

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière: Génie des matériaux

Option : science des matériaux pour la construct-durable

Thème

**Optimisation de la pâte d'un béton autoplaçant
(BAP) à base d'ajouts cimentaires locaux**

Réalisé par :

TALEB Mounir

Encadreur :

Pr. GHERNOUTI .Y

Co-Encadreur :

GUECIOUER . D

Remerciements

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur Mr.Ghernouti Yousef pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet. Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Nous tenons à remercier pour M^{me}. Gueciouer. D aides qu'il nous a données. Nôtres remerciement vont également aux responsables et personnel du au laboratoire de Centre d'Etude et de Service Technologique de l'industrie des matériaux de construction (CETIM).

Et enfin , que nos chers parents et familles , et bien avant tout trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices , aides ,soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de master dans les meilleures conditions.

Résumé

Les propriétés auto plaçantes du béton proviennent nécessairement de celles de la pâte. Pour cela, les études de formulations se basent essentiellement sur la pâte et ses constituants. Les mesures rhéologiques effectuées sur pâtes peuvent servir de base pour la prédiction des propriétés rhéologiques des bétons. C'est dans ce contexte que s'articule notre travail dans ce mémoire.

Pour aboutir à une formulation de pâte autoplaçante, plusieurs essais de mesures des diamètres d'étalement au mini-cône ont été effectués sur des pâtes à différent dosage en superplastifiant et à différent pourcentage d'ajouts cimentaires (marbre et tuf) pour déterminer le point de saturation de l'adjuvant. Par la suite une caractérisation à l'état frais et durci est effectuée sur des bétons autoplaçants, en retenant uniquement les pâtes autoplaçantes optimisées.

Mots-clés: Béton autoplaçant, ajouts cimentaires, marbre, tuf, étalement, point de saturation.

المخلص

ان خصائص الخرسانة ذاتية التوضع تتعلق بالضرورة بخصائص العجينة. للأجل هذا تتركز دراسات الصياغة اساسا على العجينة و مكوناتها. ان القياسات الريولوجية على العجينة تسمح بالتكهن بخصائص الريولوجية للخرسانة. في هذا النص من المقال نوضح العمل الذي قمنا به في هذه المذاكرة.

للأجل الحصول على صياغة لعجينة الخرسانة ذاتية التوضع نقوم بالكثير من المحاولات على قياسات القطر عن طريق مخروط صغير وذلك لعجينة ذات اختلاف في مقادير الملدن و مختلفة النسبة في المضافات الاسمنتية(الرخام او الطف) وهذا من اجل تعيين نقطة التشبع المعزز. و بعد ذلك نحجز خصيصا العجائن ذاتية التوضع المثالية و نلاحظ تأثيرها على مميزات الخرسانة ذاتية التوضع في الحالة الطازجة والمتصلبة .

كلمات- مفاتيح. خرسانة ذاتية التوضع , مضافات اسمنتية, الرخام , الطف, النشر, نقطة التشبع.

TABLE DE MATIERES

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

Partie Théorique

Chapitre1

1.1. Introduction.....	3
1.2.constituants des bétons autoplaçants.....	4
1.2.1.granulats.....	5
1.2.2. pâte.....	5
1.2.2.1. Ciment.....	5
1.2.2.2.Addition minérales.....	6
1.2.2.3.Super plastifiants.....	7
1.2.2.4.Agent de viscosité.....	8
1.2.2.5.Eau.....	9
1.3. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP.....	9
1.4. Rôle des additions minérales.....	11
-Effet filler ou effet de remplissage.....	12
-Effet chimique ou pouzzolanique.....	12
1.5.Méthodes de formulation des BAP.....	12
1.5.1.Approche Japonaise.....	12
1.5.2.Approche Suédoise.....	15
1.5.3.Approche de la JSCE.....	15

TABLE DE MATIERES

1.5.4. Approche du laboratoire Central des ponts et chaussées (LCPC).....	16
1.6. Caractérisation d'un béton autoplaçant (BAP).....	17
1.6.1. Caractérisation à l'état frais.....	17
1.6.1.1. Essai évaluant la fluidité (étalement).....	17
1.6.1.2. Essais évaluant la déformabilité.....	18
-Essai de la boîte en « L ».....	18
1.6.1.3. Essais évaluant la stabilité.....	20
-Essai de stabilité au tamis.....	20
1.6.2. Caractérisation à l'état durci.....	21
1.6.2.1. Propriétés mécaniques.....	21
-Résistance à la compression.....	22
-Résistance à la traction.....	22
1.7. Rhéologie de la pâte d'un béton autoplaçant.....	23
1.7.1. Les coulis de ciment.....	23
1.7.2. Méthodes d'optimisation des coulis de ciment.....	23
1.7.3. Consistance de la pâte de ciment : Aspect visuel.....	24
-Un aspect fluide.....	24
-Un aspect plastique.....	24
-Un aspect ferme.....	24
1.7.4. Fluidité.....	24
1.7.5. L'Approche de mesure de fluidité au mini Cône.....	24

TABLE DE MATIERES

- Essais d'étalement au mini-cône.....	25
- Le point de saturation	25
1.8.Conclusion.....	26

Partie expérimentale

Chapitre 2

2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	27
2.1. Introduction.....	27
2.1.Ciment.....	27
2.2.Ajouts cimentaires.....	29
2.2.1.Poudre de marbre.....	29
2.2.2.Poudre de tuf.....	31
2.3.Super plastifiant.....	33
2.4.Caractéristiques des granulats.....	35
2.5.Analyse granulométrique.....	37

Chapitre 3

3.Optimisation de la pâte d'un Béton autoplaçant à base d'ajouts cimentaires.....	41
3.1.Formulations étudiées.....	41
3.2.Méthodes de préparation des pâtes de ciment.....	42
3.3. Optimisation de la pâte de ciment à base d'ajout tuf	43
3.3.1.Détermination de points de saturation del'adjuvant.....	45
3.4.Optimisation de la pâte de ciment à base d'ajout de marbre.....	49
3.4.1.Détermination de points de saturation de l'adjuvant.....	52
3.5. Analyse et discussions des résultats.....	55

TABLE DE MATIERES

Chapitre 4

4. Formulation d'un béton autoplaçant.....	57
4.1. Méthode de formulation pratique des BAP.....	57
4.2. Préparation de la gâchée.....	59
4.3. Conservation des éprouvettes.....	60
4.4. Essais et caractérisation des bétons autoplaçants.....	61
4.4.1. Essais et caractérisation sur béton frais.....	61
-Essais au cône d'Abrams.....	61
-Essai de la boîte en L.....	64
-Essai de stabilité au tamis.....	66
-La masse volumique.....	68
4.4.2. Essais et caractérisation du béton durci.....	70
-Essai de compression.....	71
-Essai de traction par flexion.....	73

CONCLUSION GENERALE

-CONCLUSION GENERALE.....	76
---------------------------	----

-Référence bibliographique

-Annexe

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Fig 1.1: Constituants des bétons ordinaires et des bétons Autoplaçants.....	4
Fig1.2: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton auto plaçant [04].....	6
. Fig 1.3 : Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate [05].....	8
Fig 1.4: Les étapes d'interaction entre l'eau et les polysaccharides [04].....	8
Fig 1.5: Optimisation du dosage agent de viscosité-superplastifiant [09].....	9
Fig1.6: Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.....	13
Fig1.7: Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers...	14
Fig1.8: Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D [23].....	14
Fig 1.9.: Représentation schématiques de l'essai d'étalement.....	18
Fig1.10: Schéma de cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement.....	18
Fig 1.11: Schéma détaillé de la boîte en «L».....	19
Fig 1.12: L'écoulement de BAP dans la boîte en «L».....	19
Fig 1.13: Représentation schématiques de l'essai de stabilité au tamis.....	21
Fig 1.14: dispositif de l'essai de stabilité au tamis.....	21
Fig1.15: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) Correspondant.....	22
Fig 1.16: Appréciation visuelle de la consistance d'une pâte.....	24
Fig 1.17: Mini-cône pour la mesure d'étalement.....	25
Fig 2.1: Essai de consistance.....	28
Fig 2.2: Perméabilimètre de Blaine.....	28
Fig 2.3: Poudre de marbre utilisée.....	29
Fig 2.4: Diffractogramme X de la poudre de marbre.....	31
Fig 2.5: Poudre de Tuf utilisé.....	31

LISTE DES FIGURES

Fig 2.6:Diffractogramme X de la poudre de Tuf.....	33
Fig 2.7:Appareil de los Angeles.....	36
Fig 2.8:Appareil de Micro-Deval.....	36
Fig 2.9: Essai au bleu de methylene.....	36
Fig 2.10:Essai d'équivalent en sable.....	36
Fig 2.11: Analyse granulométrique des granulats.....	40
Fig 3.1:Malaxeur des pâtes	42
Fig 3.2:Préparation du coulis.....	42
Fig 3.3 Essai d'étalement au mini-cône.....	42
Fig 3.4:Evolution de l'étalement en fonction de SP avec tuf SSB=3440 cm ² /g	44
Fig 3.5:Evolution de l'étalement en fonction de SP avec tuf SSB= 5700 cm ² /g	45
Fig 3.6:Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base de tuf SSB=3440 cm ² /g	47
Fig 3.7: Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base tuf SSB= 5700 cm ² /g	49
Fig 3.8:Evolution de l'étalement en fonction de SP avec marbre SSB=3960 cm ² /g ..	50
Fig 3.9:Evolution de l'étalement en fonction de SP avec marbre SSB=5910 cm ² /g ..	51
Fig 3.10:Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base marbre SSB=3960 cm ² /g...53	
Fig 3.11:Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base marbre SSB= 5910 cm ² /g..55	
Fig 4.1:Malaxeur de béton autoplaçant.....	60
Fig 4.2:Moules de béton autoplaçant.....	60
Fig 4.3:Conservation des éprouvettes.....	60
Fig 4.4:Valeurs d'étalements pour les différents BAP.	63
Fig 4.5:Valeurs des temps (T500) pour les différents BAP étudiés.....	63
Fig 4.6: Essais de la boîte en L.....	64
Fig 4.7:Variation la capacité de remplissage pour les différents BAP.....	65
Fig 4.8:Evolution T500 de la boîte en L pour les différents BAP.....	66
Fig 4.9: Essai de stabilité au tamis.....	67
Fig 4.10:Variation de la stabilité au tamis pour les différents BAP.....	68

LISTE DES FIGURES

Fig 4.11:Essai de la masse volumique.....	69
Fig 4.12:Variation de la masse volumique à l'état frais des différents BAP.....	70
Fig 4.13:Éprouvettes d'essai de traction.....	71
Fig 4.14:Éprouvettes d'essai de compression.....	71
Fig 4.15: Presse utilisée pour la compression.....	71
Fig 4.16:Résistance à la compression à 28jours des différents BAP.....	72
Fig 4.17:Détermination de la résistance à la traction par flexion.....	73
Fig 4.18: Surface de rupture.....	74
Fig 4.19: Résistance à la traction par flexion à 28jours des différents BAP.....	74

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1:Composition chimique du ciment CEM II/B- 42,5.....	27
Tableau 2.2: Composition minéralogique du ciment CEM II/B- 42,5.....	28
Tableau2.3:Caractéristiques physiques du ciment CEM II/B- 42,5.....	28
Tableau 2.4:Caractéristiques mécanique du ciment CEM II/B- 42.....	29
Tableau2.5: Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	30
Tableau2.6:Composition chimique de la poudre de marbre.....	30
Tableau2.7:Caractéristiques physiques de la poudre de tuf.....	32
Tableau 2.8:Composition chimique de la poudre de tuf.....	32
Tableau 2.9: Caractéristiques physiques des granulats.....	35
Tableau 2.10:Caractéristiques physiques du sable d'oued souf (0/4).....	36
Tableau 2.11: Analyse granulométrique du sable d'oued souf de fraction (0/4).....	37
Tableau2.12: Analyse granulométrique du gravier de fraction(8/15).....	38
Tableau 2.13: Analyse granulométrique du gravier de fraction (3/8).....	39
Tableau3.1 : Composition des pâtes étudiées.....	41
Tableau3.2:Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout tuf avec SSB=3440 cm ² /g.....	43
Tableau3.3:Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout tuf avec SSB =5700cm ² /g.....	44
Tableau3. 4: Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes a base de tuf avec SSB=3440 cm ² /g.....	46
Tableau 3.5: Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes a base de tuf SSB= 5700 cm ² /g	48
Tableau3.6: Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout marbre avec SSB=3960 cm ² /g.....	50
Tableau3.7:Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout marbre avec SSB=5910 cm ² /g.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau3.8:Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes à base de marbre SSB=3960 cm ² /g.....	52
Tableau3.9:Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes à base de marbre SSB=5910 cm ² /g.....	54
Tableau 4.1 : Constituants pour 1m ³ du (BAP)	59
Tableau4.2:Résultats de l'essai au cône d'abrams et les temps de T500.....	62
Tableau4.3:Résultats d'essai de la boîte en L.....	65
Tableau 4.4:Résultats de l'essai de la stabilité au tamis	67
Tableau 4.5:Résultats de masse volumique à l'état frais.....	69
Tableau4.6: Résultats d'essai de compression sur les BAP étudiés.....	72
Tableau4.7:Résultats d'essai de traction par flexion sur les BAP étudiés.....	74

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton qui résulte du mélange des différents composants à savoir (pâte pure, granulats, d'éventuelles additions minérales et chimiques permet la réalisation de structures spectaculaires caractérisées par la complexité des formes proposées par les architectes concepteurs, dont les esquisses graphiques montrent des courbures et décrochements très variables qui nécessitent une forte concentration en armatures.

Après installation des coffrages et la pose d'un confinement d'armatures dense, ce cas nous oblige l'emploi d'un béton spécial, car le béton traditionnel risque de donner des désagréments pour ces structures. La mise en place du béton qui va permettre la garantie de bons résultats et un manque de surveillance pour une densité en armatures, rend l'application des bétons ordinaires à ces types d'ouvrages très difficiles avec des défaillances structurales très probables. Pour la construction de structures durables et résistantes, on doit développer non seulement un béton présentant des qualités améliorées, mais aussi d'assurer la bonne mise en place pour atteindre les objectifs de la mise en service de la structure.

La durabilité d'une structure en béton dépend intimement des différentes étapes de sa réalisation et de la méthode de sa conception. Jusqu'à la mise en service de la structure, le béton mis en place traverse deux étapes importantes doivent être satisfaites. On distingue : l'état frais, et l'état durci.

- L'état frais: Définit par l'état du matériau depuis le malaxage jusqu'au début de prise du liant, ou l'on doit avoir un bon remplissage dans les coffrages surtout là où il y a un obstacle dû à une forte concentration en armatures tout en ayant un béton uniforme et homogène.

- L'état durci : On doit viser un comportement mécanique performant, de faibles valeurs de porosité. La combinaison de ces facteurs contribue à garantir une longue durée de vie de l'ouvrage.

Ajoutons à cela l'importante évolution dans le domaine du calcul des structures qui a fait que ces dernières soient de plus en plus complexes. En effet, beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Chose qui a

INTRODUCTION GÉNÉRALE

incité les chercheurs à concevoir des bétons qui seraient mieux adaptés aux nouvelles structures. Ces bétons qui sont très fluides et qui se mettent en place sous le seul effet de leur poids propre sont connus sous le nom de « Bétons Autonivelants (BAN)» ou « Bétons Autoplaçants (BAP) »

Les bétons autoplaçants sont souvent composés d'additions minérales. C'est dans cette optique, que s'inscrit notre mémoire qui s'articule autour de la formulation et la caractérisation des bétons autoplaçants avec ajouts cimentaires disponibles localement. Notre objectif est donc de valoriser les matériaux locaux dans la production des bétons autoplaçants.

Le présent mémoire s'articule en deux parties :

La première partie présente l'état de l'art des bétons autoplaçants (BAP) d'un point de vue générale. Dans la deuxième partie expérimentale, deux volets ont été traités. Le premier volet concerne particulièrement l'étude à l'échelle de la pâte (ciment et fines). Son objectif est de comprendre l'influence des additions minérales sur le comportement rhéologique de la pâte des bétons autoplaçants. Dans cette partie plusieurs essais de mesures des diamètres d'étalement au mini-cône ont été effectués sur des pâtes à différents dosage en superplastifiant et à différents pourcentages d'ajouts (marbre et tuf) pour déterminer le point de saturation de l'adjuvant. Pour cela, nous avons fixé la quantité de liant et le rapport eau/liant et nous avons varié le type et la finesse des additions tuf et marbre ainsi le dosage en superplastifiant

Le second volet expérimentale a pour but la formulation des différents bétons en se basant sur le dosage de saturation en adjuvant qui a été déjà déterminé, ensuite de s'intéresser aux essais sur le béton à l'état frais et à l'état durci. Nous rappelons que les paramètres étudiés sont : la nature des ajouts (la poudre de tuf et la poudre de marbre) et la finesse de ces deux ajouts.

Pour clôturer, nous avons résumé l'ensemble des résultats de ce travail dans une conclusion générale.

Partie

Théorique

Chapitre 1

Recherche

bibliographique

1.1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP ou SCC en anglais pour self compacting concrete) ont été formulés au Japon vers la fin des années 80 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [01].

Ces bétons se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner dans des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du béton (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

Le constructeur Algérien ne semble pas vouloir quitter le système classique de la construction et les applications en béton autoplaçant semblent être très limitées. Il est à noter que le béton autoplaçant nécessite un système de coffrage de qualité et parfaitement étanche.

Par définition un béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique [02].

Par rapport aux bétons vibrés, les avantages des bétons autoplaçants sont [03, 04] :

- Augmentation de la productivité en raison de la réduction du temps de réalisation et réduction des nuisances sonores dues à la vibration.
- Milieu et conditions du travail au site amélioré.
- Qualité extérieure améliorée ainsi que la bonne qualité de la surface des éléments en réduisant des défauts d'apparence.
- Facilité de bétonnage des éléments fortement ferraillés.
- Remplissage des coffrages de grande hauteur ou de forme complexe, surtout, en cas de présence des parties difficilement accessibles.
- Réduction des coûts de construction.

Toutefois, les bétons autoplaçants présentent aussi des inconvénients non négligeables telles que :

- Augmentation du coût des matières premières à cause d'une quantité relativement élevée de fines et de l'utilisation des adjuvants.
- Augmentation des déformations différées, comme le retrait et le fluage du béton.
- Utilisation des coffrages plus étanches.

Le principal problème dans la formulation d'un béton autoplaçant est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation. Pour augmenter la fluidité du mélange béton, l'eau est ajoutée dans ce cas, mais ce constituant peut affecter la viscosité du mélange en diminuant ainsi la résistance à la ségrégation. De ce fait, le bon choix des constituants s'avère souvent très nécessaire pour certaines formulations.

1.2. Constituants des bétons autoplaçants

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte. Par rapport aux bétons ordinaires (BO), les bétons autoplaçants (BAP) ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton (voir fig 1.1).

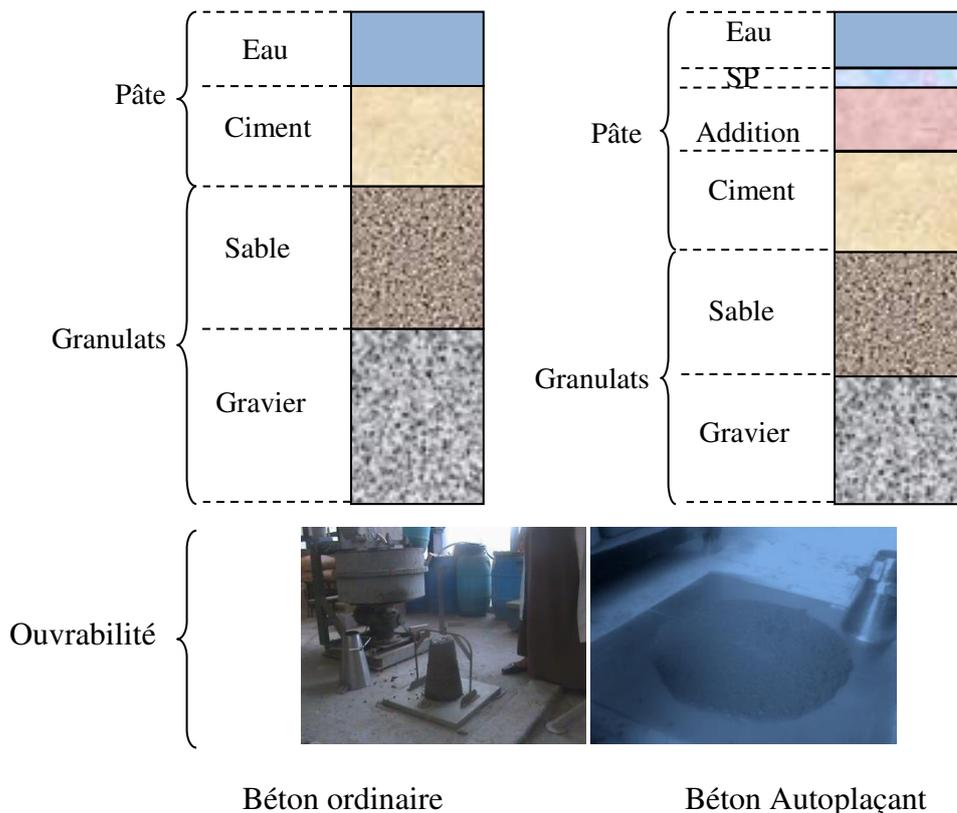


Fig 1.1 Constituants des bétons ordinaires et des bétons Autoplaçants

Les constituants du béton autoplaçant ont un rôle très important dans la détermination des propriétés de ce matériau aux états frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des bétons autoplaçants.

1.2.1. Granulats

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

Ces deux facteurs conduisent à prendre, pour les bétons autoplaçants, un rapport gravier/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée [04].

1.2.2. Pâte

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment+ additions+ eau efficace) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les bétons autoplaçants est donc élevé (330 à 400l/m³).

1.2.2.1. Ciment

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

Avec l'augmentation du dosage de ciment dans le béton, plus de chaleur se produit au cours de l'hydratation du ciment ainsi que plus de déformations différées (retrait et fluage) à long terme. Il est à noter que les effets engendrés par l'ajout excessif du ciment sont propices à l'apparition des fissures pour les éléments en béton.

Etant donné que les bétons autoplaçants contiennent plus de fines que les bétons ordinaires, une partie du ciment est souvent remplacée par les additions minérales en vue de limiter les effets défavorables mentionnées ci-dessus tout en assurant la résistance et la durabilité suffisantes des bétons autoplaçants.

1.2.2.2. Additions minérales

Les compositions de béton autoplaçant comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes.

Ce sont les exigences de résistances à la compression, les critères de durabilité (EN 206, DTU 21, ou normes XP P 18-305 etc..) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire etc.) et leur proportion respective.

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

Toutefois, l'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais dépend principalement du dosage, du type et de la finesse [05].

L'addition la plus utilisée généralement est la poudre de calcaire appelée aussi filler de calcaire car elle est généralement admise dans plusieurs travaux de recherches en tant qu'ajout économiquement fiable.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton [04] (voir fig 1.2).

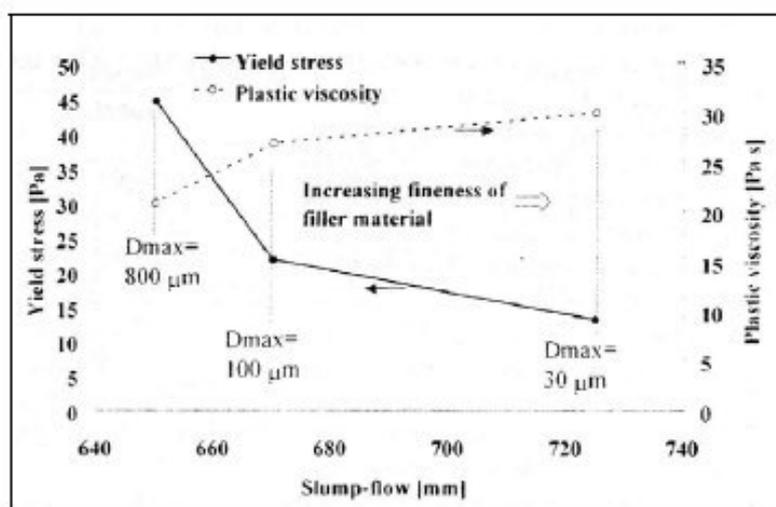


Fig 1.2 Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant [04].

L'une des fines les plus récentes utilisées comme addition remplaçant une partie du ciment dans le béton autoplaçant sont les fines d'argiles cuites à une température de 900°C. L'ajout de 5% de ces fines qui se présentent sous forme de poudre de déchet de brique a permis non seulement d'améliorer les résistances mécaniques mais aussi de favoriser un meilleur comportement rhéologique en matière de fluidité et de stabilité par rapport au béton autoplaçant témoin (sans ajout) [07].

Comme on peut citer aussi d'autres ajouts comme le laitier, utilisé dans le cadre du développement de la formulation du BAP à base des matériaux locaux Algériens [08]. D'après les résultats des recherches menées sur le BAP à base de laitier, ce dernier présente des caractéristiques rhéologiques telles que l'étalement et la résistance à la ségrégation nettement améliorées par rapport à un BAP sans laitier [08]. Son avantage qu'il soit à base de matériaux locaux ce qui réduit le coût et en même temps avoir l'aspect écologique en réduisant la quantité du ciment et le laitier comme étant un déchet.

1.2.2.3. Superplastifiants

La fluidité des bétons autoplaçants est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fillers en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [04].

Le niveau élevé de l'ouvrabilité requis par les bétons autoplaçants tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le béton autoplaçant, était impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour les résistances à la compression souhaitées. L'arrivée des superplastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des bétons autoplaçants. Les superplastifiants modernes (basés sur les éthers polycarboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange béton.

Ces superplastifiants réalisent ce qui est montré dans la (fig 1.3) avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique.

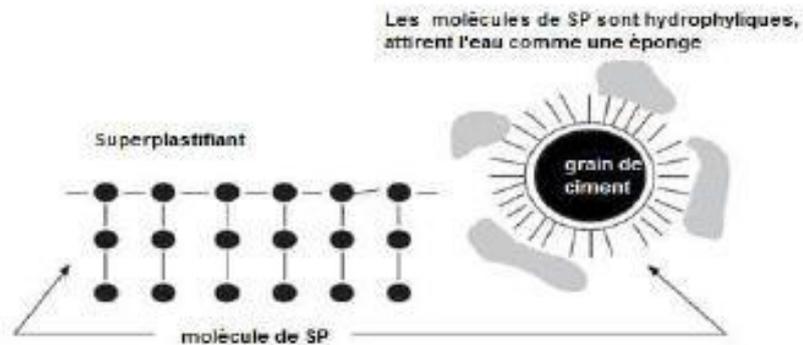


Fig 1.3 Le mécanisme d'action du superplastifiant à base de polycarboxilate [05].

1.2.2.4. Agent de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les bétons autoplaçants contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants. La (Fig 1.4) montre un exemple de réaction entre l'eau et un agent de viscosité qui est les polysaccharides pour donner la forme finale de gélification où les liaisons intermoléculaires sont fortes.

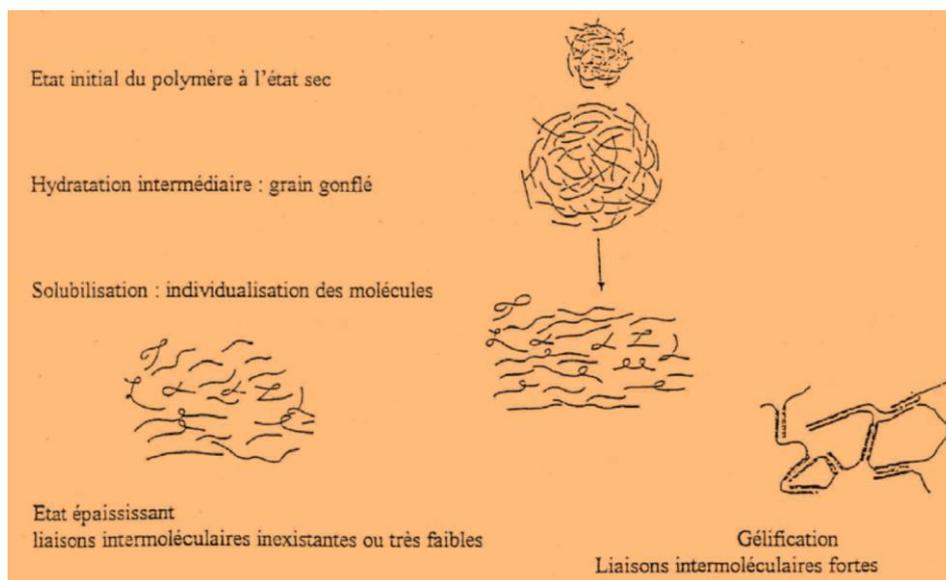


Fig 1.4 Les étapes d'interaction entre l'eau et les polysaccharides [04].

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un béton autoplaçant requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité-superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (voir Fig 1.5).

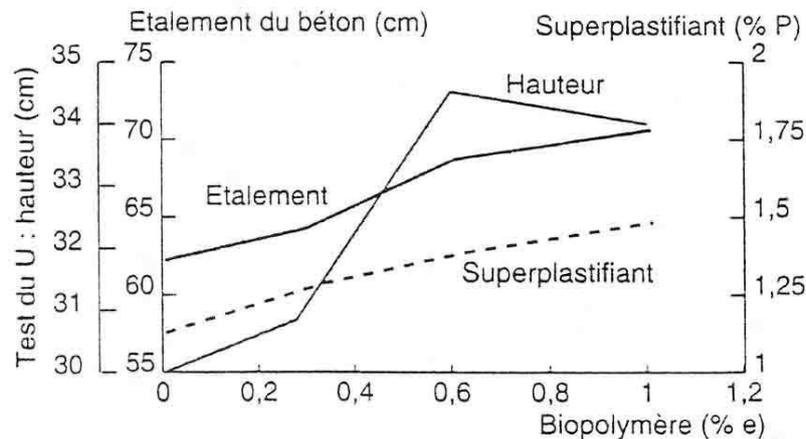


Fig 1.5 Optimisation du dosage agent de viscosité-superplastifiant [09].

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant pas alors suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des bétons autoplaçants ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0.3).

1.2.2.5. Eau

Il est connu que l'eau est l'un des facteurs les plus importants de l'ouvrabilité du béton autoplaçant. En augmentant la quantité d'eau, la concentration en solide diminue, et le béton devient fluide (seuil de cisaillement et viscosité diminuent) [10]. Cependant, en plus de diminuer la résistance mécanique du béton autoplaçant, l'introduction excessive d'eau provoque des problèmes de ségrégation.

1.3. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP

Nombreuse sont les études qui ont pour objectif de trouver une bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP) en utilisant divers ajouts minéraux. Les bétons autoplaçant sont des bétons très spéciaux dont les caractéristiques résident essentiellement dans leurs grandes fluidités. Parmi ces études on cite :

- Necira B. a effectué des essais sur des bétons autoplaçants confectionnés avec trois types d'ajouts minéraux (Fillers calcaires FC, Pouzzolane naturelle PZ et le laitier du haut fourneau LT). Il a conclu que l'introduction des ajouts minéraux tels que (FC, PZ et LT) améliore considérablement les propriétés rhéologiques des BAP et que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles au pourcentage d'ajout minéral. Il a conclu aussi que le BAP contenant le laitier du haut fourneau donne des résistances à la compression plus élevées que les BAP contenant les fillers calcaires ou les pouzzolanes naturelles [11].
- Samara M. a étudié la possibilité d'utiliser les sédiments des cours d'eau comme un fillers dans la composition du béton autoplaçant. Il a effectué des essais sur deux types de béton autoplaçant, le premier est à base de fillers calcaires et le deuxième à base de sédiments. Il a observé une perte de maniabilité sur bétons et mortiers à l'état frais, cette perte est due au pouvoir d'absorption d'eau des sédiments liée à la porosité intergranulaire des sédiments traités. Les résistances à la compression sont similaires aux résistances données par les bétons à base de fillers calcaires [12].
- Ayed K. a élaboré à partir d'une même formulation de base, trois BAP de même classe de résistance incorporant chacun un type de fines locales d'Algérie, à savoir des fines siliceuses provenant des déchets de sable siliceux servant à la fabrication du verre, des fines pouzzolaniques naturelles et des fines calcaires. L'analyse comparative des résultats a permis de mettre en évidence l'influence du type d'addition minérale sur le comportement à long terme des BAP [13].
- Rebouh N. a trouvé que l'ajout des cendres volantes dans la composition du béton autoplaçant améliore les caractéristiques de ce dernier, et augmente les résistances mécaniques au jeune âge [14].
- El Hilali A. traite dans son étude l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP frais montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative [15].
- Bouhamou N. et al. ont montré que l'incorporation des fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais à base de matériaux locaux notamment le sable de mer et le sable de carrière. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives

pour optimiser les BAP. Les résistances élevées des BAP sont liées au volume de pâte important. L'utilisation du superplastifiant "viscocrete 20HE" dans les formulations autoplaçantes peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques [16].

- Haddad O. et al. ont travaillé sur des mortiers issues des formules de BAP, ces mortiers sont obtenues en faisant varier le dosage en addition de fines calcaires (15, 30,50%). Les résultats montrent que l'addition d'un pourcentage différent en fillers n'a pas une influence significative sur l'âge du début et fin de prise. Concernant les résistances mécaniques en compression, ils ont conclu qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de fillers introduit et donc au rapport E/C [17].
- Mébrouki A. a étudié l'influence de l'ajout des fillers calcaires locales d'Algérie (carrière de Kristel d'Oran) sur la pâte autoplaçante. Les pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre constituant de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). La pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler. Il a constaté que l'incorporation d'une quantité importante de fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant (pâte sec ou très ferme). L'ajout de filler dans la pâte de ciment conduit à une diminution de la valeur d'étalement de la pâte et en contrepartie le filler améliore l'écoulement de la pâte [18].

1.4. Rôle des additions minérales

Les superplastifiants permettent donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire.

Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature. L'activité d'une addition minérale peut avoir deux effets différents :

- **Effet filler ou effet de remplissage**

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

- **Effet chimique ou pouzzolanique**

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

1.5. Méthodes de formulation des BAP

La principale difficulté à laquelle le formulateur de BAP est confronté est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires : la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Le formulateur doit donc établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène.

1.5.1. Approche Japonaise

Les chercheurs de l'université de Tokyo Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants [19,20].

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50 % de leur compacité (les chercheurs ne précisent pas dans leur article comment la compacité est mesurée). Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé. La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au

détriment des granulats [21,22]. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants. Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (Fig1.6). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

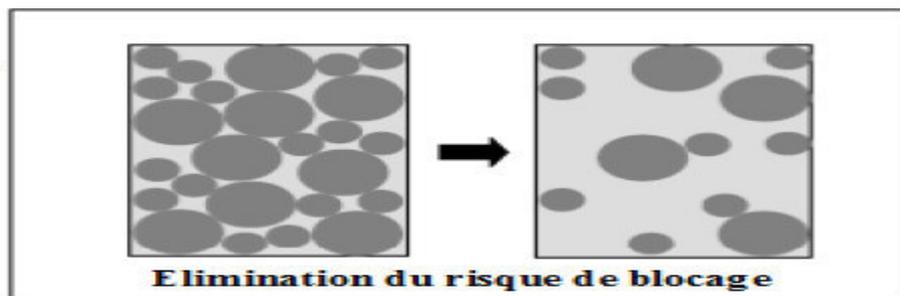


Fig1.6. Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité

À défaut d'indication, ils ont choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC [23].

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, ils choisissent de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

-Dosage du sable :

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

-Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

-Dosage de l'eau et du superplastifiant :

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier (Fig1.7.a).et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (Fig1.7.b).

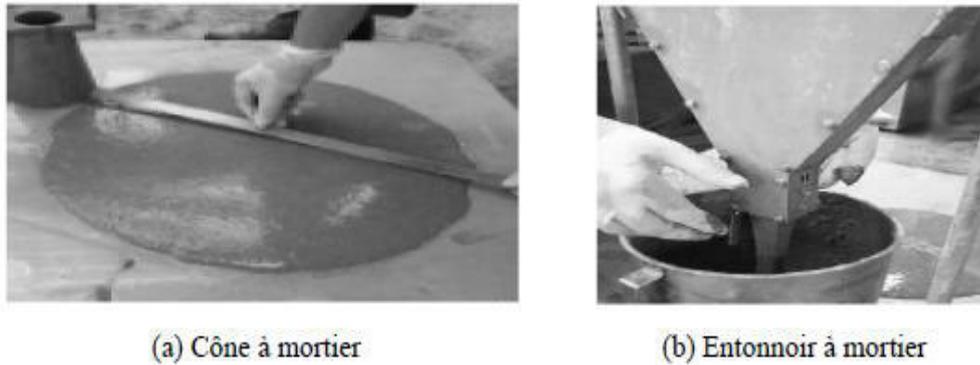


Fig1.7. Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. À l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier. Lors des essais sur mortiers de Philippe Turcry, il a préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m³, ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams. La (Fig1.8) présente le résultat de la recherche du couple eau / superplastifiant. L'étalement normalisé D' optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1. Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.

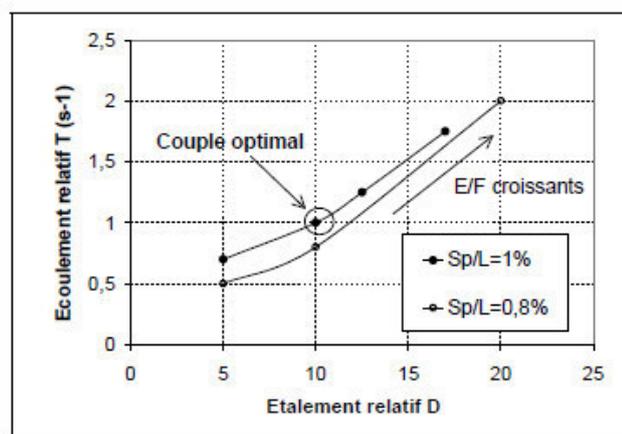


Fig 1.8. Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D [23].

Sur la Fig.1.8 la flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle.

1.5.2. Approche Suédoise

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise (Okamura), le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G /S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées.

Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats.

1.5.3. Approche de la JSCE

Cette méthode a été proposée par la japonaise society of civil engainées en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité. Les quantités des différents constituants sont déterminées comme suit :

-Quantité des gros granulats

Cette quantité varie selon l'auto compactibilité recherchée. Elle est situé entre 0,30 à 0,32 kg/m³ et le diamètre maximum est limité à 20 mm voir 25 mm.

-Quantité d'eau

Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/ m³ dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/ m³. En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/ m³.

Rapport eau/poudre Ce rapport est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau / poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 %.

Quantité de poudre et de liant La quantité de poudre se déduit du rapport eau /poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 kg/m³. dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19 kg/m³.

- Quantité d'air

Cette valeur dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air.

- Quantité des agrégats fins

Cette quantité est déduite des quantités précédentes.

- Dosage en adjuvants

Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m³, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines) : De 0,15 à 0,30% de la quantité d'eau pour les agents cellulose, 3 à 5% pour les acryliques, 2 à 3% pour les glycols, 0,05 % pour les polysaccharides solubles. [24]

1.5.4. Approche du laboratoire Central des ponts et chaussées (LCPC)

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions du mélange ;

La compacité propre ;

- La densité apparente.

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton ;
- Choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage) ;
- Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé par exemple).

1.6. Caractérisation d'un béton autoplaçant (BAP)

1.6.1. Caractérisation à l'état frais

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

Les prochaines tentatives présentent les principaux de ces tests suivant un classement définissant les paramètres rhéologiques.

1.6.1.1. Essai évaluant la fluidité (étalement) :

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cependant, l'affaissement est toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute [25]. Ce diamètre, appelé étalement D, donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu non confiné. Les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm [29]. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Par exemple, avec un béton peu stable, on remarque une séparation de la pâte et des granulats. Ce pendant cette observation est difficilement quantifiable. La (Fig 1.9) représente schématiquement l'essai d'étalement et la (Fig 1.10) montre ses différents processus.

Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. En revanche, il ne met pas en relief l'importance du caractère hétérogène du béton, il s'est donc avéré nécessaire de développer une autre famille d'essais [25].

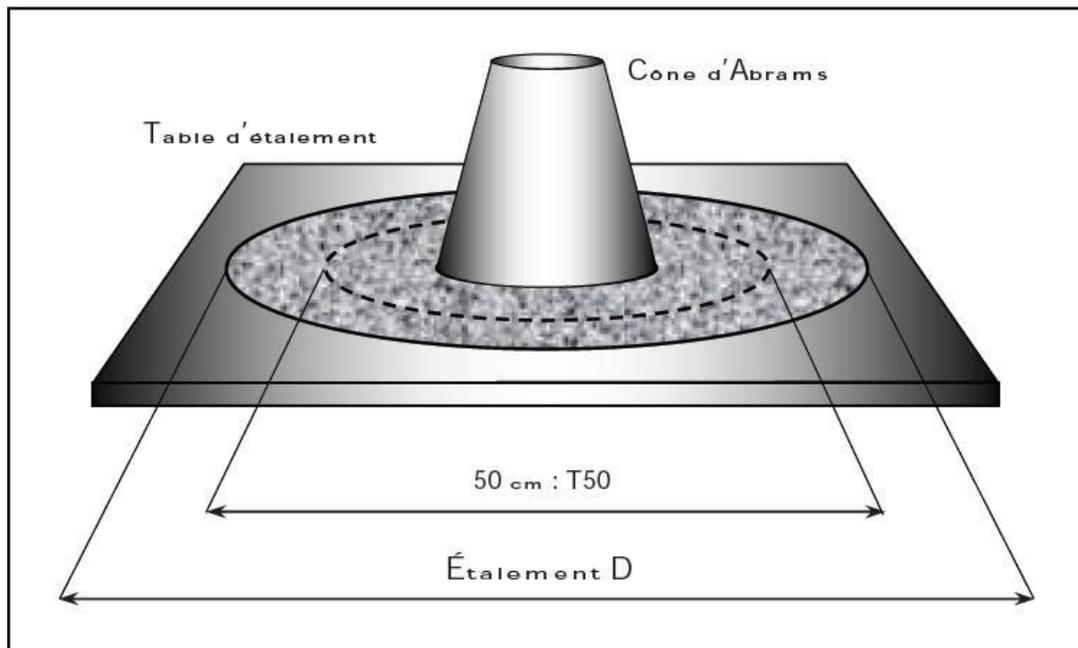


Fig 1.9. Représentation schématiques de l'essai d'étalement

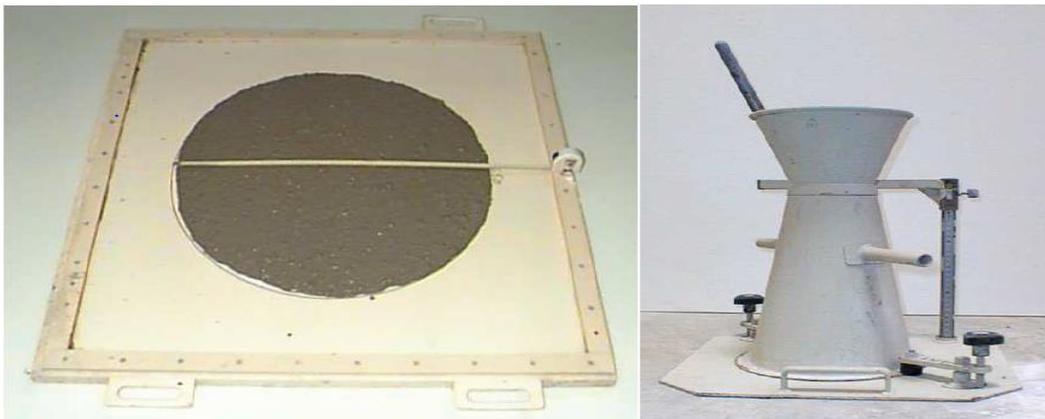


Fig 1.10. Schéma de cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement

1.6.1.2. Essais évaluant la déformabilité

Pratiquement, tous les laboratoires ont bricolé leur propre montage pour caractériser la capacité de remplissage de BAP, ce qui complique grandement l'analyse des résultats de la littérature. Ces essais procèdent, néanmoins, du même principe et les plus courants sont présentés ci-dessous.

❖ Essai de la boîte en « L »

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

Le principe de cet essai est le suivant ; La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 l). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale de la boîte à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distant entre eux de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités (H_1 à l'extrémité de la partie verticale et H_2 à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 qui renseigne sur la mobilité de BAP en milieu confiné. Ce taux doit être supérieur à 0.80 pour obtenir un BAP [26]. La (Fig 1.11) montre en détail le schéma de la boîte en «L» avec ses dimensions et la (Fig 1.12) représente l'écoulement de BAP lors de cette essai.

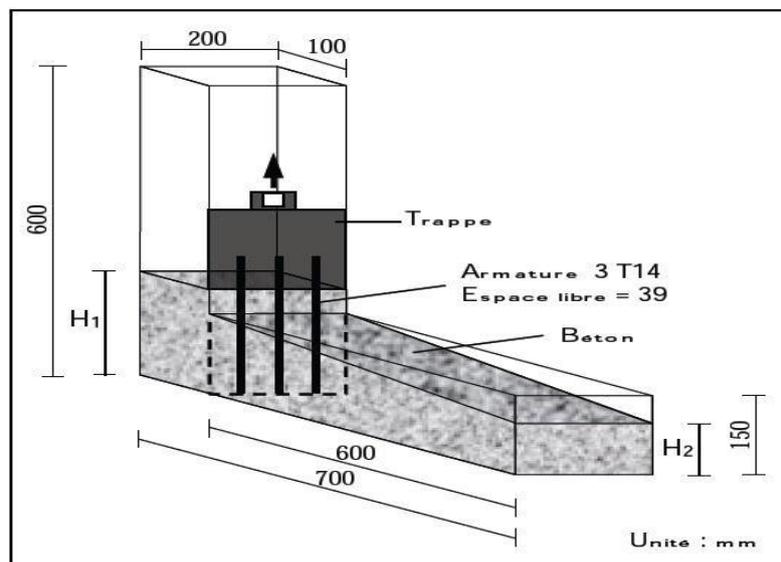


Fig 1.11. Schéma détaillé de la boîte en «L»



Fig 1.12. L'écoulement de BAP dans la boîte en «L»

1.6.1.3. Essais évaluant la stabilité

Il est indispensable de caractériser la résistance des BAP à la ségrégation car leur grande fluidité peut conduire à une mauvaise suspension des gravillons [26]. Toutefois, il est inutile de mesurer le ressuage puisque le volume important des fines dans les BAP réduit considérablement la quantité d'eau remontante à la surface. La caractérisation de stabilité par des mesures sur béton durci s'avère assez lourde et prend beaucoup de temps, comme (comptage des gravillons sur des éprouvettes sciées en deux, auscultation sonique à différentes hauteurs d'un mur, etc.).

Pour cela, des essais faciles à exécuter ont été développés afin d'évaluer la résistance à la ségrégation ; les plus couramment utilisés sont présentés ci-dessous :

❖ Essai de stabilité au tamis

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

La procédure de cet essai est la suivante ; À la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur un tamis de maille 5 mm (Fig 1.13) et (Fig 1.14). Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation. La mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante [26] :

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante :

$0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\% \rightarrow$ stabilité satisfaisante

$15\% < \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$ stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)

$\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise .

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux. [27]

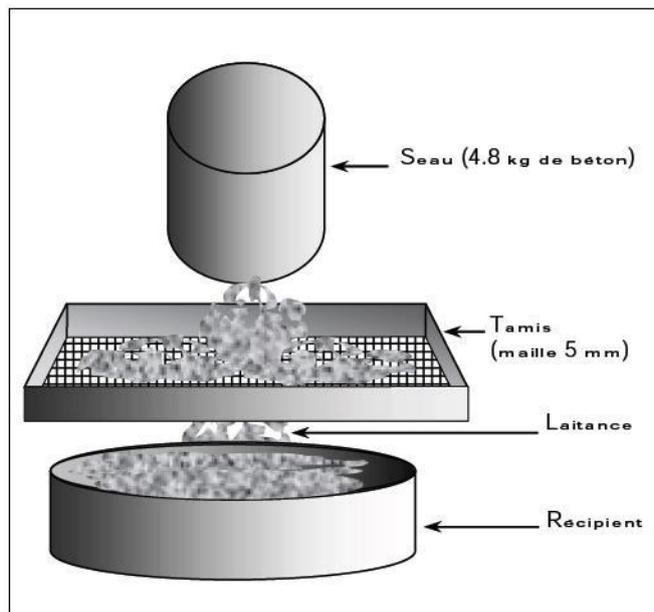


Fig 1.13.Représentation schématiques de l'essai de l'essai de stabilité au tamis



Fig 1.14. dispositif de l'essai de stabilité au tamis

1.6.2. Caractérisation à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplacants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons.

1.6.2.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [28]. Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage)

dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

a) Résistance à la compression

La résistance à la compression est la contrainte maximale sous laquelle une éprouvette du béton se rompt. Elle est influencée principalement par deux facteurs à savoir :

Le rapport E/C (ou E/P) et la teneur en ciment (ou poudre). L'augmentation du premier mène à une diminution de la résistance à la compression, pendant que l'augmentation du deuxième conduit à une augmentation de la résistance du béton.

Du moment que le BAP est formulé avec un faible rapport E/P (0,28 à 0,42) et une teneur en poudre élevée (450 à 600 kg/m³), sa résistance à la compression est plus grande que celle du béton vibré [29,30]. Domone [31] a analysé 68 cas à travers le monde où le BAP a été utilisé. Cet auteur a rapporté que la résistance à la compression des BAP est comprise entre 20 et 100 MPa, et que plus de 80% des mélanges testés ont des résistances supérieures à 40MPa. Ceci montre qu'en utilisant des BAP, il est possible d'obtenir une gamme de résistances allant de faible (20 MPa) à haute (100 MPa).

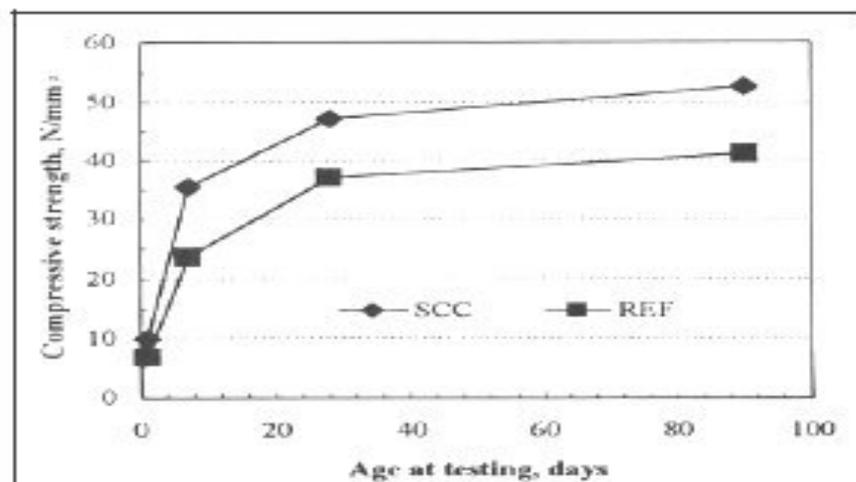


Fig1.15. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) Correspondant

b) Résistance à la traction

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction. Comme la résistance à la compression des BAP est plus grande que celle des bétons vibrés, la résistance à la traction des BAP est également plus grande [32,33,34].

Dehwah [35] a trouvé des résistances sa la traction qui varient entre 4,9 et 6,5 MPa. Des BAP confectionnées à base de différente teneur en cendres volantes ont développé des résistances qui varient entre 1,55 et 2,4 MPa [36].

1.7. Rhéologie de la pâte d'un béton autoplaçant

1.7.1. Le coulis de ciment

Le coulis est un mélange fluide à base de charges fines inférieures à 0.3mm, de liants hydrauliques et d'adjuvants. Les ciments utilisés sont des CPA ou CPJ.

Les domaines d'utilisation des coulis sont plusieurs. L'utilisation de ces derniers est effectuée en faisant recours à des techniques particulières de mise en œuvre, dont la projection et l'injection. Les travaux d'injection nécessitent des coulis de grande fluidité. Aussi, le coulis peut être vu comme la phase liquide du béton, les tendances expérimentales actuelles vont dans le sens des optimisations des formules de béton à partir d'essais effectués sur les coulis, les essais sur le béton ne viennent que pour des vérifications. L'essai au mini Cône a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec Super plastifiant Pour la recommandation de L'AFREM pour la formulation des bétons auto plaçant.

1.7.2. Méthodes d'optimisation des coulis de ciment

On présente ici les règles de formulation des coulis de ciment en fonction des propriétés rhéologiques et mécaniques visées. Dans la pratique, le formulateur doit répondre à un cahier des charges dont le plus simple est composé de quatre spécifications dans les domaines suivants :

- Fluidité ;
- Injectabilité ;
- Stabilité à l'état frais ;
- Résistance mécanique.

Parmi les essais développés pour la caractérisation des fluidités des coulis on retrouve l'essai mini Cône. Ce dernier qui présente une approche simple pour la caractérisation de la fluidité de pâte de ciment contenant des additions minérales et des adjuvants ou non. Pour les coulis fluidifié, il existe toujours un dosage en adjuvant dit «dosage de saturation », au-dessus duquel aucune augmentation significative de la fluidité de la pâte ne se produit.

1.7.3. Consistance de la pâte de ciment : Aspect visuel

On distingue trois types de consistance de la pâte de ciment : fluide, plastique et ferme.

a) Un aspect fluide

Cet aspect 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 mini-cône.

b) Un aspect plastique

Cet aspect 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 mini cône.

c) Un aspect ferme

Cet aspect est noté lorsque le mélange ne s'écoule pas d'une façon continue (mais d'un seul bloc). Le passage de mini-cône est difficile à cause de la forte consistance de ce type de mélange. (Fig1.16).

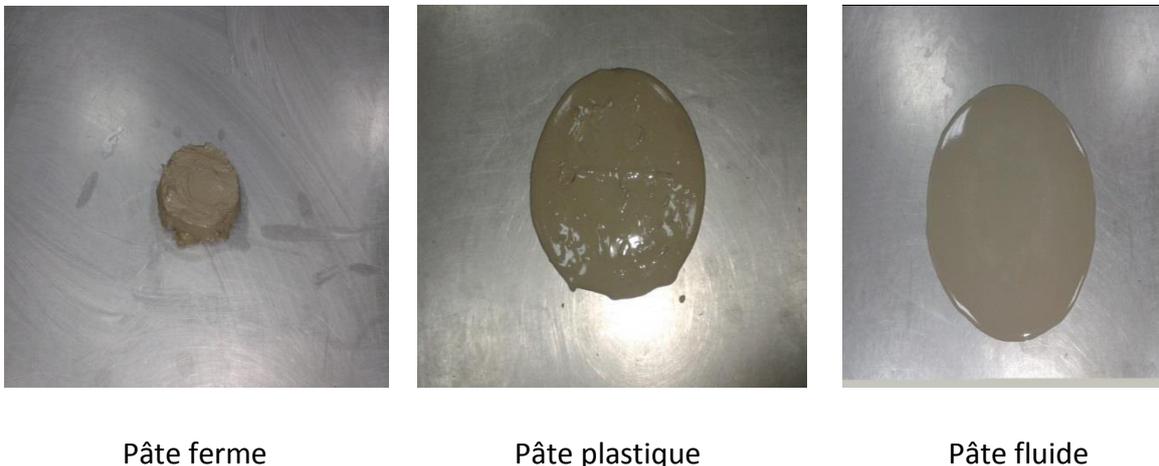


Fig 1.16. Appréciation visuelle de la consistance d'une pâte

1.7.4. Fluidité

Le dosage en superplastifiant doit être proche de la saturation, sans toutefois le dépasser, car il a été montré que son dépassement augmente les risques de sédimentation. Cette détermination est effectuée en recourant aux outils rhéologiques classiques, tels que le viscosimètre à tronconique creux, ou plus simplement le mini cône. On mesure le diamètre d'étalement d'un volume de coulis, et on trace la courbe d'évolution de ce diamètre en fonction du dosage en superplastifiant.

1.7.5. L'Approche de mesure de fluidité au mini Cône

L'essai au mini-cône a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec Superplastifiant, en utilisant que ce soit, une approche similaire à celle du cône que mesuré l'étalement.

-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 (Fig 1.17) dispose des dimensions proportionnelles à celles du cône d'Abrams. 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 40ml.

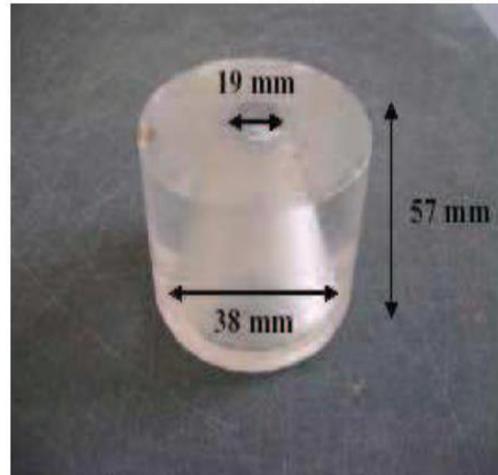


Fig 1.17. Mini-cône pour la mesure d'étalement.

C'est une méthode simple et pratique pour l'obtention d'une mesure relative de la fluidité d'une pâte, cette mesure est inversement proportionnelle au diamètre d'étalement, en mesurant le diamètre que prend un certain volume de pâte pour s'écouler du mini cône ; la pâte présentant le moins diamètre d'étalement est la pâte moins fluide.

-Le point de saturation :

Est défini par le dosage de Superplastifiant au-dessus duquel le diamètre d'étalement ne décroît plus d'une manière appréciable. Bien que ce point soit souvent déterminé d'une manière subjective à partir de l'allure de la courbe, une définition plus objective en termes de pente de la courbe est aussi possible. Le fait qu'une combinaison Ciment- Superplastifiant ne présente pas un point de saturation bien identifiable peut indiquer une incompatibilité. Le dosage de saturation peut être choisi en prenant le point de saturation comme valeur maximale pour :

- un type du ciment.
- un rapport E/L.
- une teneur en additions minérales données.

1.8. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

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

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

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

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

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

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

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

Partie

Expérimentale

Chapitre 2

**Caractérisations des
martiaux utiliser**

2. Caractérisation des matériaux utilisés

2.1. Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre mémoire. La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituants sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

2.1. Ciment

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ CEM II/B - 42,5) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) conforme à la norme algérienne NA 442, provenant de la cimenterie de M'sila du groupe LAFARGE

Tableau 2.1.Composition chimique du ciment CEM II/B- 42,5.

Composition chimique	Teneur %
SiO ₂	15.71
Al ₂ O ₃	4.15
Fe ₂ O ₃	2.52
CaO	60.71
MgO	2.39
K ₂ O	0.59
Na ₂ O	0.18
SO ₃	1.79
Cao liber	1.424
Cl	0.025
Ins	2.82
P.F	11.630
Total	100

Tableau 2.2. Composition minéralogique du ciment CEM II/B- 42,5.

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker(%)
clinker	C ₃ S	55
	C ₂ S	20
	C ₃ A	07
	C ₄ AF	11
	Caol	02
Régulateur de prise	Gypse	05

Tableau 2.3.Caractéristiques physiques du ciment CEM II/B- 42,5.

Caractéristiques	Résultats
Consistance normalisée H ₂ O	26.6 (%)
Temps de prise(DP)	140 min
Fin de prise (FP)	250 min
Stabilité (Froid)	/
Stabilité (chaud)	0.00
Masse volumique absolue	2.99 g/cm ³
Surface spécifique(SSB)	4026 cm ² /g

**Fig 2.1.**Essai de consistance**Fig 2.2.**Perméabilimètre de Blaine

Tableau2.4.Caractéristiques mécanique du ciment CEM II/B- 42,5.

Echéances en jours	Résistance à la Flexion (MPa)	Résistance à la Compression(MPa)
02 jours	4.3	20.6
07jours	5.6	36.6
28jours	6.7	43.5

2.2. Ajouts cimentaires

Dans notre recherche, deux types d'ajouts cimentaires ont été utilisés pour la formulation des bétons autoplacants: La poudre de marbre et la poudre de tuf. Chaque ajouts broyés à deux finesses de mouture afin d'étudier l'effet la finesse sur les propriétés des bétons autoplacants étudiées.

2.2.1. Poudre de marbre

Le marbre est une roche métamorphique compacte de la région de Tizi Ouzou, extraite par abattage à l'exploitation des moellons de dimension variant de (80-100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir une poudre finement broyée dont les caractéristiques physiques et la composition chimique présentées dans les tableaux 2.5 et 2.6.

**Fig 2.3.** Poudre de marbre utilisée

Tableau 2.5. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique apparente	0.96 g/cm ³
Masse spécifique	2.69 g/cm ³
porosité	0.5
couleur	Blanche
Surface spécifique(SSB1)	3960 cm ² /g
Surface spécifique(SSB2)	5910 cm ² /g

Tableau 2.6.Composition chimique de la poudre de marbre.

Composition chimique	Teneur(%)
SiO ₂	2.08
Al ₂ O ₃	0.48
Fe ₂ O ₃	0.11
CaO	54.15
MgO	0.19
SO ₃	0.01
K ₂ O	0.08
Na ₂ O	0.01
P ₂ O ₅	0.02
TiO ₂	0.01
Perte au feu(%)	42.86
Somme des Composition(%)	100

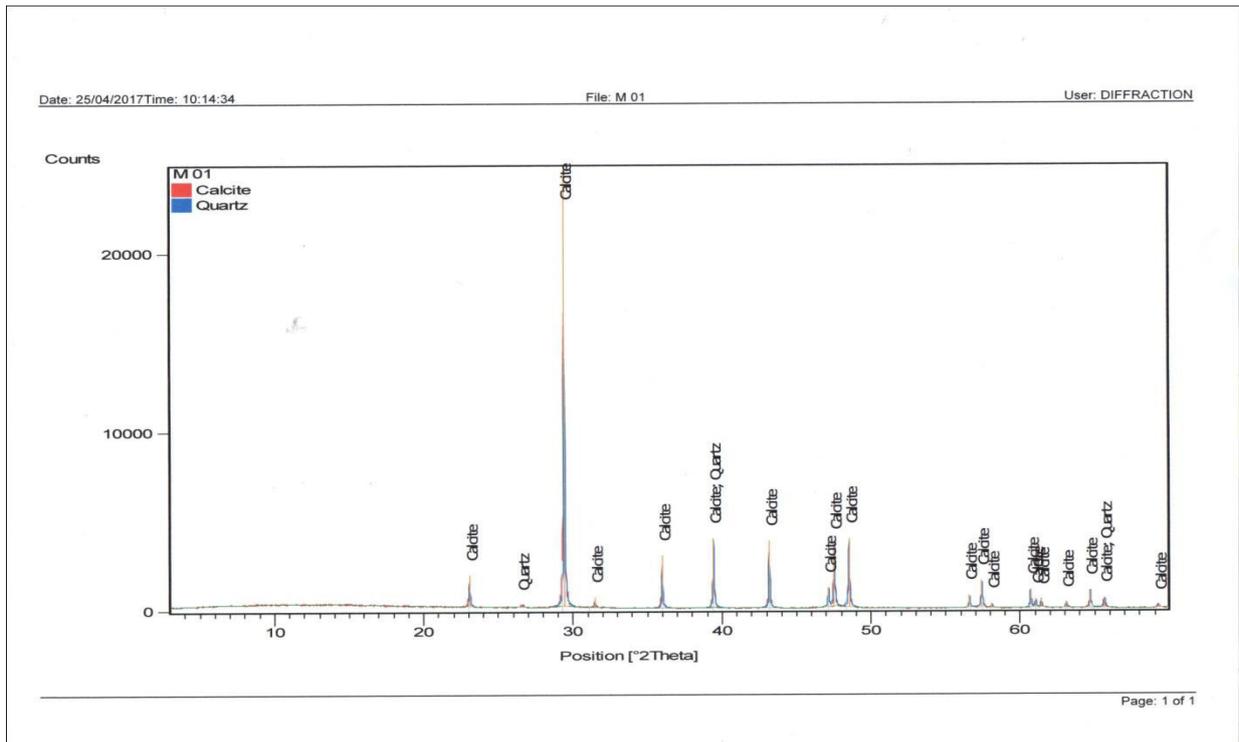


Fig 2.4. Diffractogramme X de la poudre de marbre

2.2.2. Poudre de tuf

Récupéré au niveau de la carrière de tuf de THENIA, fournie sous forme de poudre mouillée, après séchage à 105C°, elle est concassée, broyée pour obtenir une poudre finement broyée. Les caractéristiques physiques et la composition chimique de la poudre de tuf sont présentées dans les tableaux 2.7 et 2.8.



Fig 2.5. Poudre de Tuf utilisé

Tableau 2.7. Caractéristiques physiques de la poudre de tuf

Caractéristique	Résultats
Masse volumique apparente	0.72g/cm ³
Masse spécifique	2.52g/cm ³
porosité	0.4
couleur	jaunâtre
Surface spécifique(SSB1)	3440 cm ² /g
Surface spécifique(SSB2)	5700 cm ² /g

Tableau 2.8. Composition chimique de la poudre de tuf.

Composition chimique	Teneur(%)
SiO ₂	60.55
Al ₂ O ₃	17.20
Fe ₂ O ₃	4.85
CaO	4.61
MgO	1.79
SO ₃	0.01
K ₂ O	3.23
Na ₂ O	2.40
P ₂ O ₅	0.16
TiO ₂	0.48
Perte au feu(%)	4.73
Somme des compositions (%)	100

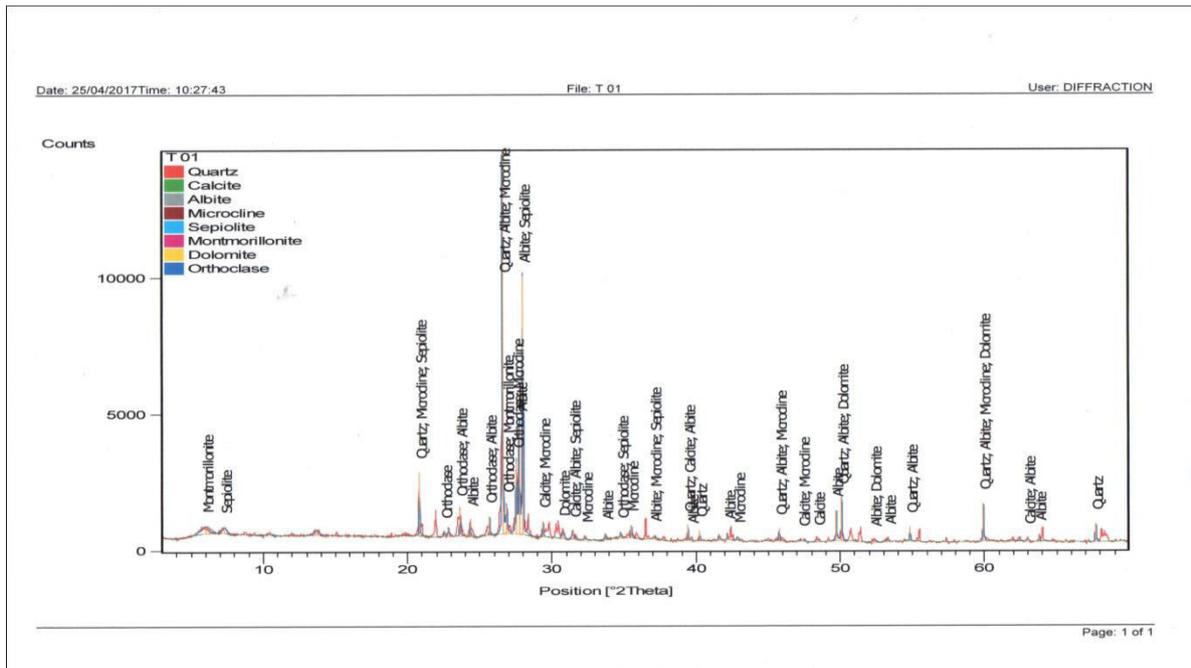


Fig 2.6. Diffractogramme X de la poudre de Tuf

2.3. Super plastifiant

Dans notre travail, on a utilisé un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération, commercialisé par l'entreprise GRANITEX d'Alger.

Description :

Le medaflo 145 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le medaflo 145 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.

Le medaflo 145 ne présente pas d'effet retardateur

Caractéristiques :

Forme.....liquide.

Couleur.....brai clair.

Ph.....5-6.

Densité.....1,065+-0,015.

Teneur en chlore.....<1g /l

Extrait sec.....30+-1,5%

Propriétés et effets :

Grace à ses propriétés le medaflow 145 permet :

Sur béton frais :

- L'obtention d'un E/C très bas
- L'obtention plastiques fluides
- Une très bonne maniabilité
- Un long maintien de l'ouvrabilité
- De faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Bonne résistances initiale et finales
- De diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

Domaines d'application :

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-nivelant
- Bétons pompés
- Béton précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

0,3 à 2,0% du poids de ciment soit 0,33 à 1,8 litre pour 100kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Mode d'emploi :

Lemedaflow145 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite. Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le medaflow 145 peut être combiné à un retardateur de prise Medaretard GR

2.4. Caractéristiques des granulats :

Nous avons utilisés dans ce travail les granulats suivants: un sable (0/4) de d'Oued Souf et deux classes de gravillon (3/8) et (8/15) .

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des granulats utilisés pour la confection des bétons autoplaçants.

Tableau 2.9. Caractéristiques physiques des granulats.

Caractéristique	Symbole	Sable (0/4)	3/8	8/15
Masse volumique absolue (g/cm ³)	P _S	2.67	2.73	2.73
Teneur en eau (%)	W	0.46	0.21	0
L'absorption d'eau (%)	A _s	1.68	0.45	0.30
Micro Deval (%)	M _{DE}	/	19.98	14.72
Los Angeles (%)	L _A	/	30	41.26



Fig 2.7.Appareil de los Angeles



Fig 2.8.Appareil de Micro-Deval

Tableau 2.10. Caractéristiques physiques du sable d'oued souf (0/4).

Caractéristiques	symbole	Résultats
Module de finesse	M_f	2.56
Equivalent en sable (%)	ESV	83
	ESP	81
Valeur Bleu de méthylène (g/kg)	V_B	0.5



Fig2.9. Essai au bleu de methylene.



Fig 2.10.Essai d'équivalent en sable.

2.5. Analyse granulométrique

Il s'agit de fractionner le matériau au moyen d'une série de tamis pour déterminer sa classe. L'analyse granulométrique établie pour chaque fraction est présentée dans les tableaux suivants :

-Sable d'Oued Souf (0/4) :

Tableau 2.11. Analyse granulométrique du sable d'oued souf de fraction (0/4).

Ouverture des Tamis (mm)	Refus cumulé Ri	Refus cumulé	Tamisât cumulé	Module de finesse (%)
6.3	00	00	100	2.56
5	5	0.78	99.22	
4	9	1.41	98.59	
3.15	13	2.04	97.96	
2.5	20	3.14	96.86	
2	29	4.55	95.45	
1.25	73	11.47	88.53	
1	106	16.66	83.34	
0.63	242	38.05	61.95	
0.5	329	51.72	48.28	
0.315	491	77.20	22.80	
0.250	540	84.90	15.1	
0.125	619	97.32	2.68	
0.08	629	98.89	1.11	
0.063	630	99.05	0.95	
Fond de tamis	631	99.21	0.79	

-Gravier de fraction (8/15) :**Tableau 2.12.** Analyse granulométrique du gravier de fraction (8/15).

Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)	teneurs (%)	
	Refus cumulé (R _i)	Refus cumulé	TamisâtCumulés
	Masse sèche totale : M ₁ = 2700 g Masse sèche après lavage : M ₂ =2672g	Masse sèche des fines retirées après lavage : M ₁ - M ₂ =28 g	
14	00	00	100
12.5	502	18.59	81.41
10	1236	47.77	52.23
8	1758	65.11	34.89
6.3	2246	83.18	16.82
5	2596	96.14	3.86
4	2645	97.96	2.04
3.15	2660	98.51	1.49
2.5	2666	98.74	1.26
0.063	2672	98.96	1.04
Fond de tamis	2672	98.96	1.04

-Gravier de fraction (3/8) :**Tableau 2.13.** Analyse granulométrique du gravier de fraction (3/8).

Masse sèche totale : $M_1=$ 603g		Masse sèche des fines retirées après lavage : $M_1 - M_2 =7g$	
Masse sèche après lavage : $M_2=596 g$			
Ouverture des tamis (mm)	Poids(g)	teneurs (%)	
	Refus cumulé (Ri)	Refus cumulé	TamisâtCumulés
8	00	00	100
6.3	65	10.77	89.23
5	243	40.29	59.71
4	443	73.46	26.54
3.15	505	83.74	16.26
2.5	552	91.54	8.46
2	574	95.19	4.81
1.25	588	97.51	2.49
0.063	591	98	2
Fond de tamis	593	98.34	1.66

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1
ENR. N° 0767/17

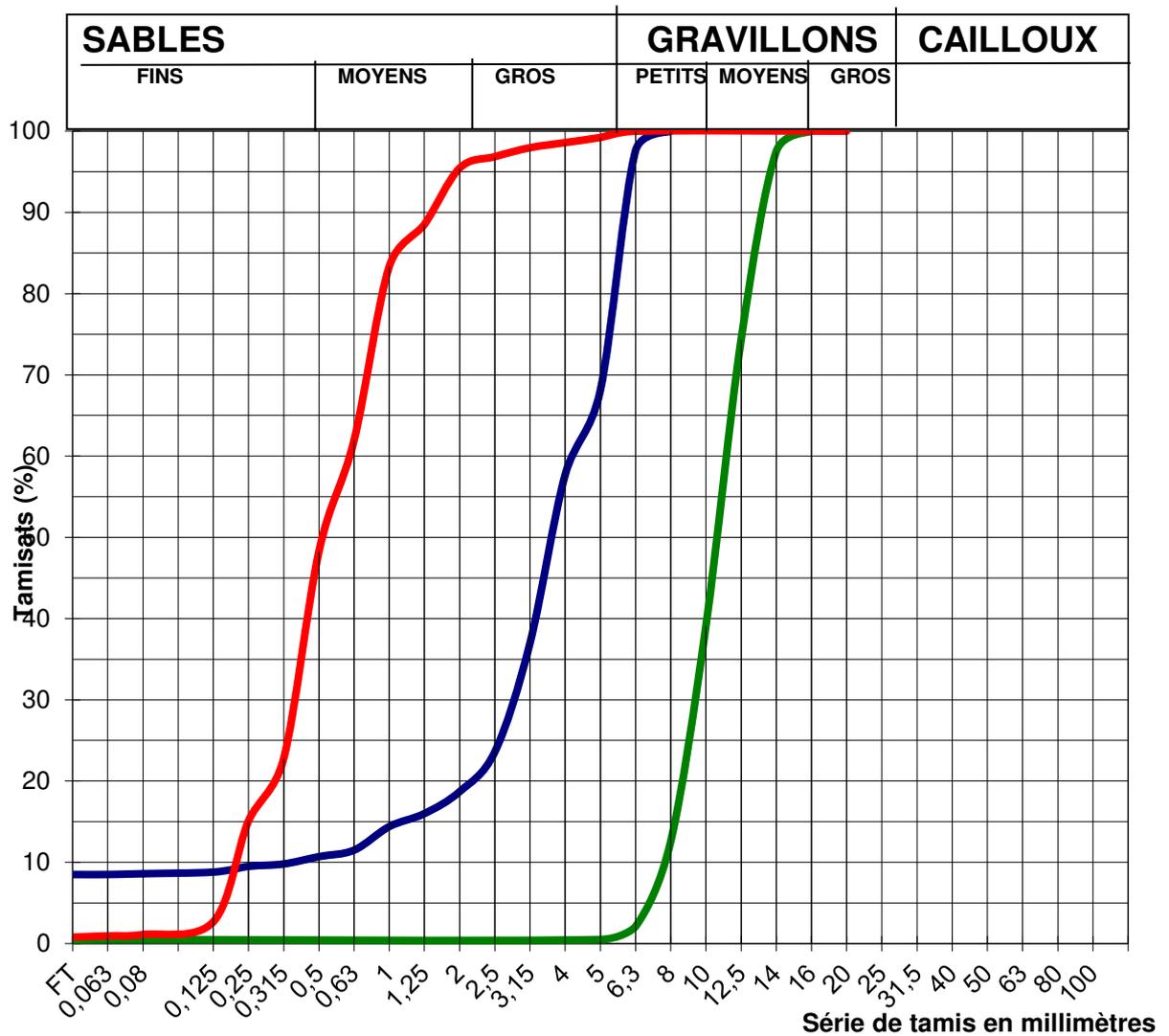


Fig 2.11. Analyse granulométrique des granulats.

Chapitre 3

**Optimisation de la pâte
d'un BAP à base d'ajouts
cimentaires**

3. Optimisation de la pâte d'un béton autoplaçant à base d'ajouts cimentaires:

3.1. Formulations étudiées :

En partant du principe qu'un béton est composé d'une phase fluide (la pâte) et d'une phase solide (granulats à rapport gravier/sable fixe), les propriétés autoplaçantes du béton proviennent nécessairement de celles de la pâte. Pour cela, les études de formulations se basent essentiellement sur la pâte et ses constituants. Les mesures rhéologiques effectuées sur pâtes peuvent servir de base pour la prédiction des propriétés rhéologiques des bétons. Pour aboutir à une formulation de pâte autoplaçante, plusieurs essais de mesure de diamètre d'étalement au mini-cône ont été effectués sur des pâtes à différent dosage en superplastifiant et à différent pourcentage d'ajouts cimentaires (marbre ou tuf) pour déterminer le point de saturation de l'adjuvant des pâtes qui présentent le meilleur étalement, pour cela :

Nous avons fixé:

- Le rapport eau/liant ($E/L=0.28$),
- La quantité des ajouts comme addition (marbre ou tuf), 10% du poids de ciment.
- La quantité de liant.

Nous avons varié:

- Le type des ajouts cimentaires tuf et marbre ;
- La finesse des ajouts cimentaires tuf et marbre, (deux finesses pour chaque ajouts).
- La quantité des ajouts comme substitution, (10%, 20%, 30%) du poids de ciment.
- Le dosage en superplastifiant (SP) varie de 0.8 à 2% par rapport à la masse de liant.

Le tableau suivant donne les compositions des différentes pâtes sur les quelles des mesures d'étalement ont été effectués.

Tableau3.1. Composition des pâtes étudiées.

		Pâte témoin	Pâtes avec ajouts comme substituant		
Liant	Ciment (%)	100	90	80	70
	Addition (%)	10	10	10	10
	Substitution de ciment (%)	0	10	20	30
Eau/Liant	0.28				
Superplastifiant	0.8% à 2%				

3.2. Méthodes de préparation des pâtes de ciment.

Les pâtes de ciment ont été préalablement malaxées de façon à obtenir un système bien défloculé. Le gâchage a été réalisé de la manière suivante :

-Introduire l'eau et le 1/3 de la quantité du supe plastifiant dans le malaxeur à mortier et démarrer en vitesse lente pendant 15 second pour bien disperser l'adjuvant. Eteindre le moteur ;

-Verse le liant et remettre en vitesse lente pendant 30 sec puis en vitesse rapide pendant aussi 30 sec ;

-Stopper le moteur 30sec pour raclerles bords du récipient ;

-Rajouter les 2/3 du superplastifiant et remettre en route en vitesse rapide pendant 2min.

-La mesure du diamètre de l'étalement de coulis est faite juste la fin du malaxage (Voire fig 3.1, fig 3.2 et fig 3.3)



Fig 3.1. Malaxeur des pâtes



Fig 3.2. Préparation du coulis



Fig 3.3. Essai d'étalement au mini-cône

3.3. Optimisation de la pâte de ciment à base d'ajout tuf

Nous présentons dans les tableaux et les figures suivants les résultats des essais au mini-cône effectués sur les différentes compositions de la pâte de ciment à base d'ajout tuf. La notation des pâtes étudiées est donnée comme suit:

PPTT: Pâte de ciment témoin à base d'ajout de poudre de tuf comme addition.

PPT10: Pâte de ciment à base de tuf en substituant 10% de ciment par le tuf.

PPT20: Pâte de ciment à base de tuf en substituant 20% de ciment par le tuf.

PPT30: Pâte de ciment à base de tuf en substituant 30% de ciment par le tuf.

Tableau 3.2. Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout tuf avec $SSB=3440 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Adj(%) \ L'etalement(cm)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
PPTT	17	24.5	27	29	30	30	30
PPT10	26	29	31	33	34	34	34
PPT20	21	30	32	35	35	35	35
PPT30	23	29	31	32	32	32	32

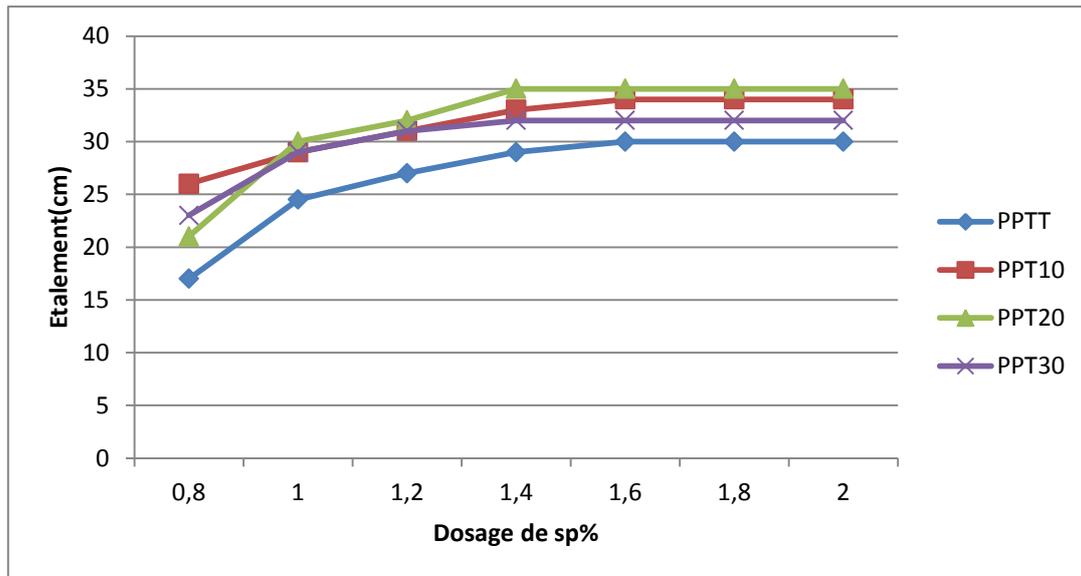


Fig 3.4. Evolution de l'étalement en fonction de SP avec tuf SSB= 3440 cm²/g

Tableau 3.3. Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout tuf avec SSB =5700cm²/g

Adj(%) \ L'étalement(cm)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
PPTT	18	21	22.5	23.5	25	25	25
PPT10	19	23	25	28	28	28	28
PPT20	19	26.5	30	33	33	33	33
PPT30	18	26	29	29	29	29	29

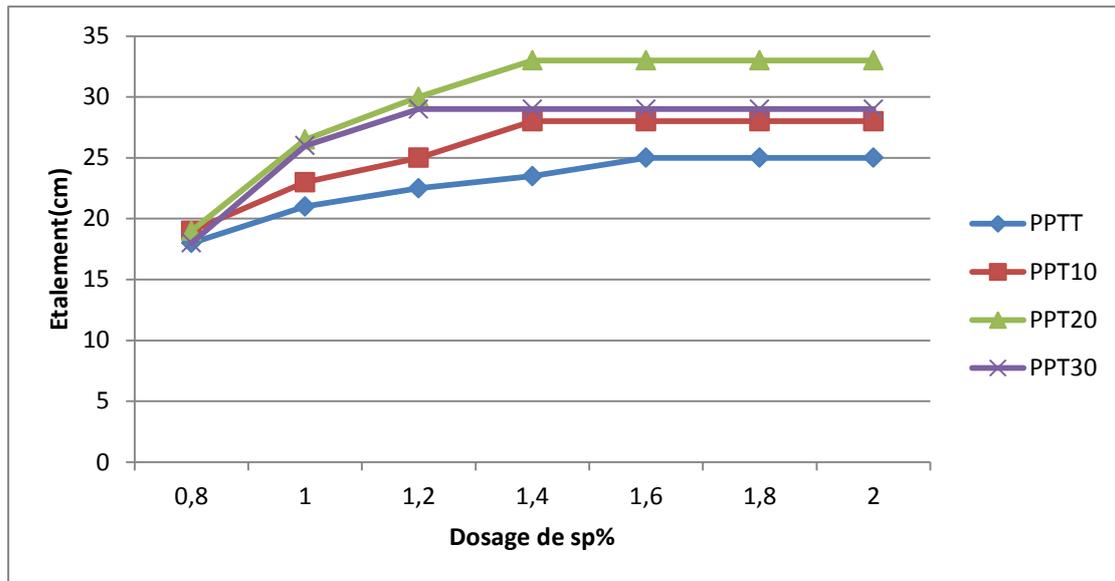


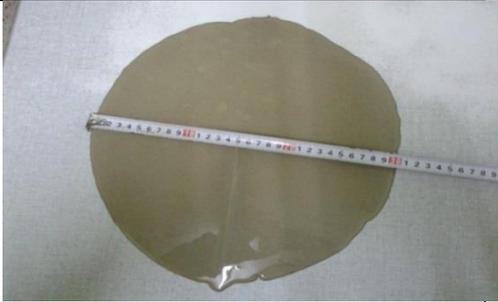
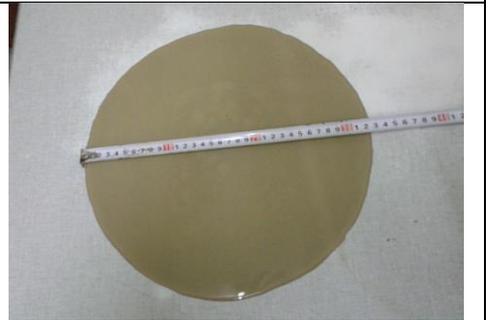
Fig3.5. Evolution de l'étalement en fonction de SP avec tuf SSB=5700 cm²/g.

A travers les résultats obtenus sur les différentes pâtes de ciment étudiées à base d'ajout tuf avec les deux finesses, on peut déterminer le point de saturation d'adjuvant qui présente le diamètre maximum de l'étalement (la meilleur fluidité).

3.3.1. Détermination de points de saturation de l'adjuvant

Les tableaux et les figures suivante donnent le point de saturation d'adjuvant des différentes pâtes étudiées.

Tableau 3.4. Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes a base de tuf avec $SSB=3440 \text{ cm}^2/\text{g}$.

coulis	Point de saturation	Diamètre de l'étalement	photo
PPTT	1.6%	30 cm	
PPT10	1.6%	34cm	
PPT20	1.4%	35cm	
PPT30	1.4%	32cm	

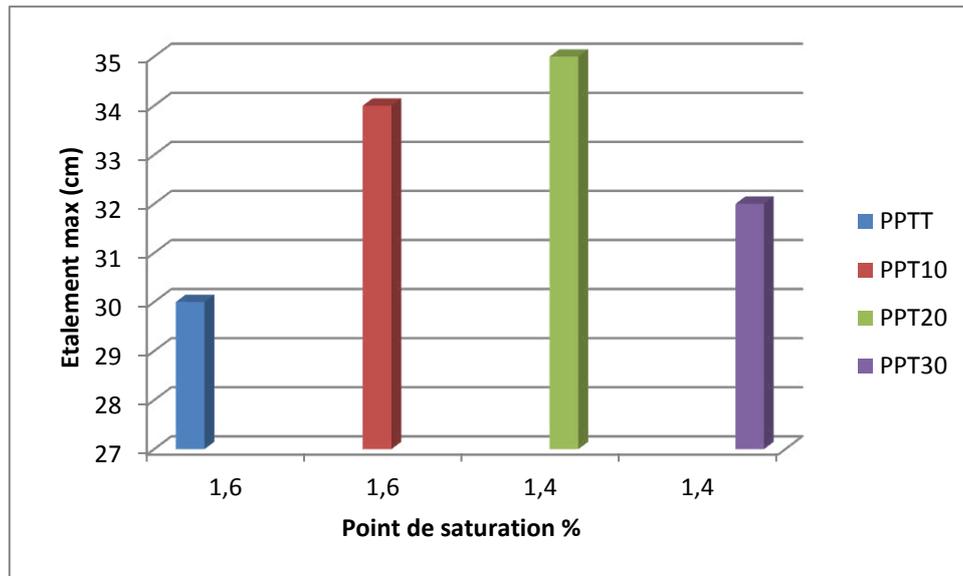
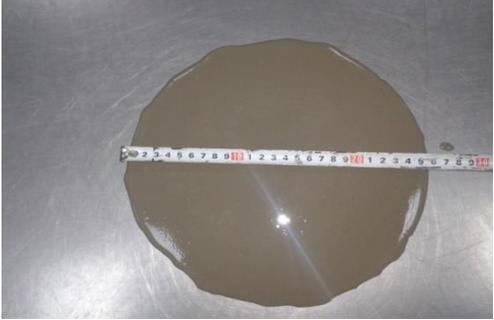
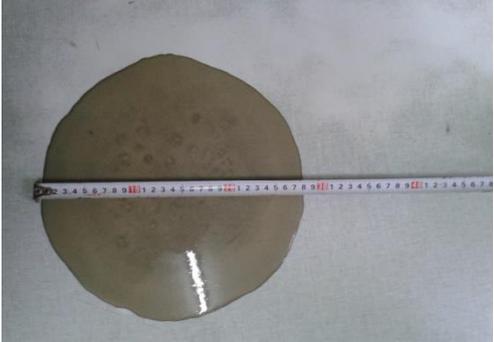
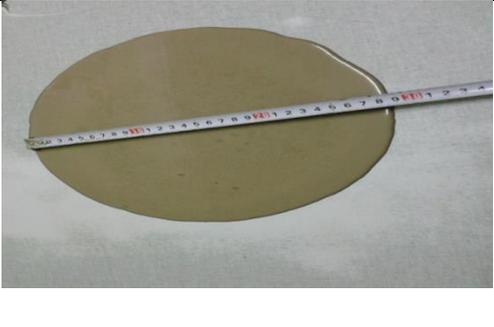


Fig 3.6. Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base de tuf $SSB = 3440 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau 3.5. Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes a base de tuf SSB= 5700 cm²/g.

coulis	Point de saturation	Diamètre de L'étalement	photo
PPTT	1.6%	25 cm	
PPT10	1.4%	28 cm	
PPT20	1.4%	33 cm	
PPT30	1.2%	29 cm	

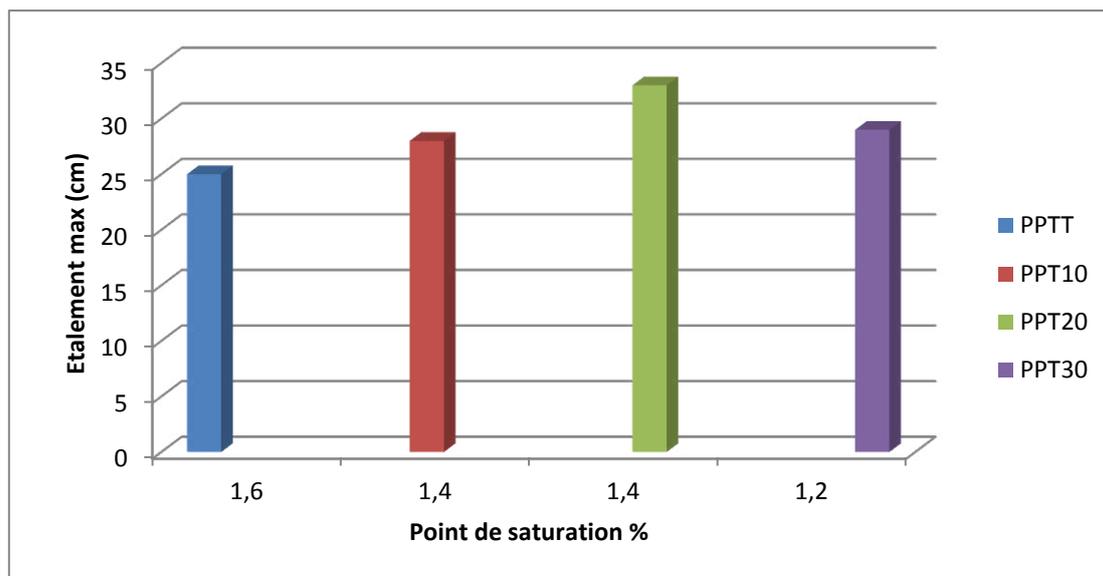


Fig 3.7. Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base tuf $SSB= 5700 \text{ cm}^2/\text{g}$

3.4. Optimisation de la pâte de ciment à base d'ajout de marbre

Nous présentons dans les tableaux et les figures suivants les résultats des essais au mini-cône effectués sur les différentes compositions de la pâte de ciment à base d'ajout marbre. La notation des pâtes étudiées est donnée comme suit:

PPMT : Pâte de ciment témoin à base d'ajout de poudre de marbre comme addition.

PPM10 : Pâte de ciment à base de marbre en substituant de 10% de ciment par le marbre.

PPM20 : Pâte de ciment à base de marbre en substituant de 20% de ciment par le marbre.

PPM30 : Pâte de ciment à base de marbre en substituant de 30% de ciment par le marbre.

Tableau 3.6. Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout marbre avec $SSB=3960 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Adj(%) \ L'étalement (cm)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
PPMT	21	23	26	28	30	30	30
PPM10	22	26	28	29	31	31	31
PPM20	23	27	30	34	34	34	34
PPM30	24	30	33	33	33	33	33

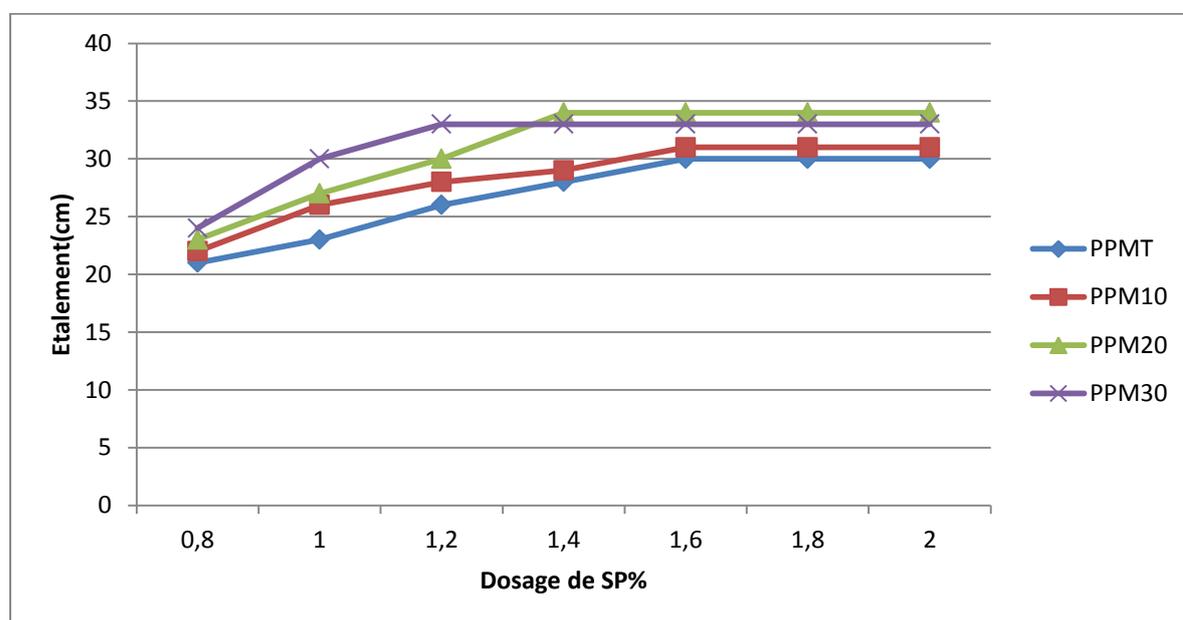


Fig 3.8. Evolution de l'étalement en fonction de SP avec marbre $SSB=3960 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau 3.7. Valeur d'étalement des pâtes cimentaires à base d'ajout marbre avec $SSB=5910 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Adj (%) \ L'étalement (cm)	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
PPMT	19.5	23	27	30	31	31	31
PPM10	21	28	30	32	33	33	33
PPM20	25	30	33	36	36	36	36
PPM30	27	31	33	35	35	35	35

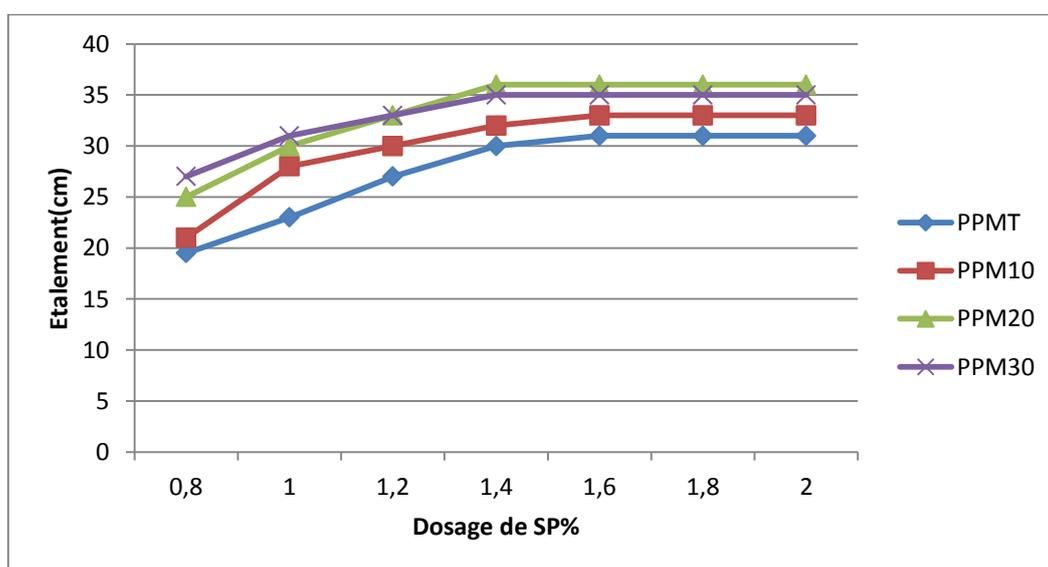


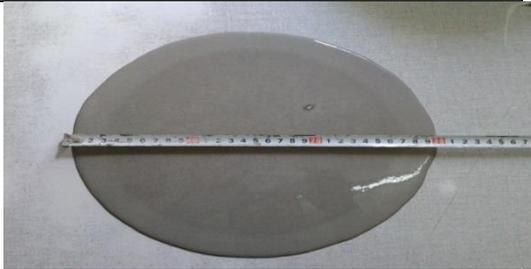
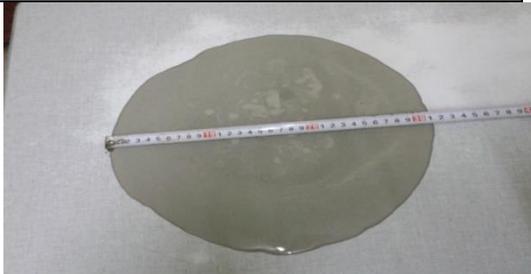
Fig 3.9. Evolution de l'étalement en fonction de SP avec marbre $SSB=5910 \text{ cm}^2/\text{g}$

A travers les résultats obtenus sur les différentes pâtes de ciment étudiées à base d'ajout marbre avec les deux finesses, on peut déterminer le point de saturation d'adjuvant qui présente le diamètre maximum de l'étalement (la meilleur fluidité).

3.4.1. Détermination de points de saturation de l'adjuvant.

Les tableaux et les figures suivantes donnent le point de saturation d'adjuvant des différentes pâtes étudiées.

Tableau 3.8. Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes à base de marbre SSB=3960 cm²/g

coulis	Point de saturation	Diamètre de L'étalement	photo
PPMT	1.6%	30 cm	
PPM10	1.6%	31 cm	
PPM20	1.4%	34 cm	
PPM30	1.2%	33 cm	

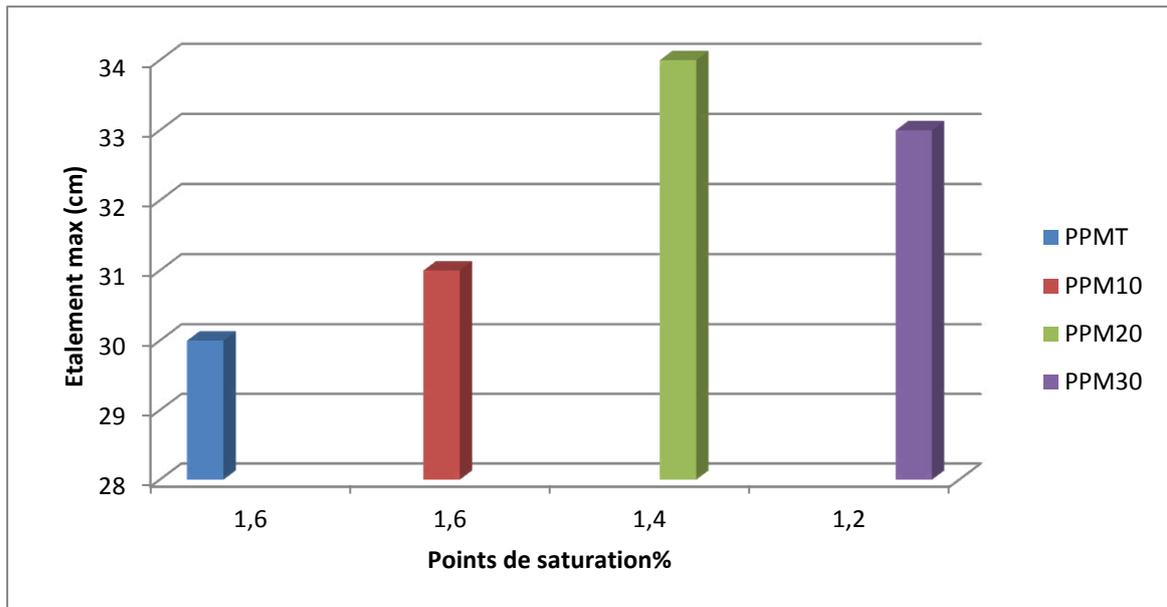
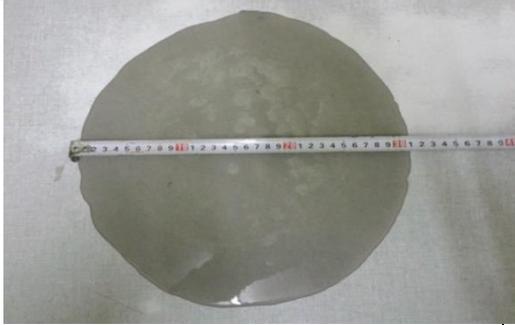
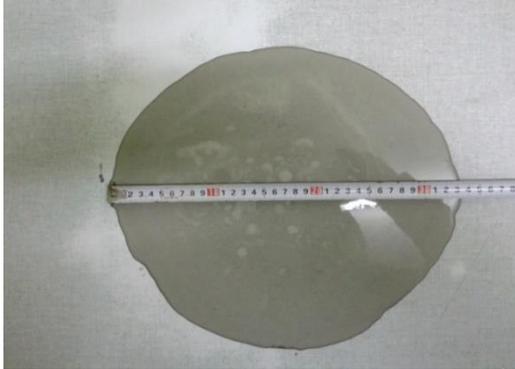


Fig 3.10. Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base marbre $SSB=3960 \text{ cm}^2/\text{g}$

Tableau 3.9. Point de saturation et diamètre maximum de l'étalement des pâtes à base de marbre SSB=5910 cm²/g

coulis	Point de saturation	Diamètre de l'étalement	photo
PPMT	1.6%	31 cm	
PPM10	1.6%	33 cm	
PPM20	1.4%	36 cm	
PPM30	1.4%	35 cm	

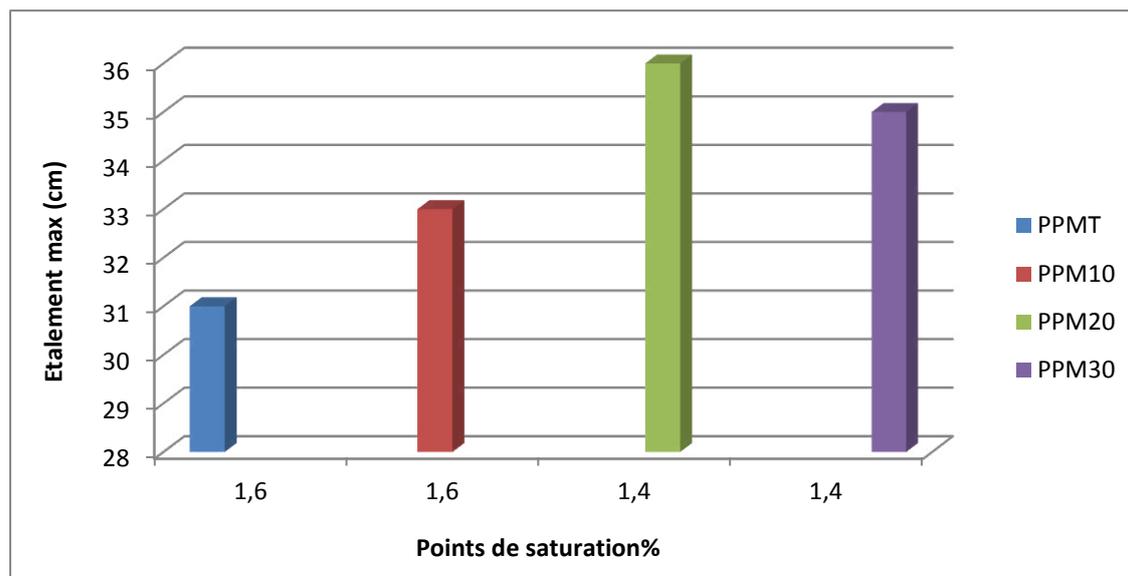


Fig 3.11. Point de saturation d'adjuvant des pâtes à base marbre SSB= 5910 cm²/g

3.5. Analyse et discussions des résultats.

- Quel que soit la composition de la pâte étudiée (pour les deux types d'ajouts ; tuf et marbre avec leur finesses) quand le dosage du superplastifiant augmente, l'étalement augmente pour atteindre le palier de saturation.
- Le point de saturation (dosage en adjuvant) est variable selon la composition de la pâte (type d'ajout, la finesse de l'ajout et le taux de substitution du ciment par l'ajout).
- Quand la quantité du ciment diminue dans une pâte, le dosage de saturation en adjuvant diminue, quel que soit le type, la finesse et le taux de substitution du ciment par l'ajout. Cela peut être expliqué par le fait que le superplastifiant interagit principalement avec les particules du ciment en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau.
- La pâte dont l'étalement est optimal est celle qui correspond à un taux de substitution du ciment par les ajouts égal à 20%. Ce constat est valable quelque soit le type d'ajout (tuf ou marbre), et quelque soit leur finesses.
- Les valeurs d'étalements de toutes les pâtes dont nous avons fait la substitution du ciment par un ajout (quelque soit l'ajout et quelque soit sa finesse) sont meilleures par rapport à celles de la pâte témoin.

- Dans toutes les pâtes optimisées (étalements maximales), le dosage de saturation en adjuvant est de 1.4% quelque soit l'ajout et la finesse.

-Pour l'ajout en marbre, quand la finesse augmente l'étalement augmente par contre pour celui du tuf, quand la finesse augmente, l'étalement diminue, cela est dû à la nature minéralogique des deux ajouts. Le tuf est de nature « actif » (effet pozzolanique), donc, il a besoin de s'hydrater (réaction avec l'eau). Quand la surface spécifique augmente, la quantité d'eau nécessaire augmente d'où l'écoulement (étalement) se trouve diminué, par contre le marbre est de nature inerte, donc son rôle fondamentale limite au remplissage intergranulaire (entre les grains du ciment). Quand la surface spécifique augmente, les fines de marbres trouvent mieux leurs emplacements (meilleurs arrangement intergranulaires) pour créer l'effet de roulement et finalement donner un meilleur étalement.

- L'ajout de marbre peut donner les meilleures performances rhéologiques (étalement) par rapport à celui du tuf notamment s'il est bien broyé (surfaces spécifiques élevées). En revanche, le tuf peut donner des performances mais pour des surfaces spécifiques modérées (inférieur à celles du ciment).

Chapitre 4

**Formulation et
caractérisation
des bétons auto plaçant**

4. Formulation d'un béton autoplaçant :

Cette partie est consacrée à la formulation et la caractérisation des différents bétons autoplaçants en se basant sur le dosage de saturation en adjuvant et les pâtes autoplaçantes optimisées dans la partie précédente (chapitre 3), possédant le meilleur comportement rhéologique (meilleur étalement). Nous rappelons que les paramètres étudiés sont: la nature des ajouts (la poudre de tuf et la poudre de marbre) ainsi que la finesse de mouture.

4.1. Méthode de formulation pratique des BAP.

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Dans l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme NF EN 206-1, soit en général de 300 à 400 kg/m³.
- En complément, la masse d'addition se situe entre 60 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

Quatre bétons autoplaçants seront étudiés dans cette partie, formulés d'après la méthode japonaise prenant en compte l'optimisation la pâte de ciment à base des ajouts tuf ou marbre.

Les données de base :

On a choisi :

-G/S=0,9.

-On fixe le rapport $E/(C+F)=0,41$

- Le dosage en superplastifiant est déterminé dans le chapitre 3 (donné par l'essai d'étalement au mini cône).

Optimisation de la composition du BAP :

-Le volume de la pâte pour 1m^3 du BAP égale à 340 l/m^3 .

320 kg/m^3 du ciment.

40kg/m^3 du (tuf ou marbre) comme addition (10 % de poids du ciment).

80 kg/m^3 du (tuf ou marbre) comme substitution (20 % de poids du ciment).

40kg/m^3 comme addition + 80 kg/m^3 comme substitution = 120 kg/m^3 comme filler.

$$E/(C+F)=0,41$$

$$G/S=0,9.$$

Détermination de la masse de chaque constituant :

On a:

$$C=320\text{ kg/m}^3.$$

$$F=120\text{ kg/m}^3.$$

$$E/(C+F)=0,41 \text{ donc } E=0,41*(320+120)$$

$$E= 180,40\text{ l/m}^3.$$

Volume de la pâte égale 340 l/m^3 .

Volume de granulats égale 660 l/m^3 .

$$G/S= 0,9$$

$$G+S= 660 \longrightarrow G= 660-S$$

$$S=660/1,9 \longrightarrow S= 347,37\text{ l/m}^3.$$

$$G= 660-347,37 \longrightarrow G= 312,63\text{ l/m}^3.$$

Le dosage en superplastifiant est 1,4% de la masse ciment et filler.

$$SP=0,014*(320+120).$$

$$SP=6,16\text{ kg/m}^3.$$

L'extrait sec du superplastifiant (polycarboxylate) est de 30%.

Donc la quantité d'eau provient de superplastifiant est de $0,7 * 6,16= 4.312$

D'où la quantité d'eau utilisée pour 1m^3 est de $176,12\text{ l/m}^3$.

On utilise les masses spécifiques des granulats pour déterminer leurs dosages en Kg.

- Sable (0/4) = 940kg .

- Gravier 3/8 représente 60% = 506kg .

- Gravier 8/15 représente 40% = 337kg .

-Le même calcul sera effectué pour la formulation des quatre bétons autoplaçants à base des ajouts marbre ou tuf avec différent finesse SSB, notés comme suit :

BAPT1: Béton autoplaçant de poudre de tuf avec $SSB=3440\text{ cm}^2/\text{g}$.

BAPT2: Béton autoplaçant de poudre de tuf avec $SSB=5700 \text{ cm}^2/\text{g}$.

BAPM1: Béton autoplaçant de poudre de marbre avec $SSB=3960 \text{ cm}^2/\text{g}$.

BAPM2: Béton autoplaçant de poudre de marbre avec $SSB=5910 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Les compositions des différents bétons sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1. Constituants pour 1m^3 du (BAP)

Type de BAP Constituants (kg)	BAPM1	BAPM2	BAPT1	BAPT2
ciment.	320	320	320	320
addition	40	40	40	40
substitution	80	80	80	80
superplastifiant	6.16	6.16	6.16	6.16
Eau	176.12	176.12	176.12	176.12
Sable (0/4)	940	940	940	940
Gravier 3/8	506	506	506	506
Gravier 8/15	337	337	337	337

4.2. Préparation de la gâchée

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie. Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas elle est de $1/20$ ème du m^3 . Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindrique /prismatique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, poudre de tuf, poudre de marbre) et les introduire dans le malaxeur.

- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter la trois quart d'eau graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant .



Fig 4.2. Malaxeur de béton autoplaçant



Fig 4.1. Moules de béton autoplaçant

4.3. Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage, pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.



Fig 4.3. Conservation des éprouvettes

4.4. Essais et caractérisation des bétons autoplaçants

Les essais effectués sur les bétons permettent de caractériser leurs performances physiques et mécaniques, de conclure sur leur nature (autoplaçant ou non) et sur les types d'application dans lesquelles ils pourront être utilisés (verticales ou horizontales).

Les caractéristiques et propriétés qui ont été appréhendées concernent la rhéologie et les performances mécaniques :

- L'étalement au cône d'Abrams. Le temps de l'étalement à 500mm.
- La stabilité au tamis.
- La capacité de remplissage. Le temps d'écoulement à 500mm dans la boîte en L.
- La masse volumique.
- La résistance à la compression, la résistance à la traction.

4.4.1. Essais et caractérisation sur béton frais :

Une liste non exhaustive des essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état frais a été présentée dans la synthèse bibliographique. Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC : l'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, et stabilité au tamis.

- **Essais au cône d'Abrams :**

Cet essai est habituellement effectué pour le béton vibré dans le but de déterminer sa consistance par mesure de l'affaissement, c'est ce qui a été fait pour le béton BAP.

Pour un BAP cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton. Après soulèvement du cône.

Les valeurs cibles de l'étalement sont typiquement dans une fourchette de 60 à 75 cm, le temps d'écoulement intermédiaires a été mesuré ; il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre d'étalement de 500 mm, noté T500.

Les résultats obtenus par cet essai sur les différents bétons sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.2. Résultats de l'essai au cône d'abrams et les temps de T500

béton	Etalement (cm)	T500 (s)	photo
BAPT1	70	2.59	
BAPT2	67	3.87	
BAPM1	74	2.26	
BAPM2	75	2.50	

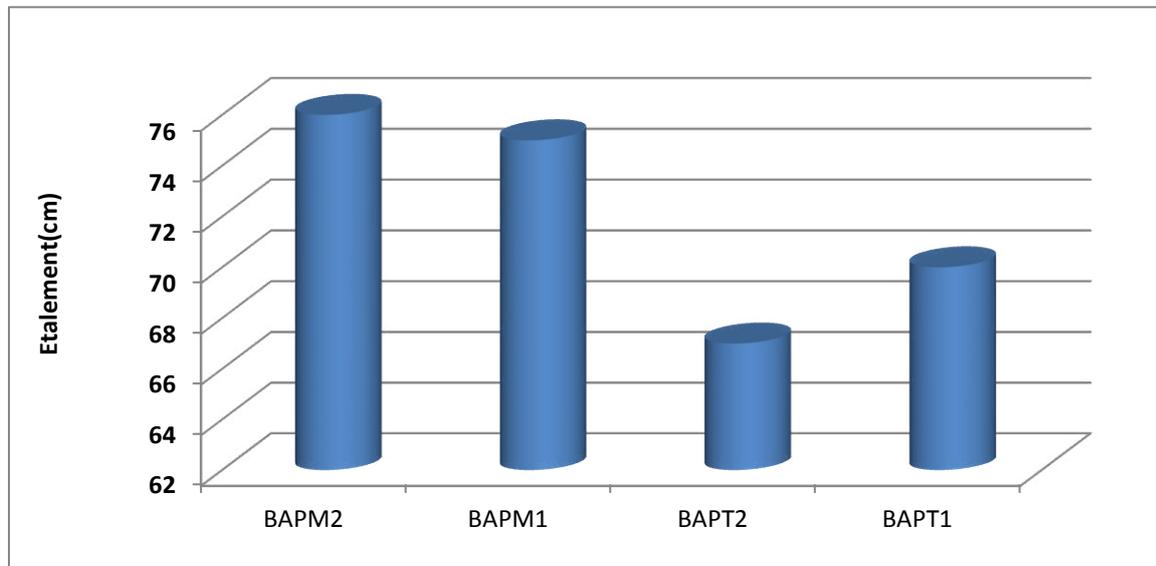


Fig 4.4 .Valeurs d'étalements pour les différents BAP.

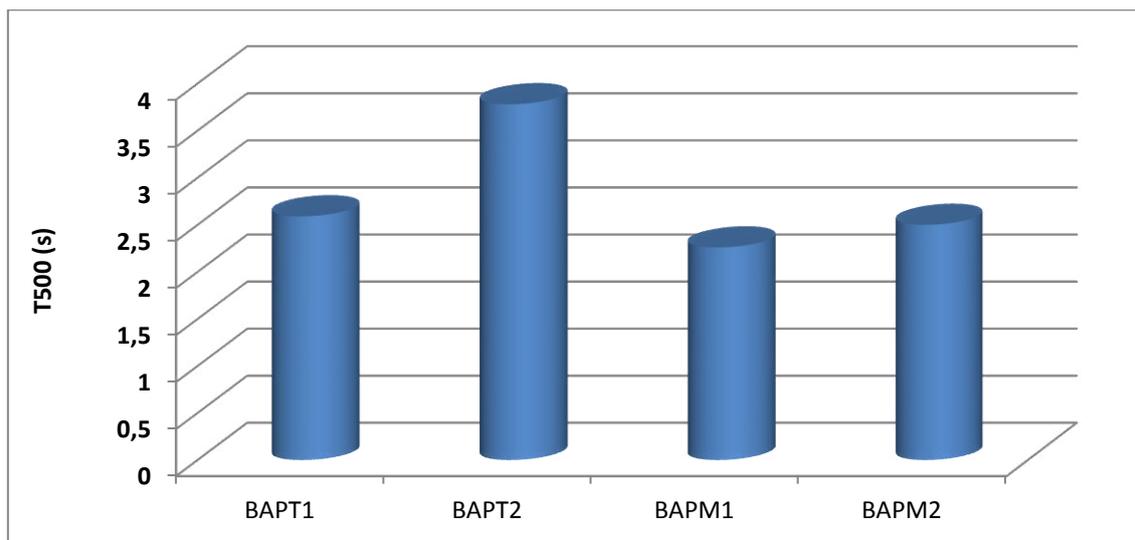


Fig 4.5. Valeurs des temps (T500) pour les différents BAP étudiés.

-Nous pouvons constater que les quatre (04) bétons autoplaçants étudiés respectent les critères d'étalement recommandé (compris entre 60 et 75cm). Nous pouvons aussi observer que l'auréole de la laitance à la périphérie des galettes du béton était absente ou très faible. L'étalement des BAPM1 et BAPM2 (poudre de marbre) est meilleur comparé à celui du BAPT1 et BAPT2 (poudre de tuf). Cela peut être expliqué par rapport à la nature minéralogique de l'ajout (inerte ou actif).

Ainsi, pour un même dosage en superplastifiant, la poudre de marbre augmente sensiblement l'étalement par rapport à la poudre de tuf. Cette dernière a besoin d'une grande quantité d'eau que la poudre de marbre ce qui réduit par conséquent son ouvrabilité (son étalement).

Nous pouvons remarquer que le comportement rhéologique donné par l'étalement pour les 4 BAP étudiés est conservé par rapport à celui de leurs pâtes déjà étudiés dans la partie optimisation de la pâte.

- **Essai de la boîte en L**

L'essai de la boîte en L (Fig4.6.) est effectué pour le béton autoplaçant seulement. Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné.

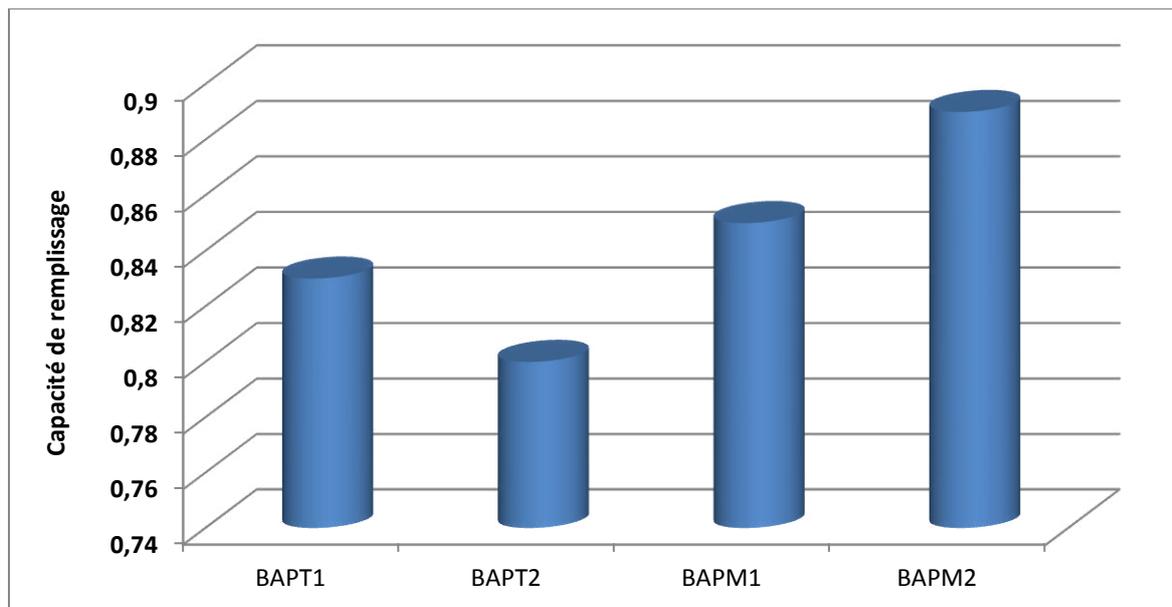
La partie verticale de la boîte est remplie de béton, après soulèvement de la trappe en acier, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs de béton dans les parties verticales. Pour un BAP, $H1/H2$ doit être supérieur à 0,8.



Fig 4.6. Essais de la boîte en L

Tableau 4.3. Résultats de l'essai de la boîte en L.

Béton	BAPT1	BAPT2	BAPM1	BAPM2
Capacité de remplissage (H1/H2)	0.83	0.80	0.85	0.89
T500(s)	3.11	2.59	2.96	2.25

**Fig 4.7.** Variation la capacité de remplissage pour les différents BAP.

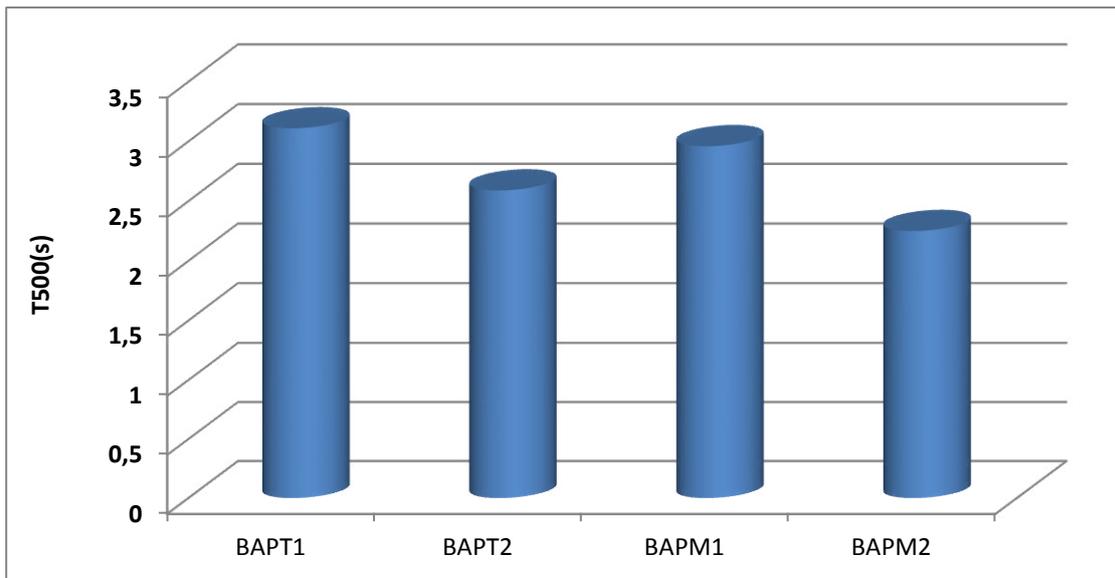


Fig 4.8. Evolution T500 de la boîte en L pour les différents BAP.

La capacité de remplissage pour les quatre (04) bétons autoplaçants (BAP) étudiés sont supérieures ou égales à 0.8 ce qui évite le risque de blocage de ces bétons entre le ferrailage.

La capacité de remplissage des BAPM1 et BAPM2 (poudre de marbre) est supérieure à la capacité de remplissage du BAPT1 et BAPT2 (poudre de tuf). Donc la poudre de marbre influence positivement et mieux que la poudre de tuf sur le taux de remplissage.

Les temps d'écoulements intermédiaires ont été mesurés. Il s'agit du temps nécessaire pour atteindre une distance de 500 mm, noté T500. Pour l'ensemble des bétons, le temps T500 diminue avec l'augmentation de la SSB ou la finesse des ajouts. Ce paramètre donne une appréciation sur la vitesse d'étalement ce qui est en relation directe avec la viscosité du BAP.

- **Essai de stabilité au tamis**

Lors de l'essai d'étalement, une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de la ségrégation et du ressuage). Mais l'essai le plus approprié pour la mesure de la stabilité est l'essai de stabilité au tamis (fig4.9). L'objectif de cet essai est d'évaluer les bétons autoplaçants vis-à-vis les risques de ségrégation et du ressuage en calculant le poids de la laitance passée au tamis par la formule donnée ci-après.

$$P_{\text{laitance}} \% = \frac{\text{poids de laitance passée (kg)}}{4,8 \pm 0,2} \times 100$$

Le calcul du pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon conduit à classer le béton autoplaçant de la façon suivante :

- 0% P laitance (%) 15% Stabilité satisfaisante.
- 15% < P laitance < 30% Stabilité critique.
- P laitance (%) > 30% Stabilité très mauvaise (béton inutilisable).

Cet essai a été effectué sur les 4 BAP étudiés. Le tableau (4.4.) Présente les résultats obtenus.



Fig 4.9. Essai de stabilité au tamis.

Tableau 4.4. Résultats de l'essai de la stabilité au tamis.

Béton	BAPT1	BAPT2	BAPM1	BAPM2
Poids de laitance %	6.1	5.35	8.10	7.77

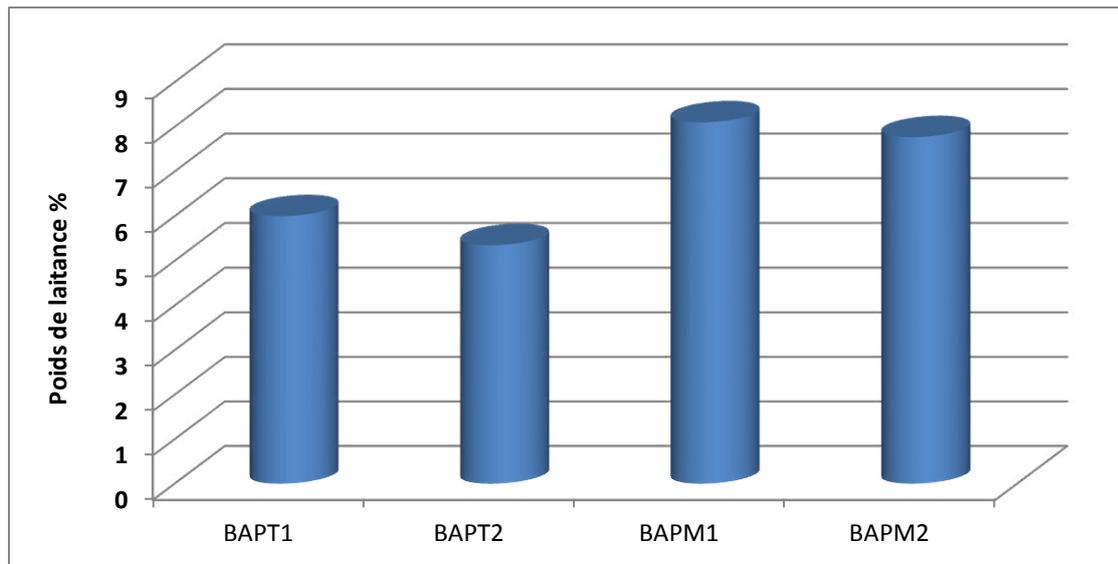


Fig 4.10. Variation de la stabilité au tamis pour les différents BAP.

Les quatre BAP testés soient : BAPM1 et BAPM2 (poudre de marbre) et BAPT1 et BAPT2 (poudre de tuf) ont une laitance « P » inférieure à 15%, donc une stabilité satisfaisante et le béton est homogène et stable.

Les quatre (04) BAP ont présenté une bonne stabilité au tamis, donc pas de ségrégation statique. En effet la quantité de laitance est située dans le domaine recommandé du BAP.

Nous remarquons que les poids de laitance du BAPM1 et BAPM2 (poudre de marbre) sont supérieurs aux poids de laitance du BAPT1 et BAPT2 (poudre de tuf) et cela est dû, comme c'est déjà avancé dans le paragraphe précédent (résultats des étalements), à la nature minéralogique différente des 02 ajouts (tuf et marbre).

- **La masse volumique**

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition du béton autoplaçant frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique. Pour effectuer cette mesure, nous utilisons un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement de BAP et sa surface libre est ensuite arasée. Nous pesons alors le récipient plein. Le rapport entre la masse du BAP (masse du récipient plein à laquelle on soustrait la masse du récipient vide) sur le volume du récipient correspond à la masse volumique du BAP frais exprimée en Kg/m^3 . la formule de la masse volumique à l'état frais :

$$M_v = M/V \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

avec :

$$M = M1 - M0$$

M1 : est la masse du récipient plein de béton ;

M0 : est la masse de récipient vide ;

V : le volume du récipient.

Les résultats sont inscrits dans le tableau 4.5.



Fig 4.11. Essai de la masse volumique.

Tableau 4.5. Résultats de masse volumique à l'état frais.

Béton	BAPT1	BAPT2	BAPM1	BAPM2
Masse volumique Kg/m ³	2309	2377	2342	2405

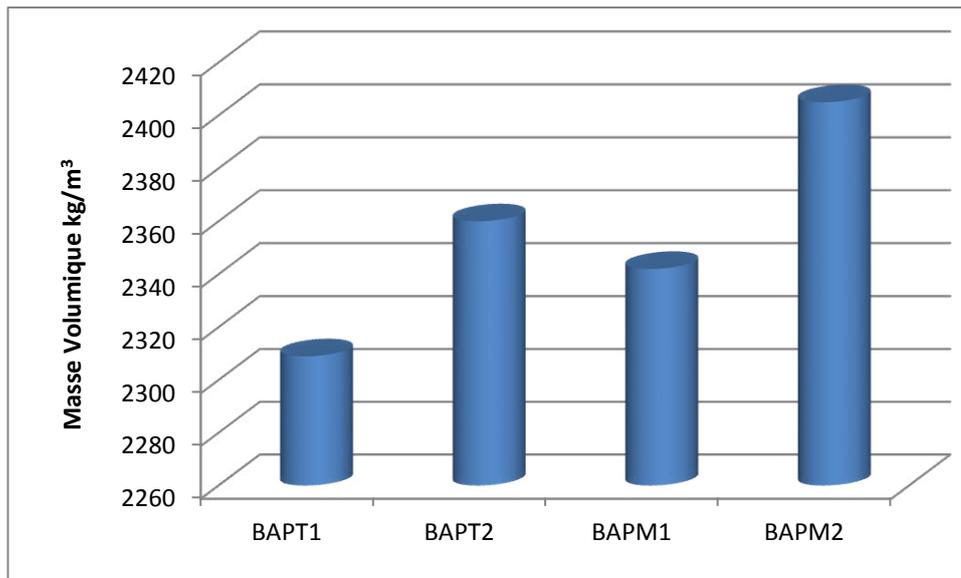


Fig 4.12. Variation de la masse volumique à l'état frais des différents BAP.

La masse volumique pour les quatre (04) bétons autoplaçants étudiés : BAPM2, BAPM1 et BAPT2, BAPT1 est comparable (les valeurs sont proches).

-Nous remarquons aussi que la masse volumique augmente quand la finesse (SSB) des ajouts augmente. Quand la finesse de l'ajout est grande (SSB élevé), cette ajout s'arrange mieux entre les vides inters granulaires des granulats (entre les grains fins de sable et de gravier et de ciment) pour améliorer la compacité, ce qui est justifié par cette augmentation de la masse volumique quand la surface spécifique (SSB) des fines utilisé augmente.

Nous remarquons aussi que la poudre de marbre donne une meilleure masse volumique quand sa finesse est grande par rapport à celle du tuf. Ce constat confirme et justifie ce que nous avons déjà conclu au niveau de l'écoulement de la pâte et le BAP pour cet ajout. Les fines se placent et s'arrangent mieux entre les autres granulats pour donner l'effet de roulement dans le cas de l'écoulement et en même temps améliorer la compacité.

4.4.2 Essais et caractérisation du béton durci :

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression et en traction par flexion des différents bétons autoplaçant étudiés sont réalisées sur des éprouvettes prismatique ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) pour la traction et réalisées sur des éprouvettes cylindrique ($11 \times 22 \text{ cm}^3$). Ont été conservées après démoulage dans milieux non agressifs jusqu'à l'échéance déterminée 28 jours. Les valeurs prises en compte sont les moyennes obtenues des résultats individuels de trois éprouvettes.

**Fig4.13.** Epreuves d'essai de traction**Fig4.14.** Epreuves d'essai de compression

- **Essai de compression**

L'essai de compression consiste à soumettre des éprouvettes de béton cylindriques à diamètre (11)x(22) cm³ à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu' à la rupture de l'éprouvette. On note la charge maximale atteinte P (KN) et la surface de chargement S (m²). Et la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c \text{ [MPa]} = P / S$$

Les essais effectués sur les différents bétons aux âges (28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau (4.6).

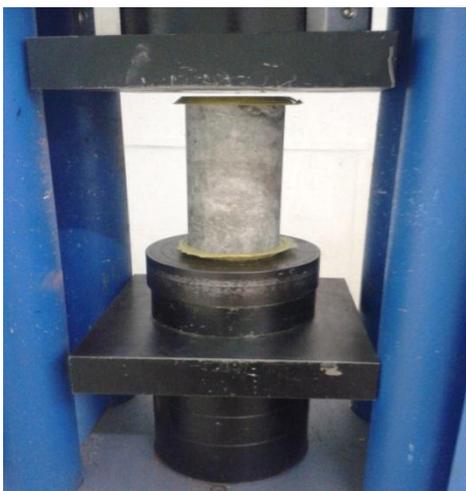
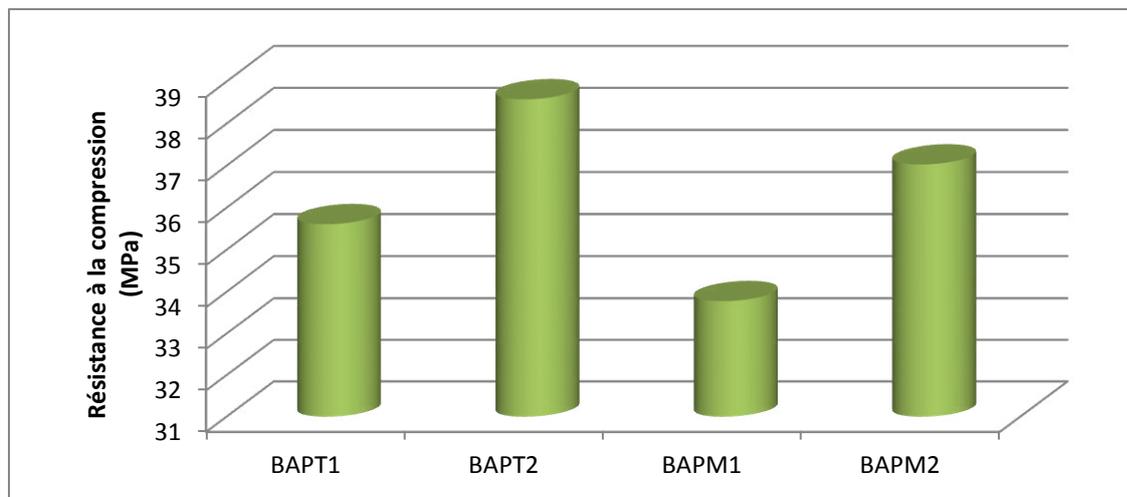
**Fig 4.15.** Presse utilisée pour mesurer de résistance à la compression

Tableau 4.6. Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés.

Béton	BAPT1	BAPT2	BAPM1	BAPM2
Résistance à la Compression (MPa)	36	38	34	37

**Fig 4.16** .Résistance à la compression à 28 jours des différents BAP.

Le premier constat que nous pouvons signaler est qu'avec les matériaux et les ajouts utilisés (poudre de marbre et poudre de tuf), nous avons pu formuler des bétons autoplaçants (BAP) qui ont des résistances à la compression acceptables (supérieurs à 33MPa), ce qui les situent toujours dans la gamme des bétons courants.

-Nous remarquons aussi que la résistance à la compression à 28 jours du BAPT2 (poudre de tuf avec la plus grande finesse) est meilleure par rapport aux autres BAP étudiés. Ce résultat est peut-être dû aussi à la nature active de cette addition. La réaction chimique entre la silice apportée par la poudre de tuf et la portlandite produite par l'hydratation du ciment conduit à l'accroissement de la résistance à travers la formation de nouveaux hydrates (CSH).

-Nous remarquons aussi que la résistance à la compression augmente (pour les types d'ajouts) quand la finesse augmente (SSB augmente). Ce résultat favorise l'utilisation des ajouts avec

une finesse élevée à cause de leur effet positif sur la compacité et par voie de conséquence sur la résistance à la compression.

- **Essai de traction par flexion**

L'essai de résistance à la traction par flexion est effectué en conformité avec la méthode qui consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques, reposant sur deux appuis, à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture. La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50 N/s). La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction par flexion est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux.

-On trouve la résistance à la flexion qui se localise au milieu de l'éprouvette, et se calcule par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3F_f l}{2a^3}$$

F_f : force concentrée en KN

l : distance entre les deux appuis $l=3a$ (en cm)

a : Coté et hauteur de l'éprouvette prismatique



Fig.4.17. Détermination de la résistance à la traction par flexion



Fig.4.18 Surface de rupture.

-Les essais effectués sur les différents bétons à l'âge de (28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau (4.7).

Tableau.4.7 Résultats d'essai de traction par flexion sur les bétons étudiés.

Béton	BAPT1	BAPT2	BAPM1	BAPM2
Résistance de traction par flexion(MPa)	5.10	5.25	4.74	5.15

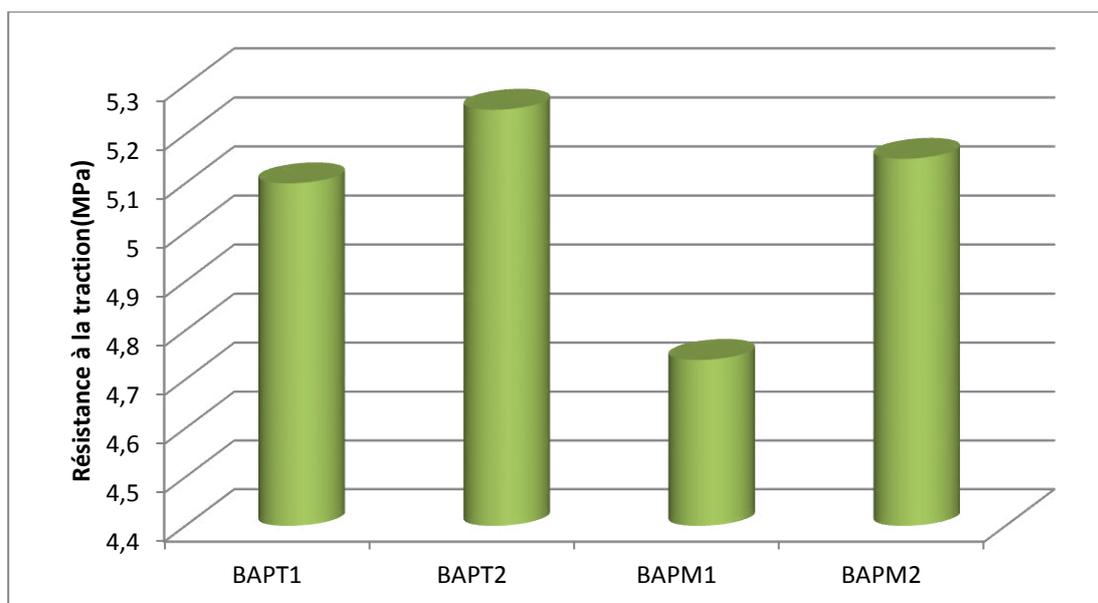


Fig.4.19 Résistance à la traction par flexion à 28 jours des différents BAP.

Les résistances à la traction par flexion (R_f) pour les quatre (04) bétons autoplaçants (BAP) formulés sont bonnes et acceptables.

Nous pouvons constater que l'effet des deux ajouts utilisés avec leurs finesses sur la résistance à la traction a conservé ses tendances par rapport aux résultats des résistances à la compression. En général les résultats des résistances à la traction des quatre bétons autoplaçants (BAP) sont comparables. L'effet de la poudre de tuf comme ajout (SSB élevé) est plus marquant (meilleur) que celui de la poudre de marbre. Cela est dû à la nature minéralogique différente des deux ajouts (tuf qui est actif et marbre qui est inerte). Aussi, pour un ajout donné, quand la finesse est élevée, nous avons tendance à améliorer la résistance à la traction par flexion du BAP.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les objectifs de notre étude étaient de produire un béton autoplacant économique de faible impact environnemental à travers l'exploitation des poudres de marbre et de tuf qui sont disponibles dans le marché Algérien. Ce travail a été mène sur deux volets, dans le premier volet, on a effectué des essais de mesure d'étalement sur des pâtes cimentaires à base des ajouts cimentaires marbre et tuf en variant la finesse de ces ajouts et le taux de substitution de ciment, et cela pour déterminer le dosage en superplastifiant qui correspond à la meilleure fluidité afin d'optimiser la composition de la pâte d'un béton autoplacant. Le second volet expérimental a pour but principal la formulation et la caractérisation à l'état frais et durci des bétons autoplacants en retenant uniquement les pates autoplacantes optimisées dans le premier volet qui possèdent le meilleur comportement rhéologique (meilleur étalement).

En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le point de saturation (dosage en adjuvant) est variable selon la composition de la pâte (type d'ajout, la finesse de l'ajout et le taux de substitution du ciment par l'ajout).
- Dans toutes les pâtes optimisées ou l'étalement est maximal, le dosage de saturation en adjuvant est de 1.4% quelque soit l'ajout et la finesse.
- La pâte dont l'étalement est optimal est celle qui correspond à un taux de substitution du ciment par les ajouts égal à 20%. Ce constat est valable quelque soit le type d'ajout (tuf ou marbre), et quelque soit leur finesses.
- L'ajout de marbre peut donner les meilleures performances rhéologiques (étalement) par rapport à celui du tuf notamment s'il est bien broyé (surfaces spécifiques élevées). En revanche, le tuf peut donner des performances mais pour des surfaces spécifiques modérées (inferieur à celles du ciment).
- L'étalement des bétons autoplacants a base de la poudre de marbre est meilleur comparé à celui des bétons autoplacants à base de la poudre de tuf.

CONCLUSION GENERALE

- Les quatre (04) BAP ont présenté une bonne stabilité au tamis, donc pas de ségrégation statique. Nous avons remarqué que les poids de laitance du BAPM1 et BAPM2 (poudre de marbre) sont supérieurs aux poids de laitance du BAPT1 et BAPT2 (poudre de tuf).
- la résistance à la compression à 28 jours du BAPT2 (poudre de tuf avec la plus grande finesse) est meilleure par rapport aux autres BAP étudiés
- la résistance à la traction par flexion pour BAPT2 (poudre de tuf, finesse élevée) est plus marquant (meilleur) que celui de la poudre de marbre.
- Il est possible d'utiliser des matériaux locaux tels que la poudre de marbre et la poudre de tuf dans la confection de béton autoplaçant.
- L'emploi de ces matériaux comme addition au BAP en remplacement du ciment pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante.
- De point de vue rhéologique et économique, la substitution de 20% du ciment par la poudre de marbre ou la poudre de tuf semble être très bénéfique.

Reference bibliographique

- [01] H.Okamura and al « Self compacting high performance concrete” Proceeding of the fifth EASEC, vol3, pp2381-2388 (1995).
- [02]H.Okamura, M.Ouchi “Self compacting concrete-development present and future” Proceedings of first international RILEM symposium on self-compacting concrete (PR07)-Stockholm-Suède, pp3-14,13-15 (1999).
- [03] H.Hafid “Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologiques des bétons frais” Thèse de doctorat de l’université Paris-Est, France-2012.
- [04] S.Assié “Durabilité des bétons autoplaçants” Thèse de doctorat de l’institut national des sciences appliqués-INSA Toulouse-France-2004.
- [05] B.Safi “Formulation et caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaires et mortiers autoplaçants » Thèse de doctorat de l’université M’hamed Bougara-Boumerdès-Algérie-2012.
- [06] ShenJie “Comportement mécanique des matériaux et des structures précontraintes en bétons autoplaçants (BAP)” Thèse de doctorat de l’université de Reims champagne-ardenne-France-2009.
- [07]Z.Abib « Influence des fines issues d’argile kaolinitique cuite sur les performances des bétons autoplaçants » Thèse de doctorat de l’université des sciences et de technologies Houari Boumediene (USTHB) Algérie. Mai 2014.
- [08]M.L.Kateb « Formulation des bétons autoplaçants à base de laitier »Thèse de magister de l’université des sciences et de technologies Houari Boumediene (USTHB) Algérie. Juillet 2006.
- [09]L.Hasni « Bétons autoplaçants » Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PNBAP- juillet 1999.
- [10] Hu Chong “Rhéologie des bétons fluides” Thèse de doctorat de l’école nationale des ponts et chaussées-Paris-France-1995.
- [11]B. Necira, A. Guettala a, S. Chabi,“Formulation des bétons autoplaçants : effet des ajouts minéraux et des adjuvants”, Doctorat d’État, Université de Biskra, Algérie.
- [12]Samara M, Roziere E, Khokhar M, Loukili A, “Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants”, Projet ANR-RGCU SEDIBET, 2007.
- [13]Ayed K, Vidal T, Pons G, Benaissa A, “Influence du type d’addition minérales sur les déformations différées des bétons autoplaçants”, Thèse INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 2006.
- [14]Rebouh N, “ Formulation et caractérisation d’un béton autoplaçant”, Projet de fin d’études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [15]El Hilali A, E.Ghorbel E, Gonnon P,“Influence des fillers sur l’ouvrabilité des bétons autoplaçants”, Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.

- [16] Bouhamou N, Belas N, Mebrouki A, Mesbah H, Ammar Y, “Étude de l’influence des paramètres de composition sur le comportement à l’état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux”, Doctorat d’État, Université de Mostaganem, Algérie, 2004.
- [17] Haddad O, Aggoun S, Cabrillac R, « Influence des addition minérales sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants », Université de Cergy-Pontoise, France, 2003.
- [18] Mebrouki A, Belas N, Bouhamou N, « Contribution à la formulation d’une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux », Université de Mostaganem, 2007.
- [19] Igarashi S, Bentur A, Kovler K, “Stresses and creep relaxation induced in restraining autogenous shrinkage of high-strength pastes and concretes”, *Advances in Cement Research*, 11:169_177, 1999.
- [20] Igarashi S, Bentur A, Kovler K, “Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes”. *Cement and Concrete Research*, 30 :1701_1707, 2000.
- [21] Okamura H, Ouchi M., “Self-compacting concrete. Development present use and future”, First International RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publication s.a.r.l, 3- 14, 1999.
- [22] Chanvillard G, “ Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d’acier tréfilées ”, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d’art, OA12, 1993.
- [23] Sedran T, De Larrard F, « Manuel d'utilisation de RENE-LCPC », Logiciel d'optimisation granulaire, version 6.1d. LCPC, 2000.
- [24] Okamura H, Ouchi M, “Self-Compacting Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol, 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [25] T. Sedran: «Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique». *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. N° 196, pp 53-60. Mars–Avril 1995
- [26] Groupe de travail «BAP»: «Bétons auto-plaçants : Recommandations provisoires». Association Française de Génie Civil. Juillet 2000
- [27] N. Hasan, E. Faerman & D. Berner: «Advances in underwater concreting : St- Lucie Plant intake velocity cap rehabilitation». *High Performance Concrete*. ACI SP 140- 9. pp 187-213. 1992.
- [28] K.H. Khayat: «Technologie du béton». GCI-340 (note de cours). Département de Génie Civil. Université de Sherbrooke. 1996.
- [29] Domone, P.L, “ Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies ”, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(2):197-208.
- [30] Holcim, “ Le béton autocompactant ”, 1ère édition, Suisse, 2005
- [31] Domone, P.L, “ Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies ”, *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(2):197-208.
- [32] EFNARC, “ Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete ”, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32pp.
- [33] Sonebi, M., and Bartos P.J.M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999; 275-89.
- [34] Felekoglu, B., Turkel, S., and Baradan, B, “ Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete ”, *Building Environment* 2007; 42(4): 1795–802.

[35] Dehwah, H.A.F, “ Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash ”, Construction and Building Materials 2012; 26: 547–51.

[36] Siddique, R, “ Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash ”, Materials and Design 2011; 32: 1501–7

Annexe

Annexes

Annexes1 : Mode opératoire des essais de ciment

1 . La surface spécifique Blaine SSB : NF P 15-471

- La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et la température connue, à travers une couche de liant tassé.

1.1. Spécification du perméabilimètre – Blaine :

Le perméabilité –Blaine utilisé doit répondre aux exigences suivantes :

-La cellule : de masse utilisée à un bord supérieur plan et perpendiculaire à son axe, elle s'assemble à l'ajustage par une liaison conique 19/35 ou de dimensions voisines.

-Le piston : son extrémité doit être droite et à bords vifs, il comprend un méplat (prolongé par échancrure à la tête) pour permettre le passage de l'air les tolérances de dimensions doivent faciliter un coulissement dans la cellule.

-La grille est composée de 30 à 40 trous de 1mm de diamètre.

-La cellule, le piston et la grille sont en métal inoxydable.

-Les disques de papier filtre sont découpés à bord net à partir d'un papier filtre à filtration courante, texture moyenne.

-Le manomètre en (U) est en verre de 1 à 1,5 mm d'épaisseur, il est fixé de préférence sur une planchette – support au moyen d'un collier.

-Le liquide effleurant au repos au trait inférieur doit être stable, non volatil et non hygroscopique de faible viscosité et de faible densité (Dibutylphtalate, huile minérale, extra fluide ...).

Mode Opératoire :

-La surface spécifique est déterminée avec le perméabilimètre de Blaine.

-On place un papier filtre sur la plaque inférieure de la cellule.

-On introduit l'échantillon de ciment et on égalise en secouant légèrement la cellule.

-On place ensuite un papier filtre au-dessus de l'échantillon et on comprime ce dernier en tournant légèrement le piston jusqu'à ce que son col et supporter par le bord supérieur de la cellule.

-Après compression de l'échantillon dans la couche soumise à l'essai et le papier filtre

-On relie la cellule du tube du manomètre et on s'assure de la parfaite étanchéité du raccord.

Annexes

-On ferme le robinet monté sur le tube manomètre, on comprime la poire on caoutchouc.

-Le relâchement simultané de la pression sur la poire et l'ouverture du robinet d'aspiration ont pour effet, l'air est lentement aspiré du tube du manomètre et le liquide est refoulé vers le haut, lorsque le niveau du liquide atteint le repère supérieur.

-On ferme le robinet on met le chronomètre en marche lorsque la surface inférieure du ménisque franchisse le deuxième trait annulaire depuis le sommet du tube.

On arrête le chronomètre.

Expression des résultats :

La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3 t}}{\rho (1 - e) \sqrt{\eta}}$$

SSB : surface spécifique (cm²/g)

K : constant de l'appareil.

e : porosité de la couche tassée, égale à 0.5

t : temps mesuré en secondes

ρ : Masse volumique des grains g/cm³

η : Viscosité de l'air à la température d'essai .

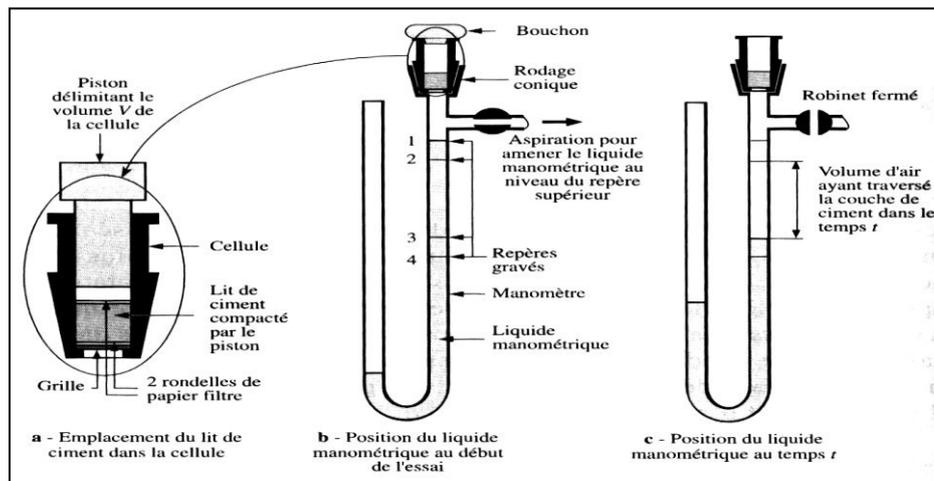


Fig.1. l'appareil perméabilimètre – Blaine

2. Essai de consistance et de prise

Objet de l'essai

-Calculer la quantité d'eau optimale et le temps de prise

Mode opératoire

2.1. Essai de consistance

-Monter la sonde de consistance sur l'appareil de Vicat et ajuster le repère de la tige coulissante sur le zéro de la règle graduée en abaissant la sonde jusqu'à la plaque de base

-Peser 500g de ciment. Peser une première quantité d'eau.

-Verser la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur, ajouter soigneusement les 500g de ciment et régler le zéro du chronomètre.

- Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 secondes, arrêter le malaxage, démonter le récipient, racler les parois à l'aide d'une spatule, remettre la pâte raclée dans la gâchée et remonter le récipient.

- Malaxer de nouveau pendant 90 secondes, puis arrêter la machine.

-Remplir immédiatement le moule tronconique placé sur la plaque support et légèrement graissé au préalable jusqu'au refus. Araser ensuite la surface du moule avec précaution de manière à obtenir une surface supérieur lisse.

- Mettre le moule et la plaque de base dans l'axe de la sonde dans l'appareil de Vicat, rabaisser la sonde jusqu'au contact avec la surface supérieure de la pâte et observer un temps d'arrêt. Lâcher ensuite la partie mobile de l'appareil de Vicat.

-Noter la distance de la sonde du fond du moule à la fin de la pénétration, indiqué par le repère de la tige sur la règle graduée de l'appareil.

- Si cette distance n'est pas comprise entre 5 et 7 mm, refaire l'essai avec une autre pâte en variant la quantité d'eau en plus ou en moins de quelques grammes, jusqu'à avoir une distance de 5 à 7 mm.

Noter la quantité d'eau correspondant à la distance comprise entre 5 et 7 mm.

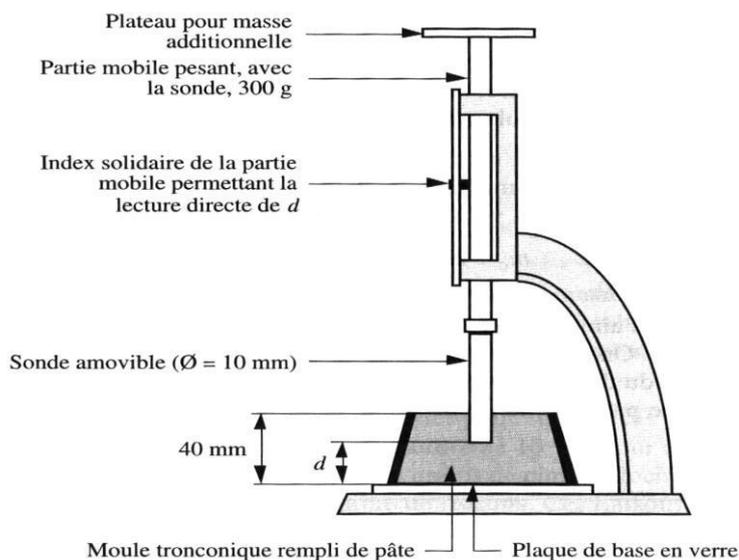


Fig.2 . l'appareil de Vicat

2.2.Essai de prise

-Monter l'aiguille sur l'appareil de Vicat et ajuster le repère de la tige coulissante sur le zéro de la règle graduée en abaissant la sonde jusqu'à la plaque de base.

-Peser 500 g de ciment et la quantité d'eau normalisée.

-Verser la quantité d'eau dans le récipient du malaxeur, ajouter soigneusement les 500 g de ciment et régler le zéro du chronomètre. Noter l'heure de gâchage aussi.

-Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 secondes, arrêter le malaxage, démonter le récipient, racler les parois à l'aide d'une spatule, remettre la pâte raclée dans la gâchée et remonter le récipient.

- Malaxer de nouveau pendant 90 secondes, puis arrêter la machine.

- Remplir immédiatement le moule tronconique placé sur la plaque support et légèrement graissé au préalable jusqu'au refus. Araser ensuite la surface du moule avec précaution de manière à obtenir une surface supérieure lisse.

- Mettre le moule et la plaque de base dans l'axe de l'aiguille de l'appareil de Vicat, rabaisser l'aiguille jusqu'au contact avec la surface supérieure de la pâte et observer un temps d'arrêt. Lâcher ensuite la partie mobile de l'appareil de Vicat.

-Noter la distance de l'aiguille du fond du moule à la fin de la pénétration et noter en même temps l'heure de lecture dans la case correspondante. Placer ensuite le moule avec la plaque de base dans le bain d'eau et nettoyer l'aiguille de pénétration Si cette distance n'est pas

Annexes

comprise entre 3 et 5 mm, refaire l'opération de pénétration à intervalles réguliers de 10 à 15 mm et à des endroits distants de 10 mm du bord du moule. Noter à chaque fois la distance de l'aiguille à la base du moule et l'heure de lecture dans la case correspondante. Noter l'heure de début de prise correspondant à la distance comprise entre 3 à 5 mm.

- Retourner le moule sur sa petite base et commencer à noter l'enfoncement de l'aiguille à des intervalles variant de 300 mn en les diminuant à 15 mn vers la fin de prise. Noter à chaque fois l'enfoncement de l'aiguille et l'heure dans la case correspondante.

-Noter l'heure de fin de prise correspondant à un enfoncement de 0.5 mm.

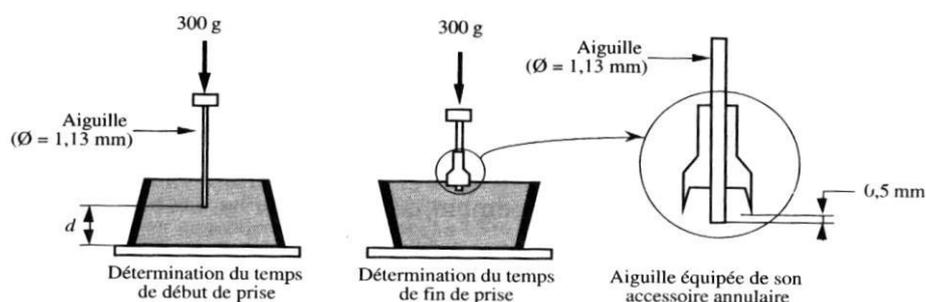


Fig.3. mesure du temps de prise

3 -Essai de détermination des résistances mécaniques.

À La présence norme AFNOR a pour but de définir les essais de flexion et de compression permettant de déterminé la contrainte de rupture à la traction par flexion et à la contrainte de rupture la compression des liants hydrauliques.

Le mortier normal se compose en masse d'une partie du liant à essayer, de trois parties en sable normal, selon norme AFNOR et une demi- partie d'eau (E/C=0.5).

La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction de l'éprouvette à préparer, elle est pesée est avec une précision de 0.5 %.

Dans le cas de la préparation d'éprouvettes (4x4x16) cm, les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable normale : 1350g.

Liant : 450g.

Eau : 225g.

Confection des éprouvettes :

-Verser dans le récipient du malaxeur 225 ml d'eau, lui ajouter 450g de ciment.

-Mettre le malaxeur à vitesse lente pendant une minute puis à vitesse rapide pendant 2 minutes dont les premières secondes est réservées au versement de 1350g de sable normalisé.

Annexes

-Arrêter le malaxage, démonter le batteur de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune fraction du mortier n'échappe au malaxage.

-Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 minutes à vitesse rapide.

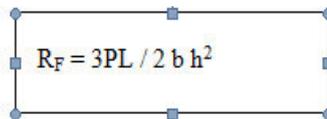
-Verser le contenu du récipient, dans le moule des éprouvettes (4x4x16) cm, faire 120 coups avec la table à choc, araser la surface au moyen d'une truelle.

-Placer les moules dans la chambre humide (65%), après 24 heures, démouler et placer les éprouvettes dans l'eau (20°C).

- Essai de rupture à la flexion : NF P 15-471

Le dispositif de flexion comporte 2 appuis de distance entre eux 10 cm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et 3eme rouleau équipement des 2 premiers et transmettant la charge jusqu'à rupture de l'éprouvette, deux des rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement autour de leur centre dans le plan vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette.

Elle est calculée par la formule suivante :


$$R_F = 3PL / 2 b h^2$$

R_F (Kgf /cm²) : la résistance à la flexion.

P (KN) : la force affichée sur l'appareil.

L (cm) : Distance entre les appuis égale à 10 cm.

b (cm) : l'épaisseur de l'éprouvette.

h (cm) : la largeur de l'éprouvette.

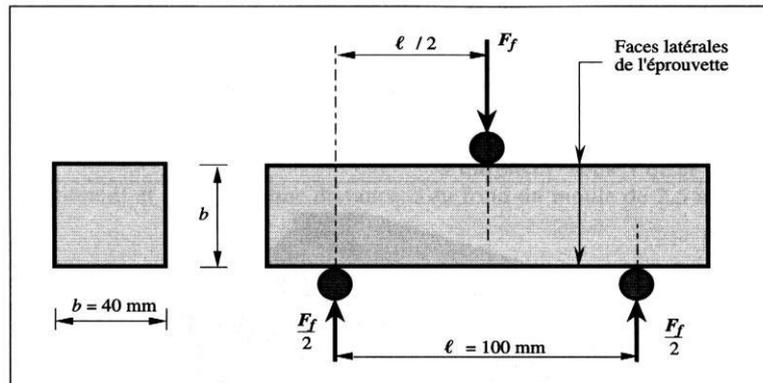


Fig.4. Essai de rupture à la flexion

-Essai de rupture à la compression : NF P 15-471

Chaque demi-prisme est essayé en compression sur ses faces latérales de moulage, ces 2 plaques de métal dur de sections (4 x 4) cm. Le demi prisme est placé entre de matière que son extrémité intacte dépasse environ 1 cm.

Les contraintes de rupture à la compression, les âges des éprouvettes sont 2, 7 et 28 jours.

La résistance à la compression est calculée par formule suivant :

$$R_c = F / S$$

Où R_c (Kgf / cm²) : la résistance à la compression.

F (Kgf) : la force donnée par l'appareil.

S (cm²) : la surface.

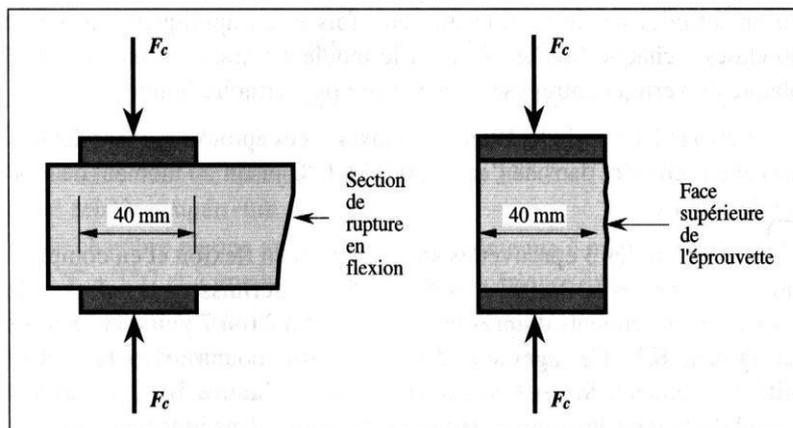


Fig.5. Essai de rupture à la compression

ANNEXES 2 : Mode opératoire des essais concernant les bétons autoplaçants (à l'état frais).

1-Essai d'étalement au cône d'Abrams

(Slump Flow)

Objet de l'essai :

Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

Matériel nécessaire :

Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée d'au moins 90cm de côté.

Cône d'Abrams, celui-ci dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.

Mètre de 90cm

Mode opératoire :

Mettre le plateau sur un support stable et horizontal.

- Humidifier la surface de la plaque.
- Placer le cône au centre du plateau.
- Prélever un échantillon représentatif du béton.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir.
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la Plaque avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois le béton étalé, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final sur deux cotés perpendiculaires.
- Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5cm, l'essai est invalide et reconduit.

Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.

2 - Essai de stabilité au tamis

Annexes

Objet de l'essai :

-Qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.

Matériel nécessaire :

Seau de 10 litres + couvercle

Tamis 5mm diamètre 315mm + fond de tamis

Balance : précision minimale 20g, portée minimale 20kg.

Mode opératoire :

Echantillonnage : malaxer, verser directement 10litres de béton dans le seau. Le temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement < 30 secondes.

Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.

Attendre 15 minutes, Peser le fond, Poser le tamis +fond sur la bascule.

Verser au centre du tamis un poids de béton égal à 4,8 kg \pm 0,2 kg, hauteur de chute du béton 50 cm \pm 5 cm.

Attendre 2 minutes.

Faire la tare.

- Peser le poids de laitance : $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond +laitance}} - P_{\text{fond}}$.

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

Stabilité (%) = $(P_{\text{laitance}} \times 100) / P_{\text{échantillon}}$

3 - Essai de la boîte en L (Capacité de remplissage) :

Objet de l'essai :

Tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du phénomène de blocage inacceptables.

Matériel nécessaire :

La boîte en L

Mode opératoire :

Vérifier que la boîte est sur un plan horizontal.

Remplir de béton la partie verticale de la boîte en L (Son volume est d'environ 13litres).

Araser et laisser le béton reposer pendant 1minute.

Annexes

Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2. On exprime le rapport $H2/H1$.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe de blocage ou de ségrégation.