.174	1.045	6.896	0.897	15.000	955.078	46.817	0.747
20	2.272	1.000	7.430	0.828	15.000	951.930	44.902	0.665
21	2.299	1.004	7.461	0.815	00.000	941.496	44.401	0.642
22	2.187	1.063	7.019	0.897	00.000	956.899	44.104	0.628
23	2.235	1.025	7.348	0.859	15.000	961.932	43.860	0.616
24	2.310	1.000	7.552	0.804	00.000	941.710	43.626	0.604
25	2.187	1.069	7.123	0.900	00.000	962.902	42.583	0.550
26	2.284	1.000	7.622	0.812	15.000	957.934	42.223	0.529
27	2.304	1.002	7.656	0.800	04.773	950.586	41.839	0.507
28	2.291	1.000	7.727	0.800	14.491	960.567	40.544	0.422
29	2.283	1.012	7.824	0.800	15.000	969.922	37.692	0.075

La valeur de la SR dans la figure V.6 se rapproche de la limite son intervalle désigné dans le tableau V.4. Ce qui signifie qu'on ne peut pas optimiser le PA et le PL des BAP sans diminuer sa SR.

La valeur optimale du Mf = 2.17 est maintenue dans le fuseau B des sables admissibles un peu trop fins (figure I.4). La fraction fine des sables (< 0,125 mm) améliore la viscosité des BAP [12].

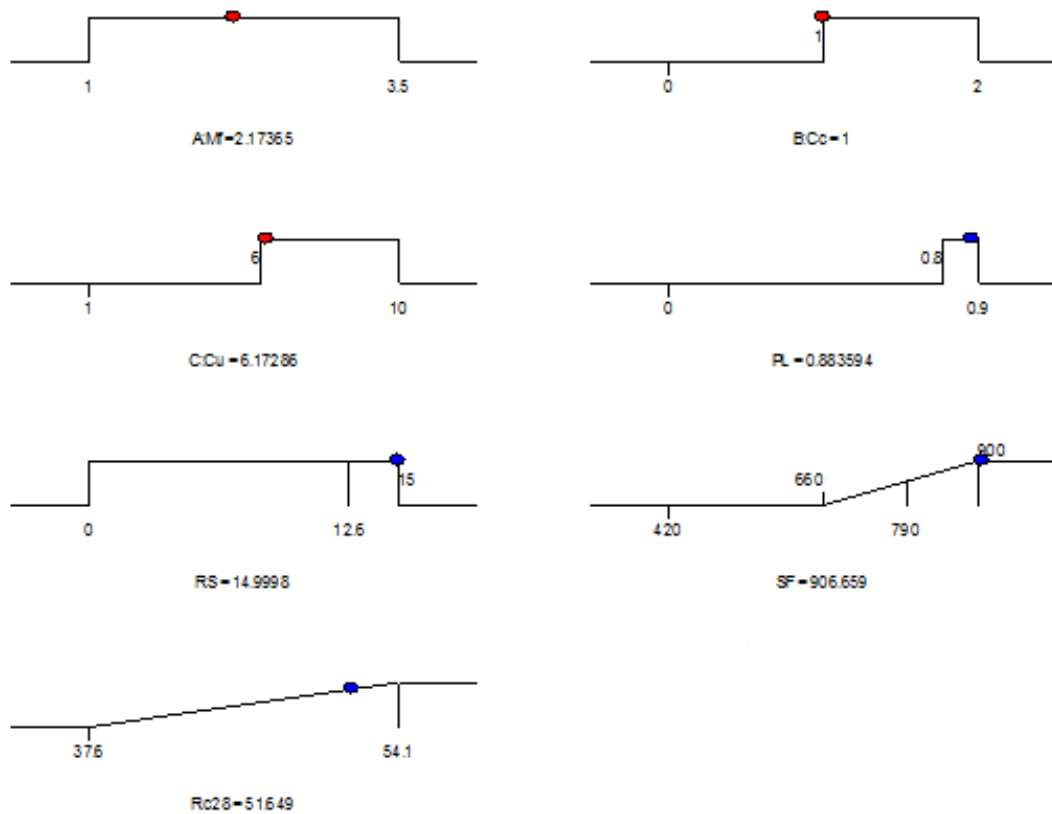


Figure V.6 - Fonction rampe de l'optimisation combinée de  $PL$ ,  $RS$ ,  $SF$  et  $R_{c28}$ .

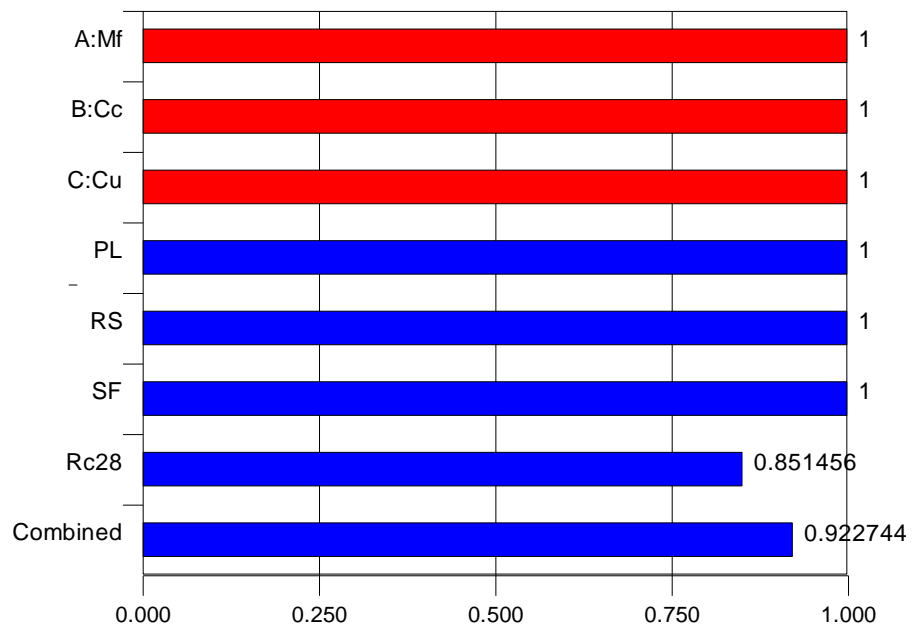


Figure V.7 – Diagramme des barres analogiques des désirabilités des propriétés des BAP en fonction des paramètres liés à la granulométrie des sables.

La figure V.7 présente le diagramme des barres analogiques des désirabilités des propriétés rhéologiques et mécaniques étudiées, avec une désirabilité combinée  $\Delta = 0,923$ .

## 7. Conclusion

L'optimisation est un processus industriel très utilisé pour l'obtention des paramètres qui permettent d'avoir la meilleure qualité possible pour un produit donné. Cette méthode a été employée dans ce chapitre pour obtenir les valeurs optimales des propriétés granulométriques du sable qui donnent les meilleures propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP.

Les résultats obtenus montrent la grande influence de la granulométrie du sable sur les propriétés du BAP à l'état frais. Cependant, ces paramètres ne doivent pas être pris seuls pour prédire la résistance à la compression.

## Conclusion générale

Les propriétés des bétons conventionnelles et des BAP sont influencées par les propriétés et les proportions des différents constituants solides et liquides, et aussi par les conditions de malaxage et de cure.

Les BAP sont plus avantageux par rapport aux bétons conventionnels, vu la facilité de leur emploi, grâce à leur ouvrabilité et leurs propriétés mécaniques. Cela nécessite un bon choix des constituants et de la méthode de formulation des BAP, pour satisfaire aux exigences techniques demandées.

Les constituants des BAP peuvent être classés en deux catégories: solides et liquides. Cependant, les méthodes de formulation actuellement employées ne prennent pas en considération ces deux catégories à la fois, manquent de robustesse et ne rependent pas aux objectifs industriels.

La combinaison de la méthode de la densité de remplissage sèche avec le modèle hydrodynamique a permis de développer un nouveau modèle hydrodynamique spécifique aux BAP, et qui prend en considération les fractions solides et liquides de ces derniers pour garantir des propriétés rhéologiques et mécaniques satisfaisantes. Le nouveau modèle prend pour valeur maximale de la fraction de volume de transition entre le régime frictionnel et hydrodynamique,  $\Phi/\Phi_m = 0,79$ .

L'étude expérimentale de la pâte autoplaçante a permis de déterminer le point de saturation en SP qui est de 1,1 % pour les deux SP étudiés. Cependant, on a choisi le MEDAFLOW 30, car il assure une bonne stabilité de la pâte, par rapport au Sikaplast - 40 Pro.

Le dosage en SP pour la formulation des BAP doit être légèrement supérieur à celui obtenu lors de l'étude de la pâte autoplaçante, du fait qu'une partie du liquide sera absorbée par les granulats. La valeur prise est donc égale à 1,2 %.

Tous les mélanges de BAP formulés respectent le seuil d'hydrodynamicité. Mais, certains d'entre eux n'ont pas présenté de propriétés autoplaçantes. Ces mélanges sont ceux avec un pourcentage élevé de SC (forte friction intergranulaire), ainsi que le mélange contenant le SR à très faible  $M_f$  (proche de 1). Ce dernier augmente

considérablement la viscosité plastique du BAP et nécessite un excès en pâte supérieur à celui utilisé dans cette étude. Cependant, le taux de liant utilisé dans l'étude expérimentale fait partie des paramètres contrôlés, fixés pour tous les mélanges, afin d'étudier les effets d'un seul constituant, qui est le sable.

Tandis que, les mélanges avec des proportions de SD  $\geq 50$  % sont ceux qui ont donné les meilleures performances à l'état frais. La forme arrondie des grains de SD favorise la fluidité du béton frais (faible frottement). Le Mf des SD utilisés (1,70 et 2,03) donne une viscosité modérée au mortier (la partie poudre + liquide + sable), ce qui est nécessaire pour obtenir des propriétés autoplaçantes.

Pour la résistance à la compression, les mélanges avec une faible fluidité ont donné des résistances relativement faibles ( $< 39$  MPa). Ce qui est le cas du mélange avec 100 % SC, pour lequel on attendait des résistances plus élevées. Contrairement au béton conventionnel, l'obtention d'une résistance mécanique élevée d'un BAP est fortement liée à sa bonne fluidité.

La substitution partielle du SC par des sables roulés a permis d'améliorer la  $R_{c28}$ . Cette dernière est améliorée d'au moins 15 %, pour une substitution de 50 %.

Les propriétés rhéologiques et mécaniques obtenues pour la majorité des mélanges de BAP sont satisfaisantes, et les  $R_{c28}$  ne diffèrent pas de celles des bétons conventionnels utilisés dans les ouvrages courants. Ces résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des BAP performants avec un rapport E/P = 0,40 et un dosage en SP relativement faible (1,2 %).

L'utilisation de la méthode de surface de repense a permis de construire des modèles mathématiques de troisième ordre, pour la prédiction des propriétés étudiées des BAP, par le moyen du logiciel Design-Expert.

Les coefficients de corrélation des modèles prédictifs de PL, RS et SF sont respectivement de 91,03 %, 92,60 % et 82,00 %. Par conséquent, les modèles développés sont fiables et présentent un intérêt industriel important, car ils permettent de prédire les propriétés fraîches du BAP en se basant uniquement sur la granulométrie du sable.

L'équation prédictive de la RS montre un coefficient de corrélation élevé, mais avec de nombreux termes d'interaction, ce qui signifie que le phénomène de ségrégation est compliqué.

Le coefficient de corrélation du modèle prédictif de  $R_{c28}$  a été trouvé égal à 66,30 %. Cela montre que la résistance à la compression normale ne dépend pas uniquement du  $M_f$ , du  $C_c$  et du  $C_u$  du sable utilisé.

Cette modélisation a permis de déterminer les propriétés granulométriques optimales qui conduisent aux meilleures qualités du BAP frais et durci, en obtenant un étalement, un écoulement et une résistance à la compression maximale, tout en réduisant un faible taux de ségrégation.

Les facteurs optimaux de la distribution granulométrique du sable permettant d'obtenir les meilleures propriétés fraîches et durcies du BAP ont été obtenues avec une désirabilité globale de 92,23 %, dans les plages définies dans ce travail.

## Perspectives

Une perspective immédiate serait d'étudier la possibilité d'améliorer les modèles de prédiction des propriétés mécaniques, en introduisant d'autres propriétés telles que la forme du sable.

La formulation basée sur le nouveau modèle hydrodynamique développée dans cette thèse doit être validée et performée par une étude expérimentale. Ce modèle sera révolutionnaire dans le domaine de formulation des BAP, une fois sa robustesse est prouvée.

Une étude sur le rapport entre le dosage optimal des SP à partir de l'étude de la pâte autoplaçante et le dosage réel nécessaire pour la formulation des BAP, peut être menée, en prenant compte des paramètres tels que la composition chimique des granulats, leurs coefficients d'absorption d'eau.

Il conviendra d'étudier l'influence du fait de limiter la fraction du volume des constituants solides, afin d'assurer un comportement hydrodynamique des BAP, sur la durabilité de ces derniers.

## Références bibliographiques

- [1] Burteaux M., Laitiers de haut fourneau, Techniques de l'ingénieur, Réf: M7425 v1, 1995.
- [2] Benghazi Z., Zeghichi L., Hamdane A., STUDY OF ALKALI-ACTIVATED POZZOLANA/SLAG CEMENT, BASED ON LOCAL MATERIALS, SBEIDCO – 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries - ENSET Oran (Algeria), Proceeding Vol. 3, 12 au 14 Octobre 2009, p 335-342.
- [3] Murmu M., Singh S. P., Hydration Products, Morphology and Microstructure of Activated Slag Cement, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 8, 2014, p 61-68.
- [4] Laakri M., Oudjit M.N., Abdeli K., Volumetric variation and rhéology of cement based mineral additions (blast furnace slag and silica fume), Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 8, 2014, p 207-212.
- [5] Rapport final FILLTECH, Technologie des bétons liée à l'utilisation de fillers calcaires : valorisation de ceux-ci par une utilisation dans les bétons, 2007.
- [6] Abdo J., Ciments: Composition hydratation, prise et durcissement, Techniques de l'ingénieur, C920 v2, 2020.
- [7] Luxan M.P., Madruga F., Saavedra J., Rapid evaluation of pozzolanic activity of naturels products by conductivity measurements, Cement and Concrete Research Vol. 19, 1989 p8-63.
- [8] Trigo A. P. M., Liborio J. B. L., Doping Technique in the Interfacial Transition Zone Between Paste and Lateritic Aggregate for the Production of Structural Concretes, Materials research, Vol. 17(1), 2014, p 15-22.
- [9] NF EN 197-1, Ciment - Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Avril 2012.
- [10] Bernier G., Formulation des bétons, Techniques de l'ingénieur, Ref: C2210, 2004.
- [11] Day K. W., Concrete Mix Design, Quality, Control and Specification, Taylor & Francis, London, 4<sup>ème</sup> édition, London, Royaume-Uni, 2013.
- [12] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, Mai 2005.
- [13] Neville A. M., Brooks J. J., Concrete Technology, Edition Pearson Education Limited, 2<sup>ème</sup> édition, Harlow, Royaume-Uni, 2010.

- [14] Li Z., *Advanced Concrete Technology*, Edition John Wiley & Sons, New Jersey, Etats Unis, 2011.
- [15] NF EN 13139, *Granulats pour mortiers*, (Janvier 2003).
- [16] Festa, J., Dreux, G., *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Edition Eyrolles, 8<sup>ème</sup> édition, Paris, France, 2007.
- [17] NF EN 1008, *Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*, Juillet 2003.
- [18] Rixom M. R., Mailvaganam N., P., *Chemical Admixtures for Concrete*, E&FN Spon, 3<sup>ème</sup> édition, London, Royaume-Uni, 2002.
- [19] Granju J-L., *Introduction au béton armé, théorie et applications courantes selon l'Eurocode 2*, Eyrolles, Ballon Miré, France, 2012
- [20] Bache H., *Compact reinforced composite, basic principles*, Aalborg Portland, CBL Report 41, 1987.
- [21] Malier Y., *Bétons à Hautes Performances*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1991.
- [22] *Guide pour l'emploi des adjuvants en 43 fiches pratiques: Composition – Propriétés – Dosage – Emploi*, SYNAD, Editions Le moniteur, 2014.
- [23] Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A-M., Taerwe L., *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*, *Cement & Concrete Composites*, No. 29, 2007, p 94–102.
- [24] Güneyisi E., Gesoğlu M., *Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin*, *Materials and Structures* No. 41, 2008, p 1519–1531.
- [25] Yammine J., Chaouache M., Guerin M., Moranville M., Roussel N., *From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 (7), 2008, p 890-896.
- [26] Wallevik O. H., *Rhéology – a scientific approach to develop self-compacting concrete*, 3rd International Symposium on SCC, Rilem, Reykjavik, Islande, August 2003, p 23-31.
- [27] Geiker M. R., Brandl M., Thrane L.N., Nielsen L.F., *On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete*, *Cement, Concrete and Aggregates*, No. 1, 2002, p 3-6.
- [28] de Larrard F., *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. E&FN Spon, London, Royaume-Uni, 1999.

- [29] Brouwers H. J., Radix H. H. J., Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research* No. 35, 2005, p 2116-2136.
- [30] Kou S. C., Poon C. S., Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31(2), 2009, p 107-113.
- [31] Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, *Fiches techniques Tome 2*, Collection techniques Cimbéton, Centre d'information sur les ciments et leurs applications, Janvier 2013.
- [32] Roy A., Use and benefits of self-compacting concrete, Wordpress, 19 janvier 2018, Disponible sur: <https://constrblog.wordpress.com/>, Consulté le 24/10/2019.
- [33] Cussigh F., Bétons auto-plaçants (BAP), *Techniques de l'ingénieur*, C 2217, 2007.
- [34] Legrand C., Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1971.
- [35] Barrioulet M. Legrand C., Etude des frottements intergranulaires dans le béton frais. Idées nouvelles sur l'écoulement du béton frais vibré, *Matériaux et Constructions*, RILEM (63), 1978.
- [36] El Barrak M., Michel Mouret M., Bascoul A., Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste, *Cement & Concrete Composites* 31, p12–21, 2009.
- [37] Diederich P., Contribution à l'étude des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, (2010).
- [38] Guiraud P., Performances et durabilité des BAP, *CIMbéton*, Septembre 2016, Disponible sur: <https://www.infociments.fr/>, Consulté le 03/12/2019.
- [39] Khelifa M. R., Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, *Faculté des sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil, Ecole Doctorale Sciences et Technologies Centre de Recherche sur la Matière Divisée*, 2009.
- [40] Da Silva P. R., & de Brito J., Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler, *Materials and Structures*, Vol. 49(7), 2005, p 2749–2766.
- [41] Domone, P. L., A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29(1), 2007, p 1–12.
- [42] Pelisser, F., Vieira, A., & Bernardin, A. M., Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 175, 2018, p 324–332.

- [43] Okamura, H., Ozawa, K., Mix-design for self-compacting concrete. Concrete Library, Japanese Society of Civil Engineering (JSCE) Vol. 25, 1995, p 107-120.
- [44] Zarzuela, R., Luna, M., Carrascosa, L. M., Yeste, M. P., Garcia-Lodeiro, I., Blanco-Varela, M. T., Cauqui M. A., Rodríguez-Izquierdo J. M., Mosquera, M. J., Producing C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials, Cement and Concrete Research, Vol. 130, 106008, 2020.
- [45] Irico S., Qvaeschning D., Mutke S., Deuse T., Gastaldi D., Canonico F., Durability of high performance self-compacting concrete with granulometrically optimized slag cement, Construction and Building Materials, Vol. 298, 123836, 2021.
- [46] Nanthagopalan P., & Santhanam M., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand, Cement and Concrete Composites, Vol. 33(3), 2011, p353–358.
- [47] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Efficiency of mineral admixture in mortars - Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, p 264–277.
- [48] Benaicha M., Belcaid A., Alaoui A.H., Jalbaud O., Burtschell Y., Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete, Structural Concrete, Vol. 20, 2019, p 1702– 1709.
- [49] Neville A. M., Properties of concrete, 4<sup>ème</sup> édition, Longman Ltd. London, 1995.
- [50] Tanaka K., Sato S., Watanabe S., Arima I., Suenaga, K., Development and utilisation of high performance concrete for the construction of the Akashi Kaikyo Bridge, ACI SP-140 High Performance Concrete in Severe Environments, ACI Committee, 1993.
- [51] Ogawa, A., Sakata K., Tanaka, S., A study on reducing shrinkage of highly flowable concrete in Second CANMET/ACI International Symposium on advances in concrete technology, Las Vegas, SP-154, ACT, 1995, p 55-72.
- [52] Domone P. L., Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cement and Concrete Composites, Vol. 28(2), 2006, p 197–208.
- [53] Su J. K., Cho S. W., Yang C.C., Huang R., Effect of sand ratio on the elastic modulus of self-compacting concrete, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10(1), 2002, p 8-13.
- [54] Yankun Z., Guangzhi C., Dongya Q., Review on self compacting concrete with manufactured sand. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 634, 2021, 012121.

- [55] Bédérina M., Khenfer M. M., Dheilly R. M., Quéneudec M., Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35(6), 2005, p 1172–1179.
- [56] Zeghichi L., Benghazi Z., Baai L., The Effect of the Kind of Sands and Additions on the Mechanical Behaviour of S.C.C, *Physics Procedia*, Vol. 55, 2014, p 485-492.
- [57] Sahraoui M., Bouziani T., Effects of fine aggregates types and contents on rheological and fresh properties of SCC, *Journal of Building Engineering* Vol. 26, 100890, 2019.
- [58] Research and Markets, Concrete Superplasticizer Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2021-2026, Rapport, Avril 2021.
- [59] Lachemi M., Hossain K. M. A., Lambros V., Nkinamubanzi P. C., Bouzoubaa N., Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, p 185-193.
- [60] Benaïcha M., Roguiez X., Jalbaud O., Burtschell Y., Alaoui A. H., Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 84, 2015, p 103–110.
- [61] Orgass M., Dehn F., Effect of mixing technology on high-performance concretes, *Aufbereitungstechnik* Vol. 47(11), 2006, p 32–37.
- [62] Ma J., Orgass M., Tue N. V., Influence of addition methode of superplasticizer on the properties of Fresh UHPC, 2<sup>nd</sup> International symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 2008, p 93-100.
- [63] Pan J., Effet de la température et de l’agitation sur les propriétés rhéologiques des bétons fluides à rhéologie adaptée, thèse doctorale, Université de Sherbrooke, 2015.
- [64] Benghazi Z., Zeghichi L., Djellali A., Hafdallah A, Predictive Modeling and Multi-response Optimization of Physical and Mechanical Properties of SCC Based on Sand’s Particle Size Distribution, *Arabian Journal of Science and Engineering*, Vol. 45, 2020, p 8503–8514.
- [65] EN 12350-8, Essai pour béton frais – Partie 8: béton auto-plaçant – Essai d’étalement au cône, Juin 2019.
- [66] Li H., Huang F., Yi Z., Wang Z., Zhang Y., Yang Z., Investigation of Mixing Technique on the Rheological Properties of Sel-Concrete, *Applied Sciences*, No. 10, 2020, 5189.
- [67] EN 12350-9, Essai pour béton frais – Partie 9: béton auto-plaçant – Essai à l’entonnoir en V, Novembre 2010.

- [68] Torrenti J.-M., D'Aloia-Schwartzentruber L., Le grand livre des bétons, Connaissances et pratiques – Avancées environnementales – Réglementation et cadre normatif, Editions du Moniteur, 2014.
- [69] NF EN 12350-10, Essai pour béton frais – Partie 10: béton auto-plaçant – Essai à la boîte en L, Novembre 2010.
- [70] NF EN 12350-11, Essai pour béton frais – Partie 11: béton auto-plaçant – Essai de stabilité au tamis, Novembre 2010.
- [71] NF EN 12390-3, Essai pour béton durci – Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes, Juin 2019.
- [72] SIA 262, Construction en béton, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Janvier 2013.
- [73] Midorikawa T., Pelova G. I., Walraven J. C., Application of « The Water Layer Model » to self-compacting mortar with different size distributions of fine aggregate, HERON, Vol. 54, No. 2/3, 2009, p 73-99.
- [74] Okamura H., Ouchi M., Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vo. 1(1), 2003, p 5-15.
- [75] Su N., Miao B., A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, 2003, p 215– 222.
- [76] Funk J., Dinger D., Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions, Edition Kluwer Publishers, London, Royaume-Uni, 1994.
- [77] Kwan A. K. H., Ng P. L., Fung W. W. S., Research directions for high-performance concrete. HKIE Civil Conference, Hong Kong, April 12–14<sup>th</sup>, 2010.
- [78] Powers T. C., The Properties of Fresh Concrete, Edition John Wiley & Sons, New York, Etats-Uni, 1968.
- [79] Fuller W. B., Thompson S. E., The laws of proportioning concrete, Transactions of the American Society of Civil Engineering, Vol, 33, 1907, p 222-298.
- [80] Andreasen A.H.M., Andersen J., Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift, Vol. 50, 1930, p 217– 228, (En Allemand).
- [81] Brouwers H. J. H., Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. Physical. Review E Vol 4, 031309-1–031309-14 , 2006.
- [82] Wong H. H. C., Kwan A. K. H., Packing density of cementitious materials: part 1- measurement using a wet packing method, Materials and Structures, Vol. 41 (4), 2008, p 689-701.

- [83] Kwan A. K. H., Wong H. H. C., Packing density of cementitious materials: part 2 - packing and flow of OPC + PFA + CSF, *Materials and Structures*, Vol. 41 (4), 2008, p 773-784.
- [84] Kwan A.K.H., Fung W.W.S., Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31 (6), 2009, p 349-357.
- [85] Cumberland D. J., Crawford R. J., *The Packing of Particles*, Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 1987.
- [86] Onoda G.Y., Liniger E., Random loose packings of uniform spheres and the dilatancy onset, *Physical Review Letters*, Vol. 64, 1990, p 2727–2730.
- [87] Hu C., de Larrard F., The rheology of fresh high performance concrete, *Cement and Concrete. Research*, Vol. 26 (2), 1996, p 283–294.
- [88] Mueller F. V., Wallevik O., Khayat K. H., A New Homogeneity Assessment Concept Applied to Evaluate Self-Compacting Concrete, 8<sup>th</sup> RILEM Symposium On Self-Compacting Concrete “SCC2016”, RELIM PRO 100, Washington D.C., Mai 2016, p 123-132.
- [89] NF EN 934-2/IN1, Adjuvants pour bétons, mortier et coulis – partie 2: adjuvants pour béton – Définitions, exigences, conformités, marquage et étiquetage, Aout 2012.
- [90] MEDAFLOW 30 superplastifiant haut réducteur d’eau, notice technique, Fiches techniques GRANITEX, Février 2017.
- [91] SikaPlast – 40 Pro, Superplastifiant/Haut Réducteur d’eau polyvalent de nouvelle génération, Notice produit, Sika.
- [92] Choi M. S., Lee J. S., Ryu K. S., Koh K-T., Kwon S. H., Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test, *Construction and Building Materials*, Vol. 106, 2016, p 632-639.
- [93] Mebrouki A., Belas N., Bouhamou N., Contribution à la formulation d’une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux, *Afrique Science*, Vol. 04, No. 02, 2008, p 212-230.
- [94] NF P18-507, Additions pour béton hydraulique – Besoin en eau, contrôle de la régularité – Méthode de mesure de fluidité par écoulement “au cône de Marsh”, Novembre 1992.
- [95] NF EN 445, Coulis pour câble de précontrainte – Méthodes d’essais, Décembre 2007.
- [96] Bello L., Méthodologie de formulation des Bétons Auto-Plaçants Légers, CERIB, 334.E, Septembre 2015.

- [97] NF EN 12390-2, Essai pour béton durci – Partie 3: confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Juin 2019.
- [98] Kim Y.J., Choi Y.W., Lachemi M., Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, p 11-16.
- [99] ISO 3534-1, Statistique – Vocabulaire et symboles, 2006.
- [100] Jurowski K., Grzeszczyk S., The Influence of Concrete Composition on Young's Modulus, *Procedia Engineering*, Vol. 108, 2015, p 584-591.
- [101] Collectif Eyrolles, Règles BAEL 91 modifiées 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites, Edition Eyrolles, 3ème édition, Paris, France, 2000.
- [102] Roux J., Pratique de l'eurocode 2 : Guide d'application, édition Eyrolles, 2007.
- [103] ACI Building Code 318M-05. Building code requirements for structure concrete and commentary. ACI Committee 318, 2005.
- [104] Uchikawa H., Sawaki D., Hanehara S., Influence of kind and added timing organic admixture on the composition, structure, and property of fresh cement paste, *Cement Concrete Research*, Vol. 25, 1995, p 353–64.
- [105] de Larrard F., Bosc F., Catherine C., Deflorenne F., La nouvelle méthode des coulis de 'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées – 202-*, Réf 4012 (Mars-Avril 1996), p 61-69.
- [106] Aïtcin P-C., Béton de haute performance, Édition Eyrolles, Paris, France, 2001.
- [107] Hu J., Wang K., Effects of Size and Uncompacted Voids of Aggregate on Mortar Flow Ability, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 2007, p 75–85.
- [108] Abdul Bari J., Krithiga K. S., Self-compacting Concrete: A Review, *Select Proceeding of SMTS 2019, Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 78, 2021, p 377-386.
- [109] Geiker M., Brandl R. M., Thrane L.N., Nielsen L.F., On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacted concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 24 (1), 2002, p 3–6.
- [110] Bouziani T., Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modeling approach. *Construction and Building Materials*, Vol. 49, 2013, p 308–314.
- [111] Azzouz L., Benabed B., Kadri E.H., Kenai S., Effect of sand type on fresh and hardened self-compacting concrete, 2<sup>nd</sup> International Sustainable Buildings Symposium, Ankara, Turkiye, May 28–30, 2015, p 37-41.

- [112] Khattab E., Effects of incorporating dune sand as fine aggregate replacement in self-compacting concrete. *Key Engineering Matererials*, No. 668, 2016, p 189–196.
- [113] Nimodiya P.N., Patel H.S., Experimental investigation of effect of sand fines on properties of self compacting concrete, *Journal of Emerging Technology and Innovative Researches*, Vol. 5(9), 2018, p 980–985.
- [114] Yan W., Wu G., Dong Z., Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model, *Construction and Building Materials*, No. 226, 2019, p 469–482.
- [115] Benmerioul F., Makani A., Tafraoui, A., Zaoui, S., Valorization of the crushed dune sand in the formulation of self-compacting-concrete. *Procedia Engineering*. No. 171, 2017, p 672–678.
- [116] AbuSeif E. S. S., Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: an experimental study. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6(3), 2013, p 857–863.
- [117] ASTM D6913/D6913M-17, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, Etats-Unis, 2017.
- [118] e-Handbook of Statistical Methods (2019) NIST/SEMATECH. Disponible sur <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Consulté le 26/10/2019.
- [119] Goupy J., Introduction aux plans d'expériences, Edition DUNOD, Paris, 2001.
- [120] Brown S. R., Melamed L. E., *Experimental Design and Analysis*, Sage Publications, The international Professional Publishers, Etats Unis, 1990.
- [121] Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiments*, Wiley, 9<sup>ème</sup> édition, New York, Etats-Unis, 2017.
- [122] Jahan A., Ismail M. Y., Noorossana R., Multi response optimization in design of experiments considering capability index in bounded objectives method. *Journal of Science and Industrial Research* Vol. 69, 2010, p 11–16.
- [123] Ulmo J., Pflugfelder B., Méthode d'exploration de la « surface de réponse » pour l'optimisation d'une variable dépendante dans le cas de facteurs contrôlés quantitatifs, *Revue de statistique appliquée*, Tome 27, No 4, 1979, p 23-36.
- [124] Rguig M., Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées. Mécanique. Thèse de doctorat, Université de Nantes Faculté des sciences et des techniques, France, 2005.
- [125] Derringer G., Suich R., Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, Vol. 12(4), 1980, p 214–219.

- [126] Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Edition Wiley, 4<sup>ème</sup> édition, New York, États-Unis, 2016.
- [127] Maxwell S. E., Delaney H. D., Kelley K., Designing Experiments and Analyzing Data. A Model Comparison Perspective, Routledge, 3<sup>ème</sup> édition, New York, États-Unis, 2018.