



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

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCCEN

**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MAGISTER EN GENIE CIVIL**

OPTION : MATERIAU BETON

Présenté et soutenu le / / 2012 par :

Mr GUELLIL Mustapha Khadir

**FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS PAR LA
METHODE DE LA PATE EN EXCES**

Jury De SOUTENANCE

M ^r A. BEZZAR	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r A. MEGNOUNIF	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r A. MEBROUKI	MCA	Univ. Mostaganem	Examineur
M ^r F. GHOMARI	Pr	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r M.A. BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur

A mes parents

A mon frère et ma sœur

A tous mes amis

RESUME

La formulation des Bétons autoplçants utilise plusieurs méthodes dont la pâte en excès. Le concept de cette méthode est associé à une caractérisation du squelette granulaire en calculant son diamètre moyen et sa compacité. Tout en adoptant la méthode d'empilement compressible, nous avons dans un premier temps déterminé et validé un paramètre d'homothétie entre le granulats brut et le granulats enrobé. Cette démarche nous a permis de valider la méthode de formulation en dehors du domaine expérimental étudié.

Dans ce travail, nous avons aussi optimisé le squelette granulaire et déterminer par la suite le volume optimal de pâte nécessaire pour écarter d'une part les granulats en vue d'atténuer leurs frottements respectifs, et de permettre d'autre part le un bon écoulement du mélange.

Les pâtes aux propriétés autoplçantes ont été constituées à partir d'un plan de mélange basé sur un modèle polynomial. Partant de cette pâte et d'ajouts graduels en eau ou en granulats pour un rapport massique gravillon / sable variant de 0,8 à 1,1, il a été possible, de confectionner des bétons autoplçants, répondant à tous les critères recommandés par l'AFGC.

Mots clefs : Béton autoplçant, pâte en excès, plan de mélange, empilement compressible, optimisation, adjuvant, compacité.

ملخص

تركيبه خرسانة ذاتية الرص أو الدك تستخدم أساليب عدة بما في ذلك العجين الزائد. يرتبط مفهوم هذه الطريقة مع تحديد خصائص الهيكل الحبيبي عن طريق حساب القطر المتوسط و التراص. مع اعتماد طريقة التراص قابل للانضغاط ، حددنا و ثبتنا في البداية، ثابتة بين الحبيب الممزوج و الغير الممزوج. سمح لنا هذا التوجه للتحقق من طريقة تركيبه خارج نطاق التجارب التي تمت دراستها.

في هذه العمل، تم أيضا تحسين الهيكل الحبيبي و تحديد حجم الأمثل للعجين المطلوبة لتوزيع الحبيبات للتخفيف من حدة الاحتكاك من جهة ، ومن جهة أخرى تسمح لتدفق جيد للخرسانة.

تم تشكيل العجين ذات خصائص ذاتية الرص من دراسة الخليط تقوم على نموذج متعدد الحدود. من تركيبه العجين المتحصل عليها و إضافات تدريجية من الماء أو من الحصى من خلال نسبة كتلة الحصى / الرمل تتراوح بين 0.8 و 1.1، كان من الممكن تركيب خرسانة ذاتية الرص تستجيب لكل مميزات الموصى بها من قبل AFGC .

الكلمات الرئيسية : خرسانة ذاتية الرص، العجين الزائد، نموذج متعدد الحدود، التراص قابل للانضغاط ، مادة مساعدة، تحسين ، التراص .

ABSTRACT

The mix design of self-compacting concretes using several methods including the excess paste. The concept of this method is associated with a characterization of the granular skeleton by calculating the mean diameter and packing density. While adopting the method of compressible packing, we initially determined and validated a parameter of homothety between the rough aggregate and the coated aggregate. This gait enabled us to validate the method of formulation apart from the studied experimental field. This approach allowed us to validate the method of formulation outside the experimental domain studied.

In this work, we also optimized the granular skeleton and then determine the optimal volume of paste required to disperse aggregates on one side in order to reduce their respective friction, and the other side allow a good flow of the mixture.

Cement pastes with self-compacting properties were formed from a mixture design based on a polynomial model. From this paste and gradually additions of water or aggregates for a mass ratio of gravel / sand varying from 0.8 to 1.1, it was possible to make self-compacting concrete, meeting all criteria recommended by the AFGC.

Key words: Self-compacting concrete, excess paste, mixture design, compressible packing, optimization, adjuvant, packing density.

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Pr. GHOMARI Fouad pour la confiance et la patience qu'il m'a témoignées ainsi que pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux.

De la même manière, j'aimerais remercier sincèrement mes co-encadreurs, Dr. BOUKLI HACENE et Mr TALEB Omar, pour avoir supervisé mes travaux expérimentaux et pour leurs conseils et assistance en matière de documentations.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance au Dr BEZZAR Abdelillah, maître de conférence à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Mes vifs remerciements sont adressés au Dr MEGNOUNIF Abdellatif, Doyen de notre faculté de technologie et maître de conférence à l'université de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateur de mon travail de mémoire.

Je remercie également, Dr MEBROUKI Abdelkader, Docteur à l'Université de Mostaganem, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner et de participer à mon jury de mémoire.

Mes sincères remerciements à Mr METAHRI Boumediene, chef de projet à l'agence nationale des autoroutes, section de Tlemcen, et à tous mes collègues de travail qui ont participés de près où de loin au bon déroulement de ce travail.

Un grand merci à mon père, à ma mère, à mon frère et ma sœur et à toute ma famille pour leur soutien constant, leur patience et leur encouragement tout au long de ces années de mémoire.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au cours de mon mémoire et celles qui ont permis son bon déroulement.

SOMMAIRE

Résumé	
Abstract	
Remerciements	
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	6
INTRODUCTION GENERALE.....	8
CHAPITRE 1: BETON AUTOPLAÇANT : CONCEPT ET FORMULATION.....	10
1.1. Introduction.....	11
1.2. Ouvrabilité des bétons autoplaçants.....	12
1.3. Caractérisations des BAP.....	13
1.3.1. A l'état frais.....	13
1.3.2. A l'état durcis.....	13
1.4. Constituants et leur influence dans la formulation des BAP.....	18
1.5. Interactions entre constituants.....	19
1.6. Méthodes de formulation des BAP.....	21
1.6.1. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	22
1.6.2. Méthode basée sur l'optimisation du mortier.....	22
1.6.3. Méthode de formulation chinoise.....	23
1.6.4. Méthode basée sur l'optimisation de la pâte.....	24
1.7. Conclusion.....	32
CHAPITRE 2 : ETUDE DE LA PATE CIMENTAIRE.....	34
2.1. Introduction.....	35
2.2. Matériaux utilisés.....	35
2.2.1. Le ciment.....	35
2.2.2. Les fillers calcaires.....	37
2.2.3. Adjuvant.....	37
2.2.4. Eau.....	37
2.3. Méthode de préparation de la pâte de ciment.....	38
2.4. Matériels et méthode d'essais.....	38
2.4.1. Essais d'étalement au mini-cône.....	38
2.4.2. Essai au cône de Marsh.....	38
2.5. Programme expérimental.....	39
2.5.1. Consistance de la pâte de ciment.....	40
2.5.2. Résultats et discussion.....	41
2.6. Analyse par plan de mélanges.....	43

2.6.1.	Application des plans de mélanges pour la formulation de la pâte de ciment	43
2.6.2.	Pâte autoplaçante optimale.....	47
2.6.3.	Interprétation des résultats.....	51
2.7.	Conclusion.....	56
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE.....		57
3.1.	Introduction.....	58
3.2.	Matériaux.....	58
3.2.1.	Sable.....	58
3.2.2.	Gravier.....	58
3.3.	Calculs du diamètre moyen du mélange granulaire.....	60
3.4.	Compacité.....	62
3.4.1.	Méthode d'empilement granulaire.....	63
3.4.2.	Calculs des compacités expérimentales.....	65
3.4.3.	Utilisation du logiciel RenéLCPC pour le calcul de la compacité.....	67
3.5.	Surface granulaire.....	69
3.6.	Conclusion.....	76
CHAPITRE 4 : FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS.....		77
4.1.	Introduction.....	78
4.2.	Confection des bétons autoplaçants.....	78
4.2.1.	Méthode adoptée pour la formulation des BAP.....	78
4.2.2.	Composition des BAP.....	80
4.2.3.	Résultats des essais d'ouvrabilité.....	81
4.2.4.	Résistance à 28 jours.....	82
4.2.5.	Bilan.....	82
4.3.	Eau retenue par les granulats.....	83
4.3.1.	Dispositif de mesure de l'eau retenue.....	83
4.3.2.	Hypothèse.....	85
4.4.	Epaisseur de la pate en excès	85
4.4.1.	Calcul à partir de la surface granulaire	86
4.4.2.	Calcul à partir de la taille moyenne des granulats	87
4.5.	Détermination de l'épaisseur de la pâte en excès.....	87
4.5.1.	Bilan.....	87
4.6.	Détermination du facteur représentatif du comportement autoplaçant.....	88
4.6.1.	Approche.....	88
4.6.2.	Calcul du paramètre k.....	89
4.7.	Contribution à la formulation des bétons autoplaçants.....	90

4.8. Exemple d'application pour validation.....	91
4.9. Conclusion.....	93
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	94
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	96
ANNEXES.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [TUR, 04].....	11
Figure 1.2 :	Développement des résistances à la compression en fonction du temps [KLA, 02].....	14
Figure 1.3 :	Résistances en compression [HAD, 04].....	15
Figure 1.4 :	Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers [TAL, 09].....	15
Figure 1.5 :	Comparaison des modules d'élasticité de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [KLA, 02].	16
Figure 1.6 :	Influence du type de béton sur le fluage [BEN, 09].....	17
Figure 1.7 :	Influence du type de béton sur le retrait [BEN, 09]	18
Figure 1.8 :	Illustration de la théorie de la pâte en excès	25
Figure 1.9 :	Théorie de la pâte en excès – composition d'un béton [OH, 99].....	25
Figure 1.10 :	Épaisseur de pâte en excès autour d'un granulat dans une classe donnée	28
Figure 1.11 :	Épaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre [BAR, 05]	29
Figure 1.12 :	Épaisseur de la pâte en excès et l'étalement en fonction de la distribution granulométrique [HAN, 06].	30
Figure 1.13 :	Relation entre les propriétés du BAP et l'épaisseur de la pâte en excès [HAN, 06].	31
Figure 1.14 :	Variation de la réponse – Etalement dans le plan : Ciment, Filler, Sp; COMPOSANTS FIXES : Eau = 0.30500 [MEB08].....	32
Figure 2.1 :	Mini-cône pour la mesure d'étalement.....	38
Figure 2.2 :	Essai de cône de Marsh.....	39
Figure 2.3 :	Confection de la pâte cimentaire	40
Figure 2.4 :	aspects visuels des pâtes confectionnées	41
Figure 2.5 :	Domaine expérimental	42
Figure 2.6 :	Forme de la fonction de désirabilité pour la réponse étalement & application sur le logiciel STATISTICA.....	49
Figure 2.7 :	Forme de la fonction de désirabilité pour la réponse écoulement & application sur le logiciel STATISTICA.....	50
Figure 2.8 :	Représentation des mélanges à l'aide d'un triangle équilatéral	51

Figure 2.9 (a) :	Représentation ternaire dans le plan (E C F) & (P F C) et l'espace pour la réponse Etal.....	52
Figure 2.9 (b) :	Représentation ternaire dans le plan (E C P) & (E F P) et l'espace pour la réponse Etal	53
Figure 2.10 (a) :	Représentation ternaire dans le plan (E C F) & (P F C) et l'espace pour la réponse Ecoule.....	54
Figure 2.10 (b) :	Représentation ternaire dans le plan (E C P) & (E F P) et l'espace pour la réponse Ecoule.....	55
Figure 3.1 :	Courbes granulométriques des granulats ENG carrière de Sidi Abdelli [BOU, 10]...	59
Figure 3.2 :	Dispositif de mesure de la compacité expérimentale	62
Figure 3.3 :	Classe dominante dans un mélange ternaire (ici, la classe de taille intermédiaire) [LAR00].....	64
Figure 3.4 :	Schéma de fonctionnement de René-LCPC	67
Figure 3.5 :	Courbe représentant la compacité calculée par le logiciel RENE-LCPC	68
Figure 4.1 :	Illustration de la démarche de confection des BAP.....	78
Figure 4.2a :	Aspect apparent d'un béton fluide.....	80
Figure 4.2b :	Aspect apparent d'un béton plastique.....	80
Figure 4.3 :	Dispositif de mesure de l'eau retenue par les granulats.....	83
Figure 4.4 :	Exemple de courbe de filtration d'un squelette granulaire [BAR, 05].....	84
Figure 4.5 :	Organigramme de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès.....	86
Figure 4.6 :	Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre.....	88
Figure 4.7 :	Evolution du paramètre k en fonction du rapport G/S.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :	Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre [BAR, 05].....	12
Tableau 1.2 :	Essais & valeurs cibles caractérisant le BAP à l'état frais.....	13
Tableau 1.3 :	Rôles des principaux paramètres dans l'écoulement et la formulation des BAP [BAR, 05].....	19
Tableau 1.4 :	Interactivités entre les constituants pour toutes les réponses [BAR, 05].....	20
Tableau 1.5 :	Exemples de différentes compositions utilisées au Japon (Kg/m^3) [TUR, 04].....	23
Tableau 2.1 :	Propriétés chimiques du ciment [TAL, 09].....	35
Tableau 2.2 :	Propriétés physico – mécaniques du ciment [TAL, 09].....	36
Tableau 2.3 :	Propriétés chimiques des fillers calcaires.....	37
Tableau 2.4 :	Caractéristiques de l'adjuvant « PLASTOCRETE TECHNO 7».....	37
Tableau 2.5 :	Caractéristiques chimiques de l'eau [BOU, 10].....	37
Tableau 2.6 :	Procédure de malaxage des pâtes de ciment [AIT, 01].....	38
Tableau 2.7 :	Compositions des pâtes confectionnées.....	40
Tableau 2.8 :	Contraintes implicites des facteurs.....	44
Tableau 2.9 :	Points de construction de la matrice d'expériences.....	45
Tableau 2.10 :	Matrice d'expériences de l'étude.....	45
Tableau 2.11 :	Valeurs expérimentales des réponses de la matrice d'expériences.....	47
Tableau 2.12 :	Fonction de désirabilité en fonction de la réponse.....	48
Tableau 2.13 :	Composition du mélange optimal.....	50
Tableau 2.14 :	Réponses du modèle et de l'expérience.....	51
Tableau 3.1 :	Caractéristiques physiques du sable [BOU, 10].....	58
Tableau 3.2 :	Caractéristiques physiques des graviers [BOU, 10].....	59
Tableau 3.3 :	Valeurs du diamètre moyen pour $G/S= 0,8$	60
Tableau 3.4 :	Valeurs du diamètre moyen pour $G/S= 0,9$	61
Tableau 3.5 :	Valeurs du diamètre moyen pour $G/S= 1$	61
Tableau 3.6 :	Valeurs du diamètre moyen pour $G/S=1,1$	62
Tableau 3.7 :	Compacité expérimentale du sable.....	66

Tableau 3.8 :	Compacité expérimentale du gravier [GHO, 11].....	66
Tableau 3.9 :	Caractéristiques des gravillons du béton.....	69
Tableau 3.10 :	Surfaces développées pour G/S= 0,8.....	72
Tableau 3.11 :	Surfaces développées pour G/S= 0,9.....	73
Tableau 3.12 :	Surfaces développées pour G/S=1.....	74
Tableau 3.13 :	Surfaces développées pour G/S=1,1.....	75
Tableau 3.14 :	Surfaces granulaires des bétons confectionnés.....	76
Tableau 4.1 :	Volume des constituants de la pâte pour 350 Kg/m ³ de ciment	79
Tableau 4.2 :	Composition d'un mètre cube de béton	79
Tableau 4.3 :	Procédure de l'élaboration d'un BAP G/S =1.....	79
Tableau 4.4 :	Compositions finales des bétons confectionnés (Kg/m ³).....	80
Tableau 4.5 :	Ouvrabilité des bétons confectionnés.....	81
Tableau 4.6 :	Résistances à 28 jours des bétons confectionnés.....	82
Tableau 4.7 :	Epaisseur de la pâte en excès des bétons calculé par les deux approches.....	87
Tableau 4.8 :	Valeurs du paramètre k des bétons autoplaçants confectionnés.....	89
Tableau 4.9 :	Composition du béton obtenu.....	92
Tableau 4.10 :	Ouvrabilité du béton obtenu.....	92

INTRODUCTION GENERALE

Les bétons autoplaçants sont connus pour être des bétons fluides qui se mettent en place sans vibration, homogène et stable, et ils confèrent aux structures une résistance et une durabilité équivalente à celle des bétons ordinaires et des bétons à hautes performances. Ils constituent l'une des plus importantes innovations de la dernière décennie en matière de technologie de construction.

Sur les chantiers comme dans les usines de préfabrication, ces bétons offrent de multiples avantages, liés à leurs caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages. Ils affirment leurs performances au fil des chantiers et s'imposent progressivement. Ils remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Un intérêt très particulier est porté pour ce type de béton dans notre pays au regard du nombre important de projets de recherches qui ont vu le jour au sein des universités algériennes, offrant ainsi la possibilité aux industriels de profiter des avantages qu'il procure tout en utilisant des matériaux locaux.

La formulation des bétons autoplaçants se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante du volume de pâte du ciment. En effet, la présence de la pâte (mélange de ciment, d'adjuvants, d'eau efficace et d'additions minérales) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines.

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. Une variété des matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux : ouvrabilité, rhéologie, résistance.

De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes, relativement peu précises et essentiellement basées sur les résultats empiriques.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux antérieurs réalisés au sein du laboratoire EOLE de l'université de Tlemcen. Elle fait suite à un premier mémoire de magister soutenu par Mr TALEB et qui a concerné l'optimisation de la formulation des BAP ainsi que le comportement de ce matériau à l'état frais. Le présent travail a trait à l'étude de la formulation des BAP par la méthode de la pâte en excès. Il a pour objectif de donner à la confection des BAP un caractère plus scientifique en utilisant des matériaux locaux.

Le mémoire est composé de 4 chapitres :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique concernant les propriétés des BAP en termes d'ouvrabilité et de rhéologie, les méthodes de caractérisation correspondantes, les approches de formulation existantes ainsi que le rôle joué par les différents constituants des BAP et les paramètres influents sur l'écoulement.

Le chapitre 2, concerne une étude à l'échelle de la pâte de ciment. Il présente les matériaux, les méthodes d'essais pour réaliser cette étude. En élaborant une stratégie basée sur le plan de mélange, on définira une pâte optimale aux critères autoplaçants. L'exploitation des résultats obtenus à partir de ce plan de mélange permettent aussi de comprendre le rôle joué par chaque constituant entrant dans la formulation de la pâte.

Dans le chapitre 3, on propose une caractérisation du squelette granulaire se résumant dans une description des différentes classes composant ce squelette. Nous procédons par la suite à la détermination du diamètre moyen, de la compacité maximale du mélange granulaire en adoptant la méthode d'empilement compressible et de sa surface.

Le passage à l'échelle du béton, fait l'objet du quatrième et dernier chapitre. Dans ce chapitre, on décrit la démarche pour la réalisation des bétons autoplaçants qui consiste en l'association d'une pâte de ciment autoplaçante à différents mélanges granulaires dont le rapport graviers sur sable (G/S) varie. Ces bétons seront validés par une série d'essais selon les recommandations de l'AFGC. Une analyse du rôle de l'eau dans le béton est effectuée, de laquelle découle un principe de formulation en utilisant la théorie de la pâte en excès. Elle conduit à proposer un paramètre caractéristique définissant l'interaction pâte-granulats. Ce paramètre est validé sur l'ensemble de nos résultats et par ceux tirés de la littérature.

Ce travail sera achevé par une conclusion générale de l'ensemble des résultats tout en suggérant de nouvelles perspectives de recherche.

CHAPITRE 1

BETON AUTOPLAÇANT : CONCEPT ET FORMULATION

1.1. Introduction

Les Bétons autoplaçants (BAP) sont des matériaux fluides qui se mettent en place sans vibration. Ils se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais [AFG, 00] [SED, 99]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quelque soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir à formuler un BAP, la pâte définie comme le mélange de ciment, d'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure 1.1).

En général, les BAP possèdent les mêmes constituants que les BO, à savoir, le ciment, l'eau, le sable et le gravier. A ces quatre constituants viennent s'ajouter les fines et les adjuvants selon la propriété demandée. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

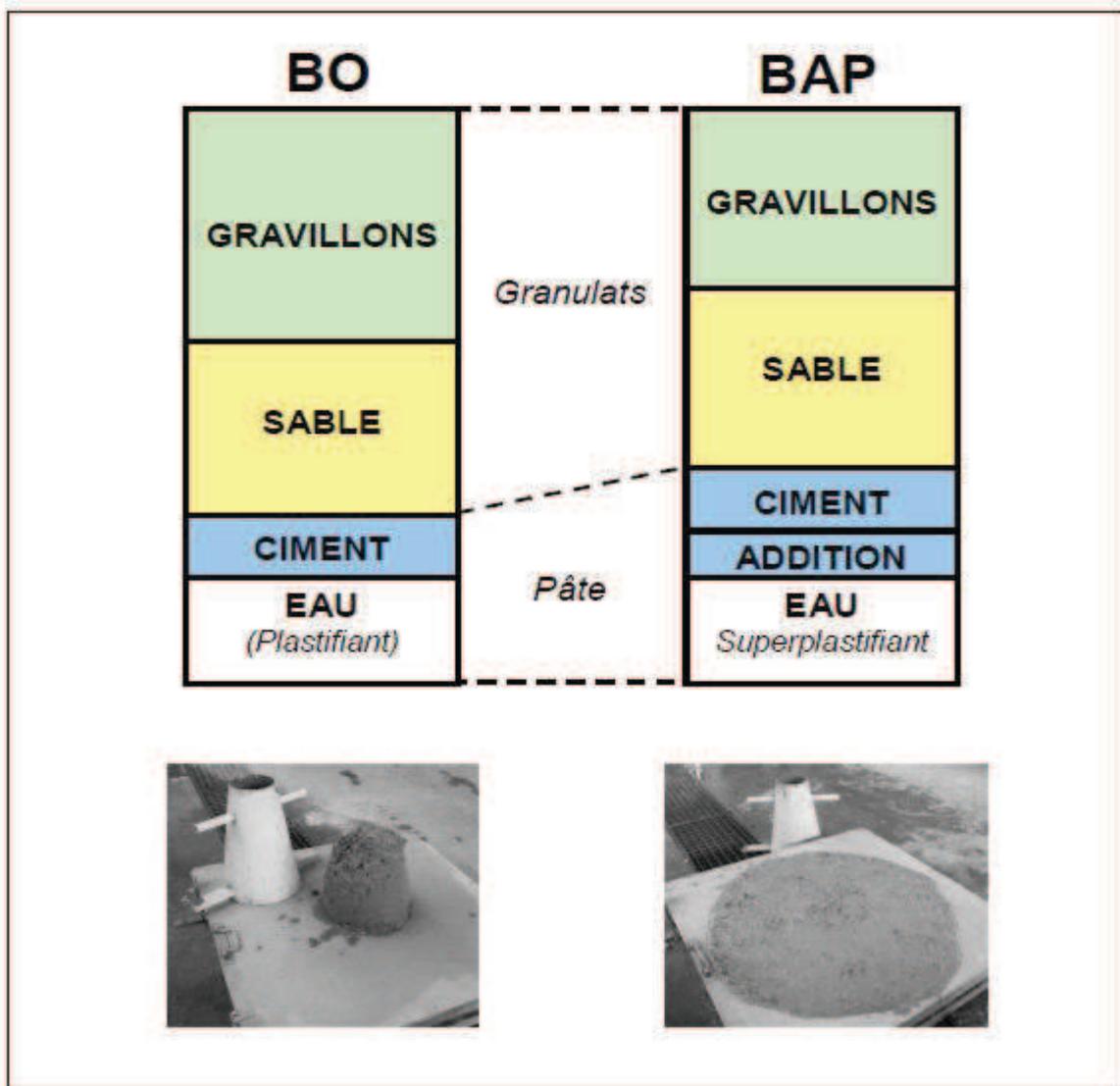


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [TUR, 04].

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

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais ; il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP coïncide d'ailleurs avec l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules.

La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courants en centrale à béton [LOU, 03] [ROL, 98]. Cela étant, en pratique leur utilisation est peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions minérales.

Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais.

1.2. Ouvrabilité des bétons autoplaçants

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés précitées, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité et résistance à la ségrégation). Pour résumer, nous présentons dans le tableau 1.1, les propriétés des BAP, les moyens pour les caractériser et les actions entreprises pour leur mise en œuvre.

Tableau 1.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre [BAR, 05].

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation de superplastifiants Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Utilisation de matériaux de grande surface granulaire
	Réduction de la séparation de phases	Utilisation d'agents de viscosité Réduction du rapport E/C
		Réduction de la taille maximale des granulats

Capacité de passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction de la taille maximale des granulats ainsi que le volume granulaire
---------------------	------------------------------------	--

1.3. Caractérisation des BAP

1.3.1. A l'état frais

Parmi les essais préconisés pour valider une formule de BAP, on regroupera ceux qui sont disponibles dans notre laboratoire (EOLE) dans le tableau 1.2 avec leurs valeurs cibles recommandées par l'AFGC :

Tableau 1.2 : Essais & valeurs cibles caractérisant le BAP à l'état frais.

Essais	Classe	Valeurs cibles préconisées
Etalement au cône d'Abrams	SF ₁	550 - 650 mm
	SF ₂	660 - 750 mm
	SF ₃	760 - 850mm
Ecoulement au V-funnel	VF ₁	t ≤ 8 s
	VF ₂	9 ≤ t ≤ 25 s
Boite en L	H ₂ /H ₁	≥ 80 %
	T ₂₀	< 1,5 s
	T ₄₀	< 3,5 s
J-Ring	SF - SFJ _{ring}	< 5 cm
stabilité au tamis GTM		0% ≤ P ≤ 15%
		15% ≤ P ≤ 30%
		P ≥ 30%

1.3.2. A l'état durci

Dans cette partie, on fera une comparaison des propriétés à l'état durci entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires, en recueillant les résultats d'études effectuées à l'échelle nationale et internationale.

1.3.2.1. Propriétés mécaniques

1.3.2.1.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des plus importantes propriétés du béton durci. Comparativement aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants suivent les mêmes évolutions de résistances à la compression [KLA, 02]; d'ailleurs, jusqu'à l'âge de 28 jours, il n'y a pas de différence significative entre les résistances atteintes par les deux bétons confectionnés à l'aide de mêmes compositions, sauf pour le cas où le béton autoplaçant est préparé avec le même rapport E/C que le béton vibré, dans ce cas, la résistance du BAP est meilleure [KLA, 02].

La figure 1.2 montre, qu'un béton autoplaçant confectionné avec les fillers calcaires développerait de meilleures résistances à la compression par rapport aux autres additions minérales.

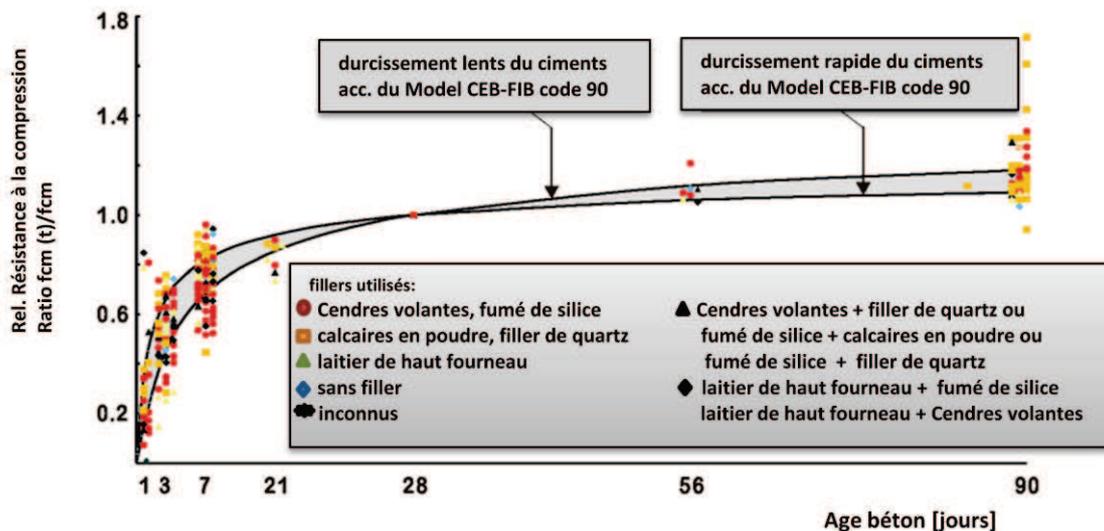


Figure 1.2 : Développement des résistances à la compression en fonction du temps [KLA, 02].

En n'utilisant que des fillers calcaires, la figure 1.3 montre que jusqu'à l'âge de 28 jours, les résistances à la compression des bétons autoplaçants seraient inversement proportionnelles aux taux de substitutions du ciment par ces additions [HAD, 04].

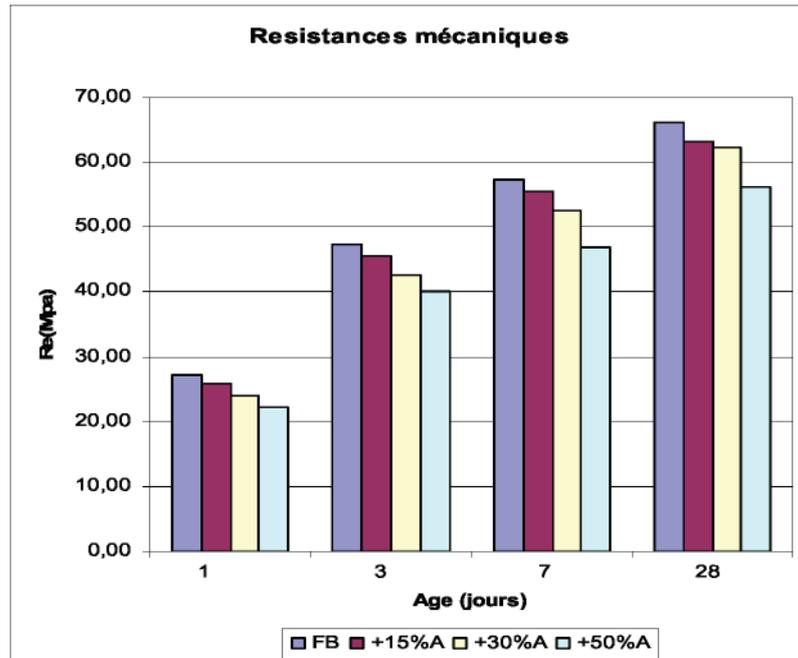


Figure 1.3 : Résistances en compression [HAD, 04].

Dans une autre étude réalisée, à partir de nos propres matériaux, Taleb a montré qu’une réduction du rapport E/C de 0,50 à 0,47 pour un BAP, avec un taux de 20% de fillers et qui a d’ailleurs répondu aux critères de l’AFGC, permet d’améliorer la résistance de 18% [TAL, 09].

La même étude a aussi montré que la décroissance de résistance en fonction des fillers est toujours linéaire, cependant la tangente de la droite à tendance à diminuer en réduisant le rapport E/L (figure 1.4).

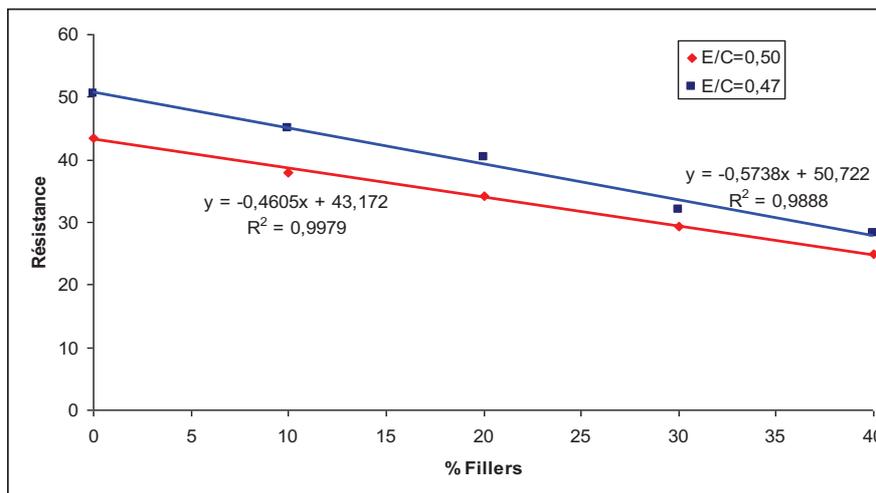


Figure 1.4 : Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers [TAL, 09].

1.3.2.1.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton dépend des modules de Young des différents composants et de leurs pourcentages en volume. [KLA, 02] a démontré que le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 20% inférieur par rapport au béton conventionnel ayant la même résistance en compression et fabriqué par les mêmes granulats (figure 1.5).

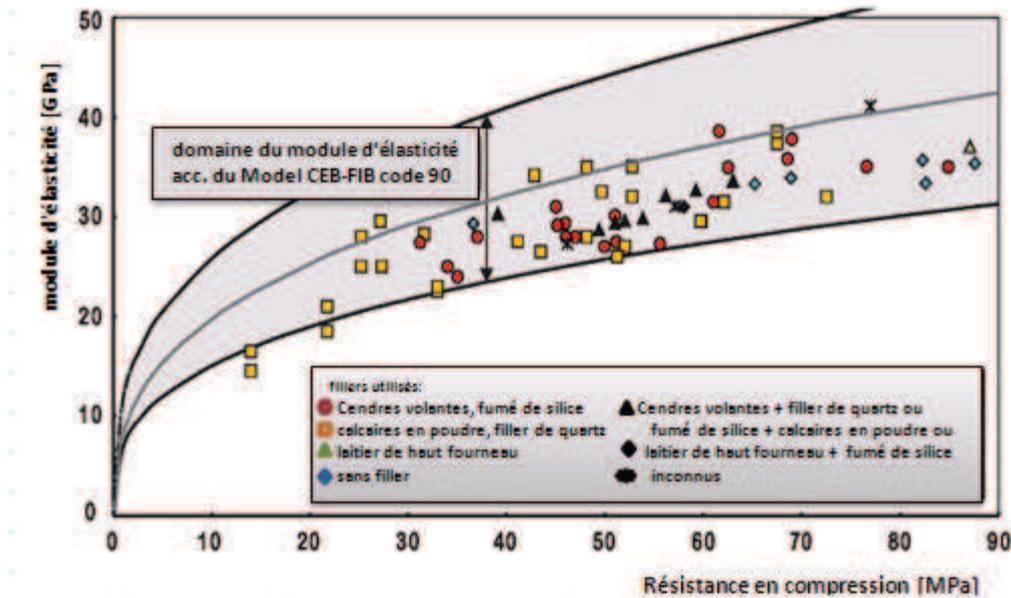


Figure 1.5 : Comparaison des modules d'élasticité de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [KLA, 02].

Pineaud [PIN, 07] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BO. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (Résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [PIN, 07].

1.3.2.1.3. Résistance à la traction

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer cette résistance [KON, 01]. En effet l'augmentation de la quantité de sable et / ou du volume de fines, entraîne une élévation de la résistance en traction.

On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. Pour certains auteurs [KLU, 03 ; KON, 01], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BO. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BO (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud [PIN, 07]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

1.3.2.1.4. Déformations et fluage

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [ASS, O5].

Les travaux de [BEN, 09], ont montré que l'augmentation du volume de pâte, entraînée par l'ajout de fillers, conduit à des déformations différées plus importantes pour les BAP en les comparant avec le BO. Cela peut être expliqué selon l'auteur par la présence d'additions minérales dans les BAP qui lui offre des pores plus fins que ceux des bétons vibrés. En effet, la pression capillaire étant inversement proportionnelle aux rayons des pores, celle-ci est d'autant plus forte dans les BAP, ce qui engendrerait un fluage plus important dans ces bétons, par comparaison aux bétons vibrés correspondants (Figure 1.6).

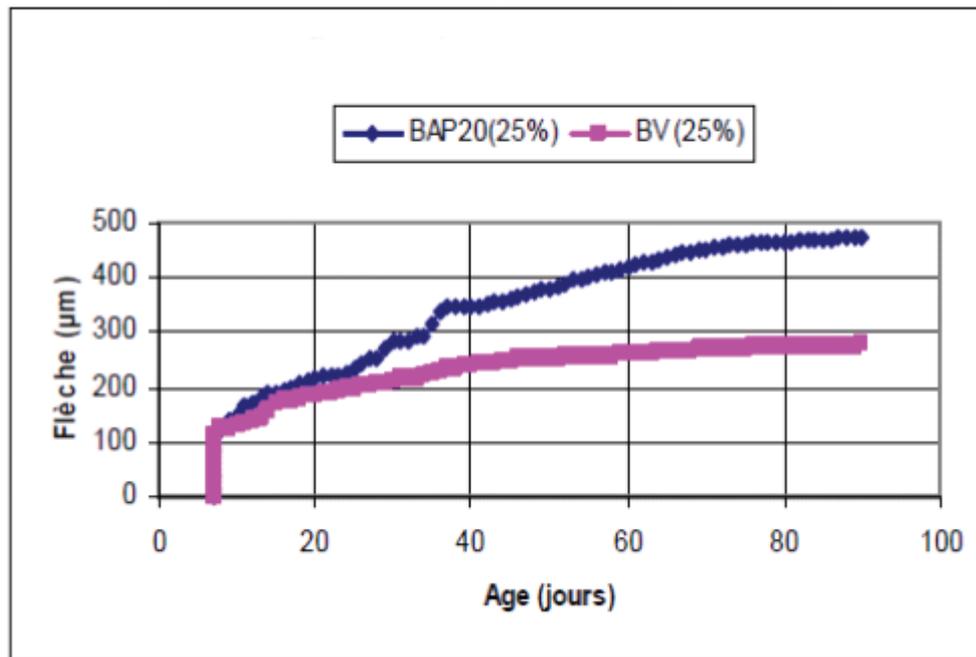


Figure 1.6 : Influence du type de béton sur le fluage [BEN, 09].

1.3.2.1.5. Retrait

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [ASS, O5]. Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

[BEN, 09], a montré que le retrait total du BAP est plus élevé que celui du béton traditionnel d'égale résistance. L'ordre de grandeur de cette déformation est aux alentours de 450 µm/m (Figure 1.7).

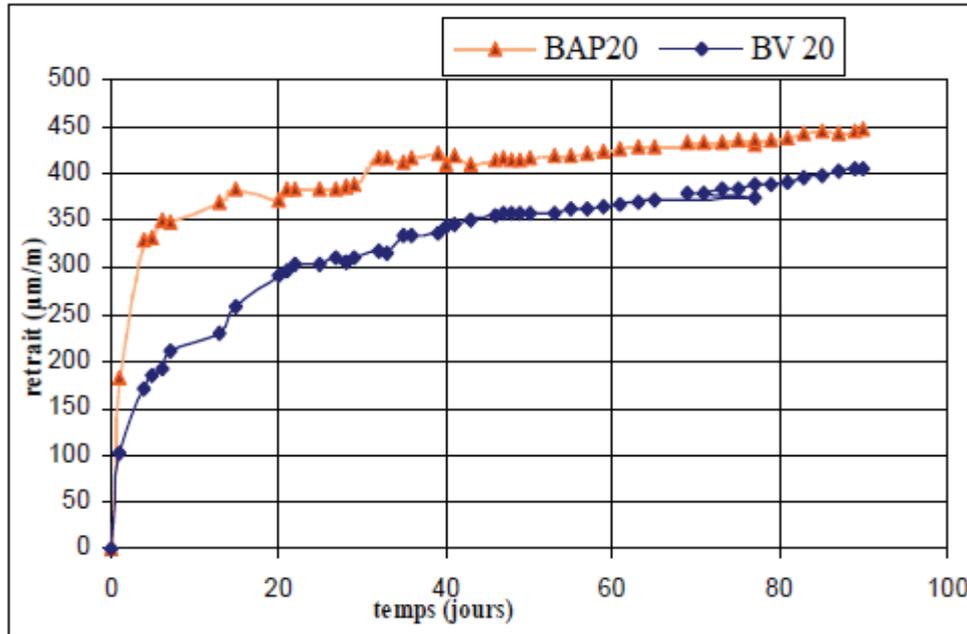


Figure 1.7 : Influence du type de béton sur le retrait [BEN, 09].

1.3.2.2. Propriétés physico-chimiques des BAP

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlorures, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO), [ASS, 05].

La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée.

Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlorures et d'absorption d'eau par capillarité. A résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

Dans un travail réalisé au sein de notre laboratoire par Touil [TOU, 09], une comparaison a été faite entre un BO et un BAP sur l'évaluation du coefficient de diffusion, il a trouvé que le flux des ions chlorure d'un BAP est plus grand de l'ordre de 9 % par rapport à celui d'un BO.

1.4. Constituants et leur influence dans la formulation des BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide & solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique. Ainsi, nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Un bilan sur les rôles des constituants influents dans la formulation des bétons autoplaçants est représenté dans le tableau 1.3 sous forme de synoptique général. La dernière colonne exprime l'influence de l'augmentation du dosage du constituant ou de la valeur du paramètre correspondant.

Tableau 1.3 : Rôles des principaux paramètres dans l'écoulement et la formulation des BAP [BAR, 05].

Constituants et paramètres principaux	Rôles principaux dans la formulation	Influence sur le seuil de cisaillement et la viscosité
Eau (E)	Fluidité et hydratation (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Diminution
Ciment (C)	Liant (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Augmentation
Concentration volumique en solides	Encombrement, plus de frictions entre les particules	Augmentation
Granulats	Réduction du coût du béton, performances mécaniques variables selon le type	Selon le type
Additions minérales	Optimisation du squelette granulaire du béton, avantages environnementaux et économiques	Selon le type (demande en eau)
Filler calcaire (F)	Amélioration de l'écoulement au dessous du dosage critique	Dépend du dosage
Superplastifiants (SP)	Déflocculation, dispersion des particules de Ciment	Diminution
Agents de viscosité (AV)	Résistance à la ségrégation, cohésion	Augmentation

1.5. Interactions entre constituants

L'interaction étant principalement entre les constituants composant la pâte de ciment qui enveloppe le squelette granulaire, El Barrak [BAR, 05], a étudié cette interaction en exploitant les résultats d'un plan de mélange élaboré pour obtenir une pâte de ciment au critère autoplaçante, composée de cinq constituants (ciment (C), eau (E), filler (F), superplastifiant (SP) et agent de viscosité (AV)).

Partant d'une analyse des diagrammes ternaires avec deux constituants hors plan, le sens et le niveau de la réponse sont étudiés.

El Barrak a défini 3 types d'interactivité :

- Interactivité faible lorsqu'il n'y a ni changement de niveau ni de sens des courbes iso-réponses.
- Interactivité synergique lorsque les courbes iso-réponses conservent le même sens de variation mais lorsque le niveau de la réponse est différent.
- Interactivité antagoniste lorsque le sens des courbes iso-réponses s'inverse et que le niveau des réponses est différent.

Le tableau 1.4 regroupe les interactivités entre les différents constituants pour les réponses étudiées :

Tableau 1.4 : Interactivités entre les constituants pour toutes les réponses [BAR, 05].

Type de réponse	Type d'interactivité		
	Faible	Synergique	Antagoniste
Seuil de cisaillement statique	C-F C-SP C-AV F-SP F-AV SP-AV à dosages faibles	SP-E	SP-AV à dosages élevés AV-E à dosages élevés
Etallement	C-F C-SP C-AV F-SP F-AV AV-E à dosages faibles	SP-E SP-AV à dosages faibles	SP-AV à dosages élevés AV-E à dosages élevés
Viscosités	C-F C-AV F-SP F-AV SP-AV à dosages faibles	SP-E à dosages faibles	C-SP AV-E à dosages élevés SP-AV à dosages élevés SP-E à dosages élevés

D'après le tableau 1.4, on remarque que le filler interagit peu avec les autres constituants, ce qui confirme sa nature inerte. Par ailleurs, le superplastifiant et l'agent de viscosité ont une interactivité antagoniste à dosages élevés pour toutes les réponses.

Pour interpréter ces résultats, une compréhension de l'action physico-chimique des différents constituants sur l'écoulement des mélanges cimentaires est nécessaire.

Dès lors que le ciment et le filler calcaire sont mis dans l'eau, ils se dissolvent à des intensités diverses, dépendant de la taille et de l'organisation superficielle des grains (le filler calcaire se dissout nettement plus faiblement que le ciment). Il en résulte une augmentation d'ions dans la solution interstitielle : alcalins (Na^+ , K^+), sulfates (SO_4^{2-}) en raison de la présence de gypse dans le ciment, mais surtout calcium (Ca^{2+}) et hydroxydes (OH^-). Cette concentration ionique rapide accroît la force ionique de l'espace inter-solide et élève rapidement le pH de la suspension en raison de la libération des OH^- .

Les actions de SP et AV sur les propriétés rhéologiques des mélanges sont gouvernées par la force ionique et le pH qui dépendent eux-mêmes de la concentration en solides. Une compétition entre eux, notamment dans les interactions avec les ions calcium mais vraisemblablement aussi avec les alcalins, et la plus grande quantité de l'un ou de l'autre de ces produits vont régir le comportement final de la suspension.

El Barrak [BAR, 05] a relevé dans cette étude, sur le seuil et la viscosité, une interaction faible qui permet à SP et AV d'agir indépendamment l'un de l'autre lorsqu'ils sont en faible dosage et une interaction antagoniste lorsqu'ils sont à dosages élevés dans le mélange. A l'exception de la réponse étalement, où il y a une interaction synergique même à faible dosage.

Une interaction antagoniste régit de la compétition entre SP et AV dans l'utilisation des ions calcium qui sont parallèlement impliqués dans les mécanismes de nucléation/croissance.

C'est donc un équilibre entre SP et AV qu'il s'agit de trouver pour obtenir un mélange fluide mais stable, représentatif du comportement autoplaçant.

1.6. Méthodes de formulation des BAP

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

Parmi les techniques de formulation les plus répandues, nous citons :

- La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires,
- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers,
- La méthode chinoise.
- La méthode basée sur l'optimisation de la pâte.

La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires, réside dans la nécessité d'acquérir le logiciel (Bétonlab Pro), ce qui présente un inconvénient majeur dans certains laboratoires.

Les bétons autoplaçants obtenus par la méthode basée sur l'optimisation du mortier sont loin d'être économique car ils comportent un volume de pâte très important et peuvent conduire à des problèmes de retrait.

En parallèle, la méthode chinoise utilise une relation empirique pour estimer le dosage en ciment fondée sur des données empiriques provenant du Taïwan. Elle ne peut pas donc être appliquée dans d'autres régions.

Dans notre étude, nous nous baserons sur la méthode de l'optimisation de la pâte. Cette approche a tendance à trouver le volume de pâte minimum nécessaire pour répondre aux critères des BAP. Elle permet ainsi à optimiser le coût des BAP.

1.6.1. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire [SED, LAR 99]. Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Ce modèle fait intervenir deux notions physiques :

- La compacité virtuelle du mélange, noté γ : la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent des additions fines aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, noté C est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- Indice de serrage K : grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i on définit un indice de serrage K_i . Plus ce dernier est élevé plus les contacts entre les grains d'une même classe sont importants et plus le seuil de cisaillement τ_0 est significatif.

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment.

1.6.2. Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais [OKA 95, OUC 99, HAY 95 et NAG 95], est, également, nommée Méthode Japonaise. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdosés en liant et économiquement peu viables.

La méthode repose sur les concepts suivants :

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume des grains et le volume total du système (grains+vides)) afin de minimiser les risques de blocage.
- Volume du sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier.
- Rapport $\frac{E}{Poudre}$ et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel. Ces essais permettent de calculer deux paramètres : $\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2}$ et $R_m = \frac{10}{t}$ où D est l'étalement, D_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs [SED, 99] et [JIN, 02] et [BET, 05] montrent que pour un BAP, $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$.

Tableau 1.5 : Exemples de différentes compositions utilisées au Japon (kg/m^3) [TUR, 04].

	Ciment	Laitier	Cendres	Filler	Sable	Gravillon	Eau	SP	Agent de viscosité
NAK. 95	200	200	100	0	704	898	165	6	0
HAY. 95	180	220	100	0	753	926	170	7,7	1,5
YUR. 92	300	0	0	200	700	910	170	8	0,2

1.6.3. Méthode de formulation chinoise

Dans les Pays Bas et beaucoup d'autres pays européens, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme un point de départ pour le développement des BAP. Plus récemment, Su N. et col. [SU, 01] ont proposé une nouvelle méthode pour formuler le BAP basé, au début, sur la compacité des granulats (sable et gravier) et, puis, sur le remplissage des vides des granulats avec la pâte.

Cette méthode référée en tant que méthode chinoise comparée à la méthode japonaise est plus simple, plus facile pour l'exécution et sauve le coût.

- Etape 1 : Calcul du dosage des granulats

Le facteur de compacité PF « Packing Factor » est le rapport entre la masse des agrégats compactés et la masse des agrégats desserrés.

Le paramètre PF influe sur la teneur des granulats dans le BAP. Une valeur forte de PF implique une grande quantité de gros et de fins granulats utilisés. Par conséquent, la capacité de passage du béton autoplaçant et sa résistance à la compression seront réduits [HIL, 09].

Donc il est très important de connaître la valeur optimale de PF pour répondre aux exigences des propriétés des BAP.

La proportion de gros et de fins granulats peut être calculée par les deux équations suivantes :

$$M_g = PF \times \rho_{gL} \left(1 - \frac{S}{G}\right) \quad [1.1]$$

$$M_s = PF \times \rho_{sL} \frac{S}{G} \quad [1.2]$$

M_g : proportion de gros granulats (Kg/m^3),

M_s : proportion du sable (Kg/m^3),

ρ_{gL} : masse volumique apparente des gros granulats (Kg/m^3),

ρ_{sL} : masse volumique apparente du sable (Kg/m^3),

- Etape 2 : Calcul du dosage de ciment

[JSCE, 98] utilise un dosage en ciment entre 270 et 290 Kg/m^3 . En général, les recommandations en Tawain imposent pour le BHP ou le BAP une résistance à la compression égale à 20 psi (0,14 MPa) /Kg de ciment. Donc, le dosage de ciment est défini comme :

$$C = \frac{\sigma'_c}{20} \quad [1.3]$$

C : dosage en ciment (Kg/m^3)

σ'_c : résistance à la compression (psi)

- Etape 3 : Calcul du dosage en eau

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport $\frac{E}{C}$ déterminé expérimentalement.

1.6.4. Méthode basée sur l'optimisation de la pâte

1.6.4.1. Introduction

En 1918, D. A. Abrams a proposé une théorie concernant une méthode de mélange de béton dans son document «Conception de mélanges de béton". Il s'agit du rapport de l'eau sur ciment et la proportion de gros granulats. Et en 1940, Kennedy a proposé la "Théorie de la pâte en excès» [KEN, 40], qui est essentielle à la compréhension du mécanisme de l'ouvrabilité du béton frais. Sa théorie explique le fait que pour atteindre la maniabilité, il est nécessaire d'avoir non seulement assez de pâte de ciment pour couvrir la surface des agrégats, de manière à minimiser la friction entre eux, mais aussi un excès en plus pour lui donner une meilleure fluidité.

La figure 1.8.a montre le vide qui résulte entre les agrégats en contact. En ajoutant de la pâte de ciment, ces agrégats serrés sont ensuite séparés par une couche de pâte de ciment autour d'eux (figure 1.8.b). Aussi il a pu constater que le vide est rempli d'une partie de cette pâte de ciment.

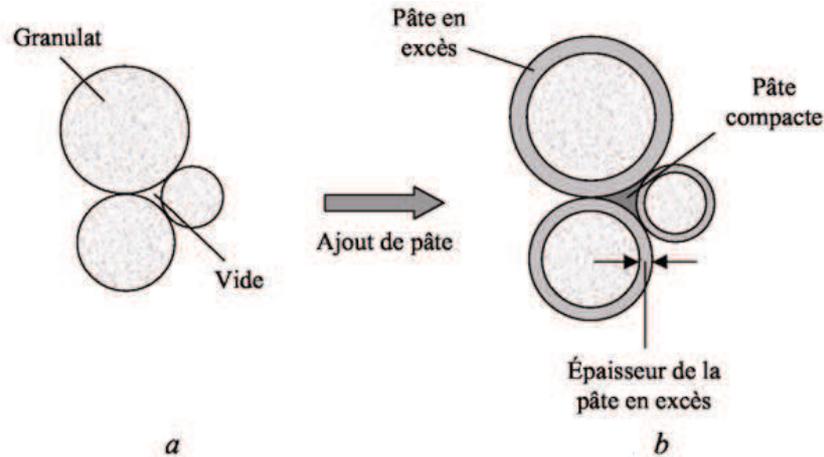


Figure 1.8: Illustration de la théorie de la pâte en excès.

L'ajout de la pâte de ciment va changer l'interaction entre les agrégats. C'est en quelque sorte comme un effet de dispersion, c'est à dire, les agrégats sont repoussés les uns des autres. Sans une couche de pâte de ciment autour d'eux, le mouvement entre les agrégats générerait beaucoup de frottement et de ce fait, la maniabilité sera impossible.

La théorie de la pâte en excès suppose que les granules dans le béton (ou le mortier) sont sphériques, et que la distribution granulométrique dans le béton est uniforme et continue.

Afin d'appliquer cette théorie, il est nécessaire de définir ses principaux paramètres. La figure 1.9 montre un échantillon de béton où les granules sont bien espacés par la pâte de ciment. En imaginant que les granules de l'échantillon sont compactés au maximum, nous allons extraire la pâte en excès V_{PE} qui couvre les granules. Le volume restant est constitué des granules compactés et de la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette. Ce volume restant correspond donc au volume apparent des granules compactés ; il est ainsi composé de deux volumes, le volume solide des granules V_{GR} et le volume de la pâte compacte V_{PC} .

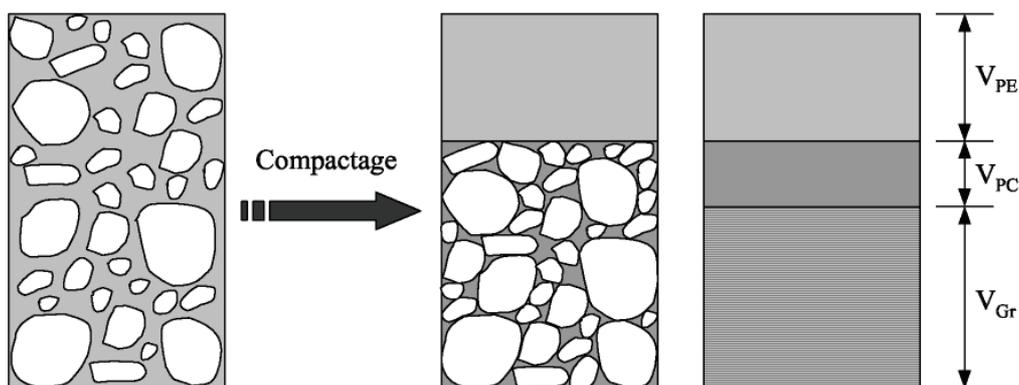


Figure 1.9: Théorie de la pâte en excès – composition d'un béton [OH, 99].

1.6.4.2. Travaux d'OH et col. [OH, 99]

OH et col. [OH, 99] ont obtenu par l'expérimentation, des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

$$e_{PE} = \frac{V_{PE}}{S_{Granulats}} \quad [1.4]$$

Où :

e_{PE} : épaisseur de la pâte en excès répartie sur toute la superficie des granulats,

V_{PE} : volume de la pâte en excès.

Avec :

$$V_{PE} = V_P - V_{PC} \quad [1.5]$$

V_P : Volume de la pâte.

V_{PC} : Volume de la pâte compacte.

V_P étant connu, la détermination du volume de la pâte compacte (V_{PC}) correspond à calculer le volume des vides dans un échantillon de granulats compactés.

1.6.4.3. Travaux de Tangtermsirikul, Pettersson et Bui [TAN, 95] [PET, 99] [BUI, 99]

C'est une approche similaire du dosage de la pâte, mais cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. Dans ce cas, le volume de la pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats et ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocages lors de l'écoulement. Les auteurs font l'hypothèse qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. Ils proposent les deux critères suivants :

- Critère de fluidité

Le volume de pâte minimal V_{fmini} qu'il faut pour fluidifier 1 m³ de béton s'écrit :

$$V_{fmini} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{C_e} \quad [1.6]$$

Où V_{vides} est la porosité du mélange de sable et de gravillon, mesurée selon la norme américaine ASTM C29/C29M. C_e est un coefficient "d'écartement"; lorsqu'il vaut 1, V_{fmini} est égal à V_{vides} : le volume de pâte remplit la porosité des granulats et lorsque C_e est supérieur à 1, la pâte comble la porosité et écarte les granulats. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$C_e = \left(\frac{e_{\text{mini}}}{D_{\text{moyen}}} + 1 \right)^3 \quad [1.7]$$

$$D_{\text{moyen}} = \frac{\sum(m_i \times d_i)}{\sum m_i} \quad [1.8]$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats (mm); d_i est le diamètre du tamis i (mm); m_i est la masse de granulats retenus sur le tamis i (Kg); e_{mini} est la distance moyenne entre les granulats, minimale pour fluidifier le béton (mm).

La détermination de e_{mini} se fait de manière expérimentale. Des bétons avec des volumes de pâte décroissants sont confectionnés; on considère que le volume limite de fluidité est atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, on obtient des courbes donnant la distance e_{mini} en fonction de D_{moyen} pour différents rapports massiques eau sur fines $E / (C + F)$ et diamètres maximaux du gravillon. On notera que les auteurs n'ont choisi que trois paramètres pour décrire e_{mini} ($E / (C + F)$, D_{moyen} , D_{max}) au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle.

➤ Critère de non-blocage

Il s'agit de calculer le volume V_{bi} qui représente le volume limite de granulats de taille d_i , au-delà duquel le béton ne s'écoule plus dans un milieu confiné, comme la boîte en L. Les auteurs proposent de modéliser V_{bi} linéairement en fonction du rapport de l'espacement e des armatures de la boîte en L et du diamètre d_i . Les auteurs ont remarqués que le volume critique d'un sable quelconque ($e / d_i > 15$) est de 840 l/m^3 : le sable n'est pas prépondérant dans le critère du blocage, si le béton est fluide. Il y a donc un grand nombre d'essais à réaliser pour obtenir une courbe du volume critique.

Le risque de blocage est écrit en fonction du rapport du volume V_i de granulat d_i et de son volume limite V_{bi} .

$$R = \sum_I \frac{V_i}{V_{bi}} \quad [1.9]$$

En posant $R = 1$, il vient l'expression 1.10, qui donne le volume de pâte, pour 1 m^3 de béton, en deçà duquel il y a risque de blocage lors de l'écoulement du béton en milieu confiné.

$$V_{b\text{mini}} = 1 - \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) \times N_g}{\sum \frac{\rho_{gi} \times N_g \times \rho_s}{V_{bi}} + \sum \frac{\rho_{si} \times (1 - N_g) \times \rho_g}{V_{bi}}} \quad [1.10]$$

ρ_g et ρ_s sont les masses volumiques respectives du gravillon et du sable (kg/m^3) ; N_g est le rapport entre la masse de gravillon et la masse totale des granulats ; ρ_{gi} (respectivement ρ_{si}) est la proportion dans le gravillon (respectivement dans le sable) du diamètre d_i (%).

➤ Application de l'approche

On trouve l'application de cette approche, dans les travaux de P. Turcry [TUR, 04], pour le calcul des volumes de pâtes minimaux suivant les deux critères, il a utilisé les données publiées [BUI, 99] concernant le coefficient e_{mini} et la fonction $V_{\text{bi}} = f(e/d_i)$. Il a constaté que le critère de non-blocage est largement prépondérant par rapport à celui de la fluidité pour différentes répartitions entre gravillons 6/10 et 10/14, et quelque soit le rapport $E/(C+F)$ (compris entre 0,3 et 0,4).

Le critère de non-blocage a donné un volume de pâte fonction croissante du rapport massique gravillon sur sable (G/S).

Les essais de caractérisation réalisés mettaient en évidence le manque de fiabilité du volume de pâte calculé par la méthode : l'essai d'écoulement dans la boîte en L n'a été validé pour aucune des compositions. Cependant, la loi $V_{\text{bi}} = f(e/d_i)$, donnant le volume de gravillon limite, est issue de données de la littérature, donc calée pour des gravillons différents de ceux utilisés dans son étude.

Enfin, pour appliquer correctement la méthode, il faudrait déterminer expérimentalement les différents coefficients, nécessaires aux deux critères, sur des bétons fabriqués avec les constituants utilisés.

1.6.4.4. Travaux de Bui [BUI, 99,02]

Afin de déterminer la proportion minimale de la pâte nécessaire pour fluidifier le béton, d'autres auteurs [BUI, 99,02], ont défini le paramètre qui correspond à la différence de diamètres entre celui du granulat couvert par de la pâte ($D_i + 2.e_i$) et celui du granulat (D_i), divisée par deux (figure 1.10). Les grains sont assimilés à des sphères.

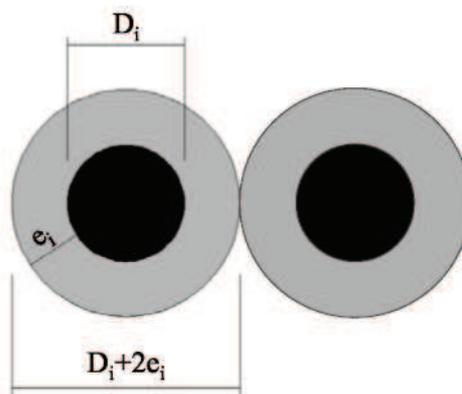


Figure 1.10: Épaisseur de pâte en excès autour d'un granulat dans une classe donnée.

Ayant la distribution granulaire en masse et donc en volume des squelettes granulaires des bétons et le diamètre moyen D_{mi} , de chaque classe granulaire i , on peut facilement remonter au diamètre moyen de tous les granulats D_M :

$$D_M = \frac{\sum(m_i \cdot D_{mi})}{\sum m_i} \quad [1.11]$$

Où m_i est le pourcentage en masse des granulats dans la classe i .

Ainsi pour un squelette granulaire de diamètre moyen D_M , le volume total de la pâte en excès V_{PE} est calculé comme suit :

$$V_{PE} = \frac{\pi}{6} (D_M + 2e_M)^3 - \frac{\pi}{6} (D_M)^3 \quad [1.12]$$

Où e_M est l'épaisseur moyenne de pâte en excès dans le béton. Ce paramètre peut être déduit en développant l'équation précédente (1.12) [BUI, 02] :

$$e_M = \frac{D_M}{2} \left(\sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_G}} - 1 \right) \quad [1.13]$$

Où V_G est le volume des granulats couverts par de la pâte en excès dans le béton.

1.6.4.5. Travaux d'El Barrak [BAR, 05]

Le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions de Toulouse en France (LMDC) lors de la thèse de doctorat de M. El Barrak, s'est basé sur la théorie de la <<pâte en excès>> pour quantifier le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplaçant. Il avait défini un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés tout en supposant que l'épaisseur de la pâte en excès, est proportionnelle à la taille du granulat (figure 1.11), en prenant en compte des paramètres, tels que le diamètre représentatif d'une classe et la compacité maximale de granulats polydispersés.

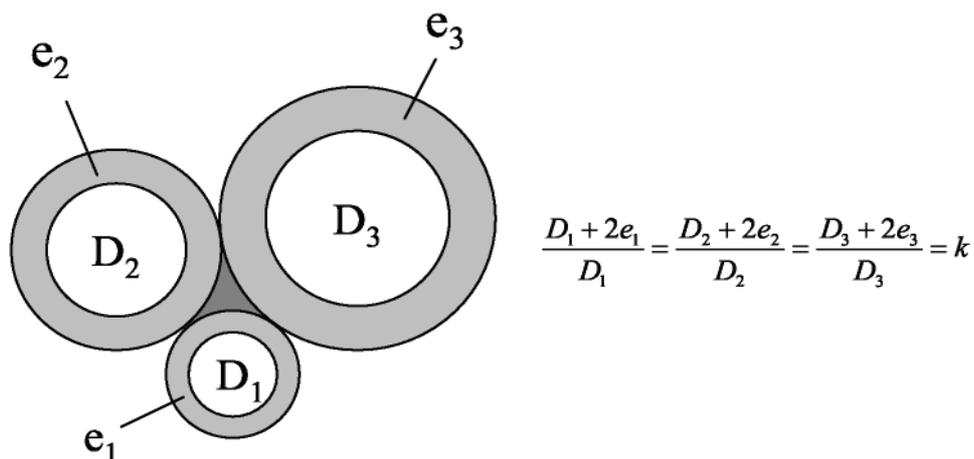


Figure 1.11 : Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre [BAR, 05].

La méthodologie proposée est intéressante pour composer un BAP, mais reste bien sûr à confirmer avec un autre domaine expérimental étudié et à différents types de matériaux utilisés.

1.6.4.6. Travaux de Hans et col. [HAN, 06]

Les travaux de Hans sur " l'influence de la teneur et la composition des agrégats sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants" ont montrés que cette influence peut être décrite par "la méthode de la pâte en excès".

La figure 1.12 montre l'influence de la distribution granulométrique notée k sur l'étalement et l'épaisseur de la pâte en excès pour un volume de pâte égale à 352 l/m^3 . Le béton noté "AB16" a donné la valeur maximale de l'épaisseur calculée de la pâte en excès ainsi que la valeur maximale de la valeur d'étalement.

Ce résultat est expliqué par l'auteur, par le fait que le béton "AB16" est composé d'un squelette granulaire qui offre une "distribution granulométrique" ayant la surface spécifique et la porosité la plus faible par rapport aux autres types de béton confectionnés dans l'étude, d'où l'importance du paramètre k .

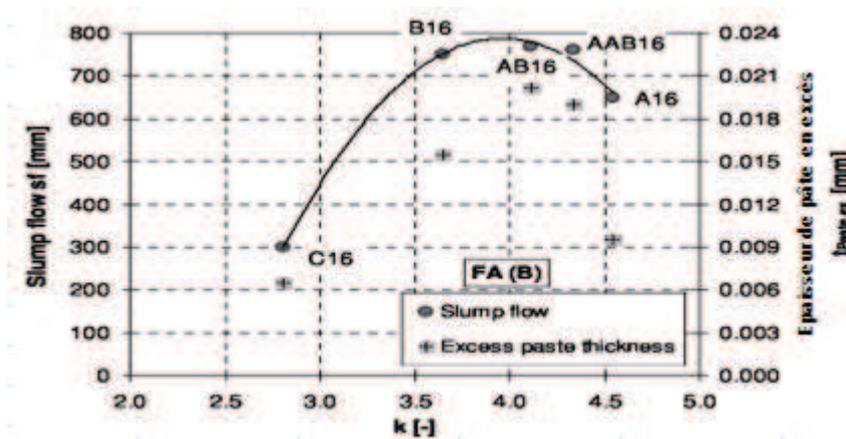


Figure 1.12 : Epaisseur de la pâte en excès et l'étalement en fonction de la distribution granulométrique [HAN, 06].

Aussi, en traçant les différentes propriétés du BAP (seuil de cisaillement, viscosité, étalement et temps d'écoulement t_e au V-funnel) en fonction de l'épaisseur de la pâte en excès (figure 1.13), Hans et al (2006) ont trouvé que l'épaisseur de la pâte en excès est un paramètre adapté pour décrire la consistance et le comportement des BAP.

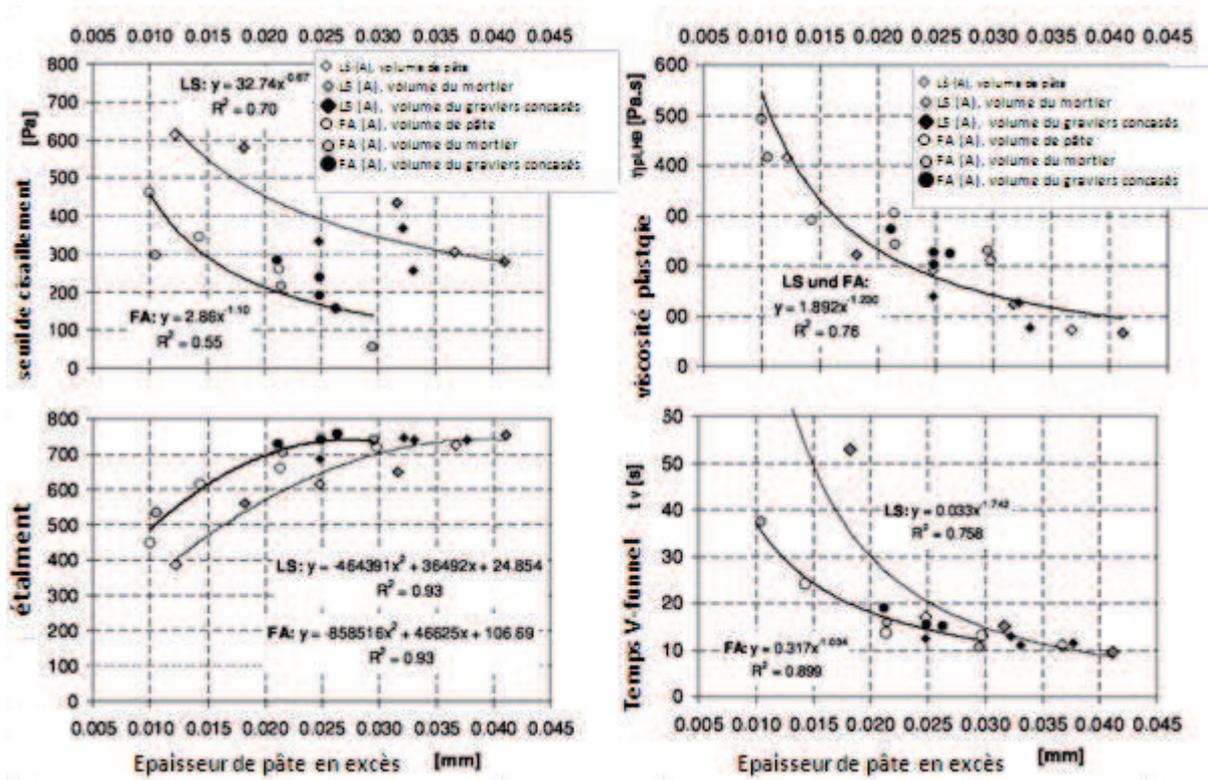


Figure 1.13 : Relation entre les propriétés du BAP et l'épaisseur de la pâte en excès [HAN, 06].

1.6.4.7. Travaux de Mebrouki [MEB, 10]

Dans le cadre d'un travail de thèse de doctorat, Mebrouki [MEB, 10] a validé la méthode proposée par le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions de Toulouse (LMDC), en utilisant des matériaux locaux.

A la différence d'El Barrak, Mebrouki a privilégié la confection des BAP sans avoir eu recours à l'utilisation des agents de viscosité, argumentant cela par la nécessité de valoriser les matériaux locaux, et de surcroît gagner en matière de coût.

De ce fait, la pâte de ciment élaborée à partir d'un plan de mélange basé sur un modèle polynomial traité par le logiciel "NemrodW", est composée de 4 constituants (ciment, eau, filler calcaire et superplastifiant).

Il a trouvé qu'en fixant le paramètre "eau" à 0.305 par exemple (figure 1.14), et en faisant varier les proportions volumiques des autres composants, le paramètre "Sp" est prépondérant: les réponses "étalement & écoulement" sont plus sensibles aux variations de ce paramètre qu'à celles du "ciment" ou du "filler".

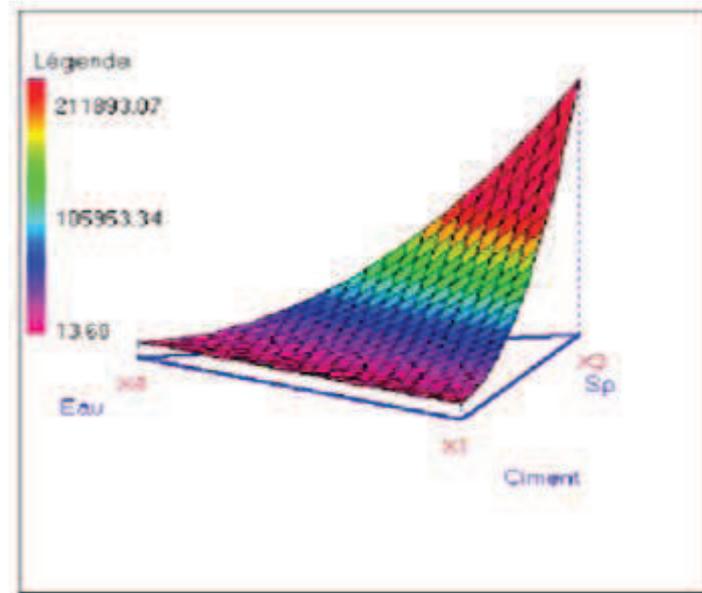


Figure 1.14 : Variation de la réponse – Etalement dans le plan : Ciment, Filler, Sp; composants fixes : Eau = 0.30500 [MEB, 08].

1.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons défini le béton autoplaçant, ses multiples propriétés, leur caractérisation, et les méthodes principales de sa formulation.

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, homogène, et qui se met en place sans vibration. Il présente des avantages techniques et socio-économiques pour les chantiers de construction par rapport au béton ordinaire traditionnel. Les principales propriétés d'ouvrabilité d'un BAP sont le remplissage (taux de remplissage et vitesse de déformation), la résistance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés et fortement ferrailés. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

Les résultats des essais expérimentaux sur des formulations de bétons autoplaçants et de bétons ordinaires, dans les domaines mécanique et physico-chimique ont montré qu'il y avait très peu de différences entre les deux types de béton. Le fluage des BAP semble légèrement supérieur à celui des BO, tandis que toutes les autres propriétés mécaniques (module d'élasticité, retrait) et de transfert (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlorés, absorption capillaire, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) peuvent être considérées comme équivalentes entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

La formulation des BAP est relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis entre stabilité et fluidité qui sont des propriétés apparemment contradictoires, nous avons détaillé les principales méthodes de formulation de ces bétons qui ont nécessité de longues années de recherches pour leurs mises en œuvre. A ce titre, leurs exploitations pour une utilisation avec des matériaux locaux sont devenues incontournables.

Par conséquent, nous allons passer par une caractérisation des différents constituants qui rentrent dans notre formulation en passant par le squelette granulaire ainsi que la pâte de ciment qui lui est associée.

Enfin, il nous reste à déterminer un paramètre d'interaction entre les granulats et la suspension de pâte de ciment dans le béton afin d'expliquer le rôle joué par la pâte de ciment dans le béton autoplaçant. La théorie de la pâte en excès permet donc de déterminer l'épaisseur de pâte couvrant la surface des granulats, pour remonter ensuite à la détermination des proportions de la pâte et du squelette granulaire.

CHAPITRE 2

ETUDE DE LA PATE CIMENTAIRE

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous essayerons d'arriver à la formulation d'une pâte cimentaire autoplaçante qui offrira un comportement optimal vis-à-vis de la stabilité et de l'écoulement en utilisant les matériaux de notre région avec les pourcentages adéquats de chaque constituant.

Nous mettrons en œuvre un programme expérimental où nous étudierons le rôle de chaque paramètre sur le comportement de la pâte cimentaire et nous délimiterons par la suite un domaine expérimental qui offrira un ensemble de mélanges homogènes et stables, aux propriétés d'écoulement mesurables.

Cependant, pour avoir le mélange de constituants possédant les réponses optimales, nous élaborerons un plan de mélanges qui permet d'avoir un nombre important d'informations (rôle des constituants, interactivité) avec un minimum d'essais.

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé est de type CEM II/A 42.5 (85 % de Clinker ; 3 % de Gypse ; 10 % de Pouzzolane et 2 % de Calcaire sableux). Il provient de la cimenterie de Béni-Saf (Wilaya d'Aïn Temouchent). Ses propriétés physiques et chimiques sont résumées dans les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1 : Propriétés chimiques du ciment [TAL, 09].

	Analyse chimique	Fluorescence X (%)
SiO ₂ (%)	27,97	25,64
Al ₂ O ₃ (%)	5,43	5,64
Fe ₂ O ₃ (%)	3,05	3,06
CaO (%)	56,37	58,01
MgO (%)	0,71	0,72
SO ₃ (%)	-	1,73
Na ₂ O (%)	0,30	0,71
K ₂ O (%)	0,43	0,51
CaO libre (%)	0,75	-
Résidus insolubles R.I.	9,11	-
Perte au feu	3,11	-
C ₃ S (%)	59,98	-
C ₂ S (%)	2,15	-
C ₃ A (%)	9,87	-
C ₄ AF (%)	9,31	-
C \bar{S} (%)	2,94	-

C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF sont déterminés à partir des équations de Bogue avec des corrections car le ciment utilisé contient de la chaux libre CaO_{libre} et des impuretés (résidus insolubles R.I.) [BUF, 07]:

$$C_3S = 4,071CaO - 7,6024 SiO_2 - 1,429 Fe_2O_3 - 6,7187 Al_2O_3$$

$$C_2S = -3,071CaO + 8,6024 SiO_2 + 1,0785 Fe_2O_3 + 5,068 Al_2O_3$$

$$C_2A = -1,692 Fe_2O_3 + 2,650 Al_2O_3$$

$$C_4AF = 3,0432 Fe_2O_3$$

$$C\bar{S} = 1,7 SO_3$$

Les corrections sont les suivantes :

$$CaO = CaO_{\text{tot}} - CaO_{\text{libre}} - 0,7SO_3$$

$$SiO_2 = SiO_2 - R.I.$$

Tableau 2.2 : Propriétés physico – mécaniques du ciment [TAL, 09].

Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	3598
Masse volumique apparente (kg/m^3)	0,98
Masse volumique absolue (kg/m^3)	3,071
Consistance (%)	25,30
Expansion à chaud (mm)	1,00
Début de prise (mn)	217
Fin de prise (mn)	280
Refus sur un tamis de $100\mu m$ (%)	1,00
Résistance à la flexion	
02 jours (bar)	26,91
07 jours (bar)	63,18
28 jours (bar)	78,39
Résistance à la compression	
02 jours (bar)	123,15
07 jours (bar)	343,75
28 jours (bar)	453,12

Au vue de ces résultats, le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ce type de ciment, peut être utilisable pour divers types de travaux (béton armé fortement sollicité, béton précontraint, etc...).

2.2.2. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires proviennent de la carrière d'El Maleh situé à 12 km d'Aïn Temouchent. La roche est de nature calcaire dolomitique. Sa composition chimique est résumée dans le tableau 2.3:

Tableau 2.3 : Propriétés chimiques des fillers calcaires [TAL, 09].

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CO ₃	Anhydrite carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4,73	33,81	18,59	0,49	93,64	41,2	0,49	41,69
Max %	5,64	34,09	20,06	0,54	96,97	42,67	0,56	43,23
Moy %	5,18	33,95	19,32	0,51	95,30	41,93	0,52	42,46

Les fillers calcaires présentent une densité absolue = 2,72 et une surface massique égale à 2900 cm²/g.

2.2.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un Plastifiant/Réducteur d'eau de nouvelle génération à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide brun. Il est désigné sous l'appellation « PLASTOCRETE TECHNO 7 ». Ses propriétés physiques se résument dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Caractéristiques de l'adjuvant « PLASTOCRETE TECHNO 7 ».

Etat	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	1,12 ± 0,03
pH à 20° C	4,7 ± 1,0

2.2.4. Eau

L'eau utilisée est celui de la commune de Chetouane. Ses caractéristiques chimiques sont résumées dans le tableau 2.5 (Boukli Hacène M.A., 2010).

Tableau 2.5 : Caractéristiques chimiques de l'eau [BOU, 10].

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	PH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

2.3. Méthode de préparation de la pâte de ciment

Le rôle de l'expérimentateur ainsi que la démarche expérimentale de l'élaboration de la pâte de ciment sont deux éléments importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière. La pâte de ciment est confectionnée à partir des quatre composantes (ciment, filler, plastifiant, eau) selon la méthode décrite dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Procédure de malaxage des pâtes de ciment [AIT, 01].

Instant	Etape	Durée du malaxage
-	Ajout E et P	
T_0	Ajout du C + F	150 s
$T_0 + 150$	Arrêt et raclage du bol	15 s
$T_0 + 165$	Reprise du malaxage	60 s
$T_0 + 225$	Fin du malaxage	

2.4. Matériels et méthode d'essais

2.4.1. Essais d'étalement au mini-cône

Un test d'ouvrabilité a été mis en œuvre par le programme LMDC, il s'agit du mini-cône. Ce matériel (figure 2.1) dispose des dimensions proportionnelles à celles du cône d'Abrams [KAN, 80]. Il permet de mesurer le diamètre d'étalement d'un volume de pâte de ciment sur une plaque horizontale. Cet essai est facile à mettre en œuvre, il est effectué directement après la fin du malaxage de la pâte de ciment. Le volume de pâte nécessaire pour cet essai est inférieur à 40 ml.

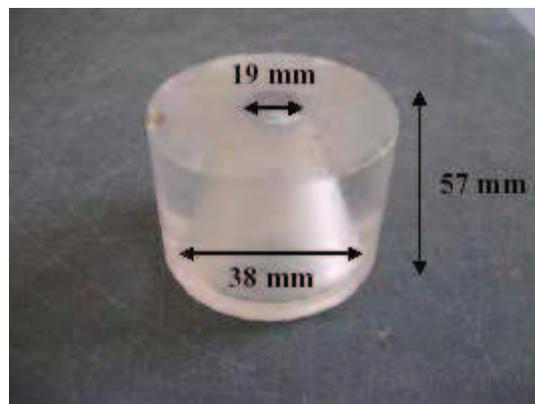


Figure 2.1 : mini-cône pour la mesure d'étalement.

2.4.2. Essai au cône de Marsh

Le principe de l'essai consiste à enregistrer le temps requis pour faire couler un volume donné de pâte à travers une buse. Le volume initial de la pâte, versé dans le cône est de 150 ml (NF P 18-358) (figure 2.2). Le temps d'écoulement est lié à la fluidité de la pâte. Plus le temps d'écoulement est long, plus la fluidité est inférieure.

Les travaux de (Sonebi et col., 2008) [SON, 08] de (Toutou et col., 2005) [TOU, 05] et de (Zerbino et col., 2009) [ZER, 09] ont montré une relation entre le temps d'écoulement mesuré au cône de Marsh et la viscosité selon la relation suivante :

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{T_V}{2.95}\right)}{0.013} \quad [2.1]$$

Avec : μ : la viscosité.

T_V : le temps d'écoulement mesuré au cône de Marsh.

D'autres études ont montré que le cône de Marsh pourrait être utilisé comme un viscosimètre [LER, 05] selon la relation suivante :

$$Q = \frac{\pi}{8\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) r^4 \quad [2.2]$$

Avec : Q : le débit de sortie.

P : la pression

μ : la viscosité.

r : rayon de l'orifice du cône.

ρ : Masse volumique du coulis.

g : Force de gravité



Figure 2.2 : Essai du cône de Marsh.

2.5. Programme expérimental

Pour les différentes confections, une large gamme de valeurs des constituants a été considérée. Le liant (L) sera constitué de ciment et de filler (C+F) avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 40%. Le dosage du plastifiant (P) est compris dans la plage du dosage recommandé par le fabricant (de 0,3 % à 1,0 %). La pâte de ciment est élaborée en passant successivement du mélange liquide composé de deux constituants (E+P) au mélange complet à quatre constituants (E+P+C+F) comme présenté dans la figure 2.3.

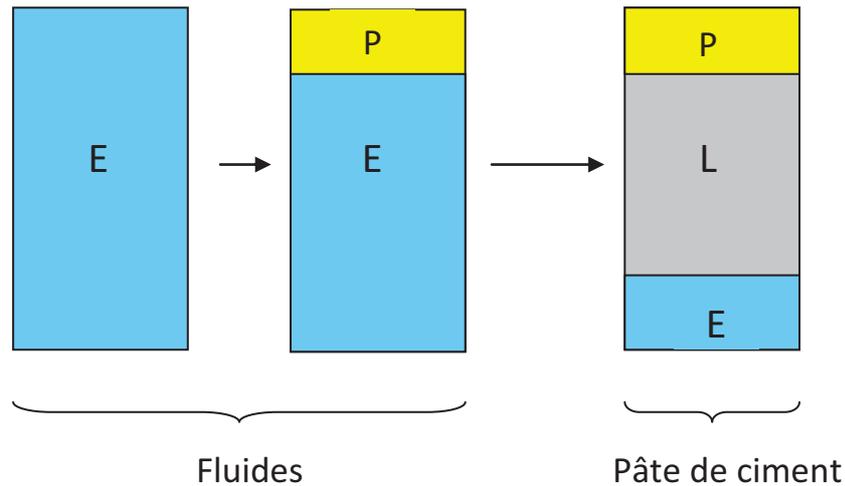


Figure 2.3 : Confection de la pâte cimentaire.

Les compositions des différentes pâtes de ciment sont présentées dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7 : Compositions des pâtes confectionnées.

Ciment (%)	90	80	70	60
Filler (%)	10	20	30	40
E/L	0,30 – 0,35 – 0,40 – 0,43 – 0,48			
Plastifiant (%)	0,3 – 0,4 – 0,45 – 0,5 – 0,6 – 0,7			

A partir des essais effectués au laboratoire, nous avons remarqué que le plastifiant avait une incidence sur les caractéristiques rhéologiques de la pâte surtout lorsque son dosage variait entre 0,40% et 0,50%. C'est pour cela que nous jugé utile d'étudier le comportement de la pâte avec un dosage de plastifiant égal à 0,45%. Cependant, nous nous sommes limités à un dosage de 0,7%, au delà duquel, le plastifiant avait un effet négatif sur le comportement de la pâte vis-à-vis de l'étalement, de l'écoulement et de la stabilité.

Concernant le rapport E/L, nous avons progressé par un pas de 0,05, tout en commençant par une valeur du rapport égal à 0,30, en vue de connaître l'aspect de la pâte jusqu'à arriver à un dosage égale à 0,48.

2.5.1. Consistance de la pâte de ciment

C'est par l'aspect visuel et l'analyse des résultats des essais qu'on peut définir trois types de consistance de pâte de ciment qui sont : fluide, plastique et ferme.

- **Un aspect fluide** est noté lorsque le mélange présente les caractéristiques d'un corps fluide, homogène et qui se remet en place très vite après le passage de la truelle.

- **Un aspect plastique** est noté lorsque le mélange présente les caractéristiques d'un corps moins fluide, homogène et qui se remet en place lentement après le passage de la truelle.
- **Un aspect ferme** est noté lorsque le mélange ne s'écoule pas d'une façon continue (mais d'un seul bloc). Le passage de la truelle est difficile à cause de la forte consistance de ce type de mélange.

2.5.2. Résultats et discussion

Afin de comprendre le rôle de chaque constituant sur le comportement du mélange et sur ses propriétés rhéologiques, il été nécessaire de faire varier les principaux constituants de la pâte dans les fourchettes préconisées (voir tableau 2.7). Les résultats concernant les aspects visuels des différents mélanges sont consignés dans le tableau de l'annexe 1.

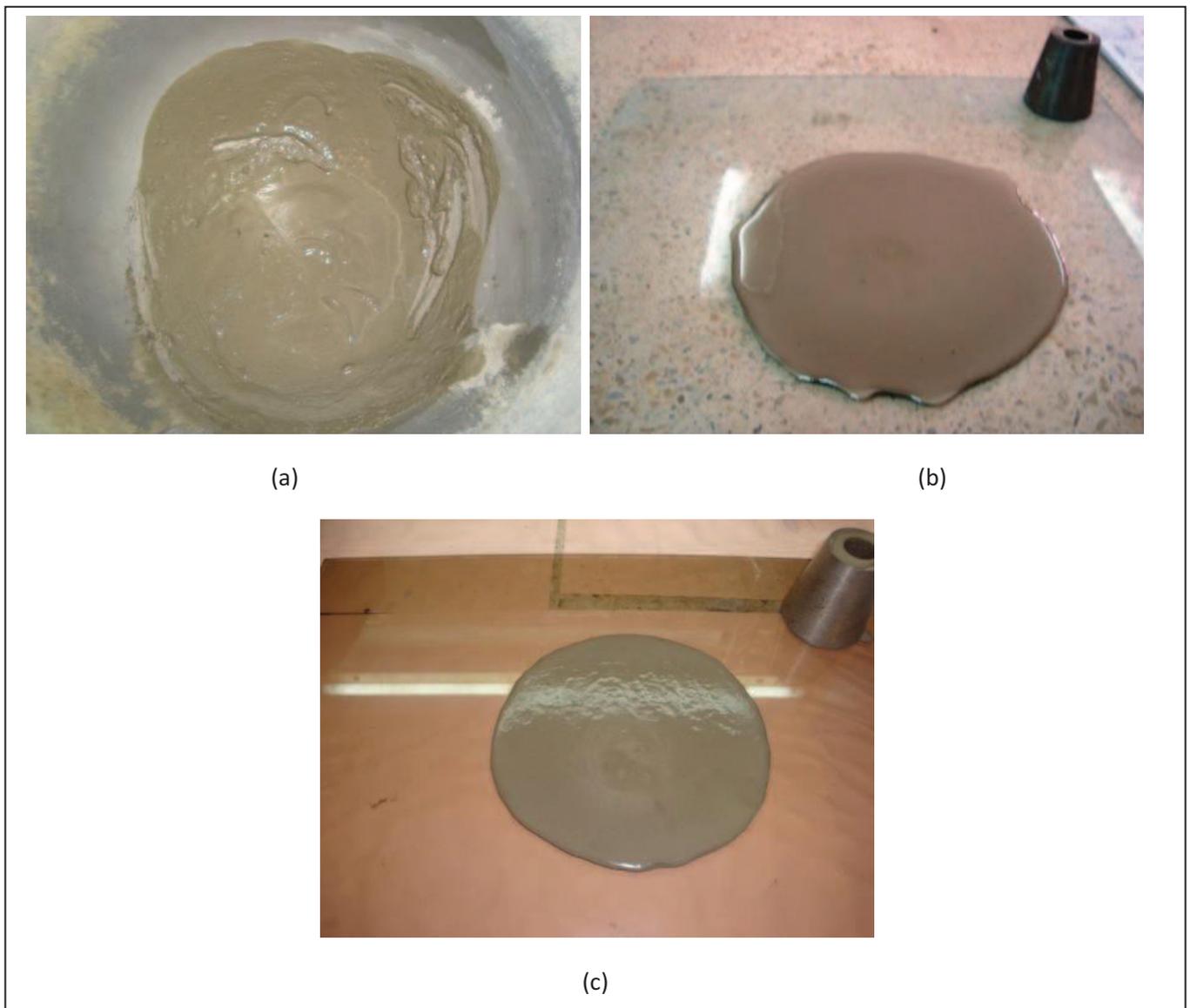


Figure 2.4 : Aspects visuels des pâtes confectionnées.

Les aspects visuels ont fait ressortir l'influence du dosage en fillers sur les deux réponses : étalement et écoulement. A dosage constant en plastifiant P et en eau E, nous avons constaté une augmentation du diamètre d'étalement et une diminution de la viscosité suivant une augmentation du dosage en filler, ce qui a montré que le filler calcaire utilisé a une faible demande en plastifiant (surface spécifique plus faible que celle du ciment substitué).

Parmi les différentes compositions des pâtes de ciment formulées, il y a celles qui ont présentées un aspect plastique où l'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh n'ont pas pu être mesurés, comme par exemple la pâte de ciment de rapport $E/L=0,35$, un taux de filler substitué de 10% et un dosage en plastifiant $P = 0,5\%$ (figure 2.4a).

En revanche, la pâte de ciment composée avec un rapport $E/L= 0,43$, un taux de filler substitué de 40% et un dosage en $P= 0,7\%$ s'écoulait ; mais une ségrégation était visible sur le pourtour de la galette (figure 2.4b).

Les pâtes homogènes et parfaitement formées, sont retenues pour les mesures d'étalement et d'écoulement au cône de Marsh, comme le cas du mélange où la teneur en filler était égale à 30%, E/L égal à 0,43 et le pourcentage du plastifiant égal à 0,5% (figure 2.4.c).

Ainsi, un taux de 0,3% du plastifiant utilisé n'avait pas d'effet sur le comportement du mélange, alors qu'un taux supérieur à 0,6% causait des problèmes de ségrégation. Nous avons aussi noté qu'un rapport E/L minimum de 0,43 était nécessaire pour obtenir des pâtes autoplaçantes.

A cet effet, un dosage massique du plastifiant par rapport à la masse du liant variant de 0,4 à 0,6% et un rapport E/L variant de 0,43 à 0,48 étaient nécessaires pour obtenir des pâtes qui répondaient aux critères recherchés vis à vis de la fluidité et de la stabilité. Le domaine expérimental de notre étude est la zone hachurée représentée sur la figure 2.5.

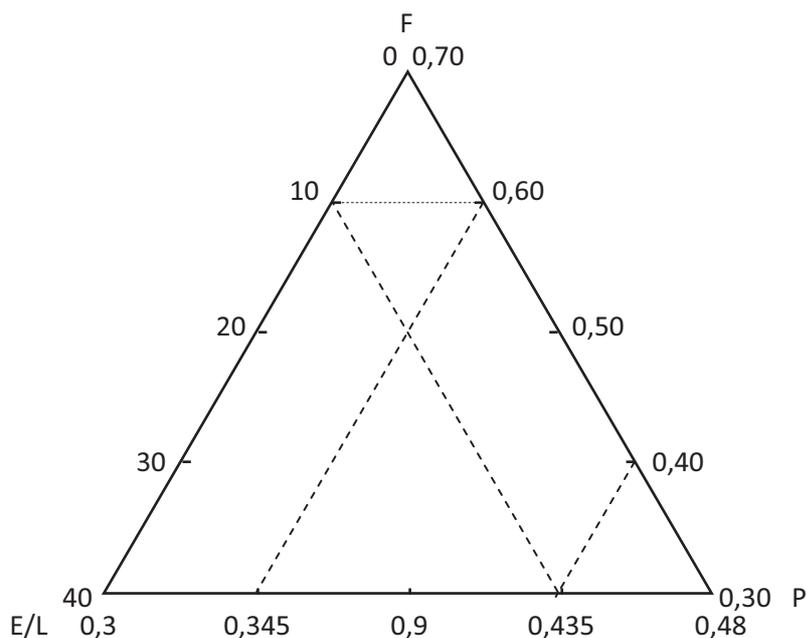


Figure 2.5 : Domaine expérimental.

Cependant, cette démarche expérimentale n'offre pas la possibilité de juger de l'importance d'un paramètre par rapport à un autre, ou plutôt de classer les paramètres par niveau d'influence sur une réponse donnée. Ainsi, nous avons besoin d'une stratégie expérimentale, capable de donner le maximum d'informations, en utilisant un nombre réaliste d'expériences. La solution que nous avons adoptée, est de définir un plan de mélanges, c'est à dire de déterminer, grâce à la méthodologie de la recherche expérimentale, une liste d'expériences dont la réalisation permet de mettre en évidence le rôle de tous les constituants, et de détecter des interactivités [BAR, 05].

Nous prendrons en compte un autre paramètre qui est la concentration volumique en solides (Γ) des pâtes de ciment. Elle prend en considération les suspensions solides issues du ciment, du filler et du plastifiant.

2.6. Analyse par plan de mélanges

Les expériences de mélange représentent une classe particulière d'expériences de surface de réponse dans lesquelles le produit analysé est constitué de plusieurs composantes ou éléments. Les plans de telles expériences s'avèrent utiles car, pour diverses industries, les activités de conception et de développement nécessitent des formulations ou des mélanges. Dans de tels cas, la réponse est fonction des proportions des différents ingrédients constitutifs du mélange.

Dans les plans de mélanges, la réponse (la qualité ou performance du produit mesurée selon certains critères) varie en fonction de la quantité de chaque facteur (variable d'entrée). Les quantités des composantes, mesurées en volume dans notre cas, s'additionnent pour avoir l'unité, ce qui veut dire qu'ils ne sont pas indépendants les uns des autres.

Le plan de mélanges nécessite d'abord la détermination d'un domaine expérimental, où l'on définit à chacun des paramètres une plage de variation, tout en s'assurant que toute combinaison possible des dosages appartenant chacun à sa plage de variation, aboutira à un mélange dont les propriétés rhéologiques sont mesurables.

2.6.1. Application des plans de mélanges pour la formulation de la pâte de ciment

Le programme expérimental a permis de délimiter un domaine expérimental où les mélanges sans réponses sont évités. Notre domaine expérimental se présente comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} 10 \% \leq F \leq 40 \% \\ 0,4 \% \leq P \leq 0,6 \% \\ 0,43 \leq \frac{E}{L} \leq 0,48 \\ 0,41 \leq \Gamma \leq 0,43 \end{array} \right. \quad [2.3]$$

Pour le traitement d'un plan de mélanges, nous transformons les contraintes relationnelles que nous avons définies, en équations arithmétiques. C, F, P et E sont respectivement les proportions volumiques des constituants : ciment, filler, plastifiant et eau.

$$\begin{aligned}
C + F + P + E &= 1 \\
-0,1129 C + F &\geq 0 \\
0,4516 C - F &\geq 0 \\
-0,01096 C - 0,0097 F + P &\geq 0 \quad [2.4] \\
0,0164 C + 0,0145 F - P &\geq 0 \\
0,59 C + 0,59 F - 0,11 P - 0,41 E &\geq 0 \\
-0,57 C - 0,57 F + 0,13 P + 0,43 E &\geq 0
\end{aligned}$$

Nous traitons l'exemple de l'inéquation 4 du système pour illustrer l'obtention de ces inéquations.

$$\text{Plastifiant} \geq 0,4 \% \Leftrightarrow \frac{M_P}{M_C + M_F} \geq 0,004$$

$$\rightarrow M_P - 0,004(M_C + M_F) \geq 0$$

$$\rightarrow M_{VP} \cdot P - 0,004(M_{VC} \cdot C + M_{VF} \cdot F) \geq 0$$

On remplace maintenant les masses volumiques par leurs valeurs respectives :

$$\rightarrow 1120 \cdot P - 0,004(3071 \cdot C + 2720 \cdot F) \geq 0$$

$$\rightarrow 1120 \cdot P - 12,284 C - 10,88 F \geq 0$$

En divisant sur 1120 on obtient l'inéquation 4 :

$$\rightarrow -0,01096 C - 0,0097 F + P \geq 0$$

Le reste des inéquations du système sont obtenues en suivant le même raisonnement.

La résolution de ce système (équation [2.4]) engendre des solutions illustrées sous forme de contraintes inférieures et contraintes supérieures qui délimite le domaine expérimental.

Tableau 2.8: Contraintes implicites des facteurs.

Constituant	Notation	Contrainte inférieure implicite	Contrainte supérieure implicite
Ciment	C	0,2811	0,3851
Filler	F	0,041	0,1346
Plastifiant	P	0,0043	0,007
Eau	E	0,5653	0,5869

Pour un plan de mélanges à 4 facteurs, le domaine d'étude constitué est un espace à 4 dimensions. Les points candidats pour le calcul du modèle et la détermination de la matrice d'expériences forment ce qu'on appelle un hyper polyèdre. Ces points sont situés sur les sommets, aux milieux des arêtes, aux milieux des faces et au centre de gravité [MEB, 10].

Compte tenu de la complexité de la résolution du problème, une résolution classique serait quasiment impossible, on utilisera le logiciel de traitement de plan de mélanges "STATISTICA", développé par la société (StatSoft) pour le résoudre.

Le Tableau 2.9 donne les informations nécessaires à la construction de la matrice d'expériences, générées par le logiciel de traitement.

Tableau 2.9 : Points de construction de la matrice d'expériences.

Points	Nombre de points
de sommets	8
d'arêtes	12
Nombre de faces de dimension 2	6
Centre de Gravité	1
Points tests internes	11
Total	38

La matrice d'expérience générée par le logiciel est présentée dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10 : Matrice d'expériences de l'étude.

N° Mélange	C (Ciment)		F (Filler)		P (Plastifiant)		E (Eau)	
	Proportions volumiques	Proportions massiques (g)						
1	0,38510	1,18264	0,04100	0,1115	0,00430	0,0048	0,56960	0,56960
2	0,28110	0,86326	0,13460	0,3661	0,00430	0,0048	0,58000	0,58000
3	0,38510	1,18264	0,04100	0,1115	0,00700	0,0078	0,56690	0,56690
4	0,28110	0,86326	0,13460	0,3661	0,00700	0,0078	0,57730	0,57730
5	0,38510	1,18264	0,04530	0,1232	0,00430	0,0048	0,56530	0,56530
6	0,29580	0,90840	0,13460	0,3661	0,00430	0,0048	0,56530	0,56530
7	0,38510	1,18264	0,04260	0,1159	0,00700	0,0078	0,56530	0,56530
8	0,29310	0,90011	0,13460	0,3661	0,00700	0,0078	0,56530	0,56530
9	0,36780	1,12951	0,04100	0,1115	0,00430	0,0048	0,58690	0,58690
10	0,28110	0,86326	0,12770	0,3473	0,00430	0,0048	0,58690	0,58690
11	0,36510	1,12122	0,04100	0,1115	0,00700	0,0078	0,58690	0,58690
12	0,28110	0,86326	0,12500	0,3400	0,00700	0,0078	0,58690	0,58690
13	0,28110	0,86326	0,13460	0,3661	0,00565	0,0063	0,57865	0,57865
14	0,28110	0,86326	0,13115	0,3567	0,00430	0,0048	0,58345	0,58345
15	0,28110	0,86326	0,12980	0,3531	0,00700	0,0078	0,58210	0,58210
16	0,28110	0,86326	0,12635	0,3437	0,00565	0,0063	0,58690	0,58690
17	0,38510	1,18264	0,04100	0,1115	0,00565	0,0063	0,56825	0,56825
18	0,38510	1,18264	0,04315	0,1174	0,00430	0,0048	0,56745	0,56745

19	0,38510	1,18264	0,04180	0,1137	0,00700	0,0078	0,56610	0,56610
20	0,38510	1,18264	0,04395	0,1195	0,00565	0,0063	0,56530	0,56530
21	0,37645	1,15608	0,04100	0,1115	0,00430	0,0048	0,57825	0,57825
22	0,37510	1,15193	0,04100	0,1115	0,00700	0,0078	0,57690	0,57690
23	0,36645	1,12537	0,04100	0,1115	0,00565	0,0063	0,58690	0,58690
24	0,28845	0,88583	0,13460	0,3661	0,00430	0,0048	0,57265	0,57265
25	0,28710	0,88168	0,13460	0,3661	0,00700	0,0078	0,57130	0,57130
26	0,29445	0,90426	0,13460	0,3661	0,00565	0,0063	0,56530	0,56530
27	0,34045	1,04552	0,08995	0,2447	0,00430	0,0048	0,56530	0,56530
28	0,32445	0,99639	0,08435	0,2294	0,00430	0,0048	0,58690	0,58690
29	0,33910	1,04138	0,08860	0,2410	0,00700	0,0078	0,56530	0,56530
30	0,32310	0,99224	0,08300	0,2258	0,00700	0,0078	0,58690	0,58690
31	0,28110	0,86326	0,13047	0,3549	0,00565	0,0063	0,58277	0,58277
32	0,38510	1,18264	0,04247	0,1155	0,00565	0,0063	0,56677	0,56677
33	0,37577	1,15401	0,04100	0,1115	0,00565	0,0063	0,57757	0,57757
34	0,28777	0,88376	0,13460	0,3661	0,00565	0,0063	0,57197	0,57197
35	0,33266	1,02162	0,08736	0,2376	0,00430	0,0048	0,57566	0,57566
36	0,33176	1,01886	0,08646	0,2352	0,00700	0,0078	0,57476	0,57476
37	0,33977	1,04345	0,08927	0,2428	0,00565	0,0063	0,56530	0,56530
38	0,32377	0,99431	0,08367	0,2276	0,00565	0,0063	0,58690	0,58690

Dans ce tableau, nous avons les proportions volumiques et massiques de chaque constituant pour les différentes compositions de pâte de ciment. Notre travail consiste à mesurer les réponses relatives à la viscosité mesurée par le temps d'écoulement au cône de Marsh et le diamètre d'étalement mesuré au mini-cône.

La conversion de ces proportions volumiques en proportions massiques aboutira à des valeurs très proches des différents composants pour certaines expériences. Afin d'éviter la répétition des essais, nous éviterons les compositions surlignées dans le tableau 2.10.

Nous aurons à confectionner donc 18 compositions pour lesquelles, nous mesurerons l'étalement au mini-cône ainsi que le temps d'écoulement. Le tableau 2.11 présente les résultats mesurés des réponses pour chaque point.

Tableau 2.11 : Valeurs expérimentales des réponses de la matrice d'expériences.

N° Mélange	C (Ciment)	F (Filler)	P (Plastifiant)	E (Eau)	Etallement (cm)	Temps d'écoulement (s)
1	0,295800	0,134600	0,004300	0,565300	14,1	25,65
2	0,293100	0,134600	0,007000	0,565300	15,5	20,4
3	0,385100	0,043150	0,004300	0,567450	12	42,16
4	0,385100	0,041800	0,007000	0,566100	13,7	25,69
5	0,376450	0,041000	0,004300	0,578250	12,5	30
6	0,375100	0,041000	0,007000	0,576900	14	20,69
7	0,288450	0,134600	0,004300	0,572650	14,8	18,02
8	0,287100	0,134600	0,007000	0,571300	16,3	15,39
9	0,294450	0,134600	0,005650	0,565300	15,3	22,27
10	0,340450	0,089950	0,004300	0,565300	12,9	30,16
11	0,339100	0,088600	0,007000	0,565300	14,3	23,03
12	0,385100	0,042475	0,005650	0,566775	12,7	30,01
13	0,375775	0,041000	0,005650	0,577575	14,1	23,25
14	0,287775	0,134600	0,005650	0,571975	15,7	17,03
15	0,332667	0,087367	0,004300	0,575667	13	23,03
16	0,331767	0,086467	0,007000	0,574767	14,8	18,25
17	0,339775	0,089275	0,005650	0,565300	14,2	27,25
18	0,323775	0,083675	0,005650	0,586900	15,5	12,9

Ayant les réponses pour les différentes compositions de pâte de ciment de notre domaine expérimental, il nous reste à trouver la pâte qui doit présenter les propriétés rhéologiques et d'ouvrabilité convenables pour satisfaire au critère de la pâte autoplaçante en donnant des réponses optimales, c'est l'objectif même de l'analyse par plan de mélanges.

2.6.2. Pâte autoplaçante optimale

Le logiciel STATISTICA offre la possibilité d'optimiser plusieurs réponses du mélange simultanément en cherchant mathématiquement la formulation pour laquelle le modèle postulé donne une réponse qui entre dans l'intervalle des valeurs optimales exigées par l'opérateur. Le logiciel doit se baser sur un degré de satisfaction en fonction de chaque réponse étudiée en faisant intervenir une pondération par la fonction de désirabilité.

2.6.2.1. Définition de la pondération pour la fonction de désirabilité

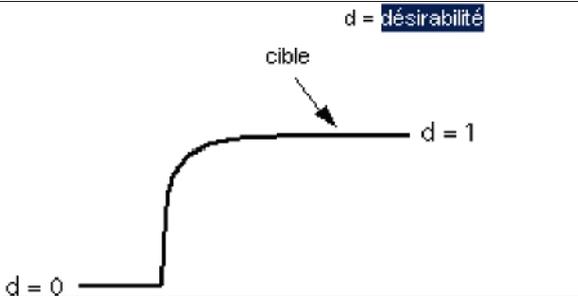
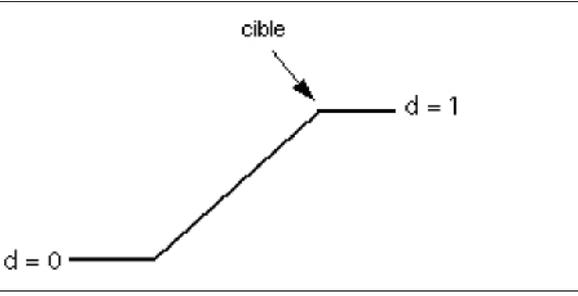
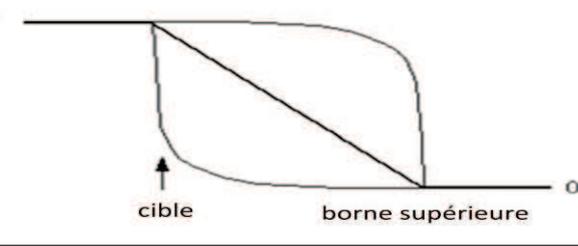
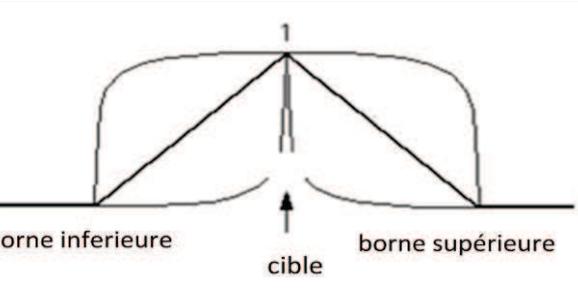
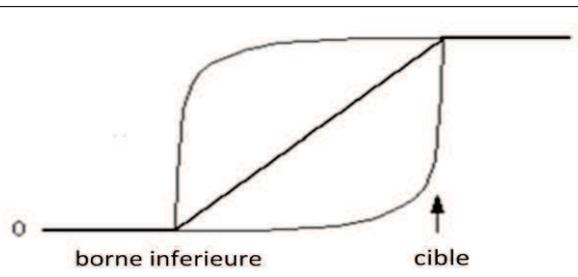
Dans l'approche de l'optimisation par STATISTICA, chaque valeur de réponse est transformée à l'aide d'une fonction de désirabilité spécifique. La pondération définit la forme de la fonction de désirabilité pour chaque réponse. On pourra sélectionner, pour chaque réponse, une pondération (comprise entre 0 et 1) afin de mettre ou non la cible en valeur.

Une pondération :

- Inférieure à 1 (le minimum est 0,1) met la cible moins en valeur,
- Egale à 1 donne une importance égale à la cible et aux bornes.

Le tableau 2.12, montre comment la forme de la fonction de désirabilité change lorsque l'objectif est de maximiser la réponse et que la pondération change :

Tableau 2.12: Fonction de désirabilité en fonction de la réponse.

Pondération	Fonction de désirabilité
<p>Une pondération inférieure à 1 met la cible moins en valeur. Une valeur de réponse éloignée de la cible peut avoir une désirabilité élevée.</p>	
<p>Une pondération égale à 1 donne une importance égale à la cible et aux bornes. La désirabilité pour une réponse augmente de manière linéaire.</p>	
<p>Minimiser la réponse en dessous de la cible, la désirabilité de la réponse est de 1 ; au-dessus de la borne supérieure, elle est de 0.</p>	
<p>Cibler la réponse en dessous de la borne inférieure, la désirabilité de la réponse est 0. Elle est de 1 au niveau de la cible ; au-dessus de la borne supérieure, elle est de 0.</p>	
<p>Maximiser la réponse en dessous de la borne inférieure, la désirabilité de la réponse est de 0 ; elle est de 1 au-dessus de la cible.</p>	

La fonction de désirabilité globale D_g à maximiser est la moyenne géométrique des désirabilités d_i des m réponses d'une étude.

$$D_g = \sqrt[m]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m} \quad [2.5]$$

Pour le cas de notre étude, et pour concilier les exigences de fluidité, de viscosité, et d'homogénéité (d'après l'expérience), certains auteurs [BAR, 05] [MEB, 10] ont définis les fonctions de désirabilité à l'échelle de la pâte.

2.6.2.1.1. Réponse Etalement (Etal)

La réponse Etalement est parfaitement satisfaisante au-dessus de la valeur de 16 cm, mais elle a une tolérance linéaire jusqu'à la valeur minimale de 14 cm (figure 2.6) [BAR, 05].

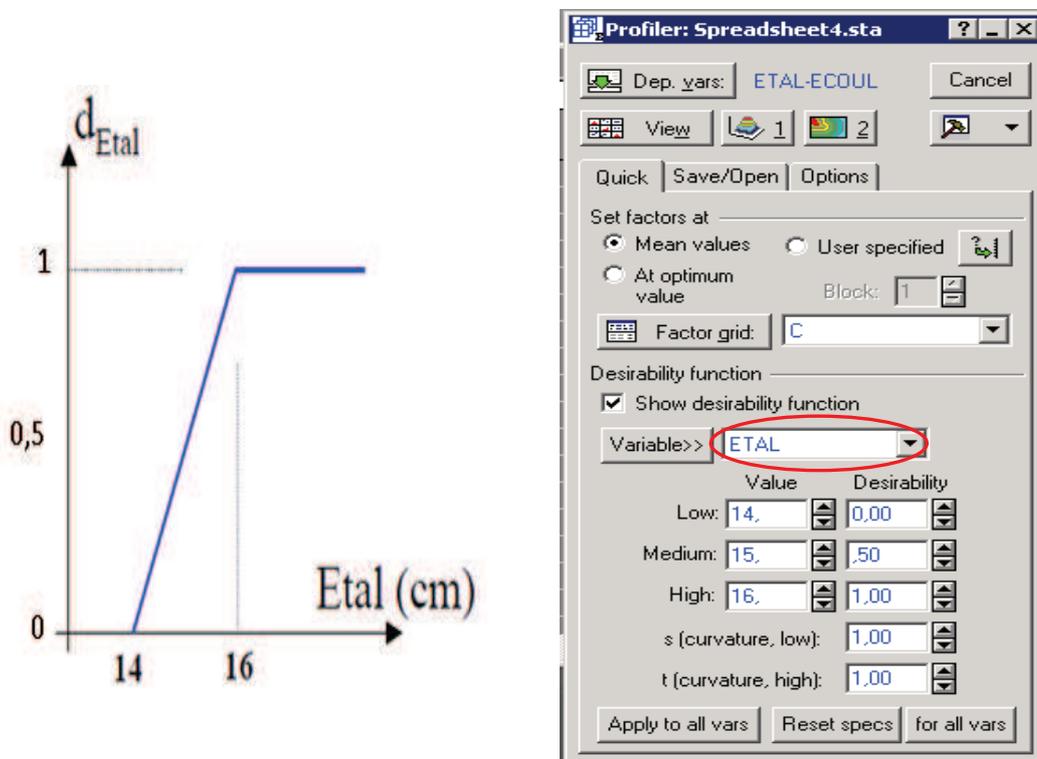


Figure 2.6 : Forme de la fonction de désirabilité pour la réponse étalement & application sur le logiciel STATISTICA.

2.6.2.1.2. Réponse écoulement (Ecoule)

C'est une forme de désirabilité bilatérale avec tolérance, dans laquelle les valeurs minimale et maximale sont respectivement 15 et 20 s, la fonction de désirabilité de cette réponse convergerait vers 1 lorsque le temps d'écoulement au cône de Marsh sera entre 17 et 18 s (figure 2.7) [MEB, 10].

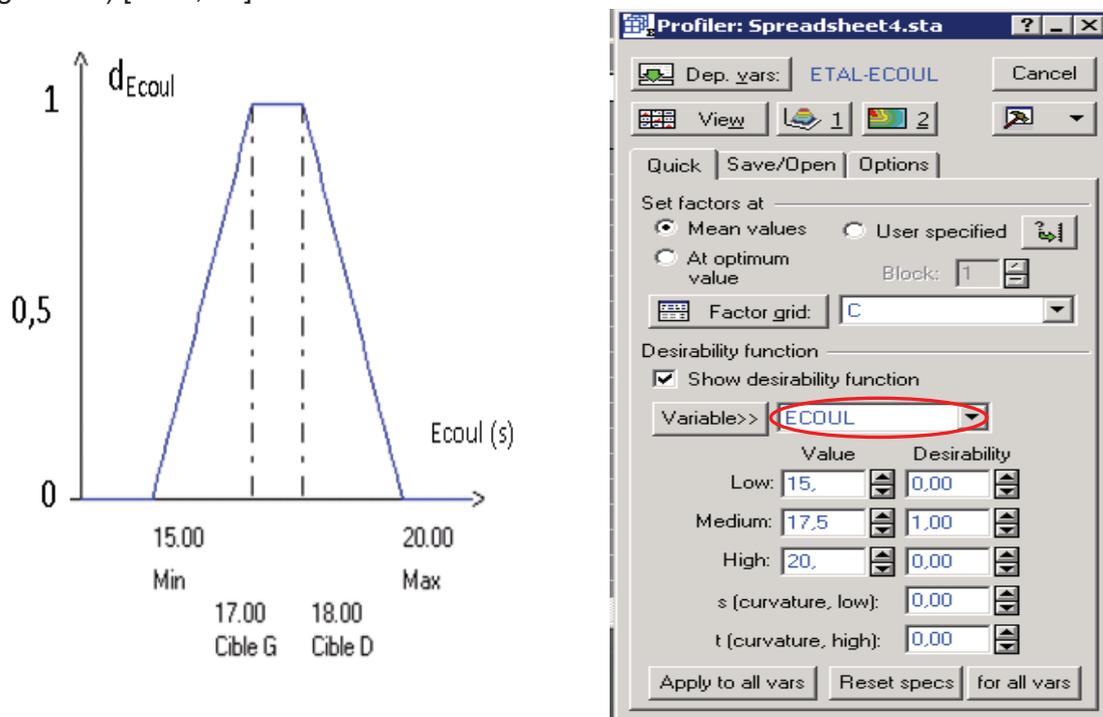


Figure 2.7 : Forme de la fonction de désirabilité pour la réponse écoulement & application sur le logiciel STATISTICA.

La formulation de la pâte de ciment autoplaçante qui répond à une désirabilité globale D_g égale à 1, générée par le logiciel est présentée dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13 : Composition du mélange optimal.

Constituant	C	F	P	E
Proportion volumique	0,28779	0,13446	0,00633	0,57142
Dosage (g/l)	883,80	365,73	7,08	571,42

Nous allons confectionner la pâte de ciment générée par le logiciel selon la même procédure utilisée pour les autres pâtes de ciment (Tableau 2.6), pour comparer les valeurs des réponses trouvés avec ceux prédit par le modèle. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14 : Réponses du modèle et de l'expérience.

Valeurs	Etalement (cm)	Ecoulement (s)
Cible	≥ 16	15 – 20
Modèle	16,02	16,49
expérimental	15,8	17,38

Nous avons trouvé que les valeurs obtenus expérimentalement entrent dans le domaine de désirabilité, en plus l'écart des valeurs avec le modèle reste faible.

2.6.3. Interprétation des résultats

Nous avons réalisé une analyse d'un plan de mélanges à quatre constituants, la variation des différentes réponses en fonction du dosage des différents constituants est représentée par le logiciel STATISTICA par des plans de coupe représentés par des triangles équilatéraux (figure 2.8) dont les sommets prennent les valeurs maximales d'un facteur. Le quatrième facteur sera fixé et considéré comme étant hors plan.

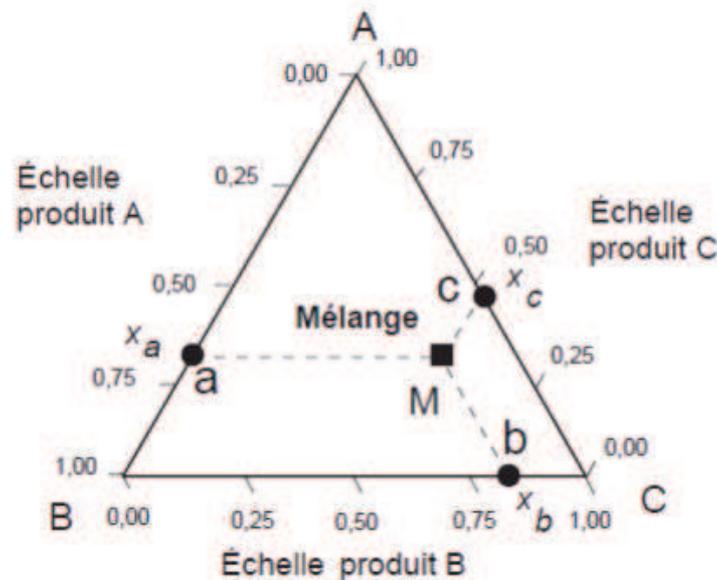


Figure 2.8 : Représentation des mélanges à l'aide d'un triangle équilatéral.

L'information que nous recherchons dans la représentation ternaire est le sens de l'évolution d'une réponse. Le constituant prépondérant est facilement repéré dans le diagramme ainsi que son influence sur la réponse dans cette coupe.

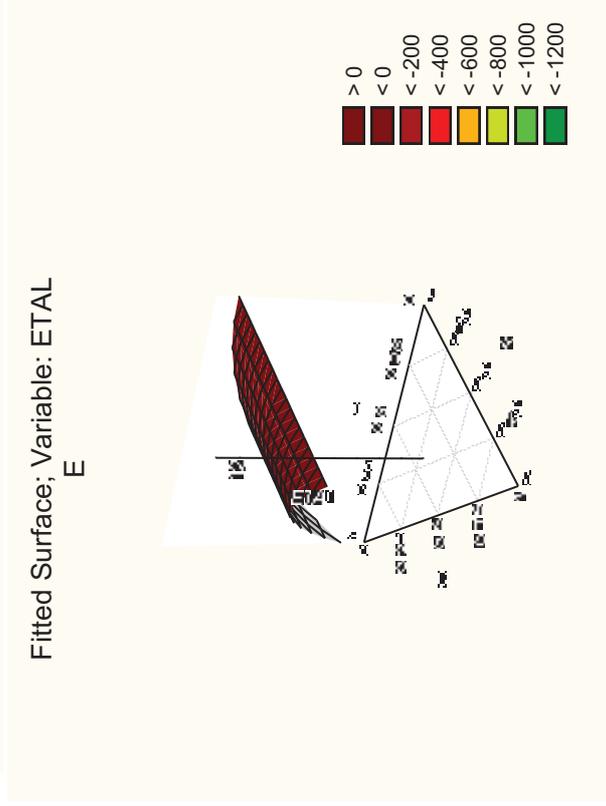
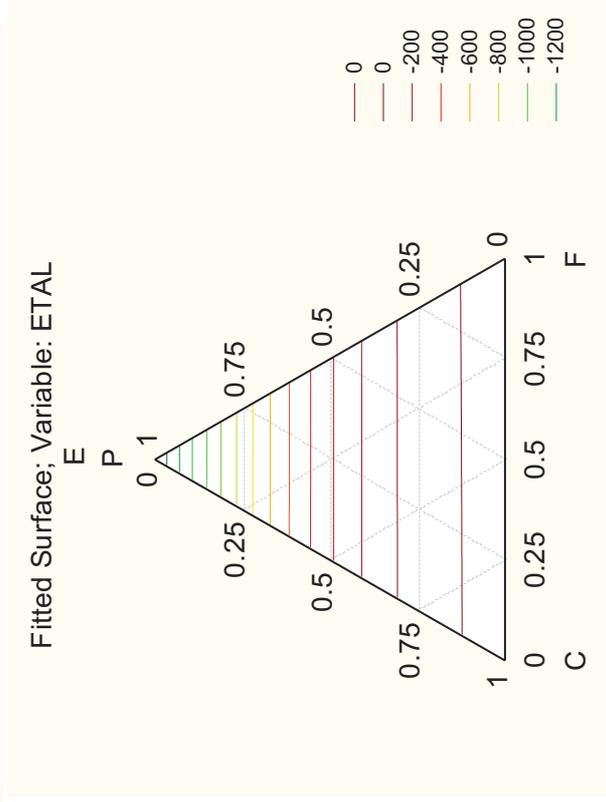
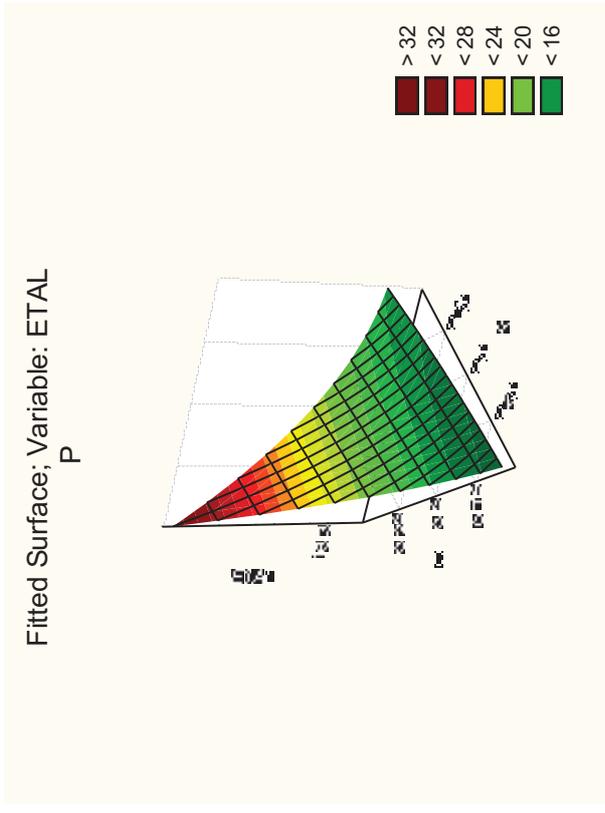
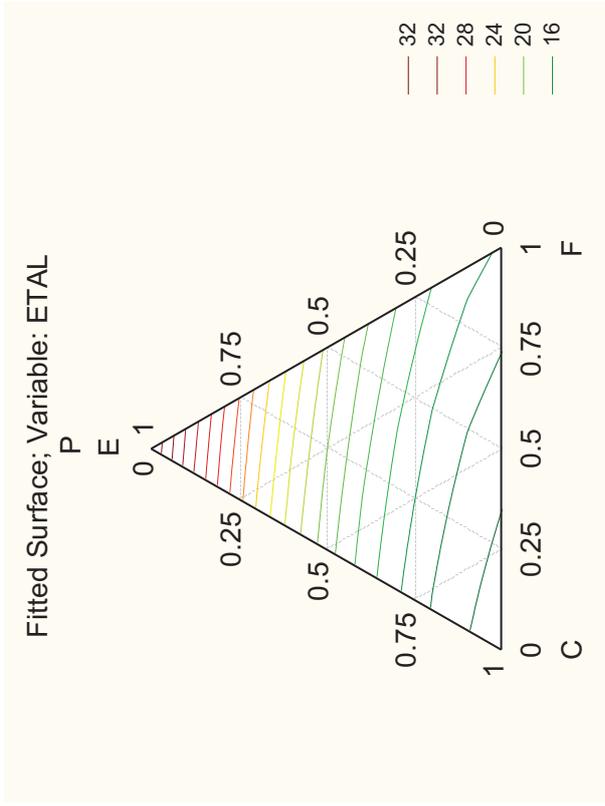


Figure 2.9 (a) : Représentation ternaire dans le plan (E C F) & (P F C) et l'espace pour la réponse ETAL.

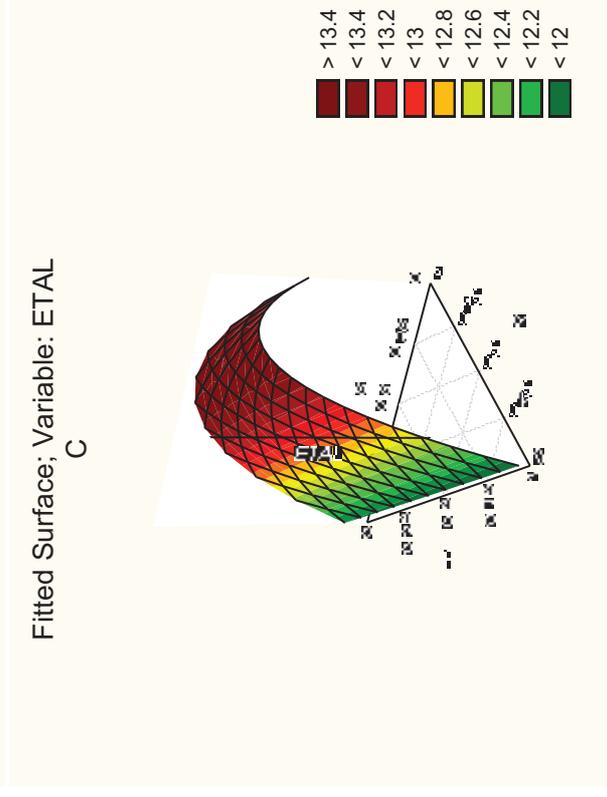
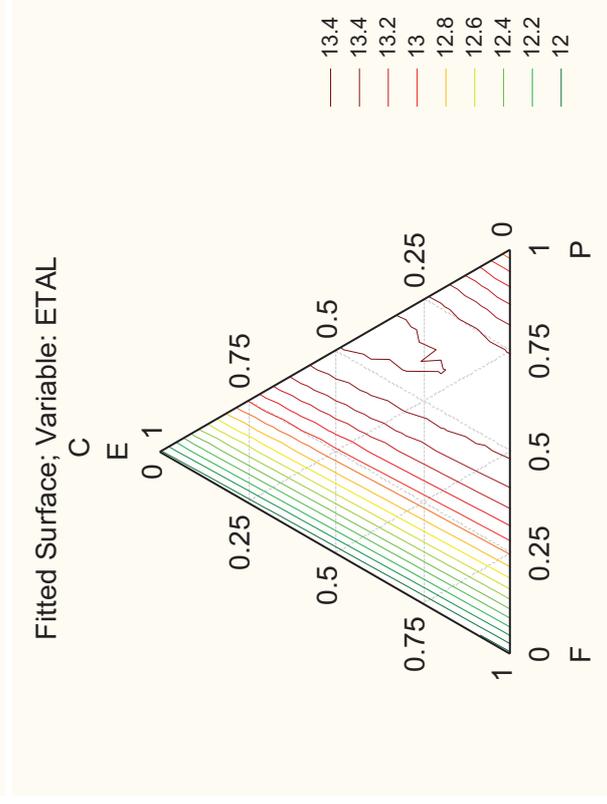
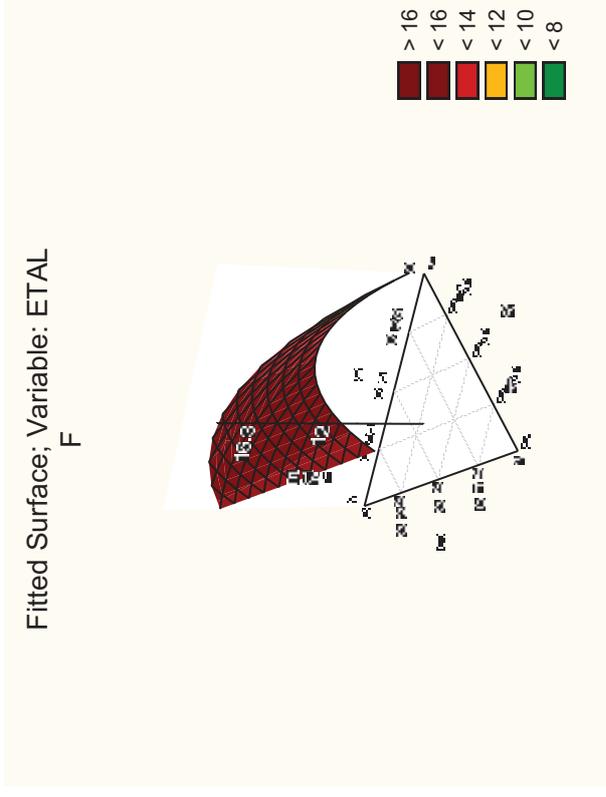
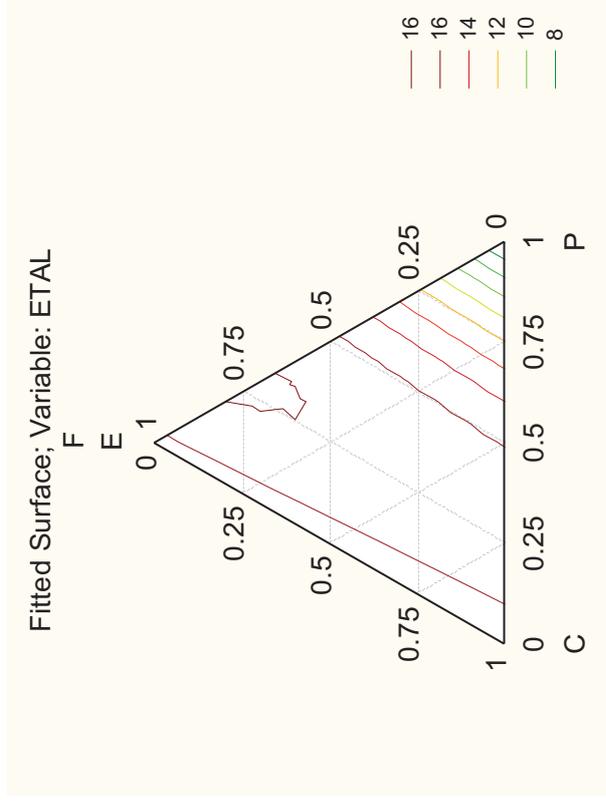


Figure 2.9 (b) : Représentation ternaire dans le plan (E C P) & (E F P) et l'espace pour la réponse Etal.

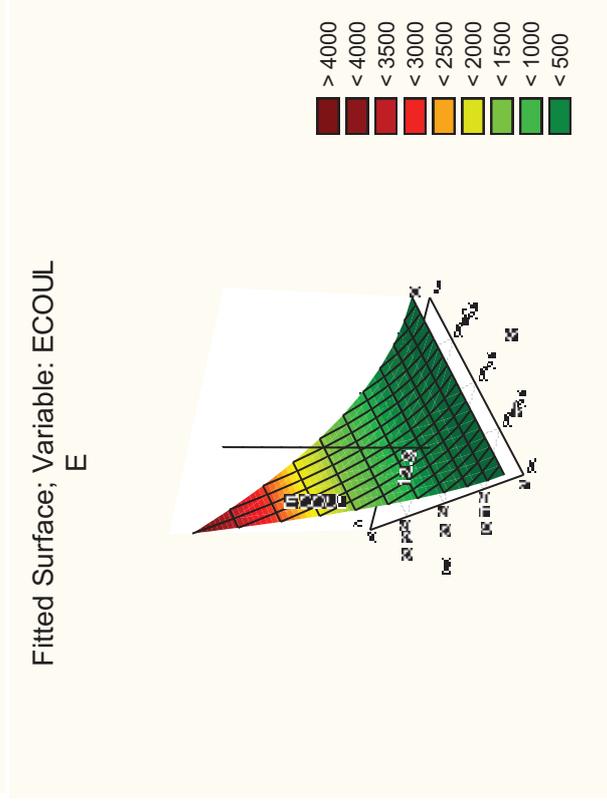
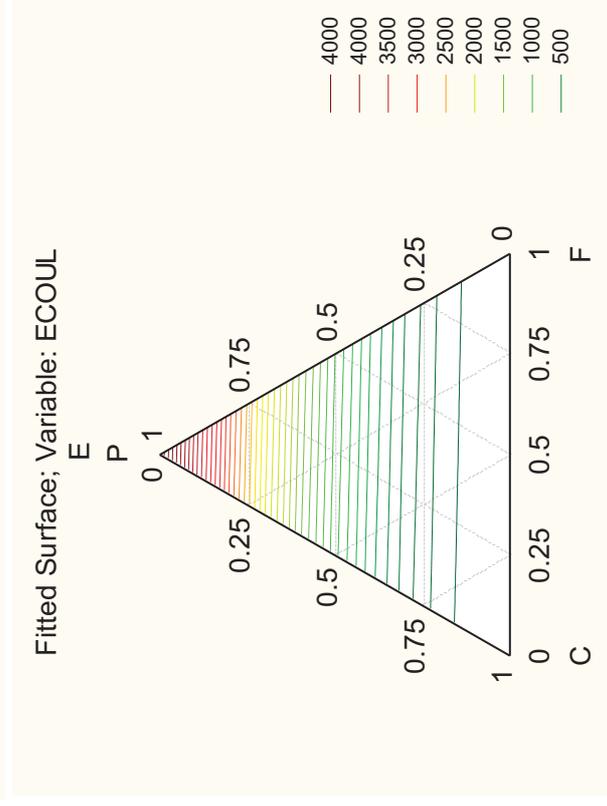
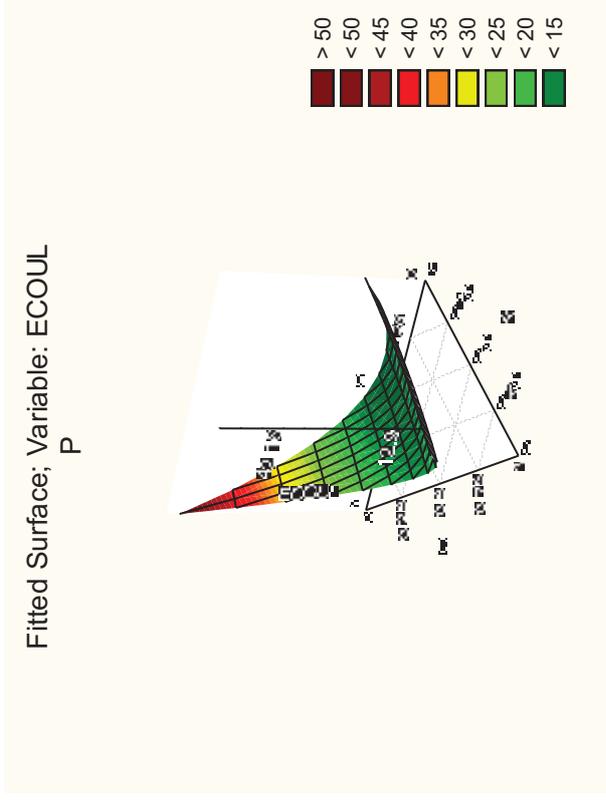
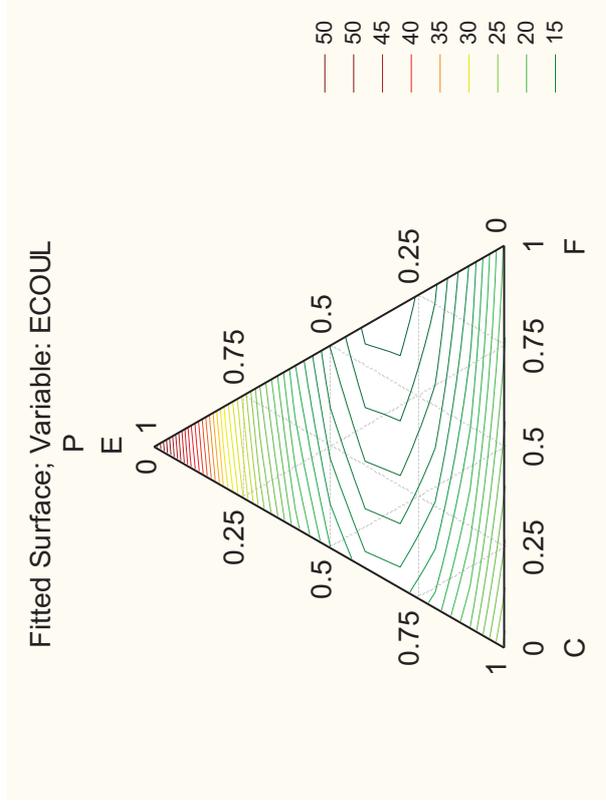


Figure 2.10 (a) : Représentation ternaire dans le plan (E C F) & (P F C) et l'espace pour la réponse Ecoul.

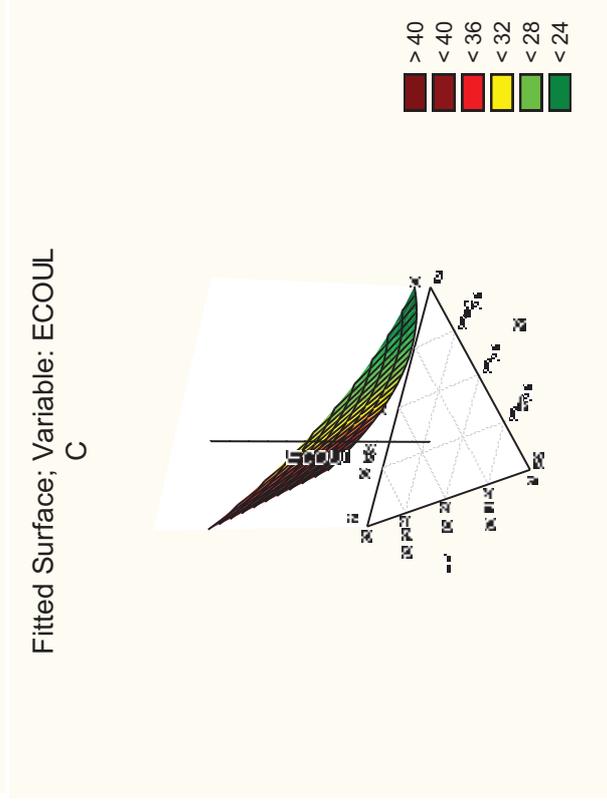
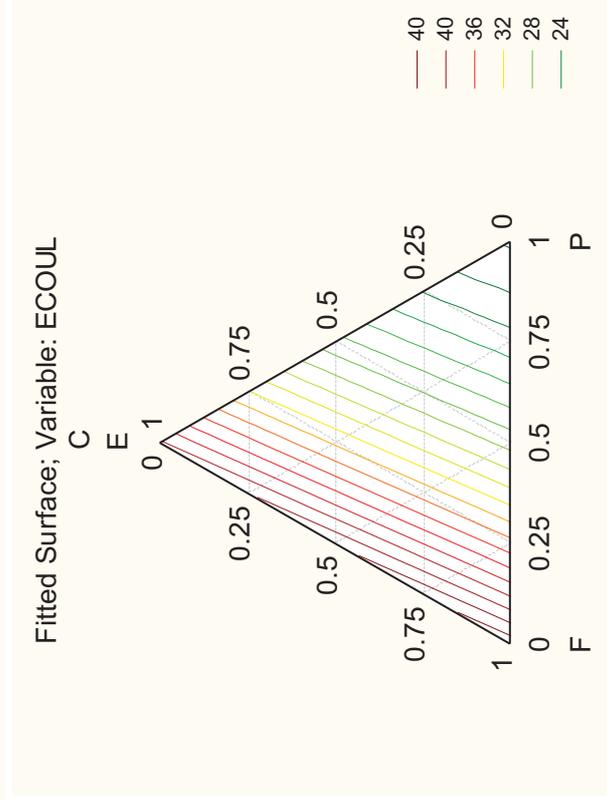
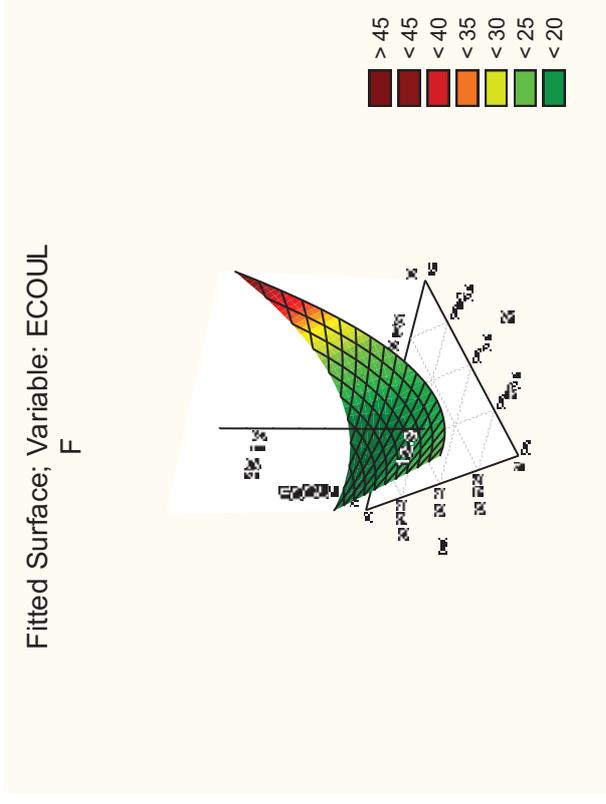
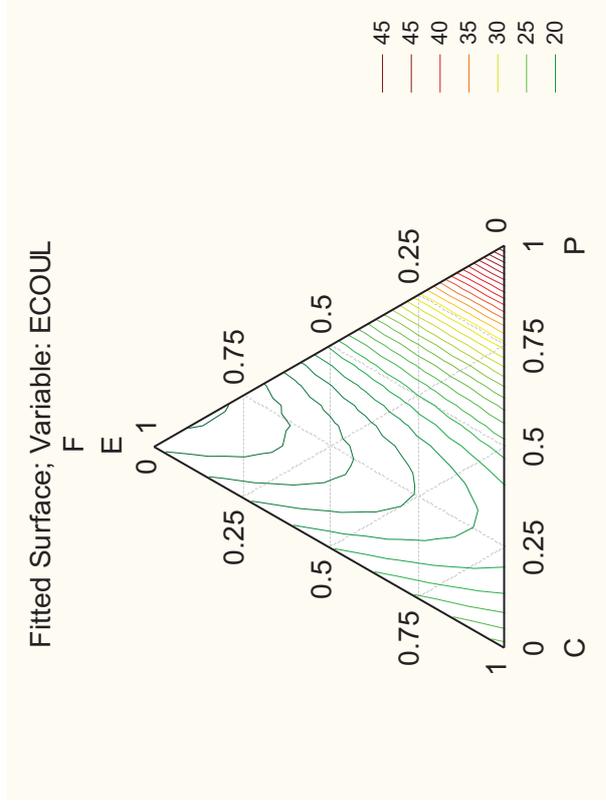


Figure 2.10 (b) : Représentation ternaire dans le plan (E C P) & (E F P) et l'espace pour la réponse Ecouli.

Nous remarquons que pour la réponse étalement, le plastifiant P se révèle le constituant dominant en faisant varier les trois autres constituants hors du plan ; l'eau E devient le constituant prépondérant en posant le constituant P hors plan avec une augmentation de la valeur de l'étalement en fonction de l'augmentation de la valeur de E ; le même raisonnement pourra être fait pour la réponse écoulement.

2.7. Conclusion

Notre point de départ a été l'élaboration d'un programme expérimental qui nous a permis de comprendre l'influence de chaque constituant sur le comportement de la pâte de ciment et délimiter un domaine expérimental où tous les mélanges présentent des caractéristiques mesurables.

Nous sommes passé à une étude par plan de mélange qui prend en compte des paramètres dépendant comme les constituants de notre pâte de ciment où nous avons déterminé une matrice d'expérience à laquelle nous avons relié les deux réponses qui sont l'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh.

En introduisant le critère de désirabilité de ces deux réponses, grâce au logiciel STATISTICA, nous avons pu obtenir une formulation de la pâte autoplçante optimale. Le même logiciel offre la possibilité d'avoir des plans de coupe dans l'espace où le constituant prépondérant est, facilement repéré dans le diagramme ainsi que son influence sur la réponse dans cette coupe. Partant de cette formulation de pâte de ciment aux propriétés autoplçantes, nous validerons en utilisant des matériaux locaux, l'hypothèse selon laquelle l'association de cette pâte à un squelette granulaire donné, aboutira à l'obtention d'un béton autoplçant.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE

3.1. Introduction

La caractérisation rhéologique des bétons passe généralement par la compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui existent entre ses constituants. La détermination de la surface granulaire ou de la compacité d'un mélange granulaire est basée, entre autres, sur la connaissance de la forme des grains qui le constituent. Cette dernière est le plus souvent assimilée à des diamètres de sphères, dont la taille est définie comme étant une moyenne entre deux ouvertures de tamis.

Dans ce chapitre, nous procéderons à une caractérisation des différents squelettes granulaires destinés à la confection de nos BAP. Cette caractérisation se résumera dans le calcul du diamètre moyen, de la compacité maximale et de la surface développée par les granulats selon différents rapports G/S allant de 0,8 à 1,1 étant donné que c'est l'intervalle recommandé dans la littérature et dans l'étude sur l'optimisation de la formulation des BAP utilisant des granulats de notre région [TAL, 09].

3.2. Matériaux

3.2.1. Sable

Le sable utilisé, provient de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ses caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques du sable [BOU, 10].

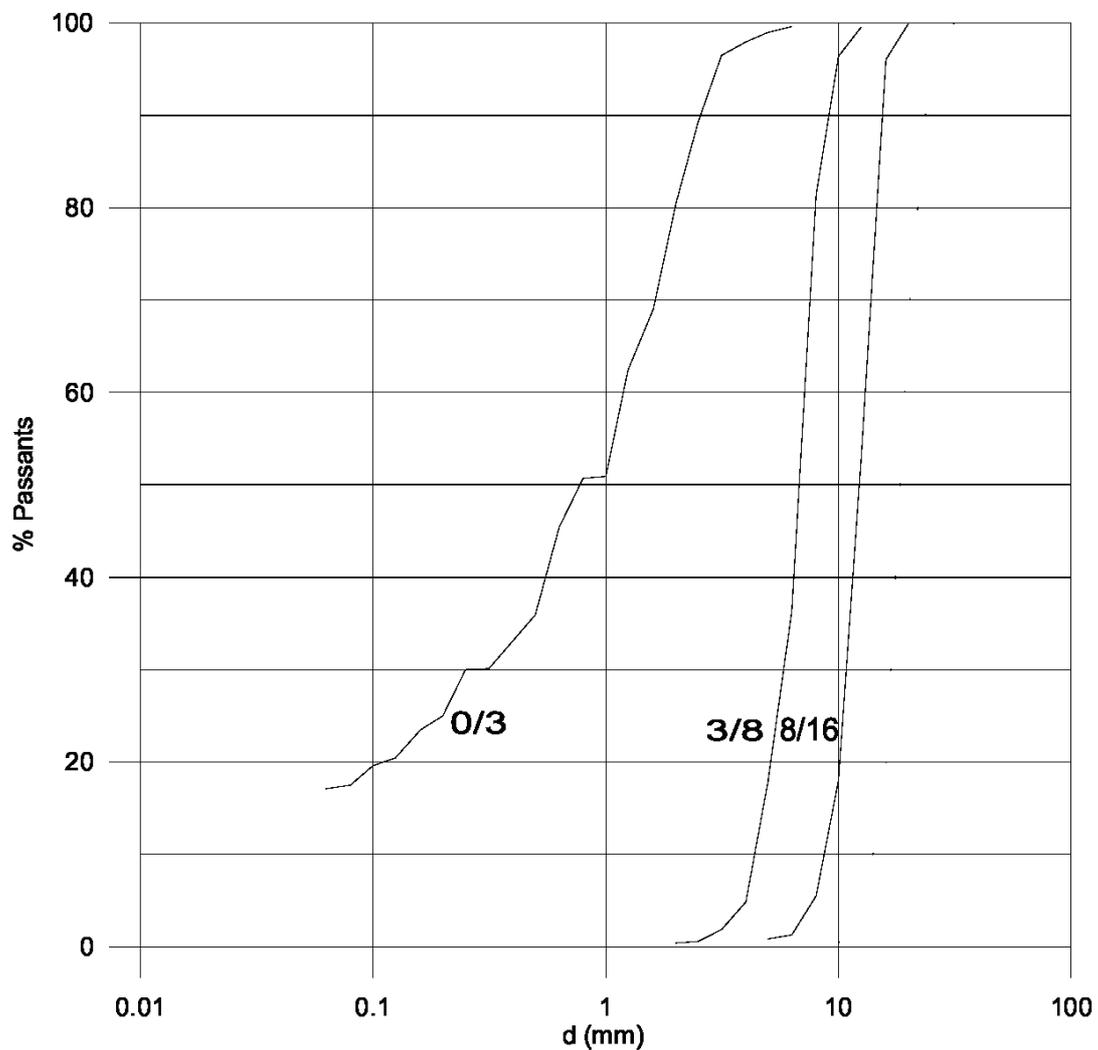
Désignation	M_V absolue (g/cm ³)	M_V appar (g/cm ³)	Equivalent de sable (%) (NA 455)	Teneur en fines (%) (NA 5128)	Module de finesse
Sable	2,500	1,426	63,2	17	2,95

3.2.2. Gravier

Ce sont des granulats concassés en provenance de la carrière de Sidi Abdelli, propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ces granulats sont disponibles sous forme de classes granulaires 3/8 et 8/16. Les caractéristiques physiques des gravillons sont représentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Caractéristiques physiques des graviers [BOU, 10]

Désignation	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
$M_{V \text{ absolue}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,587	2,587
$M_{V \text{ appar}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,355	1,423
Coefficient d'aplatissement (%)	19	8
Propreté (%) (PS)	1,92	1,3
Los Angeles (%)	27	31
Micro – Deval (%)	15	11

**Figure 3.1** : Courbes granulométriques des granulats ENG carrière de Sidi Abdelli [BOU, 10]

3.3. Calculs du diamètre moyen du mélange granulaire

Ayant la distribution granulaire en masse et donc en volume des squelettes granulaires des bétons et le diamètre moyen D_{mi} de chaque classe granulaire i , on peut facilement remonter au diamètre moyen de tous les granulats D_M :

$$D_M = \frac{\sum(m_i \cdot D_i)}{\sum m_i} \quad [3.1]$$

Où m_i est le pourcentage en masse des granulats dans la classe i .

Notre squelette granulaire est composé de sable et de graviers de différents rapports G/S. Ainsi la taille des granulats est comprise entre 0,08 et 16 mm. Nous prendrons 1 Kg d'échantillon avec un rapport de (40-60)% entre le gravillon 3/8 et le gravillon 8/16 [GHO, 11]. Le passant au tamis de 80 microns forme un ensemble de particules de dimensions comparables à celles du ciment et du filler calcaire et sont considérées comme faisant partie de la pâte.

Nous divisons notre mélange granulaire en tranches successives et nous calculerons par la suite la masse de chaque tranche. La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la moyenne entre le tamis supérieur [TM_i] et le tamis inférieur [Tm_i].

Les tableaux 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 regroupent les valeurs des diamètres moyens pour les différents rapports G/S.

Tableau 3.3 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 0,8.

Symboles	Valeurs G/S = 0,8													
	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,026	0,085	0,087	0,135	0,0912	0,057	0,079	0,0504	0,0658	0,0648	0,0974	0,1236
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
$m_i \cdot Dm_i$	0	0,0037	0,0061	0,0401	0,0817	0,2531	0,2576	0,2037	0,3555	0,2847	0,4704	0,5832	1,0957	1,7613
$\sum (m_i \cdot Dm_i)$	5,3973575													
$\sum m_i$	0,9932													
D_M (mm)	5,434310814													

Tableau 3.4 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 0,9.

Symboles	Valeurs G/S = 0,9													
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,024	0,068	0,083	0,148	0,08	0,044	0,085	0,035	0,093	0,056	0,113	0,134
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
m_i.Dm_i	0	0,00372	0,0057	0,03213	0,07802	0,2775	0,226	0,1573	0,3825	0,19775	0,66495	0,504	1,27125	1,9095
Σ (m_i .Dm_i)	5,71032													
Σ m_i	0,994													
D_M (mm)	5,744788732													

Tableau 3.5 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 1.

Symboles	Valeurs G/S = 1													
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,031	0,026	0,075	0,067	0,125	0,07	0,047	0,084	0,036	0,1	0,042	0,11	0,168
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
m_i.Dm_i	0	0,00372	0,00618	0,03544	0,06298	0,2344	0,1978	0,16803	0,378	0,2034	0,715	0,378	1,2375	2,394
Σ(m_i .Dm_i)	6,0143625													
Σ m_i	0,981													
D_M (mm)	6,130848624													

Tableau 3.6 : Valeurs du diamètre moyen pour G/S = 1,1.

Symboles	Valeurs G/S = 1,1													
	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
m_i (Kg)	0	0,02	0,0158	0,0618	0,093	0,1436	0,065	0,033	0,069	0,038	0,1	0,05	0,105	0,197
Dm_i (mm)	0,04	0,12	0,2375	0,4725	0,94	1,875	2,825	3,575	4,5	5,65	7,15	9	11,25	14,25
$m_i \cdot Dm_i$	0	0,0024	0,00375	0,0292	0,08742	0,2693	0,1836	0,11798	0,3105	0,2147	0,715	0,45	1,18125	2,80725
$\Sigma(m_i \cdot Dm_i)$	6,372323													
Σm_i	0,9912													
D_M (mm)	6,428897296													

3.4. Compacité

L'analyse de l'interaction pâte-granulats dans les bétons confectionnés, nécessite le calcul de la compacité maximale du squelette granulaire. Le calcul de la compacité maximale du squelette passe par la mesure de la compacité expérimentale d'échantillons représentatifs des différentes fractions du squelette granulaire, ainsi que du squelette lui-même.

Nous utilisons un cylindre de diamètre $\Phi = 16$ cm, et de 60 cm de hauteur (figure 3.2). Le cylindre est équipé d'un piston interne de diamètre extérieur égal au diamètre intérieur du moule moins 1mm de façon à assurer son libre coulissement à l'intérieur du moule d'une masse qui est calculée en fonction du diamètre intérieur du moule et de la densité du métal pour permettre d'appliquer une pression de 10 kPa sur le matériau. L'ensemble est solidarisé à une table à secousses.

**Figure 3.2** : Dispositif de mesure de la compacité expérimentale.

La méthode utilisée pour déterminer la compacité maximale des squelettes granulaires secs utilisés dans les bétons confectionnés est celle basée sur le modèle d'empilement compressible développé par de Larrard [LAR, 00], qui vise à calculer la valeur de la compacité maximale d'un squelette granulaire donné.

La compacité est le rapport du volume solide d'un mélange granulaire sur son volume apparent (V_A). Le volume apparent est la somme du volume des solides (V_s) et du volume des vides (V_{Vides}):

$$compacité = \frac{V_s}{V_A} = \frac{V_s}{V_s + V_{Vides}} \quad [3.2]$$

Toutefois, la compacité d'un squelette dépend du mode de mise en place, du récipient (cylindre, sphère, cube) et du procédé de compactage (piquetage, vibration avec ou sans pression). La compacité maximale (ou virtuelle selon [LAR, 00]) est la compacité que l'on peut obtenir avec un mélange granulaire donné, tout en plaçant les particules une par une. Par exemple, si l'on prend un mélange de sphères de même taille, la compacité mesurée avec les différents modes de mise en place peut changer entre 0,60 et 0,64. Or, la compacité maximale de ce même mélange avec une mise en place grain par grain est égale à 0,74 (compacité de l'arrangement cubique faces centrées des sphères).

3.4.1. Méthode d'empilement granulaire

Le Modèle d'Empilement Compressible (MEC), est la troisième génération de modèles développés au LCPC, visant à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes, à partir de la connaissance des compacités des tranches monodimensionnelles, de la distribution granulaire du système et de l'énergie fournie pendant la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage.

3.4.1.1. Compacité virtuelle d'un empilement

Pour une population de grains donnée, on sait que la compacité, rapport du volume solide au volume total, dépend du mode de mise en place du mélange. On appelle conventionnellement compacité virtuelle, la valeur maximale qu'il est possible d'atteindre en plaçant les grains un à un dans le mélange, tout en respectant leur intégrité. Les mélanges industriels, mis en place aléatoirement et avec une énergie finie, conduisent toujours à des compacités réelles plus faibles.

On appelle par convention classe monodimensionnelle, un ensemble homogène de grains dont la grosseur est comprise entre deux tamis successifs de la série normalisée (série de Renard). Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange à n classes monodimensionnelles (mais non nécessairement sphériques), on commence par distinguer la *classe dominante*, qui forme une phase continue dans le mélange et qui en assure le serrage (figure 3.3). Cette classe i étant caractérisée par la compacité qu'elle atteint lorsqu'elle est empilée isolément (β_i), on calcule la compacité d'ensemble en exprimant que les grains i occupent "en masse" tout l'espace laissé disponible par les classes plus grossières, et que leur porosité est partiellement comblée par les classes les plus fines. On doit au passage tenir compte de

deux types d'interaction granulaire : l'effet de paroi exercé par les gros grains, et l'effet de desserrement (ou d'interférence) exercé par les grains plus fins. Une hypothèse forte du modèle est de considérer ces interactions comme additives, ce qui revient à supposer la non-intersection des zones de l'empilement des grains i perturbées par les classes étrangères [LAR00].

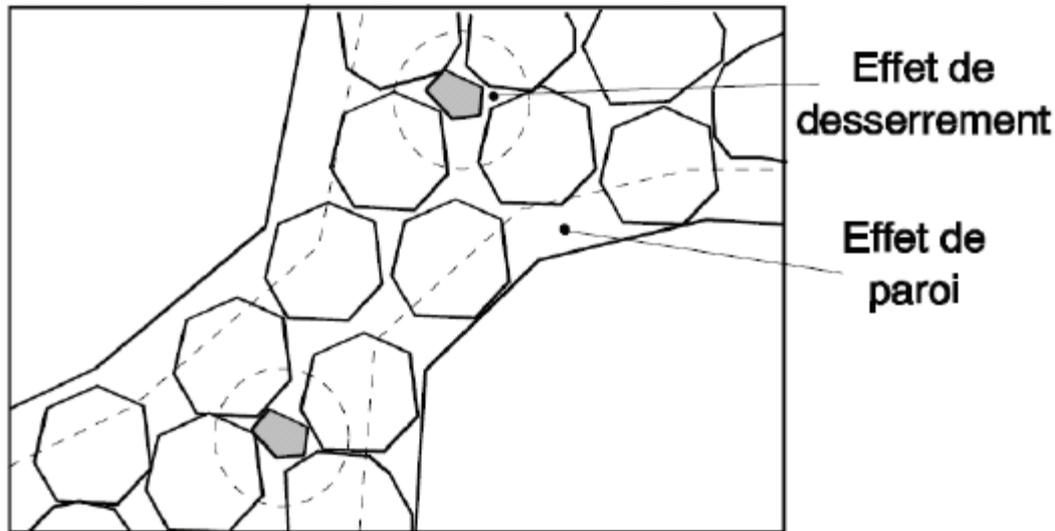


Figure 3.3 : Classe dominante dans un mélange ternaire (ici, la classe de taille intermédiaire) [LAR00].

3.4.1.2. Compacité réelle: notion d'indice de serrage

Les considérations précédentes permettent, pour une combinaison donnée de n classes granulaires, de calculer n expressions de la compacité virtuelle, chacune correspondant au cas où la classe i serait dominante. La "vraie compacité virtuelle" est la plus faible de ces n valeurs. Pour calculer la compacité réelle, on se dote d'un paramètre supplémentaire, appelé indice de serrage, symbolisé par la lettre K . Avec cet indice, on cherche à quantifier dans quelle mesure on s'approche de l'empilement virtuel. L'indice K apparaît alors comme une caractéristique du mode de mise en place du mélange. On le définit comme la somme d'indices partiels K_i de chaque classe granulaire i . Les K_i dépendent du rapport entre le volume effectif de la classe i dans le mélange, appelé Φ_i , et la valeur maximale Φ_i^* que pourrait prendre cette grandeur si le mélange était bloqué par un excès de grains i , toutes les autres classes demeurant à volume constant. On a ainsi :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}}{1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}} \quad [3.3]$$

Lorsque la concentration solide $\phi = \sum_{i=1}^n \phi_i$ croît de zéro jusqu'à la compacité virtuelle, on voit que l'indice de serrage croît d'une valeur nulle vers l'infini. Le fait de fixer la valeur de K , pour une population de grains donnée, fournit alors une équation implicite à une seule solution : la compacité réelle prévue par le modèle.

3.4.1.3. Précision du modèle

Pour être utilisable, le modèle nécessite d'abord une calibration générale, visant à quantifier d'une part les interactions granulaires (effets de paroi et de desserrement) et d'autre part les indices de serrage (paramètre K) correspondant à divers types de mise en œuvre. Une fois cette calibration effectuée- ce qui a été fait à partir d'un ensemble de mesures sur mélanges binaires - le modèle doit être alimenté par les compacités des tranches monodimensionnelles. Il peut alors prédire la compacité à partir de la connaissance des proportions granulaires d'une combinaison de grains et de l'indice de serrage correspondant à sa mise en œuvre. D'une façon générale, le modèle conduit à des précisions meilleures que le pourcent de compacité (en valeur absolue).

Du fait de ses bonnes capacités prédictives, le modèle permet la recherche numérique de mélanges de compacité maximale. Il conduit au passage à remettre en cause la notion de courbe granulaire de référence : la répartition granulaire idéale obtenue sur une certaine étendue dépend de la forme des grains considérés. Ce qui explique la diversité des courbes proposées dans la littérature technique. Le modèle d'empilement compressible, quant à lui, prévoit des distributions différentes suivant les compacités des différents étages de la granularité; d'une façon générale, à taille fixée, plus une classe est compacte, plus elle est représentée dans le mélange idéal [LAR00].

3.4.2. Calculs des compacités expérimentales

3.4.2.1. Compacité du sable 0/3

La compacité des sables est mesurée sur un échantillon de 3 Kg. On est amené en général à séparer le sable en trois classes distinctes 0-315 μ m, 3.15 μ m-1.25 mm et 1.25mm-d_{max} où d_{max} est le diamètre maximal des grains de sable. La compacité expérimentale des trois classes du sable est présentée par la formule suivante :

$$C_S = \frac{3}{\rho_S \times V} \quad [3.4]$$

Où ρ_S est la masse volumique du sable en Kg/m³ et V est le volume final de l'échantillon en m³.

Les valeurs de la compacité expérimentale du sable sont présentées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Compacité expérimentale du sable.

Matériau	ρ_s (kg/m ³)	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	C_{\exp}
S1	2500	0	0,315	0,7108
S2	2500	0,315	1,25	0,6386
S3	2500	1,25	3	0,603

3.4.2.2. Compacité du gravillon 3/8, 8/16

La mesure de la compacité expérimentale des gravillons s'effectue comme pour les sables, mais sur un échantillon de 7,5 Kg. La compacité expérimentale des gravillons est présentée par la formule suivante :

$$C_G = \frac{7,5}{\rho_G \times V} \quad [3.5]$$

Où ρ_G est la masse volumique du gravillon en Kg/m³ et V est le volume final de l'échantillon en m³.

Les valeurs de la compacité expérimentale des gravillons sont présentées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Compacité expérimentale du gravier [GHO, 11].

Matériau	ρ_s (kg/m ³)	d_{\min} (mm)	d_{\max} (mm)	C_{\exp}
G 3/8	2587	3	8	0,586
G 8/16	2587	8	16	0,573

3.4.3. Utilisation du logiciel René LCPC pour le calcul de la compacité

A fin de pouvoir utiliser de façon pratique le modèle de l'empilement compressible, il est apparu nécessaire d'utiliser le logiciel René LCPC. Le logiciel est basé sur les travaux de René Féret concernant l'optimisation granulaire des bétons.

Le logiciel a fait l'objet d'une validation dans le domaine du calcul de la compacité des mélanges granulaires secs, son schéma de fonctionnement est résumé sur la figure 3.4.

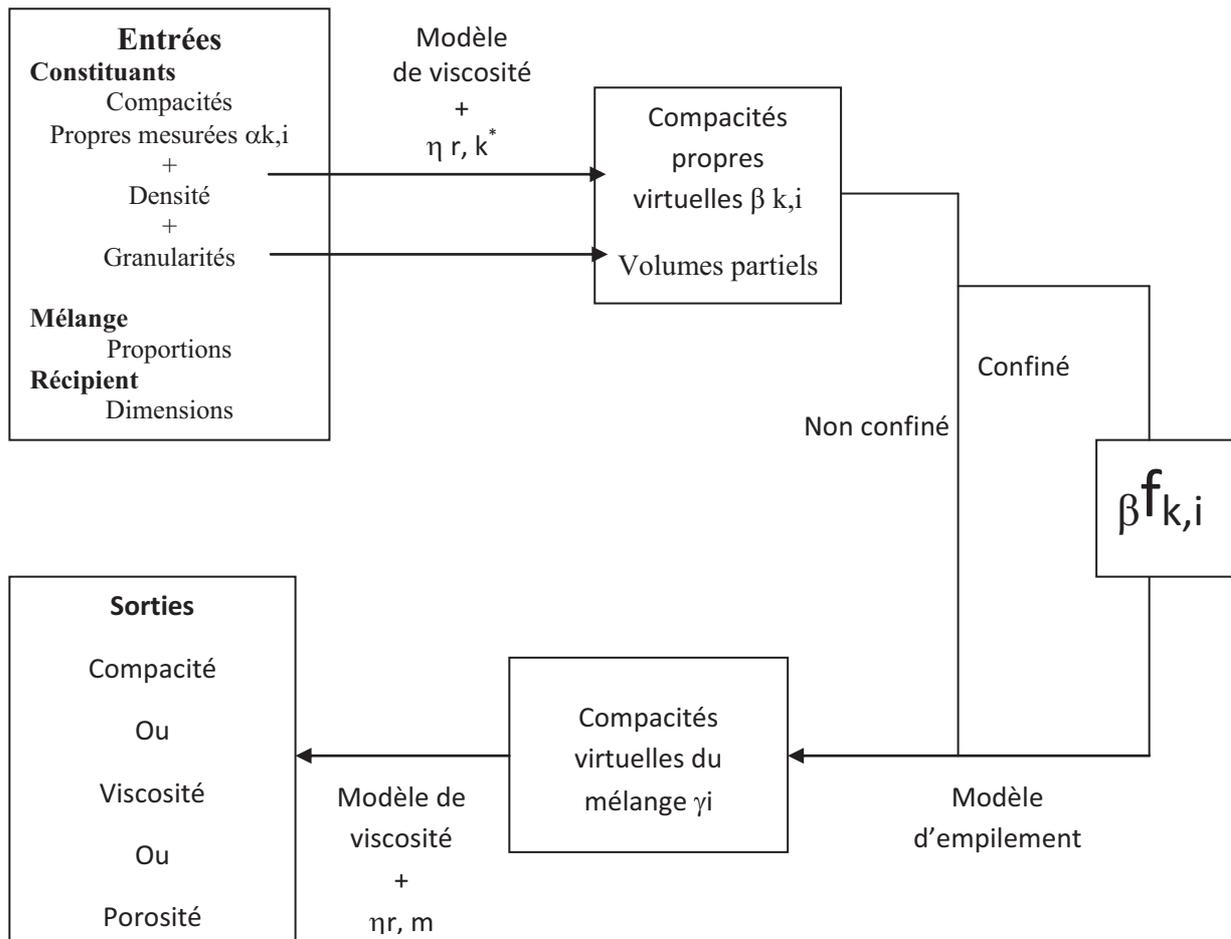


Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement de René-LCPC.

La courbe suivante (figure 3.5) présente la compacité de notre mélange granulaire (Sable 0/3 – Gravillons 3/8 et 8/16) calculée par le logiciel RENE-LCPC :

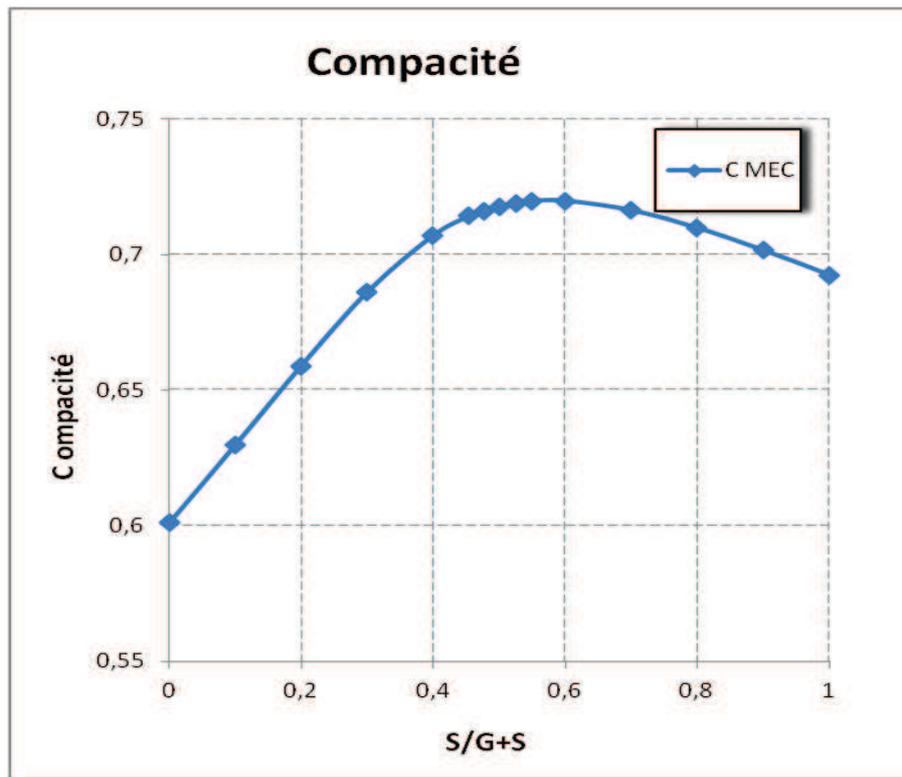


Figure 3.5 : Courbe représentant la compacité calculée par le logiciel RENE-LCPC.

D'après les résultats obtenus, on constate que la compacité augmente au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage des petits granulats. Elle atteint l'optimum entre 50%-60% des petits granulats. En effet, l'ajout des petites particules fait augmenter la compacité ; plus on augmente le pourcentage des petites particules plus les vides entre les grosses particules sont remplis conduisant à un matériau de plus en plus compact.

On remarque aussi que les compacités calculées par la méthode d'empilement compressible sont supérieures à celles mesurées expérimentalement.

A partir de ces résultats, et pour un volume donné de granulats, nous pouvons déduire le volume occupé par les vides dans les mélanges compacts des granulats.

3.5. Surface granulaire

Notre objectif est de déterminer la surface totale des granulats, accessible à la pâte de ciment dans les bétons confectionnés.

La surface totale d'un mélange granulaire est la somme des surfaces de toutes les particules qui le constituent. Pour la calculer, nous déterminons la surface totale des granulats de chaque classe granulaire. Chaque classe est représentée par un ensemble de granulats identiques en forme, en taille et en densité. Les hypothèses suivantes ont été prises en considération :

- Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites,
- Malgré leur porosité, ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau.
- A l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

❖ *Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton*

Si on considère par exemple deux gravillons G_1 et G_2 , qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.9 : Caractéristiques des gravillons du béton

Caractéristiques des gravillons du béton			
gravillon	dosage dans le béton	masse volumique	refus au tamis ti
G_1	g_1	μ_1	R_{i1}
G_2	g_2	μ_2	R_{i2}

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_1 \cdot r_{i1} + g_2 \cdot r_{i2}) / (g_1 + g_2) \quad [3.6]$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_1 \cdot \mu_1 + g_2 \cdot \mu_2) / (g_1 + g_2) \quad [3.7]$$

❖ *Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange*

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur $[TM_i]$ et par un tamis inférieur $[Tm_i]$. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM_i et Rm_i (*exprimé en %*).

Les tamis à considérer sont les suivants :

16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

❖ *Calcul de la masse de chaque tranche granulaire*

La masse M_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (Rm_i - RM_i) \times (g_1 + g_2) / 100 \quad [3.8]$$

❖ *Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche*

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad [3.9]$$

❖ *Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche*

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad [3.10]$$

Les valeurs des volumes pour chaque type de particules moyennes seront données pour chaque tranche granulaire.

❖ *Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche*

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad [3.11]$$

❖ *Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange*

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange.

$$\omega = 1 / \mu_g \quad [3.12]$$

❖ *Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire*

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad [3.13]$$

❖ *Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire*

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne :

$$N_i = V_i / v_i \quad [3.14]$$

- ❖ *Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire*

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot S_i \quad [3.15]$$

- ❖ *Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons*

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$S_G = \sum_i S_i \quad [3.16]$$

Les tableaux 3.10, 3.11, 3.12 et 3.13 regroupent les valeurs de surfaces développées pour les différents rapports G/S :

Tableau 3.10 : Surfaces développées pour G/S= 0,8.

Opérations	Symboles	Valeurs													
		0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
tranches granulaires	T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
	T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
masse de la tranche par Kg d'échantillon	Mui (kg)	0	0,031	0,026	0,085	0,087	0,135	0,0912	0,057	0,079	0,0504	0,0658	0,0648	0,0974	0,1236
volume de la particule moyenne	Vi (10^{-9} m ³)	3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05
surface développée de la particule moyenne	Si (10^{-6} m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04
volume massique de la matrice du granulat	μi (10^{-3} m ³ /kg)	0,00392													
volume total des particules moyennes	Vi (10^{-3} m ³)	0,0E+0	1,2E-04	1,0E-04	3,3E-04	3,4E-04	5,3E-04	3,6E-04	2,2E-04	3,1E-04	2,0E-04	2,6E-04	2,5E-04	3,8E-04	4,8E-04
nombre de particules moyennes	Ni	0,0	13427624,3	1453923,0	603623,2	78400	15339,1	3029,7	934,9	649,2	209,3	134,8	66,5	51,2	32,0
surface développée par les particules moyennes	Si (m ²)	0,000	0,607	0,257	0,423	0,218	0,169	0,076	0,038	0,041	0,021	0,022	0,017	0,020	0,020
surface développée par 1 Kg d'échantillon	Sg (m ²)	1,930326521													

Tableau 3.11 : Surfaces développées pour G/S= 0,9.

Opérations	Symboles	Valeurs																										
		T _{min}	T _{max}	Mui (kg)	Vi (10 ⁻⁹ m ³)	Si (10 ⁻⁶ m ²)	volume massique de la matrice du granulat	Vi (10 ⁻³ m ³)	nombre de particules moyennes	surface développée par les particules moyennes	surface développée par 1 Kg d'échantillon	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16		
tranches granulaires		0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16												
masse de la tranche par Kg d'échantillon		0	0,031	0,024	0,068	0,083	0,148	0,08	0,044	0,085	0,035	0,093	0,056	0,113	0,134													
volume de la particule moyenne		3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05													
surface développée de la particule moyenne		5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04													
volume massique de la matrice du granulat		0,00392																										
volume total des particules moyennes		0,0E+00	1,2E-04	9,4E-05	2,7E-04	3,3E-04	5,8E-04	3,1E-04	1,7E-04	3,3E-04	1,4E-04	3,6E-04	2,2E-04	4,4E-04	5,3E-04													
nombre de particules moyennes		0,0	13427624,3	1342082,7	482898,6	74795,4	16816,2	2657,6	721,7	698,5	145,3	190,5	57,5	59,4	34,7													
surface développée par les particules moyennes		0,000	0,607	0,238	0,339	0,208	0,186	0,067	0,029	0,044	0,015	0,031	0,015	0,024	0,022													
surface développée par 1 Kg d'échantillon		1,822617798																										

Tableau 3.12 : Surfaces développées pour G/S=1.

Opérations	Symboles	Valeurs														
		0	0,08	0,16	0,026	0,075	0,067	0,125	0,07	0,047	0,084	0,036	0,1	0,042	0,11	0,168
tranches granulaires	T_{min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
	T_{max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
masse de la tranche par Kg d'échantillon	Mui (kg)	0	0,031	0,026	0,075	0,067	0,125	0,07	0,047	0,084	0,036	0,1	0,042	0,11	0,168	
volume de la particule moyenne	Vi (10^{-9} m ³)	3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05	
surface développée de la particule moyenne	Si (10^{-6} m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04	
volume massique de la matrice du granulat	μi (10^{-3} m ³ /kg)	0,00392														
volume total des particules moyennes	Vi (10^{-3} m ³)	0,0E+00	1,2E-04	1,0E-04	2,9E-04	2,6E-04	4,9E-04	2,7E-04	1,8E-04	3,3E-04	1,4E-04	3,9E-04	1,6E-04	4,3E-04	6,6E-04	
nombre de particules moyennes	Ni	0,0	1342762 4,3	145392 3,0	532608 7	60377, 0	14202, 9	2325,4	770,9	690,3	149,5	204,8	43,1	57,8	43,5	
surface développée par les particules moyennes	Si (m ²)	0,000	0,607	0,257	0,374	0,168	0,157	0,058	0,031	0,044	0,015	0,033	0,011	0,023	0,028	
surface développée par 1 Kg d'échantillon	S_G (m ²)	1,805572649														

Tableau 3.13 : Surfaces développées pour G/S= 1,1.

Opérations	Symboles	Valeurs															
		T_{\min}	T_{\max}	M _{ui} (kg)	V _i (10^{-9} m ³)	S _i (10^{-6} m ²)	volume massique de la matrice du granulat	volume total des particules moyennes	nombre de particules moyennes	surface développée par les particules moyennes	surface développée par 1 Kg d'échantillon	4	5	6,3	8	10	12,5
tranches granulaires	T_{\min}	0	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	
masse de la tranche par Kg d'échantillon	T_{\max}	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16		
	M _{ui} (kg)	0	0,02	0,0158	0,0618	0,093	0,1436	0,065	0,033	0,069	0,038	0,1	0,05	0,105	0,197		
volume de la particule moyenne	V _i (10^{-9} m ³)	3,4E-13	9,1E-12	7,0E-11	5,5E-10	4,4E-09	3,5E-08	1,2E-07	2,4E-07	4,8E-07	9,4E-07	1,9E-06	3,8E-06	7,5E-06	1,5E-05		
surface développée de la particule moyenne	S _i (10^{-6} m ²)	5,0E-09	4,5E-08	1,8E-07	7,0E-07	2,8E-06	1,1E-05	2,5E-05	4,0E-05	6,4E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,5E-04	4,0E-04	6,4E-04		
volume massique de la matrice du granulat	μ_i (10^{-3} m ³ /kg)																0,00392
volume total des particules moyennes	V _i (10^{-3} m ³)	0,0E+0 0	7,8E-05	6,2E-05	2,4E-04	3,6E-04	5,6E-04	2,5E-04	1,3E-04	2,7E-04	1,5E-04	3,9E-04	2,0E-04	4,1E-04	7,7E-04		
nombre de particules moyennes	Ni	0,0	8662983, 4	883537,8	438869,6	83806,9	16316,3	2159,3	541,3	567,0	157,8	204,8	51,3	55,2	51,0		
surface développée par les particules moyennes	Si (m ²)	0,000	0,392	0,156	0,308	0,233	0,180	0,054	0,022	0,036	0,016	0,033	0,013	0,022	0,033		
surface développée par 1 Kg d'échantillon	S _G (m ²)																1,497125552

Nous présentons dans le tableau 3.14 les valeurs des surfaces granulaires de l'ensemble des bétons confectionnés, pour 1 Kg d'échantillon. Les valeurs des surfaces granulaires sont calculées en prenant en compte le diamètre moyen arithmétique D_{mi} .

Tableau 3.14 : Surfaces granulaires des bétons confectionnés.

G/S	Surface des granulats en mètre carré par Kg d'échantillon
0,8	1,930326521
0,9	1,822617798
1	1,805572649
1,1	1,497125552

3.6. Conclusion

Pour effectuer une caractérisation des squelettes granulaires, nous avons calculé le diamètre moyen du mélange granulaire, nous avons utilisé la méthode développée pour calculer la compacité maximale des squelettes granulaires par l'intermédiaire du modèle d'empilement compressible et enfin nous avons calculé la surface de notre mélange granulaire.

Les données obtenues dans ce chapitre seront utiles afin d'étudier l'interaction entre les granulats et la pâte de ciment obtenue dans le chapitre précédent.

CHAPITRE 4

FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions l'interaction entre les granulats et la suspension de pâte de ciment dans le béton afin d'expliquer le rôle joué par la pâte de ciment dans le béton autoplaçant.

La théorie de la pâte en excès consiste à déterminer la distance moyenne (occupée par de la pâte) entre deux granulats dans le béton. Ceci revient à déterminer l'épaisseur moyenne de pâte couvrant les granulats du squelette composant le béton.

Nous allons confectionner des bétons autoplaçants constitués d'un squelette granulaire entouré par une épaisseur de pâte de ciment pour obtenir un écoulement autoplaçant. La méthode de confection de ces bétons se résume par le passage de l'échelle de la pâte de ciment autoplaçante à celui du béton.

L'épaisseur de pâte couvrant la surface des granulats déterminée par la théorie de la pâte en excès, permet de remonter à la détermination des proportions de la pâte et du squelette granulaire. Nous nous basons sur cette théorie pour déterminer l'épaisseur moyenne de pâte cimentaire, nécessaire pour confectionner les bétons autoplaçants.

4.2. Confection des bétons autoplaçants

4.2.1. Méthode adoptée pour la formulation des BAP

Nous allons confectionner des BAP à partir de la pâte autoplaçante obtenue dans le chapitre 2, ce passage de l'échelle de la pâte à celui du béton se fera par paliers successifs d'ajout de granulats et d'eau.

Un volume unité V de béton autoplaçant est obtenu en ajoutant au volume absolu de la pâte de ciment autoplaçante V_p , un volume V_A composé de graviers de rapport G/S donné et d'eau, ajouter à cela un volume des vides V_V dans le béton estimé à 2,5 %. Ainsi pour un volume unité V de béton, nous avons :

$$V = V_p + V_A + V_V \quad [4.1]$$

La figure 4.1 illustre le principe de la démarche de confection des BAP

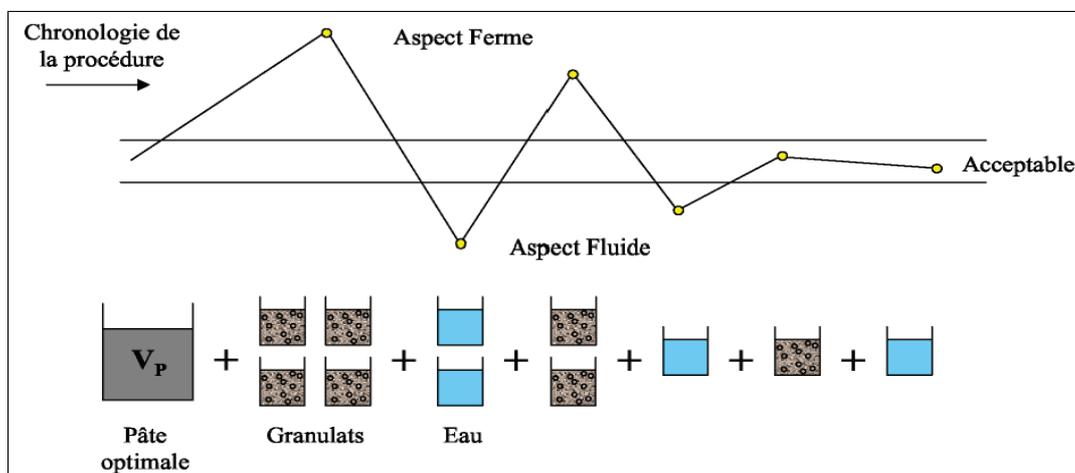


Figure 4.1 : Illustration de la démarche de confection des BAP.

En adoptant un dosage en ciment de 350 Kg par mètre cube (béton d'ouvrage de classe 35 à 40 MPa) et à partir de la formulation de la pâte optimale, on déterminera le volume des constituants de la pâte pour un mètre cube de béton. Le volume d'eau et de graviers ajoutés est déduit de la relation [4.1]. Nous tenons à spécifier que par rapport au béton ordinaire, la fraction granulaire 16/25 est absente dans la composition de nos BAP.

Tableau 4.1 : Volume des constituants de la pate pour 350 Kg/m³ de ciment.

Constituant	Ciment	Filler	Plastifiant	Eau
Volume pour 350 Kg/m ³ de ciment (m ³)	0,114	0,053	0,0025	0,226

Tableau 4.2 : composition d'un mètre cube de béton.

V_P	0,396
V_V	0,025
V_A	0,579
Somme (m ³)	1

Nous préparons une quantité de 30 l de pâte de ciment avec la même procédure décrite dans le chapitre 2, le premier ajout de graviers est égale a 0,80 V_A suivi d'une minute de malaxage, le reste des séquences d'ajout d'eau et de graviers est suivie par 30 secondes de malaxage.

Les détails des étapes de la procédure de confection d'un BAP de rapport G/S =1 sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Procédure de l'élaboration d'un BAP G/S =1.

Etape	Granulats ajoutés cumulés	Eau ajoutée cumulée	Aspect visuel	Volume total ajouté
1	0,8 V_A	0 V_A	Fluide (figure 4.2a)	0,8 V_A
2	0,9 V_A	0 V_A	Acceptable	0,9 V_A
3	0,95 V_A	0 V_A	Plastique (figure 4.2b)	0,95 V_A
4	0,95 V_A	0,02 V_A	Acceptable	0,97 V_A
5	0,98 V_A	0,02 V_A	Acceptable	V_A

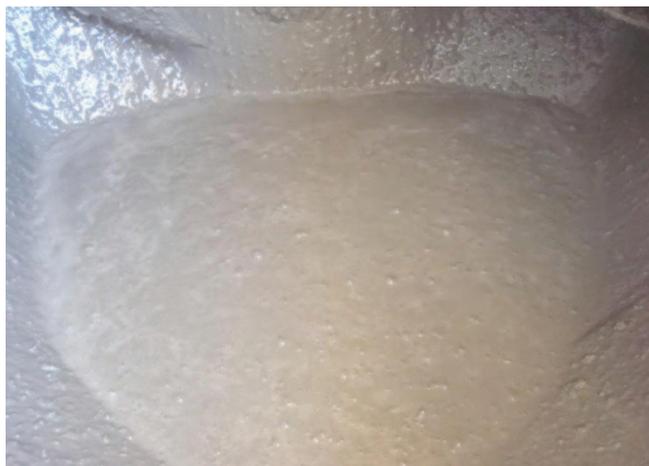


Figure 4.2a : Aspect apparent d'un béton fluide.



Figure 4.2b : Aspect apparent d'un béton plastique.

4.2.2. Composition des BAP

Le tableau 4.4 regroupe les compositions des bétons autoplaçants exprimées en kilogramme par mètre cube de béton. Dans ce contexte, le seul facteur qui varie c'est le gravier et le sable.

Tableau 4.4 : Compositions finales des bétons confectionnés (Kg/m³).

G/S	0,8		0,9		1		1,1	
Volume total ajouté	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée	Volume des granulats ajoutés	Volume d'eau ajoutée
	$0,98 V_A$	$0,02 V_A$						
Gravier 3/8	259,92		273,61		288,82		302,55	
Gravier 8/16	389,88		410,41		433,22		453,82	
Sable 0/3	794,2		759,98		722		687,63	
Ciment	350		350		350		350	
Filler calcaire	144,16		144,16		144,16		144,16	
Eau	237,58		237,58		237,58		237,58	
SP	2,8		2,8		2,8		2,8	

Pour valider la composition obtenue, le béton doit être confectionné de manière classique, c'est à dire en malaxant tous les constituants en même temps avec leurs dosages respectifs.

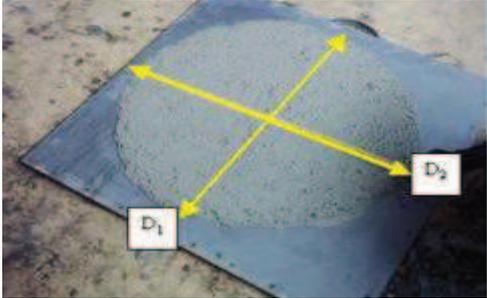
La procédure à suivre par rapport à l'introduction des constituants dans le malaxeur selon la norme NF P18-404 est la suivante :

- Gravier
- Ciment
- Filler
- Sable
- Malaxage à sec pendant 2 min.
- Eau + Plastifiant.
- Malaxage pendant 3 min.

Le temps total de malaxage est de 5 min.

4.2.3. Résultats des essais d'ouvrabilité

Tableau 4.5 : Ouvrabilité des bétons confectionnés.

Essais	Grandeur spécifique	Série Des Bétons Autoplaçants (G/S)				Photos
		0,8	0,9	1	1,1	
Etallement	D_{moy} (cm)	75	74	74	73	
J-Ring	D_{moy} (cm)	72	70	69	69	
V-funnel	TvF (s)	8,21	11,3	12,07	11,22	

Boite en L	H2/H1	0,88	0,83	0,90	0,81	
Stabilité	P (%)	11,12	9,31	11,88	8,73	

Les résultats obtenus concernant tous les bétons que nous avons confectionné sont satisfaisants et répondent aux recommandations de l'AFGC. Ils présentent une bonne réponse vis-à-vis de l'écoulement continu au V-funnel, un bon étalement au cône d'Abrams et une excellente stabilité vis-à-vis du risque de ségrégation.

4.2.4. Résistance à 28 jours

Tableau 4.6 : Résistances à 28 jours des bétons confectionnés.

G/S	0,8	0,9	1	1,1
Rc28J (MPa)	32,67	33,9	34,70	34,76

La résistance à la compression semble être influencée par le rapport G/S.

Les résultats présentés dans le tableau 4.6 montrent que l'augmentation du rapport G/S engendre un accroissement de la résistance mécanique. Ces résultats rejoignent ceux de Yammine [YAM, 07].

En parallèle, cette différence est peu significatif dans la fourchette étudiée étant donné qu'une différence de 2 MPa a été enregistrée entre un BAP de G/S = 0,8 et un autre avec un G/S = 1,1. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la résistance à la compression semble être contrôlée par la résistance de la pâte et la résistance de l'interface pâte-granulat.

4.2.5. Bilan

Nous avons constitué un béton autoplaçant à partir d'une pâte de ciment autoplaçante obtenue dans le chapitre 2. Néanmoins, un ajout d'une quantité d'eau a été nécessaire. En effet les granulats sec retiennent l'eau et modifient les propriétés autoplaçante de la pâte. Dans le paragraphe qui va suivre, nous essaierons d'interpréter cet ajout.

4.3. Eau retenue par les granulats

Les bétons autoplaçants confectionnés ont nécessité un ajout d'eau au cours de la procédure de reconstitution. Une quantité d'eau supplémentaire s'est avérée indispensable car le squelette granulaire utilisé est sec et mobilise une quantité d'eau par absorption et adsorption [BAR, 05].

Ce qui nous ramène à dire que l'association entre une pâte de ciment aux critères autoplaçants et un squelette humide peut conduire à l'élaboration d'un béton autoplaçant [BAR, 05].

El Barrak [BAR, 05] considère que l'eau retenue par le squelette granulaire correspond à la quantité d'eau nécessaire pour occuper les pores et mouiller les parois des granulats contenus dans le béton. Le squelette qui en résulte est appelé squelette humide. Il est important d'évaluer cette quantité dans la mesure où elle peut expliquer l'eau ajoutée dans la procédure de confection des bétons autoplaçants et dans la mesure où elle entre dans le calcul de la quantité de l'eau totale.

4.3.1. Dispositif de mesure de l'eau retenue

Pour mesurer la quantité d'eau retenue par un échantillon de granulats, le dispositif d'essai [BAR, 77] permet de filtrer l'eau sous pression à travers des granulats préalablement immergés dans l'eau.

Ce dispositif (figure 4.3) est constitué d'un entonnoir à support percé, de 24 cm de diamètre et de 3,3 litres de volume, et d'une burette jaugée graduée de 1 litre de volume. L'ensemble est associé à une pompe destinée à mettre la burette en dépression. Un papier filtre vient couvrir le support percé de l'entonnoir pour maintenir les granulats dans la partie supérieure et laisser passer l'eau dans la burette.

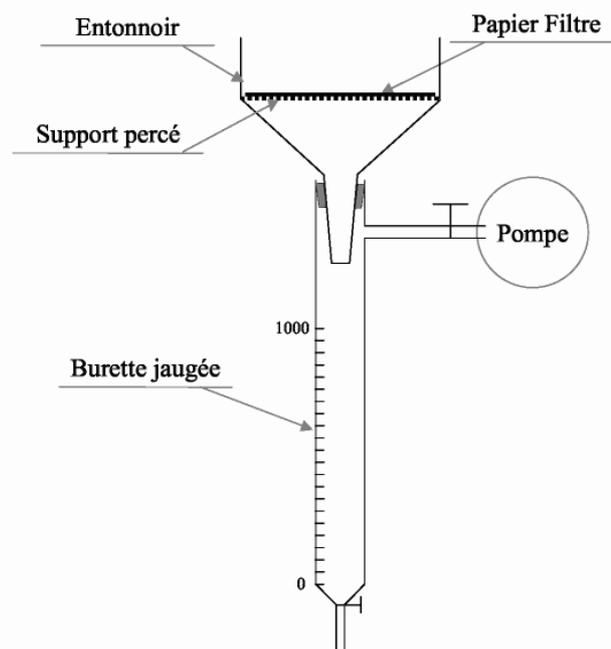


Figure 4.3 : Dispositif de mesure de l'eau retenue par les granulats.

Les échantillons granulaires testés doivent être représentatifs des squelettes étudiés. Avant la mesure, ces échantillons sont malaxés à sec de manière à homogénéiser l'ensemble des différentes fractions. Le principe de l'essai consiste d'abord à prélever l'échantillon granulaire immergé dans l'eau pendant 30 minutes, et le poser sur le papier filtre dans l'entonnoir. Le volume d'eau où baigne l'échantillon est connu. Ensuite, une dépression est créée dans la burette et le volume d'eau filtré est enregistré en fonction du temps.

En enregistrant la quantité d'eau filtrée dans la burette, on peut facilement calculer la quantité d'eau retenue par les granulats à chaque instant de l'essai. Au début de l'expérience, le débit d'eau filtré à travers les granulats est élevé (dû à la filtration de l'eau en excès), mais il diminue rapidement avec le temps. La figure 4.4 représente un exemple d'un essai de filtration. La courbe représente la quantité d'eau retenue par les granulats en fonction du temps. La première partie de la courbe (AB) traduit le passage de l'eau en excès contenue dans les granulats ; elle est linéaire. La deuxième partie (BC), non linéaire, correspond à la destruction des ménisques de capillarité entre les particules [BAR, 77]. La dernière partie (CD) est généralement asymptotique, et correspond vraisemblablement à la filtration d'eau contenue dans les pores des granulats, sous différence de pression. En effet, si on poursuit la manipulation de filtration au delà de D (temps infini), la dépression dans la burette continue à « arracher » l'eau de l'échantillon de granulats et on entre dans un domaine qui n'a plus aucun lien avec les conditions de malaxage.

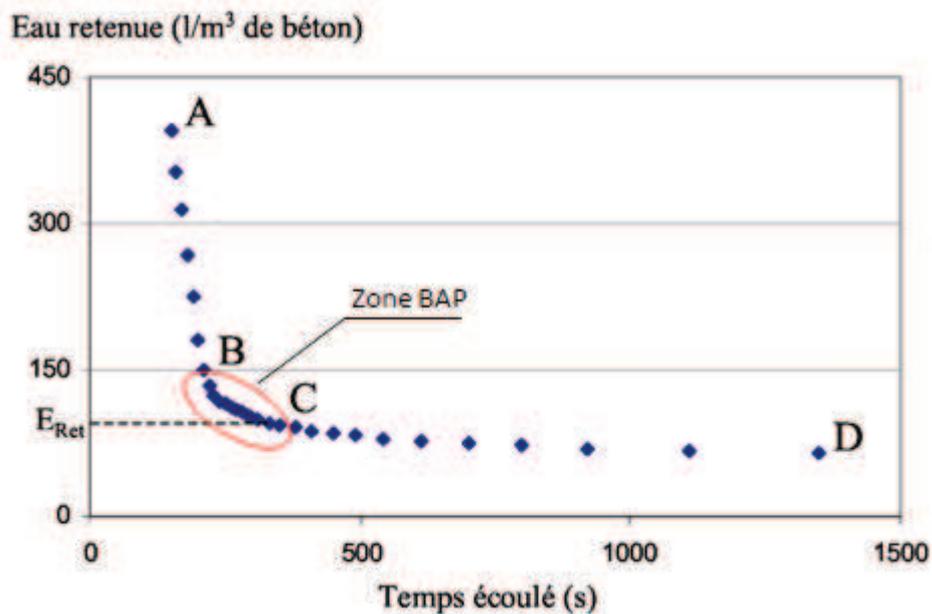


Figure 4.4 : Exemple de courbe de filtration d'un squelette granulaire [BAR, 05].

El Barrak [BAR, 05] considère que la quantité d'eau retenue ou mobilisée par un squelette granulaire donné correspond au point C, limite haute de la dernière partie (CD) [BAR, 77].

4.3.2. Hypothèse

Le même auteur [BAR, 05] a montré d'après les essais menés au laboratoire que le volume d'eau mesuré des squelettes granulaires (point C sur la figure 4.4) est inférieur de 30 à 40 l / m³ à la quantité d'eau ajoutée à l'ensemble granulats + pâte pour constituer le béton ; l'existence de ce supplément d'eau ne peut que rendre le béton confectionné plus fluide.

Par ailleurs, il a remarqué que le volume d'eau ajoutée pour constituer les bétons correspond, au point B de la courbe de filtration d'eau ; point où commence la destruction des ménisques de capillarité entre les particules (figure 4.4). Ce supplément d'eau a pour effet d'augmenter le volume de la pâte afin d'améliorer l'écoulement.

Ainsi, nous pouvons définir pour chaque rapport G/S étudié, une zone sur la courbe de filtration d'eau retenue par les granulats, cette zone est limitée dans sa partie supérieure par la quantité d'eau totale ajoutée dans la procédure de confection de béton et limitée dans sa partie inférieure par la valeur d'eau retenue réelle des granulats.

Vu qu'on ne dispose pas au sein de notre laboratoire du dispositif de mesure de cette eau retenue et vu que l'eau totale que nous avons ajoutée lors de la constitution de nos BAP est de $0,02 V_A$, nous tiendrons compte de cette dernière pour les calculs à venir.

4.4. Epaisseur de la pâte en excès

L'épaisseur de la pâte en excès peut être déterminée selon les deux principaux travaux sur la théorie d'optimisation de la pâte, ceux d'OH et col. [OH, 99] et ceux de Bui [BUI, 99,02] cités dans le chapitre 1. Néanmoins, il existe une différence entre ces deux approches. La première se base sur le calcul de la surface granulaire (chapitre 1 §1.6.4.2). Cependant la seconde méthode (chapitre 1 §1.6.4.4) utilise la taille (diamètre) moyenne des particules pour estimer l'épaisseur de la pâte [MID, 01].

En effet, L'épaisseur moyenne de pâte en excès selon la méthode par surface granulaire ne correspond pas à l'épaisseur moyenne de l'enrobage autour des grains, mais représente plutôt un paramètre de proportionnalité entre le volume de pâte et la surface granulaire ouverte à ce volume.

Pour déterminer l'épaisseur de la pâte en excès des bétons confectionnés, nous allons utiliser ces deux approches. Toutefois, nous présentons sur l'organigramme de la figure 4.5 l'ensemble des étapes principales utilisées pour calculer l'épaisseur de la pâte en excès.

Quelle que soit la nature du calcul, le point de départ est identique : la taille des granulats. Celle ci est généralement assimilée au diamètre des granulats considérés comme des particules de forme sphériques.

Calcul de l'épaisseur de la pâte en excès

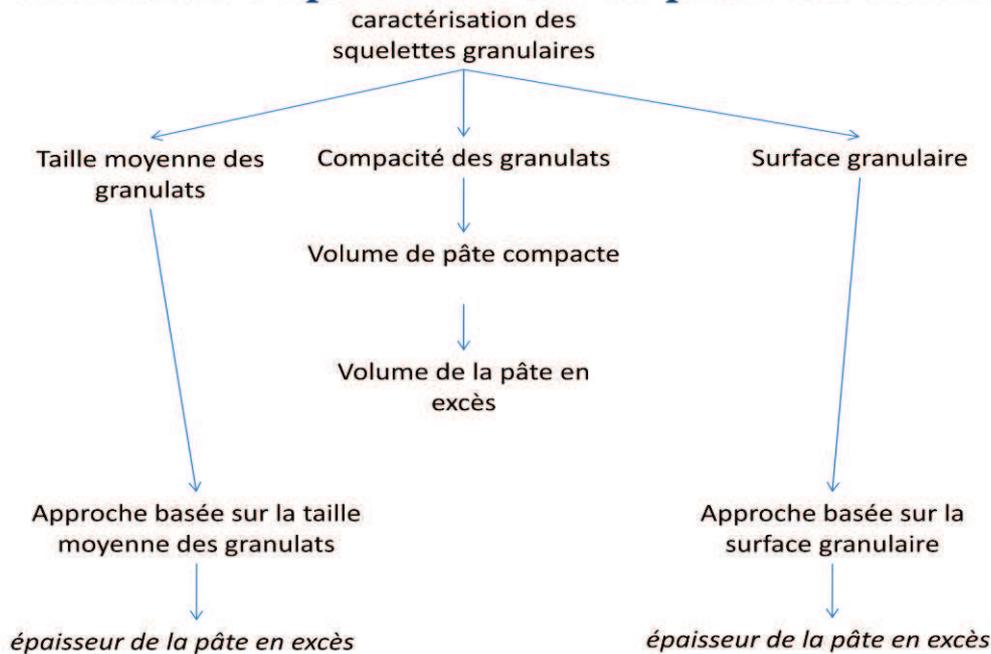


Figure 4.5 : Organigramme de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès.

Dans la branche centrale de la figure 4.5, nous présentons les étapes de détermination du volume de la pâte en excès. Ayant le volume total de pâte dans les bétons confectionnés, le volume de pâte en excès peut être calculé en déterminant le volume de la pâte compacte (contenue dans les vides entre les granulats) à partir de l'équation 1.5 (chapitre 1 §1.6.4.2). Le volume de pâte compacte V_{PC} est déterminé en calculant la compacité maximale γ du squelette granulaire sec, puisqu'il est égal au volume des vides dans les granulats compactés :

$$V_{PC} = V_{Vides} = V_{Granulats} \cdot (1 - \gamma) \quad [4.2]$$

La compacité maximale du squelette granulaire est déterminée dans le chapitre 3.

4.4.1. Calcul à partir de la surface granulaire

Dans la branche de droite figure le dénominateur de l'équation de calcul de l'épaisseur de la pâte en excès de la première approche (équation 1.4, chapitre 1 §1.6.4.2), la surface granulaire, qui est la surface de l'ensemble des granulats du squelette granulaire. Pour calculer la surface granulaire, nous additionnons les surfaces de tous les granulats du béton. Assimilés à des particules sphériques, les granulats ont une surface proportionnelle à leur diamètre moyen.

4.4.2. Calcul à partir de la taille moyenne des granulats

La branche de gauche concerne le calcul de la taille moyenne (diamètre moyen) des granulats du béton calculé dans le chapitre 3.

L'épaisseur de pâte en excès est obtenue à partir de l'équation 1.13 (chapitre 1 §1.6.4.4).

4.5. Détermination de l'épaisseur de la pâte en excès

Le volume total de pâte dans un béton est calculé en prenant en compte la fraction inférieure à 0,08 mm de granulats, considérée comme faisant partie de la suspension entourant les granulats supérieurs à 0,08 mm. Les valeurs de l'épaisseur moyenne de la pâte en excès sont présentées dans le tableau 4.7. Le calcul de l'épaisseur de la pâte en excès est fait en adoptant les deux approches.

Tableau 4.7 : Epaisseur de la pâte en excès des bétons calculé par les deux approches.

G/S	Epaisseur de la pate en excès (mm)	
	Approche [OH, 99]	Approche [BUI, 99,02]
0,8	0,0682390	0,3373294
0,9	0,0717324	0,3562989
1	0,0784378	0,3765187
1,1	0,0796987	0,3965220

Les épaisseurs des bétons autoplaçants formulés sont supérieures aux épaisseurs moyennes de la pâte en excès des différentes formulations de Bui et al [BUI, 99,02] (entre 150 et 300 microns) qui utilisent l'approche par la taille moyenne des granulats, cela peut être expliqué par les valeurs élevées des diamètres moyens de nos différents squelettes granulaires.

Les résultats des épaisseurs moyennes de la pâte en excès obtenus par Oh et al [OH, 99] varient entre 100 et 450 microns. Ce qui ne fait pas l'objet de comparaison avec les valeurs trouvés, on peut expliquer cela par les valeurs élevées des surfaces granulaires développées par nos différents mélanges de squelettes granulaires dû à une présence de quantité importante de fines ce qui a conduit à de faibles valeurs des épaisseurs de pâte en excès.

4.5.1. Bilan

L'épaisseur moyenne de la pâte en excès est un paramètre influent sur l'écoulement des bétons autoplaçants. En effet, il est nécessaire d'avoir une épaisseur de pâte moyenne autour des granulats, suffisante pour les écarter afin de réduire les frictions intergranulaires.

Cependant, pour un même volume de pâte en excès, et le même volume de granulats, l'épaisseur moyenne de la pâte en excès augmente avec le diamètre moyen du squelette granulaire (équation 1.13, chapitre 1 §1.6.4.4). La valeur absolue d'épaisseur moyenne de

pâte en excès n'est pas un paramètre indépendant, mais dépendant de la distribution granulométrique des squelettes.

Ainsi, le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction de Toulouse en France (LMDC) lors de la thèse de M.EL Barrak [BAR, 05] a développé la méthode «Excès de pâte» en définissant une approche qui soit indépendante de la distribution granulaire d'un béton, et qui permet de générer un paramètre utilisable (et comparable) quelle que soit la distribution granulaire du béton.

Nous déterminerons ce paramètre qui correspondra aux matériaux que nous avons utilisés pour la confection de notre béton autoplaçant.

4.6. Détermination du facteur représentatif du comportement autoplaçant

4.6.1. Approche

Comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe précédent, l'épaisseur de la pâte en excès dépend principalement de la taille moyenne de la distribution granulaire d'un squelette donné. Pour un même volume de pâte en excès, l'épaisseur moyenne de la pâte en excès augmente avec le diamètre moyen du squelette associé. Nous supposons tout d'abord que l'épaisseur de la pâte en excès n'est pas identique pour des tailles différentes de granulats. En effet, nous pensons que plus le granulat est grand, plus l'épaisseur de pâte couvrant sa superficie est importante, par effet de masse (ou de taille pour un granulat de même densité). Plus le diamètre d'un granulat est grand, plus épaisse est la pâte en excès couvrant sa superficie.

Nous allons donc supposer que l'épaisseur de la pâte en excès est proportionnelle à la taille du granulat (illustration à la figure 4.6). Nous définissons ainsi un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés de pâte.

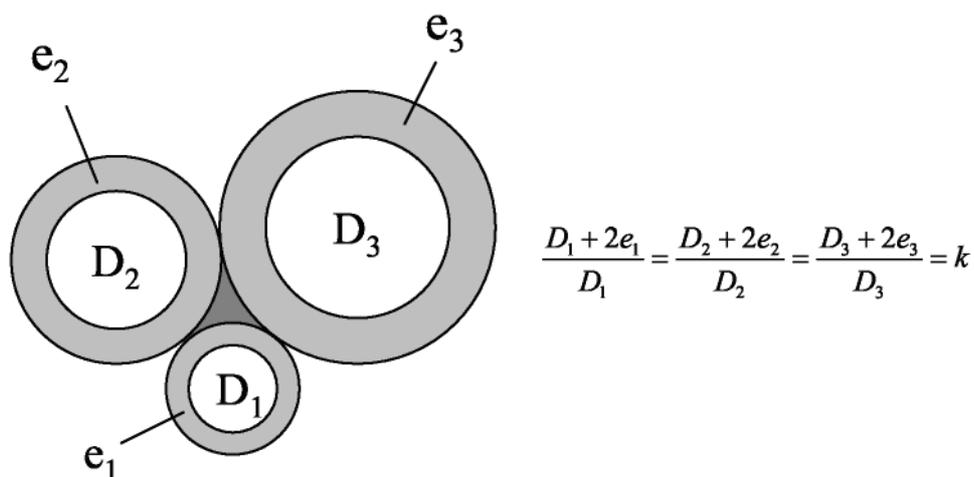


Figure 4.6 : Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre.

En pratique pour une classe i de granulats de taille D_i , l'épaisseur de la pâte en excès est e_i :

$$k = \frac{D_i + 2e_i}{D_i} \quad [4.3]$$

Par conséquent le paramètre k est identique pour toutes les classes (de $i = 1$ à n) d'un squelette granulaire. Le volume de la pâte en excès V_{PE} total peut alors s'écrire pour n classes :

$$V_{PE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi \cdot (D_i + 2e_i)^3}{6} - \frac{\pi \cdot D_i^3}{6} \right) \cdot N_i \quad [4.4]$$

Où N_i est le nombre de granulats de taille D_i de la classe i .

Ceci peut nous amener à trouver le paramètre k en développant la relation 4.4 :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{6 \cdot V_{PE}}{\pi \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot D_i^3}} = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_{G>80}}} \quad [4.5]$$

$V_{G>80}$ est le volume des granulats de taille supérieure à 80 microns, qui est entouré par la suspension constituée de pâte de ciment et des fines de taille inférieure à 80 microns des granulats.

Lorsqu'on obtient la valeur de k , nous pouvons déterminer pour chaque granulat de taille D_i l'épaisseur de pâte en excès correspondante e_i :

$$e_i = \frac{(k-1)}{2} \cdot D_i \quad [4.6]$$

4.6.2. Calcul du paramètre k

Les résultats du paramètre k correspondant aux BAP confectionnés sont présentés dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Valeurs du paramètre k des bétons autoplaçants confectionnés.

G/S	Valeurs du facteur k
0,8	1,1241
0,9	1,1240
1	1,1238
1,1	1,1233

Bui et al [BUI, 99, 02] fournissent une liste de 70 bétons autoplaçants avec un paramètre k variant entre 1,038 et 1,140 ; cependant, les bétons autoplaçants satisfaisants possèdent un paramètre k qui varie entre 1,061 et 1,132 ce qui classe les résultats des bétons confectionnés de notre étude dans le même domaine d'intervalle des bétons autoplaçants réalisés par Bui et al.

4.7. Contribution à la formulation des bétons autoplaçants

Connaissant le paramètre k nécessaire pour définir un béton autoplaçant, nous sommes capables, compte tenu de la granulométrie du squelette granulaire, de remonter à la valeur de l'épaisseur de la pâte en excès, et donc au volume de la pâte en excès. Le volume de la pâte dans une unité de volume de béton est déduit, ainsi que le volume total du squelette granulaire.

Nous savons que la somme des volumes de la pâte de ciment V_p , du squelette granulaire V_G et du volume de vides V_V forment un béton autoplaçant à un volume unité (V_V est pris approximativement égal à 2,5% dans notre cas) :

$$V_P + V_G + V_{ER} + V_V = 1 \quad [4.7]$$

Par ailleurs, l'ensemble des granulats peut être décomposé en deux parties selon la taille des granulats. Une première partie est constituée des fines de taille inférieure à 80 microns, et qui sont du même ordre de grandeur que les constituants solides de la pâte de ciment (ciment et filler). La seconde partie est ainsi constituée des granulats de taille supérieure à 80 microns, que nous notons $V_{G>80}$. Ainsi le volume total des granulats V_G est écrit :

$$V_G = V_{fines} + V_{G>80} \quad [4.8]$$

Nous avons supposé que l'eau absorbée par l'ensemble des granulats (de volume V_{EA}) n'est pas prise en compte par la pâte en excès.

$$V_P + V_{ER} - V_{EA} + V_{EA} + V_{fine} = V_{PE} + V_{PC} \quad [4.9]$$

Où V_{PE} et V_{PC} sont respectivement le volume de la pâte en excès, et le volume de la pâte compacte contenue dans les vides laissés par le squelette granulaire compacté. Ce dernier est constitué des granulats de taille supérieure à 80 microns.

$$V_{PC} = (1 - c) \cdot V_{G>80} \quad [4.10]$$

Où c est la compacité maximale (virtuelle) du squelette $V_{G>80}$

Ainsi, l'équation 4.7 peut être réécrite :

$$V_P + V_{G>80} + V_{fine} - V_{EA} + V_{EA} + V_{ER} + V_V = 1 \quad [4.11]$$

Et l'utilisation de l'équation 4.9 nous conduit à :

$$V_{PE} + V_{fine} + V_{G>80} + V_{EA} + V_V = 1 \quad [4.12]$$

Pour une granulométrie donnée, le volume des granulats de taille supérieure à 80 microns $V_{G>80}$ est une fraction du volume total des granulats V_G (pour un rapport G/S donné) :

$$V_{G>80} = a \cdot V_G \Leftrightarrow V_G = \frac{V_{G>80}}{a} \quad [4.13]$$

Où le facteur a est inférieur ou égal à 1.

De même, le volume de l'eau absorbée V_{EA} est proportionnel au volume total des granulats par l'intermédiaire d'un coefficient d'absorption volumique b , et on peut écrire :

$$V_{EA} = b \cdot V_G = \frac{b}{a} \cdot V_{G>80} \quad [4.14]$$

Le développement de la relation 4.12, nous donnera :

$$V_{PE} = 1 - V_V - V_{G>80} \cdot \left(2 - c + \frac{b}{a}\right) \quad [4.15]$$

En utilisant l'équation de l'expression de k (équation 4.5), nous remplaçons V_{PE} de l'équation 4.15 par sa valeur.

$$V_{G>80} = \frac{1 - V_V}{k^3 + 1 - c + \frac{b}{a}} \quad [4.16]$$

Le volume total des granulats (fines comprises) est exprimé donc par la relation 4.17 :

$$V_G = \frac{1 - V_V}{a(k^3 + 1 - c) + b} \quad [4.17]$$

Sachant que le volume V_V est pris approximativement égal à 2,5% du volume total unité (en principe, de 1 à 3% pour le béton autoplaçant), et que les paramètres a (fraction de granulats de taille supérieure à 80 microns), b (proportion d'eau absorbée par un volume de granulats) et c (la compacité maximale virtuelle) peuvent être déterminés ou mesurés expérimentalement, le volume total du squelette granulaire sec peut être calculé en choisissant une valeur de k correspondant au G/S choisi.

4.8. Exemple d'application pour validation

Nous considérons un squelette granulaire de rapport G/S = 1,2. Le volume de vides est fixé à 2,5 %.

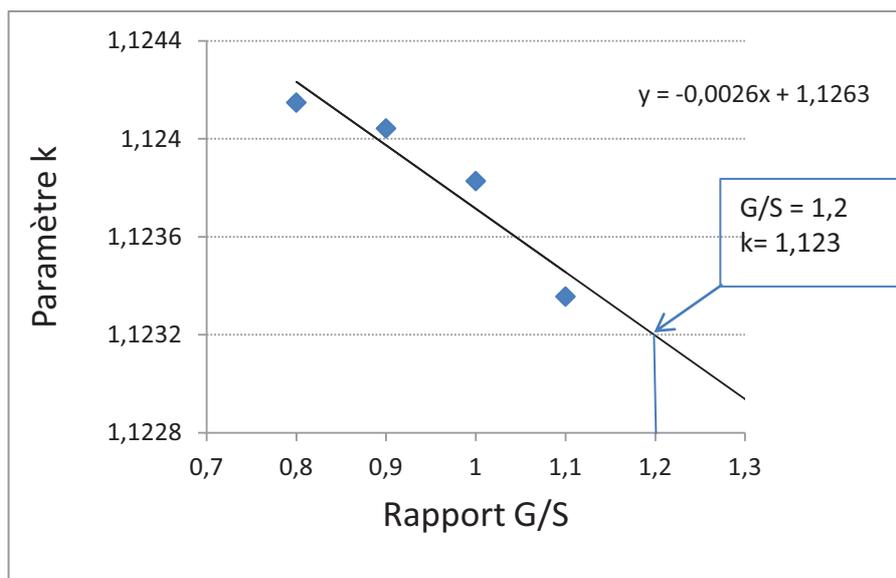


Figure 4.7 : Evolution du paramètre k en fonction du rapport G/S.

Nous évaluons d'abord le paramètre k à partir de son évolution en fonction de G/S (figure 4.7). Nous aurons un $k = 1,1232$ par extrapolation.

Pour une distribution granulaire de $G/S = 1,2$ le coefficient a est égal à $0,961$ (proportion volumique granulaire de taille supérieure à 80 microns) et le coefficient b est égal à $3,23\%$ (valeur transformée du coefficient d'absorption massique).

La compacité maximale du squelette calculée à partir du modèle d'empilement compressible est égal à $c = 0,7178$.

Compte tenu de l'incertitude (± 5 litres) avec laquelle les mesures des granulats ont été effectuées, le volume granulaire total (sable et graviers) calculé est alors : $V_g = 586 \pm 5$ litres / m^3 de béton.

La formulation peut ainsi être établie, pour 25 litres / m^3 de vides, en adoptant la composition de la pâte de ciment déjà utilisée dans la confection des bétons autoplaçants testés (tableau 4.9).

Tableau 4.9 : Composition du béton obtenu.

Matériau	Volume (l/m^3)	Masse (Kg/m^3)
Sable (0/3)	591	683,61
Gravier (3/8)		328,19
Gravier (8/16)		492,29
Ciment	107,18	329,15
Filler calcaire	50,07	136,19
Superplastifiant	2,36	2,64
E apport	224,39	224,39
Total	975	2196,46

Le béton sera confectionné en suivant les mêmes étapes que pour les autres bétons. Les résultats d'ouvrabilités sont regroupés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Ouvrabilité du béton obtenu.

Etallement (Cône d'Abrams)	Dmoy (cm)	71,5
J-Ring	Dmoy (cm)	67
V-funnel	TvF (s)	10,41
Boîte en L	H2/H1	81
Stabilité au tamis GTM	P (%)	10,65
Air occlus %	1,1	
Rc28J (MPa)	34,89	

4.9. Conclusion

Nous avons obtenue des BAP à partir d'une pâte autoplaçante associée aux graviers plus une quantité d'eau définie dans une zone sur la courbe de filtration d'eau retenue par les granulats.

Avec la théorie de la pâte en excès, nous avons déterminé l'épaisseur moyenne de la pâte en excès qui est le paramètre influent sur l'écoulement des bétons autoplaçants selon les deux approches qu'on trouve dans la littérature, celle basée sur le diamètre moyen et l'autre approche qui se base sur le calcul de la surface granulaire ; Nous avons remarqué pour cette dernière que les valeurs de l'épaisseur de pâte en excès sont dépendants de la distribution granulométrique du squelette granulaire.

Afin de minimiser l'influence de la distribution granulaire, nous avons fais intervenir un paramètre d'homothétie $\ll k \gg$ qui peut être comparable pour des bétons de différentes granulométries et qu'on a validé grâce à la base de données trouvée dans la littérature.

Ce paramètre nous a permis de déterminer le volume granulaire et d'en déduire par la suite le volume de pâte autoplaçante nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant dès lors que l'on a déterminé la quantité d'eau retenue par les granulats et cela dans une gamme de propriétés du squelette granulaire correspondant au cas de notre étude.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Notre travail de mémoire s'est inscrit dans la problématique visant à l'élaboration des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux. Il s'est situé à deux échelles : celle de la pâte et celle du béton. Ainsi, nous avons eu pour objectif de donner à la confection des BAP un caractère plus scientifique tout en appréhendant le rôle joué par la pâte de ciment dans le comportement rhéologique du béton à partir d'une association entre la pâte et le squelette granulaire en vue d'une contribution à la formulation des BAP.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une revue bibliographique concernant les propriétés des BAP en termes d'ouvrabilité et de rhéologie, les méthodes de caractérisation correspondantes, les approches de formulation existantes ainsi que le rôle joué par les différents constituants des BAP et les paramètres influents sur l'écoulement.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude rhéologique de la pâte de ciment à travers des mesures du temps d'écoulement au cône de Marsh et celles du diamètre d'étalement.

Une démarche paramétrique a été effectuée sur différentes compositions de mélanges, afin de comprendre le rôle joué par les principaux paramètres sur le comportement de la pâte autoplaçante. Les résultats de cette analyse certes intéressants ont montré les limites de cette démarche paramétrique et le besoin d'une stratégie plus complète prenant en compte tous les constituants à la fois.

La méthode des plans de mélanges s'est ainsi avérée très avantageuse. Elle a nécessité la détermination d'un domaine expérimental, et a conduit à l'élaboration d'une base de données de 38 expériences.

L'outil statistique employé dans ce chapitre nous a permis d'analyser l'ensemble des données et de déterminer dans le domaine expérimental la composition optimale de la pâte aux propriétés autoplaçante.

Dans le troisième chapitre, nous avons procédé à une caractérisation des différents squelettes granulaires en vue d'une association avec la pâte de ciment. Cette caractérisation s'est résumée dans le calcul du diamètre moyen, de la compacité maximale en adoptant la méthode d'empilement compressible et de la surface développée par les granulats.

Partant de ces caractérisations, nous avons proposé une méthode empirique pour confectionner des bétons autoplaçants, dans le quatrième chapitre. Pour cela, nous avons associée notre pâte de ciment à des squelettes granulaires de différents rapports massique gravier / sable. Cette association a nécessité l'ajout d'une quantité d'eau au-delà de celle retenue par les granulats, et les bétons obtenus se sont révélés autoplaçants.

Le supplément d'eau ajouté s'est avéré nécessaire pour augmenter le volume de pâte entourant les granulats, autorisant ainsi un écoulement autoplaçant. Nous nous sommes alors basés sur la théorie de la pâte en excès pour quantifier le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplaçant.

Pour mettre en œuvre cette théorie, nous avons défini un paramètre d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés.

Validé à partir de nos compositions et par le calcul sur la base de données bibliographiques, ce paramètre nous a permis d'aboutir à une méthode de formulation de bétons autoplaçants en déterminant le volume granulaire et d'en déduire par la suite le volume de pâte autoplaçante nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant.

L'étude entreprise a été menée au sein de notre laboratoire sur des bétons constitués à partir des matériaux de notre région, à savoir, les granulats d'une des plus grandes carrières de la région, celle de l'ENG Sidi Abdelli, ainsi que du ciment de Béni-Saf. Bien que, nous avons obtenus des résultats encourageants, un travail considérable reste à faire en encourageant tous les intervenants dans le domaine de la construction à utiliser ce type de béton innovant.

Pour se faire, une généralisation de cette étude sur une gamme élargie de graviers, de ciment ainsi que l'utilisation d'autres types d'additions minérales non calcaires pour une plus grande efficacité et économie et aller vers un contrôle rationnel et global de la qualité du béton.

Il serait intéressant aussi d'étendre cette étude aux propriétés de nos BAP à l'état durci et du point de vue de durabilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AFG, 00] AFGC. (2000), Les bétons autoplaçants : Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques – France, p 63.
- [AIT, 01] Aitcin P.C. (2001), Le béton à haute performance, Eyrolles, France, pp 225-228.
- [ASS, 05] S. Assié. (2005), Durabilité comparative des bétons autoplaçants et des bétons vibrés de même résistance mécanique. In XXIIes Rencontres Universitaires de Génie civil, AUGC.
- [BAR, 05] M.El Barrak. (2005), « Contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III – Paul Sabatier, France.
- [BAR, 77] Barrioulet M. (1977), « Contribution à l'étude des rôles respectifs joués par la pâte interstitielle et par les granulats dans le comportement mécanique du béton avant prise du liant », thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [BEN, 09] G. BENKECHKACHE, H. HOUARI, (2009) "Comparaison Des Retraits Et Fluages Des Betons Autoplaçants Et Des Betons Ordinaires Vibres", Sciences & Technologie, pp 9-16.
- [BET, 05] S. Bethmont. (2005), « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [BOU, 10] S.M.BOUKLI HACENE. (2010), "Contribution a l'étude de la résistance caractéristique des bétons De la région de Tlemcen", thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, Algérie.
- [BUF, 07] Buffo-Lacarriere L. (2007), « Prévion et évaluation de la fissuration précoce des ouvrages en béton », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, p. 246.
- [BUI, 99] BUI V. K. and MONTGOMERY D.(1999) , «Mixture porportioning method for selfcompacting high performance concrete with minimum paste volume», Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, , Paris,RILEM Publications, p. 373-384.
- [BUI, 99, 02] Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P. (2002), "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre.
- [GHO, 11] Ghomari F., Boukli Hacène S.M.A., Bouterfas M. (2011), " Optimisation De La Compacite Du Squelette Granulaire".1er Séminaire National de génie civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement.
- [HAD, 04] O.HADDAD, S.AGGOUN & R.CABRILLAC. (2004), "Influence des additions minérales sur le comportement A court terme des bétons autoplaçants", 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, Mai, Alger.
- [HAN, 06] Hans W, Reinhardt, Timo Wustholz. (2005), "About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behaviour of self compacting concrete", Materials and Structures, Rilem, Juin, pp 1-11.

- [HAY, 95] M. HAYAKAWA , Y. MATSUOKA and K. YOKOTA. (1995), "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397.
- [HIL, 09] A.EL HILALI. (2009), "Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales", thèse de doctorat de l'université Cergy Pontoise, France.
- [JIN, 02] J. Jin. (2002), "Properties of mortar for self compacting concrete", In PhD thesis, University of London, page 398.
- [JSCE, 98] Japanese Society of civil Engineering. (1998), Guide to Construction of High Flowing Concrete engineering, Gihoudou Pub, Tokyo, au Japan.
- [KAN, 80] KANTRO D.L. (1980), "Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste, a miniature slump test", cement, Concrete and aggregates.2:2, pp 95-102.
- [KEN, 40] Kennedy C.T. (1940), "The Design of Concrete Mixes", Proceedings of the American Concrete Institute, 36, pp. 373-400.
- [KLAU, 02] Klaus Holschemacher, Yvette Klug. (2002), "A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC", LACER No. 7.
- [KLU, 03] Y. Klug and K. Holschemacher. (2003), "Comparison of the hardened properties of selfcompacting concrete and normal vibrated concrete", Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik,Iceland :596-607.
- [KON, 01] G. König, K. Holschemcher, F. Dehn, and D. Wbe. (2001), "Self-compacting concrete time development of material properties and bond behavior", Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio,Japan :507-516.
- [LAR, 00] de Larrard F. (2000), "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Avril, Paris, France.
- [LAR, 99] F. De Larrard. (1999), "Concrete mixture-proportioning - A scientific approach." Modern Concrete Technology Series, no 9: E&FN SPON.
- [LER, 05] Lerov R., Rousel N. (2005), "The Marsh cone as viscosimeter: theoretical analysis and practical limits". Materials and structures, volume 35, N° 275, PP 25-30.
- [LOU, 03] A. Loukili and Ph. Turcry. (2003), "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of selfcompacting concrete." In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of buiding, 18-20, février.
- [MEB, 08] A.MEBROUKI, N.BELAS, N, BOUHAMOU, (2008), "Contribution à la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux", Afrique SCIENCE, pp 1-19.
- [MEB, 10] A.MEBROUKI. (2010), "Etude et formulation d'un béton autoplaçant a base de matériaux locaux au jeune âge ", thèse de doctorat de l'université de Mostaganem, Algérie.

- [MID, 01] Midorikawa T., Pelova G.I., Walraven J.C.(2001) , "Application of the water layer model to self-compacting mortar with different size distribution of fine aggregate", Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon.
- [NAG, 95] S. NAGATAKI and H. FUJIWARA. (1995), "Self compacting property of highly flowable concrete", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314.
- [OH, 99] Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F. (1999), "Toward mix design for rheology of self compacting concrete", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 361-37,
- [OKA, 95] H. Okamura, K. Ozawa. (1995), « Mix design for self compacting concrete », Concrete library of JSCE, N° 25, pp 107-120.
- [OUC, 99] M. Ouchi, Y. Edamatsu. (1999), « A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete », Transactions of the Japan Concrete Institute, volume 21, pp 1-6.
- [PET, 99] PETERSSON P., BILLBERG P., VAN B. K. (1999), «A model for self-compacting concrete», Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete, Paris, RILEM Publications S.A.R.L, p. 333-344.
- [PIN, 07] A. Pineaud. (2007), « Contribution a l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application a l'industrie de la préfabrication » In Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, page 271. 2007.
- [ROL, 98] S. Rols, J. Ambroise, and J. Péra. (1998), "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete." Cement and Concrete Research, pp 261-266.
- [SED, 99] T. Sedran. (1999), « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants. », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [SON, 08] Sonebi M., McKendry D. (2008), "Effect of mix proportions on rheological and hardened properties of composite cement pastes". The Open Construction and Building Technology Journal, volume 2, 15-23.
- [SU, 01] SU N., HSU K.C., CHAI H.W.(2001), "A simple mix-design method for self compacting concrete", Cement and concrete Research, vol. 31, n° 12, p. 1799-1807.
- [TAL, 09] Taleb O. (2009), "Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux ", mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.
- [TAN, 95] S. Tangtermsirikul and B. K. Van. (1995), "Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete". In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering, décembre SC-4, pp 19-20.
- [TOU, 09] Touil B. (2009), "Etude de la diffusion des ions chlorures dans les bétons locaux", mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie.

- [TOU, 05]** Toutou Z., Roussel N., Lanos C., Mélinge Y., Monnet Ph., Pontet A., Leroy R. (2005), "Rhéologies des suspensions à matrice cimentaire : approche expérimentale multi-échelle". Revue Européenne de Génie Civil, volume 9, n° 3, pp 309-320.
- [TUR, 04]** P. Turcry. (2004), « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, France.
- [YAM, 07]** J. Yammine. (2007), « Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques », thèse de doctorat, Ecole Normale de Cachan, Université de Paris 6, France.
- [ZER, 09]** Zerbino R., Berragàn B., Garcia T., Gettu R. (2009), "Workability tests and Rheological parameters in self-compacting concrete". Materials and Structures, 42, PP 947-960. DOI 10.1617/s 11527-008-9434-2.

ANNEXES

Annexe 1: Composition et aspects qualitatives des pâtes de ciment confectionnées

PATES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aspect	F	F	F	F	P	P	F	F	F	F	P	P
C	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
F	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
E/L	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Aspect	P	P	P	P	P	P	M	M	M	M	M	S
C	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
F	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
E/L	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Aspect	M	M	M	M	S	S	F	F	F	F	P	P
C	90	90	90	90	90	90	80	80	80	80	80	80
F	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
E/L	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Aspect	F	F	F	F	P	P	P	P	P	P	P	P
C	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
F	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Aspect	M	M	M	M	M	S	M	M	M	M	S	S
C	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
F	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
E/L	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Aspect	F	F	F	F	P	P	F	F	F	F	P	P
C	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
F	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
E/L	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7

PATES	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Aspect	P	P	P	M	M	M	M	M	M	M	S	S
C	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
F	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
E/L	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Aspect	M	M	M	M	S	S	F	F	F	F	P	P
C	70	70	70	70	70	70	60	60	60	60	60	60
F	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40
E/L	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Aspect	F	F	F	F	P	P	P	P	P	M	M	M
C	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
F	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7
PATES	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Aspect	P	P	P	S	S	S	M	M	M	S	S	S
C	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
F	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
E/L	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
P	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7

P:PLASTIQUE M: MESURABLE
F: FERME S: SEGREGATION

PLASTOCRETE® TECHNO 7

Plastifiant/Réducteur d'eau de nouvelle génération pour bétons prêts à l'emploi.



Conforme à la Norme NF EN 934-2 Tab. 1 et 2

Présentation PLASTOCRETE TECHNO 7 est un plastifiant réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide brun.

Domaines d'application PLASTOCRETE TECHNO 7 est un plastifiant/réducteur d'eau permet d'obtenir un long maintien de rhéologie (>1H30). Il est donc parfaitement adapté à l'industrie du BPE et à l'utilisation sur chantier.

PLASTOCRETE TECHNO 7 permet la fabrication de :

- bétons plastiques à fluides,
- bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice,
- bétons pompés sur longues distances.

Dans les bétons fluides, notamment les Bétons Autonivelants, PLASTOCRETE TECHNO 7 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule plus robuste vis-à-vis des variations de dosage en eau et des propriétés des constituants.

Caractères généraux PLASTOCRETE TECHNO 7 est un plastifiant réducteur d'eau qui confère au béton les propriétés suivantes :

- haute réduction d'eau,
- maintien prolongé de la rhéologie,
- robustesse vis-à-vis de la ségrégation,
- bel aspect de parement au décoffrage.

CLASSIFICATION 3R



Caractéristiques

Aspect Liquide brun

Conditionnement

- Fût de 220 kg
- Conteneur perdu de 1000 kg
- Vrac

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,12 ± 0,03
pH	4,7 ± 1,0
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 0,5 %
Extrait sec	30,0 ± 1,5 %
Conditions d'application	
Dosage	Dosage usuel du PLASTOCRETE TECHNO 7 : 0,3 % à 1,0 %
Mise en œuvre	PLASTOCRETE TECHNO 7 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

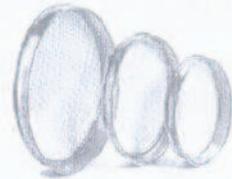
Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France



FICHE TECHNIQUE PRODUIT

XPP 18-540



PRODUIT : 0 / 3.15 mm
 FAMILLE : sables
 SITE : SIDI-ABDELLI Tél:061.22.21.91

NATURE : Calcaire (roche massive)
 ELABORATION : concassage+criblage

LaboWin®

PARTIE NORMATIVE

valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

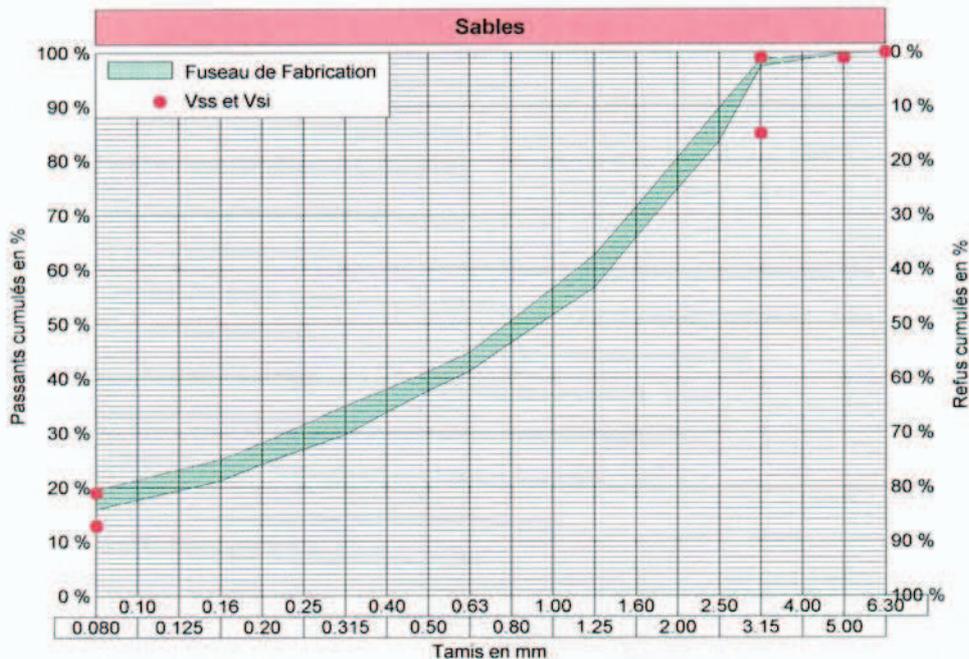
- Classe granulaire : 0/3.15
- Usage : art. 10 : Granulats pour bétons hydrauliques

Essais	Catégorie	Vss	Vsi	Xu max.	Xu min.	sf	(Vss-Vsi)/3.3
passant à 2D [6.30 mm]	GrA	...	100.0	...	97.0	0.0	...
passant à 1.58D [5.00 mm]	GrA	...	99.0	...	98.0	0.1	...
passant à D [3.15 mm]	GrA	99.0	85.0	100.0	82.0	0.7	4.2
passant à 0.08 mm	fC	19.0	12.9	21.0	10.9	0.8	...
Module Finesse	MFA	2.85	2.25	3.00	2.10	0.04	0.18
Equiv. de sable à 10%	PSB	...	60.00	...	55.00	8.66	...
VB 0/2	PSA	1.00	...	1.30	...	0.29	...

PARTIE INFORMATIVE

période du 25/12/2005 au 14/03/2006

Essais	Max.	Xf + k.Sf	Xf	Xf - k.Sf	Min.	Sf	CV	Nbre
passant à 2D [6.30 mm]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	4
passant à 1.58D [5.00 mm]	100.0	100.0	99.9	99.8	99.8	0.1	0.1	4
passant à D [3.15 mm]	98.6	98.9	98.0	97.1	97.4	0.7	0.7	4
passant à 0.08 mm	17.8	17.9	16.9	15.9	15.9	0.8	4.7	4
Module Finesse	2.58	2.6	2.55	2.5	2.50	0.04	1.57	4
Equiv. de sable à 10%	83.00	83.8	73.00	62.2	68.00	8.66	11.86	3
VB 0/2	0.97	0.7	0.38	0.0	0.23	0.29	76.32	6



• AUTRE(S) CARACTERISTIQUE(S) :
 Mvr sables : 2.56
 Impuretés Prohibés : Non décelées

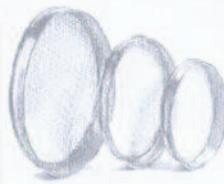
Responsable qualité

date : 18/04/2006
 Fethi Khaled



FICHE TECHNIQUE PRODUIT

XPP 18-540



PRODUIT : 3.15 / 8 mm
 FAMILLE : gravillons
 SITE : SIDI-ABDELLI Tél:061.22.21.91

NATURE : Calcaire (roche massive)
 ELABORATION : concassage+criblage

LaboWin®

PARTIE NORMATIVE

valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

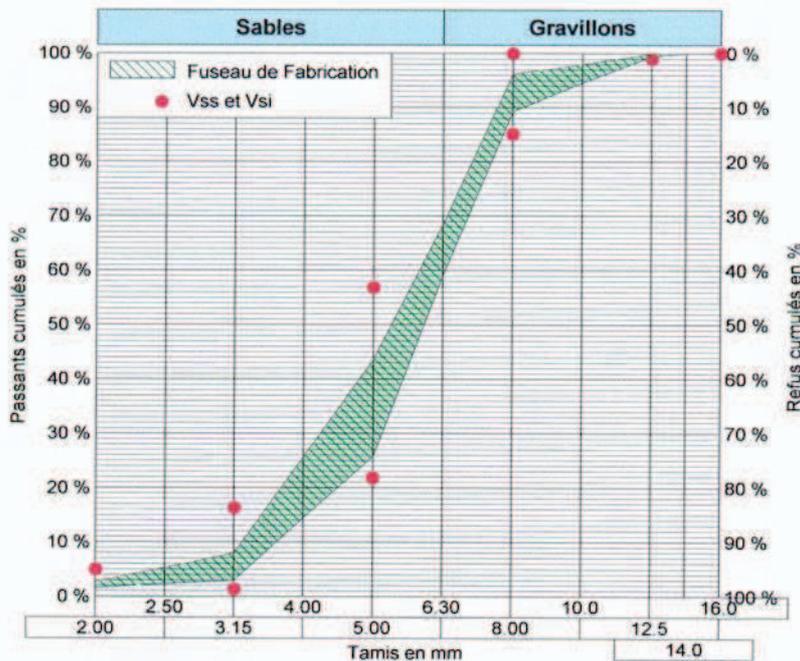
- Classe granulaire : 3.15/8.00
- Usage : art. 7 : Granulats pour chaussées (couches de fondation, de base et de liaison)

Essais	Catégorie	Vss	Vsi	Xu max.	Xu min.	sf	(Vss-Vsi)/3.3
Los Angeles	D	35.00	...	38.00	...	1.20	...
Micro Deval MDE	D	30.00	...	34.00	...	2.41	...
passant à 2D [16.0 mm]	IV	...	100.0	...	99.0	0.0	...
passant à 1.58D [12.5 mm]	IV	...	99.0	...	98.0	0.4	...
passant à D [8.00 mm]	IV	100.0	85.1	100.0	80.1	3.0	4.5
passant à (d+D)/2 [5.00 mm]	IV	56.9	21.9	62.9	15.9	7.7	10.6
passant à d [3.15 mm]	IV	16.4	1.4	21.4	0.0	2.1	4.5
passant à 0.63d [2.00 mm]	IV	5.0	...	6.0	...	0.5	...
Aplatissement	IV	35.00	...	39.00	...	0.21	...
Propreté superficielle	IV	5.00	...	5.50	...	0.21	...

PARTIE INFORMATIVE

période du 24/12/2005 au 08/04/2006

Essais	Max.	Xf + k.Sf	Xf	Xf - k.Sf	Min.	Sf	CV	Nbre
Los Angeles	30.88	31.4	29.85	28.4	28.54	1.20	4.02	3
Micro Deval MDE	22.60	23.1	20.07	17.1	17.80	2.41	12.01	3
passant à 2D [16.0 mm]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	8
passant à 1.58D [12.5 mm]	100.0	100.0	99.9	99.4	98.8	0.4	0.4	8
passant à D [8.00 mm]	98.5	96.3	92.6	88.8	89.2	3.0	3.2	8
passant à (d+D)/2 [5.00 mm]	43.1	44.0	34.4	24.8	21.8	7.7	22.4	8
passant à d [3.15 mm]	8.2	7.9	5.3	2.7	2.8	2.1	39.6	8
passant à 0.63d [2.00 mm]	3.0	2.7	2.1	1.5	1.5	0.5	23.8	8
Aplatissement	29.50	29.6	29.35	29.1	29.21	0.21	0.72	2
Propreté superficielle	1.39	1.5	1.19	0.9	0.99	0.21	17.65	4



• AUTRE(S) CARACTERISTIQUE(S) :
 Impuretés Prohibés : non décelées

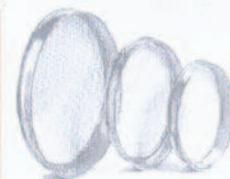
Responsable qualité

date : 18/04/2006
 Fethi Khaled



FICHE TECHNIQUE PRODUIT

XPP 18-540



PRODUIT : 8 / 16 mm
 FAMILLE : gravillons
 SITE : SIDI-ABDELLI Tél:061.22.21.91

NATURE : Calcaire (roche massive)
 ELABORATION : concassage+criblage

LaboWin®

PARTIE NORMATIVE

valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

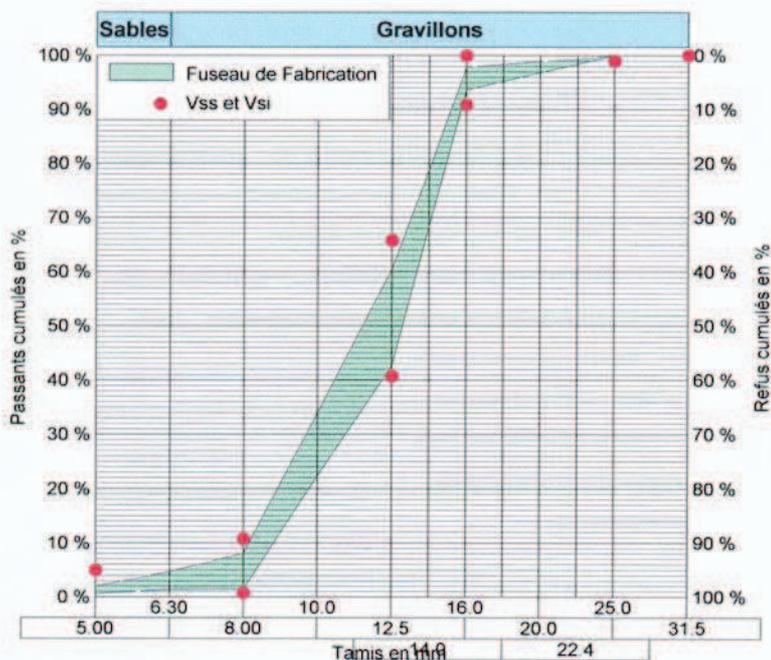
- Classe granulaire : 8.00/16.0
- Usage : art. 7 : Granulats pour chaussées (couches de fondation, de base et de liaison)

Essais	Catégorie	Vss	Vsi	Xu max.	Xu min.	sf	(Vss-Vsi)/3.3
Los Angeles	D	35.00	...	38.00	...	1.20	...
Micro Deval MDE	D	30.00	...	34.00	...	2.41	...
passant à 2D [31.5 mm]	III	...	100.0	...	99.0	0.0	...
passant à 1.58D [25.0 mm]	III	...	99.0	...	98.0	0.0	...
passant à D [16.0 mm]	III	100.0	90.9	100.0	85.9	1.4	2.8
passant à (d+D)/2 [12.5 mm]	III	65.8	40.8	71.8	34.8	6.2	7.6
passant à d [8.00 mm]	III	10.8	0.8	15.8	0.0	2.8	3.0
passant à 0.63d [5.00 mm]	III	5.0	...	6.0	...	0.6	...
Aplatissement	III	20.00	...	24.00	...	0.14	...
Propreté superficielle	III	4.00	...	4.50	...	0.22	...

PARTIE INFORMATIVE

période du 24/12/2005 au 05/04/2006

Essais	Max.	Xf + k.Sf	Xf	Xf - k.Sf	Min.	Sf	CV	Nbre
Los Angeles	30.88	31.4	29.85	28.4	28.54	1.20	4.02	3
Micro Deval MDE	22.60	23.1	20.07	17.1	17.80	2.41	12.01	3
passant à 2D [31.5 mm]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	7
passant à 1.58D [25.0 mm]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	7
passant à D [16.0 mm]	98.1	97.8	96.1	94.3	94.5	1.4	1.5	7
passant à (d+D)/2 [12.5 mm]	63.0	61.0	53.2	45.5	43.7	6.2	11.7	7
passant à d [8.00 mm]	8.3	8.5	5.0	1.5	1.7	2.8	56.0	7
passant à 0.63d [5.00 mm]	2.4	2.0	1.2	0.4	0.7	0.6	50.0	7
Aplatissement	16.51	16.6	16.41	16.2	16.31	0.14	0.85	2
Propreté superficielle	1.19	1.1	0.79	0.5	0.39	0.22	27.85	9



• AUTRE(S) CARACTERISTIQUE(S) :
 Impuretés Prohibés : non décélées

Responsable qualité

date : 18/04/2006
 Fethi Khaled