

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :  
**TAIB WALID**

**BEN SAYAH ABDENOUR**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Civil  
Option : Matériaux en Génie Civil

**Thème :**

**ELABORATION ET CARACTERISATION PHYSICOMECHANIQUE D'UN  
BETON AUTOPLAÇANT**

**Devant le jury composé de :**

Mr AMRANE BELAID	M C B	UAMOB	Président
Mr HAMI BRAHIM	M C B	UAMOB	Encadreur
Mr BOUAMRA YUCEF	M C B	UAMOB	Examineur
Mr KENNOUCHE SALIM	M C B	UAMOB	Examineur

**Année Universitaire 2017/2018**

# Remerciements

*Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Mr HAMI .B, qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique et pratique de notre projet de fin d'étude.*

*Nous tenons à remercier sincèrement Mr le directeur du " laboratoire centrale des travaux publics de BOUIRA t " (LCTP) pour nous avoir accepté d'effectuer le stage pratique au sein de ce laboratoire, et pour la confiance qu'il nous a témoigné.*

*Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance aux enseignants de La Faculté des Sciences et des sciences appliquées (Département Génie Civil) de l'université de Bouira.*

*Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leurs concours à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de notre profonde sympathie.*



# DEDICACE

*Aucun mot ne pourrait exprimer des sentiments comme la gratitude, l'amour, le respect ou la reconnaissance. Je dédie cette thèse à ...*

*A mes très chers parents  
Jamais je ne saurais m'exprimer quant aux sacrifices et dévouement que vous avez consacrés à mon éducation et mes études. Les mots aussi expressifs soient ils, restent faibles pour vous énoncer ma gratitude hautement profonde. Puisse Dieu vous exaucer de santé, de prospérité et de bien-être et vous octroyer une longue vie,*

*A mon frère Mahdi et ma sœur Amira  
A ma femme et mes deux fils Adem et Ishac  
A toute la famille Taib ainsi que la famille Hadji*

*Et a tout mes amis sans exception*

*Taib Walid*



# DEDICACE

*Aucun mot ne pourrait exprimer des sentiments comme la gratitude, l'amour, le respect ou la reconnaissance. Je dédie cette thèse à ...*

*A mes très chers parents*

*Jamais je ne saurais m'exprimer quant aux sacrifices et dévouement que vous avez consacrés à mon éducation et mes études. Les mots aussi expressifs soient ils, restent faibles pour vous énoncer ma gratitude hautement profonde. Puisse Dieu vous exaucer de santé, de prospérité et de bien-être et vous octroyer une longue vie,*

*A mes frères et sœurs*

*A ma femme et mes deux enfants Rayane et Malak*

*A toute la famille Ben Sayah  
Et a tout mes amis sans exception*

*Ben Sayah Abdenour*

# RESUME

### Résumé

L'objectif de ce travail est d'apporter des éléments permettant de comprendre le comportement rhéologique des bétons autoplaçants avec différents pourcentages de différents additifs, ainsi que l'influence de ces derniers sur l'étalement, la stabilité au tamis qui nous renseignent sur la ségrégation et en fin, sur l'écoulement à l'aide de la boîte en L.

**La première partie** du mémoire est consacrée aux connaissances actuelles des propriétés des BAP à savoir ces constituants (ciment, fines, granulats, sable, adjuvants et l'eau), les méthodes de caractérisation des différentes propriétés ainsi que différentes méthodes de leurs formulations et de la rhéologie des BAP.

**La seconde partie** constitue une étape qui consiste à caractériser tous les matériaux utilisés dans notre étude (ciment, agrégats, eau, les fines et les adjuvants).

**La troisième partie** est consacrée aux calculs et la formulation d'un BAP on utilisant la méthode JAPONAISE et ensuite de formuler trois bétons avec la composition de trois mélanges avec trois portions de fines différentes avec un dosage en super plastifiant fixe.

A- (10% de fumée de silice 10% de filler calcaire 10% du mélange fumée de silice et filler calcaire).

B- (20% de fumée de silice 20% de filler calcaire 20% du mélange fumée de silice et filler calcaire).

C- (30% de fumée de silice 30% de filler calcaire 30% du mélange fumée de silice et filler calcaire).

**La quatrième partie** présente les résultats des différents essais et l'interprétation des résultats ainsi que les recommandations qui en découlent.

### Abstract

The objective of this work is to provide éléments to understand the rhéological behavior of self-compacting concretes with different percentages of different additives, as well as the influence of the latter on the spreading, the sieve stability which gives us information on the ségrégation and at the end, on the flow using the box in L.

**The first part** of the thesis is devoted to the current knowledge of the properties of BAP namely these constituents (cément, fines, aggregates, sand, admixtures and water), the méthodes of characterization of the different properties as well as different methods of their formulations and the rheology of BAP.

**The second part** is a step that consists of characterizing all the materials used in our study (cement, aggregates, water, fines and adjuvants).

**The third part** is devoted to the calculations and the formulation of a BAP using the JAPANESE method and then to formulate three concretes with the composition of three mixtures with three portions of different fines with a fixed superplasticizer dosage.

A- (10% silica smoke 10% calcareous filler 10% of the smoke silica mixture and calcareous filler).

B- (20% silica smoke 20% calcareous filler 20% of the smoke silica mixture and calcareous filler).

C- (30% silica smoke 30% limestone filler 30% smoke silica mixture and calcareous filler).

The fourth part presents the results of the various tests and the interpretation of the results as well as the resulting recommendations.

### الخلاصة

الهدف من هذا العمل توفير العناصر اللازمة لفهم سلوك الريولوجية من الخرسانة المقولبة ذاتيا مع نسب مختلفة من الإضافات المختلفة , ومعرفة تأثير هذه الإضافات على انسياب و استواء الخرسانة , ومعرفة مختلف ردود فعلها وذلك باستعمال مختلف التجارب لاسيما .

1- الاستقرار تحت الغرابيل:

هذه التجربة التي تعطينا نظرة عن تجانس الخرسانة .

2- علبة L التي تعطينا نظرة عن انسياب الخرسانة .

**\*الجزء الأول:** من هذه المذكرة خصصناه لمختلف المعارف الانية حول خصائص مكونات الخرسانة المقولبة ذاتيا لاسيما "

الاسمنت , الحصى , الرمل , الماء و مختلف الإضافات مع تحديد مختلف طرق التصنيف و حساب مكونات هذه الخرسانة .

**\*الجزء الثاني:** خصص لتحديد نوعية مختلف مواد البناء المستعملة في الخرسانة المقولبة ذاتيا في الجزء التطبيقي لهذه المذكرة .

**\*الجزء الثالث:** خصص لحساب مكونات الخرسانة المقولبة ذاتيا باستعمال الطريقة اليابانية مع تكوين ثلاث أنواع من خليط

خراسنة بثلاث نسب مختلفة من الإضافات مع نسبة ثابتة من الملدنات الفائقة :

ا- الخليط الأول:

- 10° من مادة دخان السيليس

- 10° من مادة غبار الكلس

- 10° من مادة دخان السيليس + غبار الكلس

ب - الخليط الثاني :

- 20° من دخان السيليس

- 20° من غبار الكلس

- 20° من غبار الكلس+ دخان السيليس

ج - الخليط الثالث :

- 30° دخان السيليس

- 30° غبار الكلس

- 30° من غبار الكلس + دخان السيليس

د - الجزء الرابع: والأخير من هذه المذكرة يتمثل في مختلف نتائج تجارب التي قمنا بها مع تفسيرها , و خلاصة النتائج

المستوحاة من هذا العمل .

# SOMMAIRE

## Sommaire

### Résumés

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I. synthèse bibliographique</b> .....	04
<b>Chapitre.II. Généralités sur les bétons autoplaçants</b> .....	12
II .1.Introduction .....	12
II .2.Définition d'un béton auto plaçant .....	13
II.3. Constituants du béton .....	13
II.3.1.Introduction .....	13
II. 3.2.Ciment .....	14
II. 3.2.1. Constituants de ciment .....	14
II.3.2.2.Présentation des principaux ciments.....	19
II.3.2.2.1 CPA.CEMI Ciment portland.....	19
II. 3.2.2.2 CPJ.CEM II/A et B Ciment Portland Compose.....	19
II. 3.2.2.3 CHF-CEM III/A et B Ciment De Haut Fourneau.....	20
II. 3.2.2.4 CLK-CEM III/C Ciment De Haut Fourneau.....	20
II. 3.2.2.5 CPZ-CEM IV/A et B Ciment Pouzzolanique.....	20
II. 3.2.2.6 CLC-CEM V/A Ciment Au Laitier Et Aux Cendres.....	20
II. 3.3.Granulats .....	20
II.3.3.1.Normes applicable aux granulats .....	21
A- La Norme NF En 12620 (Aout 2003) Granulats Pour Béton.....	21
B- La Norme XP P 18-545 (Février 2004) Granulats « Conformité Et codification » .....	21
C- Granulats Pour Bétons Et Mortiers.....	21
II.3.3.2.Caractéristiques De Performance De Granulats .....	21
A- Caractéristiques applicables aux gravillons.....	21
B- Caractéristiques applicables aux sables et graves.....	21
C-Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons.....	22
D-Caractéristiques fillers .....	22
II. 3.4-Eau de gâchage .....	22
A-Caractéristiques Physique .....	22
B-Caractéristiques Chimique .....	22
II.3.5. Les Additions .....	23

II.3.5.1. Types D` Additions Minérales.....	23
A. Fillers calcaires .....	23
B. Laitier granule des hauts fourneaux .....	24
C. Pouzzolane Naturelle.....	25
D. Fumée De Silice .....	25
E. Cendres Volantes.....	26
II. 3.5.2 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires .....	26
II 3.5.3. Effet de la densité de l`addition .....	26
II. 3.5.4. Effet de la morphologie .....	27
II .3.5.5.Effet de la surface spécifique .....	27
II. 3.6.Adjuvants du béton .....	28
II. 3.6.1.Définition.....	28
II.3.6.2. Classification des adjuvants.....	28
II. 4 . Formulation des « BAP » .....	28
II. 4.1.Introduction.....	28
II.4.2. Critères de formulation des BAP.....	29
1. Fluidification de la pate .....	29
2. Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l`écoulement .....	29
3 . Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation .....	29
II.4.3. Composition d`un BAP.....	29
II.4.4. Méthodes de formulation des BAP .....	30
II.4.4.1.Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	30
II.4.4.2-Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pate.....	31
II.4.4.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	31
II. 4.4.4.Méthode basée sur un plan d'expériences.....	32
<b>Chapitre III Rhéologie des bétons autoplaçant .....</b>	<b>33</b>
III .1 . Etude rhéologique des bétons .....	33
III. 2. Définition de la rhéologie.....	33
III. 3. Domaines d`étude de la Rhéologie .....	33
III. 3.1.Rhéologie Expérimentale .....	33
III. 3.2.Rhéologie Structurale .....	33
III. 3.3.Rhéologie Théorique .....	33

III .4 .Grandeurs étudiées en rhéologie .....	33
III. 4.1 la viscosité .....	33
III.4.2 Seuil De Cisaillement .....	34
III.4.3 Contrainte De Cisaillement .....	35
III. 4.4 Gradient De Vitesse .....	35
III. 5 .Différents Comportements Rhéologiques .....	35
III. 5.1. Fluides Newtoniens .....	35
III. 5.2.Fluides Non Newtoniens .....	35
III. 5.2.1.Fluides Rhé Fluidifiants (Ou Pseudo Plastiques) .....	35
III. 5.2.2. Fluides Rhé Epaississants .....	36
III.5.2.3. Corps Plastiques .....	36
III.5.3. La thixotropie.....	36
III. 5.3.1.Définition .....	36
III.6. propriétés rhéologiques des béton autoplaçant.....	36
III. 6.1 fluidité.....	37
A. Caractérisation empirique .....	37
B. Essai d'étalement modifié. (J-Ring).....	38
C . Essai de l'entonnoir V- funnel.....	38
III. 6.2 . La ségrégation .....	38
III. 6.2.1.Définition .....	39
III. 6.2.2.Types De Ségrégations .....	39
III. 6.2.2.1.La Ségrégation Dynamique .....	39
A. L'essai à la L- Box .....	39
B. La ségrégation statique .....	40
B.1 Présentation des essais.....	40
B.2 Mode opératoire de l'essai .....	40
B.3. Ressuage .....	40
B.3.1 Définition .....	40
III 7. Interactions super plastifiants-ciment.....	41
III. 7.1.Introduction.....	41
III. 7.2. Influences Des Différents Paramètres.....	43
III. 7.2.1. Influence Du Dosage En Fluidifiant .....	43
III. 7.2.2. Influence De La Température .....	43

III. 7.2.3. Influence Du Malaxage.....	43
III. 7.2.4. Influence Du Dosage En Ciment.....	43
III. 7.2.5. Influence D'un Retardateur.....	43
III. 7.2.6. Effet De La Nature Du Polymère.....	43
III. 7.3. Modifications des réactions d'hydratation en présence de fluidifiant.....	44
III. 7.4. Le Trio C <sub>3</sub> a - Sulfates - Adjuvant.....	44
III. 7.4.1. Importance des sulfates réactifs.....	44
III 8. Caractérisation des bétons autoplaçant à l'état frais.....	45
III. 8.1 Essai d'étalement.....	45
III. 8.2 Essai De Boite En L.....	46
III.8.3 Essai d'entonnoir.....	47
III.8.4. Essai D'Etalement Modifie.....	47
III.8.5. Essai De Stabilité Au Tamis.....	48
<b>Chapitre IV. Matériaux et méthodes.....</b>	<b>51</b>
IV.1. Matériaux utilisés.....	51
IV.1.1. Ciment.....	51
IV.1.1.1. Caractéristiques physiques.....	51
IV.1.1.2. Composition chimique.....	52
IV.1.2. Les granulats.....	52
IV.1.2.1. Sable.....	52
IV.1.2.2. Les graviers.....	52
IV.1.3. Eau de gâchage.....	52
IV.1.4. Les adjuvants.....	52
IV.1.5. Les additifs.....	53
IV.1.5.1. La fumée de silice.....	53
IV.1.5.2. Les fillers calcaires.....	53
IV.2. Méthodes d'élaboration.....	53
IV.2.1. Méthode de DREUX GORISSE.....	53
IV.2.2. Méthode japonaise.....	54
IV.3. Résultats et discussions.....	54
IV.3.1. Consistance normale (EN 196-3 / NF P 15-473).....	54
IV.3.2. Temps de prise (EN 196-3 / NF P 15-473).....	54
IV.3.3. Résistances mécaniques (EN 196-1).....	55

IV.3.4. Equivalent de sable.....	55
IV.3.5. Masses volumiques.....	55
IV.4. Analyse granulométrique.....	56
IV.4.1. Les sables .....	56
IV.4.1.1. Sable EL HACHIMIA 0/3.....	56
IV.4.1.2. Sable de BOUSAADA 0/1.....	57
IV.4.1.3. Correction du sable selon d'ABRAMS .....	57
IV.4.2. Les graviers.....	58
IV.4.2.1. Le gravier 3/8 (G <sub>3/8</sub> ) .....	58
IV.4.2.2. Le gravier 8/15 (G <sub>8/15</sub> ).....	58
IV.5. Essai de Los Angeles : NF P18- 573.....	60
IV.6. Essai Micro Deval : NF P 18-572.....	61
IV.7. Interprétation des résultats.....	61
IV.8. Formulation du béton témoin par la méthode de DREUX GORISSE .....	61
IV.8.1 Essais sur béton frais.....	62
IV.8.2 Essais sur béton durci.....	62
IV.8.2.1 Résistance à la compression.....	62
IV.8.2.2 Résistance à la traction par fendage.....	63
IV.9. Formulation des bétons autoplaçants par la méthode JAPONAISE.....	63
IV.9.1. Les masses des constituants pour 1 m <sup>3</sup> .....	63
IV.9.2. BAP formulé avec ajout de 10% de fumée de silice .....	64
IV.9.2.1. Essais sur béton frais.....	64
IV.9.2.2. Essais sur béton durci.....	65
IV.9.3. BAP formulé avec ajout de 10% de fillers calcaire .....	66
IV.9.3.1. Essais sur béton frais.....	66
IV.9.3.2. Essais sur béton durci.....	67
IV.9.4. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 10% de fillers de calcaires et 10% de fumée de silice .....	68
IV.9.4.1. Essais sur béton frais.....	68
IV.9.4.2. Essais sur béton durci.....	68
IV.9.5. BAP formulé avec ajout de 20% de fumée de silice.....	71
IV.9.5.1. Essais sur béton frais.....	71
IV.9.5.2. Essais sur béton durci.....	71

IV.9.6. BAP formulé avec ajout de 20% de fillers de calcaires .....	72
IV.9.6.1. Essais sur béton frais.....	72
IV.9.6.2. Essais sur béton durci.....	72
IV.9.7. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 20% de fillers de calcaires et 20% de fumée de silice .....	73
IV.9.7.1. Essais sur béton frais.....	73
IV.9.7.2. Essais sur béton durci.....	73
IV.9.8. BAP formulé avec ajout de 30% de fumée de silice .....	75
IV.9.8.1. Essais sur béton frais.....	75
IV.9.8.2. Essais sur béton durci.....	75
IV.9.9. BAP formulé avec ajout de 30% de fumée de fillers calcaires .....	76
IV.9.9.1. Essais sur béton frais.....	76
IV.9.9.2. Essais sur béton durci.....	76
IV.9.10. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 30% de fillers de calcaires et 30% de fumée de silice.....	77
IV.9.10.1. Essais sur béton frais.....	77
IV.9.10.2. Essais sur béton durci.....	78
<b>Conclusion Générale</b> .....	81
<b>Références bibliographiques</b> .....	83
<b>Annexes</b> .....	84

# LISTE DES FIGURES

Figure III.1 viscosité .....	34
Figure III.2 affaissement au cône d'habrams .....	37
Figure III.3 essai J-Ring.....	38
Figure III.4 Capacité de remplissage. ....	40
Figure III.5 : cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement.....	45
Figure. III.6 Schéma de la boîte en L .....	46
Figure III.7 Essai d'entonnoir.....	47
Figure III.8 -Essai d'étalement modifié.....	48
Figure III.9 Essai de stabilité au tamis.....	49
Figure IV.1. Essai de l'analyse granulométrique LABO LCTP BOUIRA.....	56
Figure IV.2. Correction du sable selon ABRAMS.....	59
Figure IV 3. Composition du mélange selon DREUX G. ....	60
Figure IV.4. Essai de Los Angeles LABO LCTP BOUIRA.....	60
Figure IV.5. Essai de Micro Deval LABO LCTP BOUIRA.....	61
Figure IV.6. Essai d'étalement BAP (dosage 10% fumé de silice) .....	64
Figure IV.7. Essai boîte en L BAP (dosage 10% fumé de silice) .....	64
Figure IV.8. Essais de la stabilité au tamis BAP (dosage 10% fumé de silice).....	64
Figure IV.9. Résistance à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice).....	65
Figure IV.10. Essais d'étalement BAP (dosage 10% fillers de calcaires) .....	67
Figure IV.11. Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents aditifs à 10% .....	70
Figure IV.12. Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents aditifs à 20% .....	74
Figure IV.13. Malaxage du mélange (dosage 30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice).77	
Figure IV.14. Aspect des éprouvettes du mélange BAP (dosage 30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice). ....	78
Figure IV.15. Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents additifs à 30%.....	79
Figure IV.16. Comparaison des mélanges à différents dosages d'additifs. ....	80

# LISTE DES TABLEAUX

## Liste des tableaux

---

Tableau II.1 Sources des matières premières entrant dans la fabrication du ciment portland.....	19
Tableau III.1 valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP. ....	48
Tableau IV.1. Essais physiques du ciment.....	51
Tableau IV.2. Composition chimique du ciment.....	52
Tableau IV.3. Composition minéralogique du ciment.....	52
Tableau IV.4. Les masses des constituants pour 1 m <sup>3</sup> (méthode de DG). ....	53
Tableau IV.5. Les masses des constituants pour 1 m <sup>3</sup> (méthode Japonaise). ....	54
Tableau IV.6. Consistance normale du ciment. ....	54
Tableau IV.7. Temps de prise du ciment.....	54
Tableau IV.8. Résistances mécaniques du ciment.....	55
Tableau IV.9. Equivalent de sable.....	55
Tableau IV.10. Masses volumiques du ciment.....	55
Tableau IV.11. Masse volumique de sable de la carrière EL HACHIMIA. ....	55
Tableau IV.12. Masse volumique de sable fin de Boussaâda.....	55
Tableau IV.13. Analyse granulométrique du sable de la carrière d'EL HACHIMIA 0/3. ....	56
Tableau IV.14. Analyse granulométrique du sable de Boussaâda 0/1.....	57
Tableau IV.15. Sable corrigé selon la méthode d'ABRAMS.....	57
Tableau IV.16. Analyse granulométrique du gravier 3/8. ....	58
Tableau IV.17. Analyse granulométrique du gravillon 8/15. ....	58
Tableau IV.18. Caractéristiques du G8/15 de Oued El Bardi (Bouira) .....	61
Tableau IV.19. Caractéristiques du G8/15 de Oued El Bardi (Bouira) .....	61
Tableau IV.20. Essais sur béton frais (béton témoins dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> ). ....	62
Tableau IV.21. Essais sur béton durci résistance à la compression (béton témoins dosé à 350kg/m <sup>3</sup> ). ....	62
Tableau IV.22. Essais sur béton durci résistance à la traction (béton témoins dosé à 350kg/m <sup>3</sup> ). .....	63
Tableau IV.23. Essais sur béton frais (BAP : dosage 10% fumé de silice). ....	65
Tableau IV.24. Résistance à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice) .....	65
Tableau IV.25. Résistance à la traction par fendage (BAP : dosage 10% fumé de silice) .....	66
Tableau IV.26. Essais sur béton frais Méthode Japonaise (dosage 10% fillers de calcaires) .....	66
Tableau IV.27. Résistance à la compression BAP (dosage 10% fillers de calcaires) .....	67
Tableau IV.28. Résistance à la traction BAP (dosage 10% fillers de calcaires) .....	67

## Liste des tableaux

---

Tableau IV.29. Essais sur béton frais (BAP : dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaire)	68
Tableau IV.30. Essais à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires)	68
Tableau IV.31. Essais à la traction BAP (dosage 10% fumé de silice+10% fillers de calcaires)	69
Tableau IV.32. Essais sur béton frais Méthode Japonaise (dosage 20% fumé de silice)...	71
Tableau IV.33. Essais à la compression BAP (dosage 20% fumé de silice)	71
Tableau IV.34. Essais à la traction BAP (dosage 20% fumé de silice)	71
Tableau IV.35. Essais sur béton frais (dosage 20% fillers de calcaires)	72
Tableau IV.36. Essais à la compression BAP (dosage 20% fillers de calcaires)	72
Tableau IV.37. Essais à la traction BAP (dosage 20% fillers de calcaires)	72
Tableau IV.38. Essais sur béton frais BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)	73
Tableau IV.39. Essais à la compression BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)	73
Tableau IV.40. Essais à la traction BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)	74
Tableau IV.41. Essais sur béton frais BAP (dosage 30% fumé de silice)	75
Tableau IV.42. Essais à la compression BAP (dosage 30% fumé de silice)	75
Tableau IV.43. Essais à la traction BAP (dosage 30% fumé de silice)	76
Tableau IV.44. Essais sur béton frais BAP (dosage 30% fillers de calcaires)	76
Tableau IV.45. Essais à la compression (dosage 30% fillers de calcaires)	76
Tableau IV.46. Essais à la traction (dosage 30% fillers de calcaires)	77
Tableau IV.47. Essais sur béton frais BAP (30% fillers calcaires + 30% de fumé de silice)...	77
Tableau IV.48. Essais à la compression BAP (30% fillers calcaires+30% de fumé de silice).	78
Tableau IV.49. Essais à la traction BAP (30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice).	78

# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables, toutefois, pour construire des structures durables il est nécessaire non seulement, de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte.

Le béton traverse trois étapes importantes où certaines exigences doivent être satisfaites, On distingue :

**À l'état frais** On doit s'assurer d'une bonne mise en place dans les coffrages, en ayant un béton uniforme et homogène qui remplit parfaitement les différentes zones même celles où l'accès est difficile à cause d'une forte concentration en armatures.

**À jeune âge :** on doit assurer une résistance suffisante du béton à la traction, afin d'éviter les fissures causées par le retrait plastique et le dégagement excessif de chaleur, De bonnes conditions de mûrissement et une génération modérée de température sont alors recommandées.

**À l'état durci** performances mécaniques appropriées et à de faibles valeurs de perméabilité. Ces facteurs combinés contribuent à garantir une durée de service prolongée de la structure.

Parmi les trois états présentés ci-dessus, l'état frais du béton constitue, l'étape la plus importante et la plus délicate, en effet, même si l'on arrive à produire en laboratoire un béton conforme aux exigences en matière de performances mécaniques, il se peut que ces objectifs ne soient pas atteints au niveau de la structure si la mise en place est imparfaite .

Afin d'assurer une bonne compaction du béton, surtout dans le cas où le niveau de congestionnement est élevé, l'idée de produire des bétons fluides qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, est une solution intéressante. C'est ainsi que le concept du béton autoplçant est né.

Les bétons autoplçant BAP (angl. self compacting concrete SCC) constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main d'œuvre de moins en moins qualifiée, cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et donne des structures résistantes et durables.

Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main d'œuvre spécialisée durant la consolidation.

## Introduction générale

---

Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité, Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main d'œuvre considérable.

Les bétons autoplaçant se caractérisent en général, par une formulation contenant au moins un **adjuvant chimique** et un **ajout minéral** en proportions bien précises pour satisfaire les exigences du cahier des charges en matière de maniabilité et de stabilité.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a **quatre objectifs principaux** :

1. Optimisation des bétons autoplaçant (teneurs en gros granulats, sable et liant).
2. Développement des formulations de béton autoplaçant qui répondent à certains critères rhéologiques, tel qu'une bonne déformabilité, tout en assurant une meilleure résistance au ressuage, à la sédimentation et à la ségrégation.
3. Caractérisation des bétons autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.
4. Comparaison entre le comportement d'un béton autoplaçant et celui d'un béton ordinaire vis-à-vis les résistances mécaniques.

Le présent mémoire se compose de 04 chapitres présentés comme suit :

Les Trois premiers chapitres feront l'objet d'une analyse bibliographique :

**Afin** d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs à la technologie des bétons, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par une synthèse bibliographique, Ce premier chapitre présente les nouveautés sur les BAP.

**Le** second chapitre présente des généralités sur la technologie des béton afin d'attirer le lecteur, le troisième chapitre est consacré aux notions fondamentales relatives aux caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçant, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur l'optimisation des teneurs en gros granulats, sable, liant, ajouts chimiques et minéraux; et la caractérisation mécanique des bétons autoplaçant.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale

**Nous** présentons au quatrième chapitre l'ensemble des essais effectués au laboratoire de contrôle des travaux public LCTP , en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

Les résultats des essais d'identification des matériaux utilisés et les essais effectués sur le béton frais et durci, ainsi que leurs interprétations sont regroupés au cinquième chapitre.

## **Introduction générale**

---

Les principaux résultats et la conclusion de ce travail sont présentés dans une conclusion générale, Quelques recommandations ainsi que d'éventuels travaux de recherches futures sont proposées.

# CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre I. synthèse bibliographique

Dans le présent chapitre on abordera quelques travaux réalisés sur les bétons autoplaçants dont notre thème a été inspiré.

**I.1 Le 11 Mars 2018**, Laboratoire de matériaux de construction, Université Démocrite de Thrace, Xanthi 67100, **Grèce**, un article a été publié sur la revue ELSEVIER Construction and Building Materials par les auteurs Kosmas K, Sideris Ch, Tassos A, Chatzopoulos P et Manita portant sur : **Caractéristiques mécaniques et durabilité des bétons auto-compactants produits avec du laitier**.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le potentiel d'utilisation des scories de four à poche (LFS) comme matériau de remplissage alternatif pour la production de BAP. Les propriétés de durabilité des BAP de résistance faible et moyenne produites avec l'addition de l'LFS ont été évaluées et comparées à celles mesurées sur la référence des BAP produits avec addition de calcaire.

L'absorption d'eau, la résistance à la carbonatation, la corrosion induite par les chlorures et la résistance à l'attaque gel-dégel ont été évaluées. L'ajout de LFS a amélioré toutes les propriétés de durabilité testées.

Le BAP produit par LFS peut prolonger considérablement la durée de vie des structures en béton, en particulier lorsque la carbonatation est le principal facteur agressif.

Le laitier de fabrication d'acier est le processus de production d'acier à partir de fer ou de ferraille. Les procédés modernes de fabrication de l'acier peuvent être divisés en deux catégories: la fabrication de l'acier primaire et secondaire. La fabrication de l'acier secondaire est le plus souvent effectuée à la poche et est souvent appelée poche. Le principal sous-produit de ce processus est le laitier de poche (LFS). Dans cet article, des mélanges de béton auto-compactant (BAP) ont été produits, dans lesquels la charge calcaire a été remplacée par du LFS. Trois classes de résistance différentes ont été testées et l'LFS a été utilisée dans différentes teneurs allant de 45 à 92,5 kg / m<sup>3</sup>. Les mélanges de BAP ont été testés à l'état frais pour la fluidité, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. A l'état durci, ces mélanges ont été testés pour la résistance à la compression, la résistance à la carbonatation, la capacité d'absorption, la résistance à la pénétration du chlorure et au gel-dégel. Les résultats ont conclu que, LFS améliore les caractéristiques de durabilité du béton menant à des mélanges de béton respectueux de l'environnement à moindre coût.

Le béton autocompactant (BAP) est un type spécial de béton développé au cours des deux dernières décennies. Cela se caractérise par le potentiel d'amélioration de la qualité des éléments en béton ainsi que de la qualité de l'ensemble des procédures de construction. Il est largement utilisé dans différentes applications telles que le béton prêt à l'emploi et l'industrie des éléments préfabriqués en raison de ses nombreux avantages. Il peut se répandre dans les

moisissures sous l'effet de la force de gravité et remplir des zones restreintes sans recourir à des vibrateurs à béton, réduisant ainsi les risques d'accidents (bruits, vibrations), améliorant ainsi l'environnement de travail et la qualité de l'environnement. Structure, réduisant les besoins en main-d'œuvre et accélérant le processus de construction. La capacité de remplissage, la résistance à la ségrégation et la capacité de passage sont les principales propriétés fraîches de BAP. La compacité est liée au dosage de matériaux fins. Les matériaux passant au tamis de 0,125 mm sont considérés comme fins. Leur quantité devrait être comprise entre 380 et 600 kg / m<sup>3</sup>, conformément aux directives européennes pour le béton autoperçant.

La poudre de calcaire est le plus souvent utilisée comme matière de remplissage dans les mélanges BAP. En Grèce, la production de poudre de calcaire est limitée (deux mines au niveau national) et son coût est plutôt élevé, ce qui est peu attrayant pour les ingénieurs. Par conséquent, le remplacement de ce matériau est essentiel. Jusqu'à présent, les recherches ont montré qu'il était possible de remplacer le filtre à base de ciment ou de chaux, ou les deux, dans le cadre du BAP, et certains sous-produits industriels ont déjà été utilisés dans cette direction, avec des résultats encourageants.

Le principal sous-produit du procédé de fabrication de l'acier secondaire est le laitier de four à poche (LFS). Il est principalement constitué d'oxydes de calcium, de silice, de magnésium et d'oxydes. Plusieurs chercheurs ont montré que LFS avait des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques latentes et pouvait être utilisé comme liant alternatif pour le ciment et le béton. Selon les résultats de cette recherche, les scories de four à poche peuvent être utilisées comme matière de remplissage pour la production de bétons auto-compactants. L'ajout de l'EFT a amélioré les propriétés fraîches des mélanges de BAP et a contribué à l'obtention de mélanges de BAP plus visqueux.

Lorsque l'LFS était utilisée comme substitut de sable, la résistance à la compression des mélanges BAP 25 / 30 était augmentée après 28 jours. L'augmentation de la résistance à la compression à des âges ultérieurs était plus élevée dans les mélanges BAP 30 / 37 produits avec LFS comme substitut de sable. Ces mélanges ont été produits avec des quantités plus élevées d'LFS et ont présenté une résistance à la compression améliorée à partir de 2 jours. Le mélange obtenu avec l'ajout de 25% de laitier a donné un rendement élevé en compression.

Lorsque l'LFS était ajoutée en remplacement du ciment, tous les mélanges présentaient une résistance à la compression inférieure à 28 jours, mais cette réduction n'était pas suffisante pour compromettre leur classe de résistance. La durabilité des BAP produits par les scories de four à poche a été améliorée lorsque l'LFS était utilisée pour remplacer le sable. Le comportement de durabilité amélioré était essentiel dans le mélange BAP 30 / 37 produit avec 25% d'LFS, où toutes les valeurs de durabilité étaient égales à celles mesurées sur le mélange BAP 35 / 45 produit avec une quantité de ciment supérieure et un rapport e/c inférieur. Dans

les cas où LFS a remplacé le ciment à 10%, la durabilité contre la carbonatation a augmenté plus lentement, tandis que les autres indicateurs de durabilité sont restés presque stables ou légèrement diminués (perte de masse due à l'attaque gel-dégel). Il y avait une nette tendance à penser que des doses plus élevées d'LFS donnaient lieu à des mélanges plus durables lorsque l'LFS était ajoutée en remplacement du sable et que le rapport  $e/c$  restait constant. Dans ce cas, tous les indicateurs de durabilité des mélanges produits par l'LFS ont été améliorés.

**I.2 Le 20 janvier 2017**, Collège of Engineering, Université d'Anbar, **Irak**, un article a été publié sur la revue SCIENCE DIRECTE par l'Organisation du Golfe pour la recherche et le développement, des deux auteurs Sheelan M. Hama et Nahla N. Hilal portant sur **Propriétés fraîches du béton autocompactant avec des déchets plastiques en remplacement partiel du sable**.

L'Agence européenne pour l'environnement (2014) définit les déchets matériels, en tant que matériel ou sous-produit non désiré.

Plusieurs chercheurs étudiaient l'effet de la réutilisation des déchets plastiques sur béton. Rebeiz conclu par son travail qu'un béton préfabriqué de bonne qualité pourrait être fabriqué à partir de résines à base de déchets plastiques recyclés (Bouteilles PET) (Rebeiz, 1995). Choi et Al étudié l'utilisation de 45% de déchets plastiques (bouteilles en PET) dans certaines compositions de béton. Leurs résultats ont montré que l'utilisant des déchets plastiques correspondait à environ 2–6% du poids normale de béton alors que la résistance à la compression est réduite jusqu'à 33% par rapport à la résistance à la compression.

Ce travail couvre l'émission de déchets plastiques contenus et tailles sur les propriétés fraîches et compressives force de SCC. Trois tailles différentes de déchets plastiques (déchets de plastique fin, grossier et mélangé) ont été utilisés comme remplacement essentiel du sable naturel à six contenus différents de 0, 2,5, 5, 7,5, 10 et 12,5% en volume. Le plastique fin est défini comme un matériau fin passant au tamis de 1mm alors que les déchets plastiques grossiers (CPW) sont des matériau retenant sur tamis de 1 mm et passant de 4 mm . En outre, les déchets de plastique FPW et CPW ont été mélangés pour obtenir un nouveau matériau fin avec une gradation proche du sable naturel. Rapport eau / liant constant de 0,32 et une teneur en liant de 520 kg / m<sup>3</sup> ont été désignés comme produire des BAP. Pour améliorer la maniabilité du BAP, on ajoute les cendres volantes F (30% en poids de ciment) étaient dans le mélange. La maniabilité du BAP était mesurée en termes de diamètre d'écoulement d'affaissement, de temps d'écoulement d'affaissement, V- entonnoir, rapport de hauteur du caisson L et temps d'écoulement du caisson L. De plus, une résistance à la compression de 28 jours a également été mesurée. Les résultats des tests expérimentaux ont été évalués et comparé statistiquement.

Les principales conclusions sont les suivantes:

Des diamètres d'écoulement d'affaissement allant de 680 à 710 mm ont été obtenus pour les bétons plastiques auto-compactants.

Selon la limitation EFNARC, le mélange de référence appartenait à la classe SF1, tandis que les bétons de déchets font partie de la classe SF2. Bien que l'augmentation de la teneur en plastique a entraîné une réduction des diamètres d'affaissement des bétons, les résultats ont été acceptable pour les nombreuses applications normales de béton compact. Les diamètres d'écoulement d'affaissement des mélanges produits avec des déchets plastiques grossiers est inférieures à celles produites avec déchets plastiques fins et déchets plastiques mixtes.

L'utilisation de déchets plastiques comme remplacement partiel de l'agrégat fin a augmenté le débit d'affaissement T50 et le débit en entonnoir en V. Le mélange de référence peut être classé comme classe de viscosité VS1 / VF1, tandis que les mélanges produisent 350 avec le remplacement partiel des déchets plastiques était dans la classe de viscosité VS2 / VF2. Le rapport de hauteur de L-box était également influencé par le contenu et la taille des déchets plastiques.

On peut en conclure qu'il vaudrait mieux utiliser les déchets plastiques en remplacement partiel des agrégats fins. Le Béton de plastique auto-compactant ayant plus de 35 MPa de résistance à la compression pourrait être produite facilement. Les résultats de résistance ont indiqué que l'utilisation des déchets plastiques dans les bétons auto-compacteurs abouti à une diminution systématique de la compression. L'utilisation des déchets grossiers plastiques diminution de la résistance à la compression dans le béton plus que l'utilisation de déchets plastiques fins.

**I.3 Année 2017**, Faculté de génie civil, Université de Technologie de Wroclaw **Pologne**, un article a été publié sur la revue SCIENCE DIRECTE par les auteurs Paweł Niewiadomski, , Damian Stefaniuka et Jerzy Hołaa portant sur **Analyse microstructurale du béton autoplaçant modifié avec l'ajout de nanoparticules.**

L'analyse microstructurale du béton autoplaçant modifié avec l'ajout de nanoparticules a été réalisée. Les investigations ont inclus des bétons BAP modifiés avec différentes quantités d'additifs de nanoparticules de SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et un béton de référence fabriqué sans nanoparticules. La porosité, les dimensions maximales des pores, les modèles 3D de la microstructure, la dureté et le module d'élasticité ont été déterminés.

Sur la base des études menées, on peut conclure que l'ajout de nanoparticules améliore la microstructure du béton autoplaçant. L'analyse des résultats de porosité a prouvé que les bétons modifiés avec l'ajout de nanoparticules sont caractérisés par une porosité inférieure par rapport à la taille des pores jusqu'à 0,015 mm par rapport au béton qui ne contient pas de nanoparticules dans sa composition. L'influence positive de l'ajout de nanopoudres sur la microstructure des bétons testés est également confirmée par les résultats de la porosité totale des échantillons. En outre, les études menées ont montré que les nanopoudres peuvent

influencer positivement à la fois la dureté et le module d'élasticité de la matrice de ciment du béton. Les résultats obtenus permettent de supposer que l'utilisation appropriée de nanomatériaux en tant qu'additif pour la production de béton autocompactant peut améliorer sa microstructure largement comprise, et ainsi aboutir à sa durabilité accrue.

**I.4 Le 15 juillet 2016, université Valle Cali Colombie, un article a été publié sur la revue ELSEVIER Construction and Building Materials par les auteurs jimmy silva, Rafael Robayo, Pedro mattey et silvio devasto portant sur Propriétés du béton autoplaçant frais et durci avec des résidus de maçonnerie d'un béton recyclé.**

Le présent article traite des résultats d'une étude expérimentale sur les bétons autoplaçants (BAP) réalisés avec des granulats grossiers recyclés et un mélange minéral obtenu à partir d'un résidu de maçonnerie(RM). Il a été évalué les effets de l'utilisation de l'agrégat recyclé sur les propriétés de BAP. Cinq types de mélanges BAP ont été essayés, où l'agrégat grossier vierge a été remplacé par l'agrégat recyclé entre 0 et 100% en volume. Le ciment mélangé (ciment Portland + adjuvant) est resté constant à 480 kg / m<sup>3</sup> et comprenait 20% en poids de RM. Les propriétés rhéologiques du BAP à l'état frais ont été déterminées au moyen d'essais d'affaissement et d'écoulement, d'entonnoir en V et d'essais en boîte L. Il a montré une maniabilité appropriée et une résistance à la ségrégation, à la capacité de dépassement et à la capacité de remplissage. Les propriétés mécaniques ont été réduites avec l'incorporation du granulats grossiers recyclés en raison de la mauvaise adhérence entre l'ancien mortier et l'agrégat; cependant, les résultats se situent dans les caractéristiques admissibles à utiliser dans plusieurs éléments constructifs pour ses propriétés mécaniques acceptables.

L'utilisation du béton autocompactant (BAP) a été étendue dans le monde entier depuis son début dans les années quatre-vingt, en raison des avantages de la production et de la haute performance du produit final , Le principal avantage rhéologique du BAP est que le béton fluide peut être placé et compacté sans aucune vibration dans le coffrage de structures fortement renforcées. Cette caractéristique permet d'obtenir de nombreux avantages en termes de réduction du temps de construction, d'optimisation de la liberté de conception et d'amélioration de la qualité du produit et de l'environnement de travail. De plus, ce type de béton a un impact positif sur l'environnement il permet l'utilisation d'ajouts ou de déchets industriels ou de construction et de démolition.

ce type de béton auto-compactant pourrait être classé dans la catégorie du «béton vert» L'impact négatif sur l'environnement généré par le béton provient des émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz résultant de la décarbonatation du calcaire et de la consommation de l'électricité et le combustible pendant le processus de production du ciment Portland.

Un autre moyen de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> est l'utilisation d'ajouts de sous- produits industriels et de matériaux recyclés L'un d'entre eux concerne l'utilisation des déchets de construction et de démolition.

L'incorporation de déchets de maçonnerie et de gravats, résultant d'activités de construction ou de démolition de bâtiments en béton, comme agrégat grossier dans la préparation du béton est une alternative pour la production de béton autoplaçant . Par conséquent, le recyclage des granulats des résidus de maçonnerie est important, car il minimise la consommation de ressources minérales, qui nécessitent une énergie considérable dans leurs processus d'extraction et de broyage. L'exploitation de ces derniers se traduit par une réduction de la consommation de carburant, en effet le béton démoli est une source alternative d'agrégats pour la production de béton . L'objectif de cette recherche était l'analyse des propriétés à l'état frais et durci comme la résistance à la compression et la résistance à la traction et les propriétés de perméabilité aux âges de durcissement de 3, 7, 28 et 60 jours pour les différents mélanges incorporant 20% de résidu de la maçonnerie comme remplacement partiel du ciment, et différents pourcentages, de 0% à 100%, de granulats grossiers recyclés au lieu de granulats naturel.

Les résultats ont montré qu'il est possible d'obtenir un béton autoplaçant écologiquement durable en utilisant les constituants en vrac des débris de démolition (maçonnerie et béton) en remplacement du ciment Portland et des agrégats grossiers les résidus de maçonnerie et de béton respectivement.

En se référant aux propriétés fraîches du béton, il a été observé que lorsque pourcentage de résidus est augmenté, il est nécessaire d'ajouter plus de superplastifiant pour obtenir un béton qui pourrait être considéré comme du béton auto-compactant, selon les spécifications faites par le European Project Group et EFNARC sur les tests Slump, L-box et V-entonnoir. Ce contenu additionnel d'adjuvant est nécessaire parce que le SCC demande plus d'eau en raison des niveaux élevés d'adsorption montrés par les agrégats recyclés par rapport aux agrégats naturels.

La résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage diminuent progressivement avec l'augmentation du niveau de remplacement des agrégats. Dans la résistance à la compression, on a observé qu'à 28 jours de durcissement du BAP, elle présentait jusqu'à 30% de réduction de résistance lorsque l'on procédait à 100% de substitution d'agrégats vierges (agrégats grossiers) dans le mélange .La densité du BAP avec agrégats recyclés est inférieure à celle du béton avec agrégat vierge parce que la densité de granulats recyclés est inférieure à celle de granulats naturels en raison du mortier collé à sa surface ; cependant, l'importance de ces derniers devrait être évaluée en considérant un rapport des coûts-avantages économiques et sociaux considérant concevoir l'utilisation de BAP avec l'incorporation d'agrégats recyclés dans des applications où les spécifications des

propriétés finales du béton sont admissibles. Ces résultats ouvrent la possibilité d'utilisation d'agrégats recyclés dans la production de BAP dans des endroits où les agrégats naturels sont rares, et où la surexploitation de ces ressources non renouvelables génère un impact environnemental irréversible limitant leur durabilité future ou où il y a une pénurie de sites d'élimination et où de longs itinéraires pour arriver à ces sites génèrent de sérieux problèmes pour les municipalités.

**I.5 Le 17 Décembre 2010**, une étude a été réalisée par Monsieur Paco Diederich pour l'obtention du diplôme de doctorat en génie civil à l'université de **Toulouse** portant sur le thème : **Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton.**

Le mémoire de thèse, construit en cinq chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie traitant de la relation entre l'autoplaçance et les fillers calcaires. A partir de l'observation de problèmes rencontrés sur quelques cas réels permettant de se poser la véritable question sur laquelle ce travail s'inscrit, l'état de l'art de la recherche est entrepris en se focalisant sur l'influence des propriétés des fillers en relation avec leurs comportements dans les matériaux cimentaires (pâtes, mortiers, bétons). L'autoplaçance (avantages, obstacles actuels, approches de formulation et caractérisation) sera également étudiée de ce chapitre.

De l'analyse bibliographique découle une démarche expérimentale nécessitant une étude complète à différentes échelles, depuis le filler à l'état de poudre, en passant par sa mise en suspension dans l'eau avec ou non l'incorporation d'un superplastifiant, en présence ou non de ciment, jusqu'à son incorporation dans le béton.

Le second chapitre présente les matériaux utilisés (fillers calcaires, ciments, superplastifiants et granulats) en justifiant leur choix. Notamment, la sélection des ciments et des superplastifiants est dictée par l'évolution du marché en tenant compte des aspects techniques et environnementaux. Le choix des fillers, est établi de manière plus étayée à partir de l'appréciation de différences sur les données physico-chimiques mesurées en contrôle sur les différents sites de production. Les propriétés d'usage (finesse, granulométrie, composition) des fillers sélectionnés sont alors caractérisées à nouveau sur les lots reçus en laboratoire.

Le troisième chapitre développe une caractérisation plus approfondie des fillers sélectionnés, sur la base de la morphologie et de l'écoulement des poudres, des états de charge et de l'affinité avec la phase liquide (eau et eau+superplastifiant). Cette étape du travail est importante dans la mesure où il s'agira de juger si les propriétés mesurées à ce stade sont pertinentes à anticiper une susceptibilité du filler à entrer ou non dans une formulation autoplaçante. Cette appréciation sera possible lorsque ces propriétés seront mises en relation avec les propriétés d'écoulement mesurées sur suspensions (eau+filler, eau+filler+superplastifiant, eau+filler+superplastifiant+ciment) dans le cadre du quatrième chapitre. Dans

ce même (quatrième) chapitre, l'empilement en suspension des poudres (ciment et filler) sera étudié afin de considérer les interactions réelles dans la phase liquide (eau+superplastifiant). Enfin, le cinquième chapitre est dédié à l'étude de la faisabilité autoplaçante à l'état frais compte tenu des résultats et de l'analyse faite dans les chapitres précédents, et à une validation d'une méthode proposée pour atteindre l'autoplaçance des bétons. Quelques propriétés à l'état durci des BAP obtenus sont mesurées à titre de vérification de la performance.

Il a conclu que la confection de bétons autoplaçants (BAP) nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité de cette nouvelle génération de bétons. La grande disponibilité et par conséquent les prix réduits font du filler calcaire l'addition prédominante.

Bien que conformes à la norme produit NF P18-508 qui impose des critères aussi bien physiques que chimiques, il apparaît en pratique que tous les fillers peuvent ne pas se comporter de manière similaire lorsqu'il s'agit de confectionner un BAP. Ainsi l'observation de désordres ponctuels (bullage excessif, ségrégation par exemple) lors de l'utilisation de fillers calcaires, peut conduire au constat simpliste établi sur "le bouche à oreille" selon lequel un filler, est bon ou mauvais à être inséré dans une formulation de BAP.

Il apparaît que d'autres propriétés "clés" de l'addition sont mises en évidence par les différentes études recensées:

- la distribution granulométrique influençant également la demande en eau;
- la teneur en composés secondaires (oxyde de magnésium MgO), la présence d'impuretés (argiles, graphite) influençant les interactions avec les adjuvants;
- la morphologie, la distribution granulométrique influençant l'arrangement granulaire.

En revanche, malgré l'importance de ces propriétés dans la compréhension des comportements à l'état frais et durci du BAP, l'analyse a montré que la majorité des études qui traitent du BAP incorporant un filler calcaire ne se préoccupent essentiellement que des propriétés du béton et ne mentionnent que très partiellement les propriétés physicochimique du filler utilisés. Autrement dit, le filler semble bien intégré dans la formulation du béton.

# CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES BAP

## Chapitre...II. Généralités sur les bétons autoplaçants

### II .1.Introduction

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et parfois d'ajouts minéraux, et de faibles quantités d'adjuvants, ces constituants sont dosés de manière à obtenir après le durcissement, un produit solide dont les capacités de résistances dépassent celles des meilleures roches naturelles. Cette roche artificielle résiste bien à la compression et mal à la traction, c'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction qui remonte aux romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention Du béton armé, ce qui a permis de compenser son insuffisante résistance à la traction.[1] 17]

L'invention du béton armé est attribuée à **JOSEPH LAMBOT**, qui en **1848** fait flotter une barque en ciment armé, et à **JOSEPH MONIER**, qui construisit grâce à ce matériau des bacs à fleurs en **1819**. L'utilisation du béton armé dans la construction s'étend rapidement en France sous l'impulsion de **JOSEPH MONIER, COIGNET, FRANÇOIS HENNEBIQUE GABRIEL ARMAND**. [1] [14][15]

En France, en 1906, une circulaire ministérielle fixe des instructions relatives à l'emploi du béton armé, codifiant ainsi la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce Matériau, **En 1930**, un pas conceptuel important est alors franchi avec l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet, L'utilisation du précontraint autorise la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet d'obtenir une grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction. La reconstruction qui suit la deuxième guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art en France. **PIERRE LEHELLE** et **YVES GUYON** précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception.

Ensuite la société technique pour l'utilisation de la précontrainte (**STUP**) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde, Des recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés.

À Partir de **1980**, on fabrique et on met en place des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteinte **100 MPa**, et même **140 MPa** (BTHP) dans un immeuble à **SEATTLE AUX ÉTATS-UNIS**.

Par la suite des bétons de poudres réactives (**BPR**) ont été développés par Pierre Richard (**RICHARD ET CHEYREZY 1994**) et utilisés pour la première fois lors de la construction de la passerelle de Sherbrooke.

Des chercheurs de l'université de Sherbrooke à leur tête **P.C.AITCIN** fabriquent des bétons de 400 MPa, en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et simples, **PIERRE RICHARD**, de son côté, a pu fabriquer un béton de **800 MPa** en utilisant une poudre métallique.

En **1986**, des chercheurs Japonais ont essayé pour la première fois de fabriquer un béton fluide qui se met en place sous l'effet gravitaire et sans vibration et qui résiste bien à la ségrégation et au ressuage, ce type de béton est appelé béton auto plaçant ou béton auto nivelant.

Pendant plusieurs années à partir de **1983**, le problème de durabilité des structures était une majeure préoccupation dans le domaine de construction en Japon, pour réaliser une structure en béton durable une compaction suffisante est exigée par une main d'œuvre qualifiée, et La réduction progressive en main d'œuvre qualifiée en Japon a conduit à la réduction de la qualité de la construction ce qui a poussé l'apparition des bétons auto plaçant.

## II .2.Définition d'un béton auto plaçant

Le béton auto plaçant est un béton très fluide qui peut être mis en œuvre sans vibration (la compaction s'effectue par seul effet gravitaire) et durci avec le temps pour donner un matériau compact et homogène, Il se distingue par sa capacité à remplir les coffrages tout en gardant son Homogénéité et sa compaction, Ils sont utilisés pour parois verticales d'ouvrages de grande hauteur.[2]

Les bétons usuels subissent un certain foisonnement lors du transport et la mise en œuvre et nécessitent, une vibration interne ou externe permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau.

La formulation des (**BAP**) imaginé par **OKAMURA** est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armature.

## II.3. Constituants du béton [3][16]

### II.3.1.Introduction

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat, ainsi que de celle du ciment qui les unit. Dans un béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis.

La qualité du béton durci dépend de la **quantité d'eau** utilisée par rapport à celle du **ciment**, Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton).

La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

Augmentation de la résistance en compression et en flexion.

Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption.

Résistance accrue aux agressions atmosphériques.

Amélioration de l'adhésion entre le béton et l'armature.

Réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait.

### II. 3.2.Ciment [4]

Les ciments portland sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent suite à des réactions chimiques avec l'eau appelée **hydratation**.

Lorsqu'on ajoute la pâte (ciment, air et eau) aux granulats (sable et gravier, elle agit comme une colle et lie l'ensemble les granulats pour former un matériau semblable à la pierre, le **béton**, le matériau le plus polyvalent et le plus répandu qui existe.

L'hydratation commence dès que le ciment vient en contact avec l'eau. Cette réaction chimique produit des hydrates de ciment (résultat de l'hydratation), qui se forment à la surface de chaque particule de ciment.

Ces hydrates croissent et se répandent, jusqu'au moment où ils se lient avec d'autres qui se sont fixés sur des particules de ciment adjacentes ou adhèrent à d'autres substances voisines.

En raison de ce processus continu d'hydratation, le mélange se raidit, durcit et acquiert sa résistance mécanique, L'hydratation continue tant que les conditions d'humidité et de température sont favorables et que les produits de l'hydratation disposent de l'espace nécessaire.

Le raidissement du béton se manifeste par une perte de maniabilité qui se produit habituellement dans les trois heures qui suivent le gâchage.

Il est fonction de la composition et de la finesse du ciment, des adjuvants, des proportions du mélange et de la température.

L'hydratation et l'acquisition de la résistance ont lieu pour l'essentiel au cours du premier mois d'existence du béton mais continuent, quoique plus lentement, pendant une longue période, si les conditions d'humidité et de température sont adéquates.

#### II. 3.2.1. Constituants de ciment [5]

##### A) Constituants Principaux

##### Clinker Portland (K)

Le clinker Portland est obtenu par calcination d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte) contenant des éléments couramment exprimés en oxydes  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et de petites quantités d'autres matières.

La farine crue ou la pâte, qui est finement divisée et intimement mélangée, est donc homogène.

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  et  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer, ainsi que d'autres composants. Le rapport massique  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$  ne doit pas être inférieur à 2,0.

La teneur en oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse.

### **Laitier granule de haut fourneau (S)**

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

Le laitier granulé de haut fourneau doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de la somme de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) et du dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).

Le restant contient de l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ainsi que de faibles quantités d'autres composants. Le rapport massique  $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$  doit être supérieur à 1,0.

### **Matériaux pouzzolaniques**

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci.

Bien que les cendres volantes et les fumées de silice aient des propriétés pouzzolaniques, leurs spécifications font l'objet d'articles séparés.

Les matériaux pouzzolaniques ne durcissent pas par eux-mêmes lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau mais, lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  dissous, pour former des composés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium générateurs de résistances. Ces composés sont comparables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matériaux hydrauliques.

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de  $\text{SiO}_2$  réactif et d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La partie restante contient de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'autres oxydes.

La proportion de  $\text{CaO}$  réactif est négligeable vis-à-vis du durcissement.

La teneur en  $\text{SiO}_2$  réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

Les matériaux pouzzolaniques doivent être convenablement préparés, c'est-à-dire sélectionnés, homogénéisés, séchés ou traités thermiquement et réduits en poudre, en fonction de leur état à la production ou à la livraison.

### **Cendres volantes**

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à l'EN 197-1.

Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcique.

Les premières ont des propriétés pouzzolaniques ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

La perte au feu des cendres volantes, déterminée conformément à l'EN 196-2, mais avec un temps de calcination de 1 h, ne doit pas excéder 5,0 % en masse.

Il est également possible d'accepter des cendres volantes dont la perte au feu est comprise entre 5,0 % et 7,0 % en masse, à condition que les exigences particulières de durabilité, et notamment en ce qui concerne la résistance au gel, et la compatibilité avec les adjuvants, soient respectées, en application des normes et/ou règlements en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton ou du mortier.

Dans le cas de cendres volantes dont la perte au feu est comprise entre 5,0 % et 7,0 % en masse, la limite maximale de 7,0 % doit être mentionnée sur l'emballage et/ou sur le bon de livraison du ciment.

**NOTE:** Si la teneur en sulfate ( $\text{SO}_3$ ) de la cendre volante excède la limite supérieure admissible pour la teneur en sulfate du ciment, cette donnée doit être prise en compte dans la fabrication du ciment en réduisant en conséquence la quantité des constituants contenant des sulfates de calcium.

### **Schiste calciné(T)**

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C.

En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate mono calcique.

Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment  $\text{SiO}_2$ .

En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland.

Déterminée conformément à l'EN 196-1, la résistance à la compression à 28 jours du schiste calciné convenablement broyé doit être supérieure ou égale à 25,0 MPa.

Le mortier doit être préparé à partir de schiste calciné finement broyé seul, au lieu du ciment.

Les éprouvettes de mortier doivent être démoulées 48 h après leur préparation et conservées en atmosphère humide d'au moins 90 % d'humidité relative jusqu'à l'essai.

Déterminée conformément à l'EN 196-3, sur un mélange contenant 30 % en masse de schiste calciné broyé et 70 % en masse d'un ciment CEM I conforme à l'EN 197-1, l'expansion (stabilité) du schiste calciné ne doit pas dépasser 10 MM.

**NOTE :** Si la teneur en sulfate ( $SO_3$ ) du schiste calciné excède la limite supérieure admissible pour la teneur en sulfate du ciment, cette donnée doit être prise en compte dans la fabrication du ciment en réduisant en conséquence la quantité des constituants contenant des sulfates de calcium.

**Calcaire (L, LL)** Le calcaire doit respecter les exigences suivantes

- a) la teneur en carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) calculée à partir de la teneur d'oxyde de calcium ( $CaO$ ) doit être supérieure ou égale à 75 % en masse.
- b) la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conformément à l'EN 933-9 ne doit pas être supérieure à 1,20 g/100 g. Cet essai implique que le calcaire soit broyé à une finesse d'environ 5 000  $cm^2/g$  déterminée en termes d'aire massique, conformément à l'EN 196-6.
- c) la teneur totale en carbone organique doit, lorsqu'elle est déterminée selon EN 13639 :1999, être conforme à l'un des critères suivants :
  - LL : inférieure à 0,20 % en masse.
  - L : inférieure à 0,50 % en masse.

### **Fumée De Silice**

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de Ferro silicium ; elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe.

La fumée de silice doit satisfaire aux exigences suivantes :

**A)** la perte au feu, déterminée conformément à l'EN 196-2, mais avec un temps de calcination de 1 h, doit être inférieure ou égale à 4,0 % en masse ;

**B)** l'aire massique (BET) de la fumée de silice non traitée, déterminée conformément à l'ISO 9277, doit être supérieure ou égale à 15,0 m<sup>2</sup>/g.

### **Constituants secondaires**

Les constituants secondaires sont spécialement sélectionnés ; ce sont des matériaux minéraux naturels, ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants spécifiés en 1.1, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment.

Les constituants secondaires améliorent les propriétés physiques des ciments (telles que l'ouvrabilité ou la rétention d'eau), après une préparation adaptée et du fait de leur granulométrie. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques. Aucune exigence vis-à-vis de ces propriétés n'est toutefois établie.

Les constituants secondaires doivent être préparés correctement, c'est-à-dire qu'ils doivent être sélectionnés, homogénéisés, séchés et pulvérisés, en fonction de leur état à la production ou à la livraison. Ils ne doivent pas accroître sensiblement la demande en eau du ciment, ni diminuer en aucune manière la résistance du béton ou du mortier à la détérioration, ni diminuer la protection des armatures contre la corrosion.

### **Sulfate de calcium**

Le sulfate de calcium est ajouté aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, pour réguler la prise.

Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium dihydraté, CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), de l'hémi hydraté (CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO<sub>4</sub>) ou tout mélange de ceux-ci. Le gypse et l'anhydrite existent à l'état naturel. Le sulfate de calcium existe également sous forme de sous-produit de certains procédés industriels.

### **Additifs [6]**

La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1,0 % en masse de ciment (exception faite des pigments).

La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse du ciment.

Ces additifs ne doivent pas favoriser la corrosion des armatures ni altérer les propriétés du ciment ou du béton ou du mortier fabriqué avec ce ciment.

Lorsque des adjuvants du béton, mortier ou coulis conformes aux différentes parties de l'EN 934 sont utilisés dans le ciment, la notation normalisée leur correspondant doit figurer sur l'emballage ou le bon de livraison.

Tableau II.1 Sources des matières premières entrant dans la fabrication du ciment portland

Chaux	Fer	Silice	Alumine	Sulfate
Aragonite*	Argile*		Argile*	Anhydrite
Argile	Minerai de fer*	Argile*	Bauxite	Gypse*
Calcaires*		Basalte	Calcaires	
Calcite*	Poussières de haut fourneau	Calcaires	Cendres volantes*	Sulfate de calcium
Coquillages		Cendres d'écorce de riz	Granodiorite	
Craie	Poussières de laminoirs*	Cendres volantes	Laitiers	
Déchets alcalins		Grès	Laitier de cuivre	
Laitiers	Pyrite calcinée	Laitiers	Loess	
Marbre	Résidus de nettoyage de minerais	Loess	Minerai d'aluminium*	
Marne*	Schistes	Marne*	Pierre à ciment	
Pierre à ciment		Pierre à ciment	Résidus de nettoyage de minerais	
Poussière de four à ciment		Quartzite	Schistes*	
Schistes*		Résidus de nettoyage de minerais	Staurolite	
Terre à foulons		Sable*	Terre à foulons	
		Schiste*		
		Silicate de calcium		
		Terre à foulons		

\* Sources les plus communes.

### II.3.2.2. Présentation des principaux ciments

#### II.3.2.2.1 CPA.CEMI Ciment portland

Il contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire pour complément à 100 %.

#### II. 3.2.2.2 CPJ.CEM II/A et B Ciment Portland Compose

Les ciments CPJ-CEM II/A sont constitués d'au moins 80 % de clinker.

Les CPJ-CEM II/B sont constitués d'au moins 65 % de clinker.

Un ou plusieurs des constituants énumérés à l'article 1 forment les parts restantes.

Ces ciments existent dans la plupart des classes (de 32,5 à 52,5) à l'exception des CPJ-CEM II/B qui ne sont pas produits dans les classes 52,5 et 52,5 R.

**II. 3.2.2.3 CHF-CEM III/A et B Ciment De Haut Fourneau**

Les ciments de haut fourneau contiennent de 35 % à 64 % de clinker pour le CHF-CEM III/A et 20 % à 34 % pour le CHF-CEM III/ B, le reste des constituants étant du laitier avec éventuellement 5 % au maximum de constituants secondaires

**II. 3.2.2.4 CLK-CEM III/C Ciment De Haut Fourneau**

Ce ciment contient de 81 % à 95 % de laitier, le reste des constituants étant du clinker ou des constituants secondaires (5 % au maximum).

**II. 3.2.2.5 CPZ-CEM IV/A et B Ciment Pouzzolanique**

Les ciments pouzzolaniques contiennent de 65 % à 90 % de clinker pour le CPZ-CEM IV/A et de 45 % à 64 % pour le CPZ-CEM IV/B, le reste des constituants étant de la pouzzolane naturelle, des cendres volantes siliceuses ou de la fumée de silice, avec éventuellement 5 %, au maximum, de constituants secondaires.

Ces ciments sont actuellement produits dans la classe 22,5 des ciments à usage tropical (norme NF P 15-302).

**II. 3.2.2.6 CLC-CEM V/A Ciment Au Laitier Et Aux Cendres**

Ce ciment contient de 40 % à 64 % de clinker, de 18 % à 30 % de cendres volantes siliceuses et de 18 % à 30 % de laitier, avec éventuellement 5 % au maximum de constituants secondaires.

Le CLC-CEM V/B prévu par la norme n'est actuellement pas produit.

**II. 3.3.Granulats [7]**

Le granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des familles suivantes : (fillers ; sablons ; sables ; graves ;)

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis.

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Les granulats comme la grande majorité des matériaux de construction doivent être conformes à des normes. Les granulats constituent le squelette du béton, la régularité de leurs caractéristiques conditionne donc celles du béton.

Les granulats pour bétons font l'objet de deux principales normes de référence.

### **II.3.3.1. Normes applicable aux granulats**

#### **D- La Norme NF En 12620 (Aout 2003) Granulats Pour Béton**

Cette norme définit les termes relatifs aux granulats pour béton relevant de la Directive des Produits de Construction (DPC 89/106/CE).

Elle définit des catégories pour chaque caractéristique des granulats et des fillers utilisés dans la fabrication des bétons.

Les constituants du béton peuvent être élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés.

Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme **NF EN 206-1**, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers. Elle spécifie les caractéristiques (physiques et chimiques) relatives à l'évaluation de la conformité des granulats et au système de maîtrise de la production.

#### **E- La Norme XP P 18-545 (Février 2004) Granulats « Conformité Et Codification »**

Cette norme définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats.

Elle regroupe en codes les catégories définies dans la norme **NF EN 12620** pour les divers usages possibles : granulats pour chaussées (couches de fondation, de base et de liaison, couche de roulement utilisant des liants hydrocarbonés et bétons de ciment), granulats pour bétons hydrauliques et mortiers, granulats pour voies ferrées (assises et ballast).

Elle précise les critères de régularité et de conformité et fournit les Fiches Techniques Produit.

#### **F- Granulats Pour Bétons Et Mortiers**

La norme XP P **18-545** précise, dans l'article 10 : Granulats pour bétons hydrauliques et mortiers, les spécifications sur les granulats destinés à constituer des bétons.

Les spécifications concernent les caractéristiques détaillées ci-dessous.

### **II.3.3.2. Caractéristiques De Performance De Granulats**

#### **B- Caractéristiques applicables aux gravillons**

– Los Angeles : **LA**

- Sensibilité au gel-dégel : **G**
- Granularité et teneur en fines des gravillons : **Gr**
- Aplatissement : **A**

#### **B- Caractéristiques applicables aux sables et graves**

- Granularité et teneur en fines : **Gr**
- Module de finesse : **FM**
- Propreté : **P**
- Polluants organiques

#### **C- Caractéristiques applicables aux sables, graves et gravillons**

- Absorption d'eau **Ab**
- Impuretés prohibées
- Alkali-réaction
- Soufre total **S**
- Sulfates solubles dans l'acide **SA**
- Chlorures

#### **D- Caractéristiques applicables aux fillers**

- Granularité

Les principales caractéristiques des granulats sont repérées par des codes **A, B, C ou D**. La norme XP P 18-545 définit à l'aide de cette codification, les valeurs des spécifications adaptées à certains types d'ouvrages.

### **II. 3.4-Eau de gâchage**

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par la norme **NFP18 303**

#### **A- Caractéristiques Physique**

L'eau doit être propre, elle ne doit pas contenir des matières en suspension au-delà de : -  
2g/l pour les bétons de types A et B.

-5g/l pour les bétons de types C

**Béton A** bétons de haute qualité et à forte résistance.

**Béton B** béton a grande imperméabilité.

**Béton C** béton courant peu ou non armé.

#### **B- Caractéristiques Chimique**

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

-15g/l pour le béton Type A et B

-30g/l pour les bétons du type C

### II.3.5. Les Additions

#### II.3.5.1. Types D`Additions Minérales

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en  **fines actives**  telles que la  **fumée de silice**  et la  **pouzzolane naturelle**  et en  **fines inertes**  telles que le  **calcaire** .

Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition «  **additions pour béton hydraulique**  » à savoir :

- Additions de type I selon la norme EN 206-1

Les additions calcaires (NF P 18-308),

Les additions siliceuses (NF P 18-509), Les fillers (NF P 18-501),

- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :

La fumée de silice (NF P 78-502),

Les cendres volantes de houille (NF P 18-505),

Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506)

La pouzzolane naturelle (EN 197-1)

#### A. Fillers calcaires [6][13]

Le calcaire est une roche sédimentaire, composée majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .

Le calcaire a été introduit dans la fabrication des ciments à la suite des deux guerres mondiales pour augmenter la production et satisfaire la demande accrue de ce produit.

Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité.

Par la suite, plusieurs études ont conclu que les fillers calcaires ont une action bénéfique sur la maniabilité des liants hydrauliques, ainsi que sur les propriétés mécaniques des bétons.

En 1960, le Code Espagnol permit l'introduction de plus de 10% de filler pour des classes faibles de ciment.

Puis en 1975, le code fut révisé pour permettre d'incorporer jusqu'à 35% de calcaire.

En 1979, une nouvelle Norme Française a permis d'utiliser jusqu'à 35% de laitier, des cendres volantes, de calcaire et de pouzzolane naturelle pour un ciment composé nommé CPJ.

En plus, l'introduction de quatre classes de ciments a encouragé l'utilisation du ciment au calcaire pour contrôler les classes inférieures tout en assurant une rhéologie satisfaisante.

Dès les années 90, plusieurs pays européens révisaient leurs normes et permettaient l'introduction du calcaire en cimenterie comme le BS 7583 en 1992.

En 2000, la Norme Européenne EN 197-1 définit quatre types de ciment au calcaire parmi 27 ciments normalisés, ce qui favorise la production de ce type de ciment qui s'élève à 40 millions de tonnes représentant 24% de la production européenne.

Il fut admis que ces fillers avaient principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité.

De nos jours, des travaux laissent entrevoir une autre efficacité provenant de réactions superficielles entre les grains de calcite et le ciment, d'où on peut tirer les constatations suivantes :

Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés.

L'ion  $\text{CO}_3^-$  peut se substituer aux ions  $\text{SO}_4^-$  dans les sulfates hydratés.

Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal ; le silicate tricalcique.

Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques.

### **B. Laitier granule des hauts fourneaux**

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous-produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistra la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896).

Cependant, son utilisation a rencontré des difficultés à cause des faibles résistances engendrées.

Progressivement, cette inquiétude a disparu grâce à une optimisation entre les propriétés chimiques, le taux de verre et l'activité, ce qui a rendu le ciment au laitier très répandu aujourd'hui.

Son utilisation en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

### C. Pouzzolane Naturelle

La pouzzolane est une roche naturelle correspondant à des projections volcaniques, scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire d'une composition basaltique, sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétique ou d'hématite.

Avant la découverte du ciment Portland, on n'utilisait à l'échelle mondiale que des liants composés de pouzzolane et de chaux.

Puis leur utilisation fut délaissée à cause de leurs faibles résistances et de la lenteur de leur prise.

Toutefois grâce à ses avantages techniques, la pouzzolane naturelle est devenue très pratique dans la construction, en y substituant le ciment Portland.

Le ciment à la pouzzolane naturelle fut employé en Italie en 1910, seulement sa fabrication n'a pas été développée à cause de la baisse considérable de ses résistances mécaniques.

Ainsi son utilisation s'est orientée uniquement vers les ouvrages maritimes.

Après des progrès conséquents dans la maîtrise de son activité, le ciment à la pouzzolane devint normalisé dans le code italien en 1929.

Aux USA, un ciment à la pouzzolane a été utilisé entre 1910 et 1912 pour la construction de l'aqueduc de Los Angeles.

Dans les années trente, la California Division of High Ways s'est servi d'un ciment à la pouzzolane résistant aux sulfates pour la construction du Golden Gate à San Francisco.

En 1935, un ciment Portland à la pouzzolane a été mis en œuvre dans la construction du barrage de Bonneville sur le fleuve Columbia.

Aujourd'hui, plusieurs pays utilisent la pouzzolane naturelle dans l'industrie cimentaire tels que la Chine, l'Allemagne, la Grèce, la Turquie, le Mexique et l'Algérie.

### D. Fumée De Silice [8]

La fumée de silice est un sous-produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électriques dans lesquels sont élaborés du silicium et d'autres alliages.

La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour donner de l'oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$  en quantité prédominante (> 90%).

La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité.

De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

La fumée de silice a été introduite dans le ciment par les Norvégiens; en 1952 Bernhart mettait en évidence l'amélioration des résistances mécaniques apportées par cette addition.

La première utilisation de la fumée de silice dans le béton de construction a eu lieu en 1971 à la fonderie de Fiskaa en Norvège. Depuis 1979, les ciments Islandais renferment de 6 à 7 % de fumée de silice. Au Canada, les ciments produits par Several Canadian Cement Companies contiennent près de 7 à 8 % de fumée de silice.

Aujourd'hui cet ajout est très répandu dans le monde par son incorporation lors de la confection des nouveaux bétons où ses performances apportées ne sont plus à discuter.

### **E. Cendres Volantes**

Les cendres volantes sont de fines particules résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques.

Leurs particules ont une forme sphérique avec un diamètre allant de 1 à 150  $\mu\text{m}$ .

En 1937, Davis de l'Université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie.

En 1948, la construction du barrage de Hungry Horse aux USA fut la première application pratique.

Depuis, les études se sont multipliées et l'utilisation de ses cendres s'est énormément répandue grâce aux améliorations apportées au béton et à l'économie enregistrée par leur emploi.

### **II. 3.5.2 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires[8]**

Il existe plusieurs mécanismes de l'action des additions minérales qui induisent des modifications dans la rhéologie de la pâte du ciment ou du béton.

Les avantages de ces additions sont généralement attribués à la morphologie de la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zêta qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires.

### **II 3.5.3. Effet de la densité de l'addition [8]**

Lorsque le ciment Portland est remplacé par une addition minérale de poids spécifique inférieure, il résulte un grand volume de pâte qui nécessite plus d'eau de gâchage pour recouvrir tous les grains.

L'utilisation de la zéolite naturelle, ayant un poids spécifique de 2.2  $\text{g}/\text{cm}^3$  inférieur de celui du ciment (3.1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), diminue l'ouvrabilité du béton ce qui conduit à l'utilisation de super plastifiant pour maintenir une ouvrabilité constante.

#### II. 3.5.4. Effet de la morphologie

La morphologie des particules des additions minérales a une influence considérable sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires.

Les résultats montrent que la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton conduit à la réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes.

Dans le même contexte, Lange et *al.* ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau de gâchage et augmentait la fluidité du mélange.

Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires.

La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau dans le mélange, plus réduite.

D'autre part, la combinaison de la fumée de silice avec le super plastifiant améliore l'ouvrabilité du béton et contribue à la dispersion des grains de ciment.

#### II. 3.5.5. Effet de la surface spécifique

L'addition des ajouts minéraux au ciment Portland peut produire plusieurs modifications au sein du squelette solide du mélange.

La petite taille des particules des ajouts comble les vides interstitiels et augmente la densité de la matière.

Par conséquent, l'eau attrapée dans les pores granulaires est libérée ce qui augmente la compacité de la pâte, améliore l'ouvrabilité et diminue la demande en eau. Plusieurs recherches montrent que l'augmentation de la surface spécifique des fillers entraîne une altération des propriétés d'écoulement (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier ou du béton.

Les recherches montrent qu'une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité du béton avec l'augmentation de la surface spécifique du filler. Par contre, El Hilali a remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte de ciment.

Le même auteur a montré que la viscosité des pâtes autoplaçantes diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des pâtes de ciments.

### II. 3.6. Adjuvants du béton [9]

#### II. 3.6.1. Définition

On entend par “**adjuvant**” un produit qui ajouté au béton en faible quantité permet d’améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci.

Un adjuvant a en général une action principale d’après laquelle il se trouve défini et classé mais il peut présenter également certaines actions secondaires.

Les adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de poudres, solubles ou non, de liquide, de paillettes, etc. et sont vendus sous des appellations correspondant à une marque ou à une société.

#### II.3.6.2. Classification des adjuvants[10]

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu’ils confèrent au béton frais ou durci, On propose dans la pratique la classification suivante :

- Les Plastifiants
- Les Fluidifiants
- L’entraîneur d’air.
- Les accélérateurs.
- Les retardateurs.
- Les Hydrofuges.
- Les antigels.

### II. 4 . Formulation des « BAP » [11]

#### II. 4.1. Introduction

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage, ils offrent une grande qualité esthétique des parements.

Les prescriptions et règles de conception et de dimensionnement des structures en béton sont applicables au BAP, ce qui permet d’utiliser en lieu et place de bétons de même caractéristiques mécaniques.

Toute la gamme de résistance des bétons traditionnels peut être obtenue en auto plaçant en particulier de **C25/30 à C80/95**.

La mise au point d’une formule de **BAP** est beaucoup plus complexe, parce que, d’abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d’un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l’état frais ; Il faut réaliser, en plus de l’essai au cône, l’essai à la boîte en L et l’essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d’une pâte fluide est **très sensible à la ségrégation**.

### II.4.2. Critères de formulation des BAP[12]

Plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique.

La méthode de **Dreux-Gorisse** n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions.

La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

La formulation des BAP repose sur les trois **03** critères suivants

#### 1. Fluidification de la pate

Elle est obtenue sans ajout d'eau mais par utilisation de super plastifiants à fort pouvoir dé flocculant.

#### 2. Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement

La taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible, le volume de la pâte et la quantité des fines sont plus importante que pour un béton mis en œuvre par vibration.

#### 3 . Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation :

Elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumée de silice).

### II.4.3. Composition d'un BAP :

La formulation d'un BAP fait appel à :

- 1) **Des super plastifiants** : pour obtenir la fluidité souhaitée et quelque fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage.
- 2) **Une quantité de fines** (ciment, filler calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage (500 Kg/m<sup>3</sup>).
- 3) **Un volume de pâte élevé** (350 Kg/400L/m<sup>3</sup>).
- 4) **Un faible volume de gravillons** afin d'éviter le « le blocage du béton » dans les zones confinées c a d le rapport gravillon/sable est de l'ordre de 01 ou inférieur) et les granulats ont en général un **D max** compris entre **10** et **16 mm** afin d'améliorer l'écoulement ; l'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieux confiné.
- 5) **Eventuellement un agent entraineur d'air** pour assurer la protection contre les effets du gel-dégel.

#### II.4.4. Méthodes de formulation des BAP [12]

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

Parmi les technique de formulation les plus répandus on cite :

- ✓ la méthode basée sur l'optimisation des mortiers.
- ✓ la méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire.
- ✓ la méthode basée sur l'optimisation de la pâte.
- ✓ La méthode chinoise.

Quel que soit la méthode adoptée l'analyse des études effectuées à travers le monde relèvent que la composition des BAP est basée sur :

- Un volume de gravillons varie entre 28% et 38% du volume total du BAP.
- Un volume de pâte variant entre 30 à 42 % du volume total du BAP.
- Un rapport  $E/L < 0.48$  en poids du BAP.
- Un dosage en liant (C+ additions) variant de 385 à 635 KG/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en super plastifiant est proche de son dosage de saturation.

Avec l'expérience acquise ces derniers années certaines ordre e grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisées tels que :

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 la pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.

La masse du ciment est supérieur ou égale au minimum requis par la norme BPE (18 305), soit en générale de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>, en complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.

le dosage en super plastifiant est proche du dosage de saturation.

##### II.4.4.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

**Okamura**, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée **arbitrairement**.

Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie.

La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage.

Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications.

Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

#### **II.4.4.2-Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte**

Le béton est considéré ici comme un mélange bi phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte.

Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte.

Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton.

Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par **Tangtermsirikul, Pettersson et Bui**.

Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un Volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par **Chanvillard** et al dans une méthode de formulation des bétons de sable.

#### **II.4.4.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire**

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons.

Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte.

L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte.

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

**Sedran** et de **Larrard** ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie).

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

A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton lab.Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

**Roshavelov** a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

#### **II. 4.4.4.Méthode basée sur un plan d'expériences**

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition.

Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de super plastifiant et la masse d'agent de viscosité.

Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25.

Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs.

Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude.

# CHAPITRE III: REHOLOGIE DES BAP

## Chapitre III Rhéologie des bétons autoplaçant

### III.1. Etude rhéologique des bétons :

Le béton, à l'état frais, peut être considéré comme un fluide homogène en supposant qu'un écoulement peut avoir lieu et que les granulats soient bien repartis en tailles, leurs modélisation n'est pas aisée car chaque type de béton a un comportement différent en fonction de leur composition et de la méthode (moyen) de malaxage.

### III.2. Définition de la rhéologie

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, etc...) Ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc. ...) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

### III.3. Domaines d'étude de la Rhéologie

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

**III.3.1. Rhéologie Expérimentale** : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation)

**III.3.2. Rhéologie Structurale** explication des comportements à partir de la structure du matériau

**III.3.3. Rhéologie Théorique** fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, en fonction de la vitesse d'application de ces contraintes ou de leur variation au cours du temps.

### III.4. Grandeurs étudiées en rhéologie

#### III.4.1 la viscosité

Peut être définie comme l'ensemble des phénomènes de résistance à l'écoulement se produisant dans la masse d'une matière, Plus la viscosité augmente, et plus la capacité du fluide à s'écouler facilement diminue, plus l'énergie dissipée par l'écoulement sera importante.

La viscosité correspond à la pente de la droite donnant la variation du taux de cisaillement.

Dans le cas des coulis de ciment qui ont le comportement d'un corps de Bingham, on définit deux types de grandeur : la viscosité **plastique** et la viscosité **apparente**.

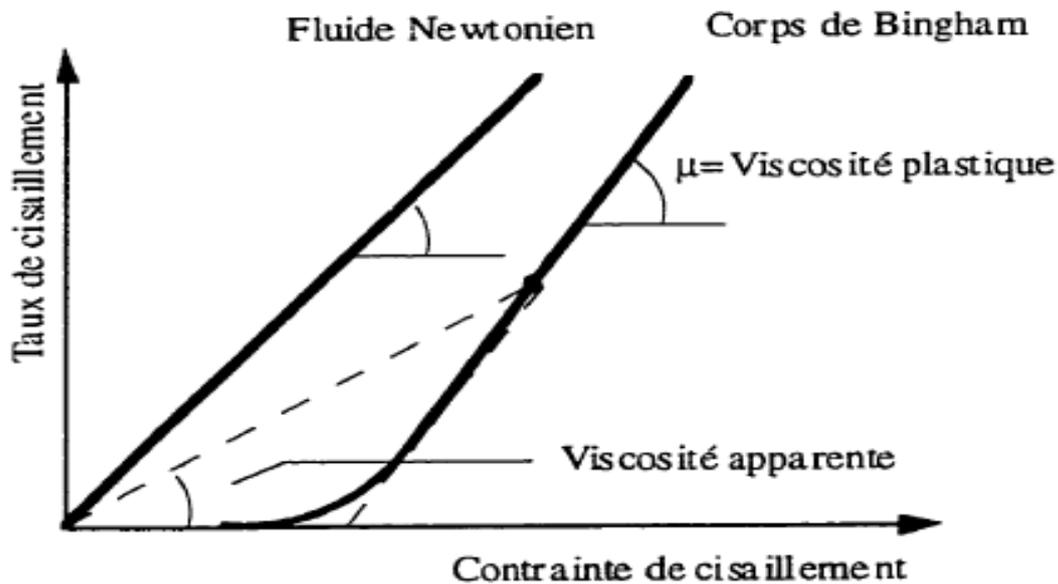


Figure III.1 viscosité

#### A. Viscosité Dynamique

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$\mu = \frac{\tau}{D}$$

Unité : Pa.s ou poiseuille dans le système international. (Symbole Pl)

#### B. Viscosité Cinématique

La viscosité cinématique est définie par la relation suivante :

$$V = \frac{\mu}{\rho}$$

#### III.4.2 Seuil De Cisaillement :

Le seuil de cisaillement (cohésion ou rigidité) est la force minimale nécessaire pour mettre en mouvement un fluide soumis une contrainte de cisaillement.

En dessous de ce seuil, le fluide possède les propriétés d'un solide élastique mais une fois ce seuil dépassé, le coulis se comporte comme un fluide newtonien ayant une viscosité plastique.

### III.4.3 Contrainte De Cisaillement

C'est la force tangentielle que l'on exerce par unité de surface du

Fluide :

$$\tau = \frac{Ft}{S}$$

### III. 4.4

### Gradient De Vitesse

On considère l'expérience suivante où le mouvement de cisaillement que subit le fluide peut être considéré comme laminaire plan :

Si  $v_0$  n'est pas trop grande, les molécules de miel en contact avec l'aluminium sont entraînées par lui à la vitesse  $v_0$ , en une couche mince.

Les forces de Van der Waal permettent de transférer une partie de l'énergie cinétique de cette couche aux molécules en dessous qui sont entraînées mais à une vitesse moindre : plus ces forces d'interactions sont fortes, plus le fluide est visqueux et plus la vitesse décroît vite quand on s'éloigne de la couche du dessus.

Le mouvement se propage en s'atténuant au sein du liquide : il est nul au contact de la plaque support qui est fixe.

Le gradient de vitesse va traduire l'évolution de la vitesse au sein du fluide :

Cette grandeur dépend de la contrainte de cisaillement appliquée et de la nature du fluide.

### III. 5 .Différents Comportements Rhéologiques

Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, différents phénomènes physiques et réactions chimiques surviennent, conférant au coulis qui en résulte la structure d'un fluide particulier. En effet il existe deux principaux types de fluides :

- **fluide newtonien**
- **fluide non newtonien**

#### III. 5.1. Fluides Newtoniens

Un fluide est dit newtonien si sa viscosité est indépendante de la contrainte appliquée.

On dit que le fluide est parfait ou linéaire.

Le rhéogramme d'un tel fluide est une droite passant par l'origine.

#### III. 5.2.Fluides Non Newtoniens

##### III. 5.2.1.Fluides Rhé Fluidifiants (Ou Pseudo Plastiques)

Ces fluides ont une viscosité qui diminue si la contrainte de cisaillement augmente ou si la vitesse de déformation augmente.

Les suspensions de particules asymétriques ont souvent se comportement :

Plus on cisaille vite, plus ces particules s'orientent dans le sens de l'écoulement et leurs **interactions** de frottement **diminuent**, C'est le cas du **sang**, des **polymères liquides à longue chaîne**, des **jus de fruits (abricot, tomate)**.

### III. 5.2.2. Fluides Rhé Epaisissants

Leur viscosité augmente si la contrainte de cisaillement augmente (ou la vitesse de déformation augmente).

### III.5.2.3. Corps Plastiques

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible .Autrement dit, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte très faible, leur viscosité est tellement forte qu'ils ne peuvent pas s'écouler.

Leur viscosité diminue ensuite si une contrainte supérieure au seuil est appliquée.

#### Exemple 1

Les peintures " qui ne coulent pas " sont un exemple caractéristique :

Sous l'effet de leur propre poids lorsqu'elles ont été appliquées, la contrainte est en

Dessous du seuil d'écoulement, elles sont suffisamment visqueuses pour ne pas couler.

Lorsqu'on les applique, la contrainte que l'on exerce avec le pinceau est supérieure au seuil d'écoulement, la peinture est assez fluide pour pouvoir être étalée sans problème

### III.5.3. La thixotropie

#### III. 5.3.1.Définition :

La thixotropie est la propriété des fluides à avoir la forme d'un gel quand ils sont au repos et devenir liquides lorsqu'ils sont agités [**BOMBLED, 1967**]

Les coulis de ciment sont considérés comme des fluides thixotropes, c'est à dire que la contrainte de cisaillement ou, plus concrètement, la viscosité apparente va diminuer dans le temps si on maintient durant une certaine période un taux de cisaillement constant. La destruction de la structure du fluide est responsable de ce phénomène. Le même comportement est observé si le coulis est laissé au repos durant un court temps ce qui implique que le phénomène de thixotropie est réversible.

## III.6. PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES BETONS AUTO PLAÇANT

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en oeuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non

confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité (vis à vis de la ségrégation et du ressuage).

La formulation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique une composition spécifique.

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ces trois principales caractéristiques :

- la fluidité
- l'homogénéité

### III. 6.1 FLUIDITE

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant, C'est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, elle influe directement sur la qualité de surface du béton après démoulage aussi elle a un rôle important sur l'adhérence entre le béton et l'armature d'un coté, et le degré de compactage du béton de l'autre coté.

#### A.Caractérisation empirique :

L'essai de référence pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai au **cône d'Abrams**. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir Son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206), il est constitué de :

##### Table d'étalement.

Table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm

##### Cône d'Abrams.

Moule en métal, d'une épaisseur min. de 1,5mm.

Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux

Dimensions intérieures suivantes :

- diamètre de la base :  $(200 \pm 2)$  mm
- diamètre du haut :  $(100 \pm 2)$  mm
- hauteur :  $(300 \pm 2)$  mm.

Le cone d'Abrams se constitue :

D'un entonnoir, en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à ce dernier d'être placé correctement sur le cône d'Abrams spécifié ci-dessus.



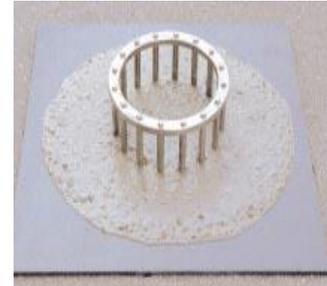
Figure III.2 cône d'Abrams

D'une règle, graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.

### B. Essai d'étalement modifié. (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton à travers des barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature de 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demie leur diamètre.



En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm.

Figure III.3 essai J-Ring

Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

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

L'étalement peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 500 mm (T500), ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau, cette dernière caractéristique est plus généralement étudiée au moyen de l'essai d'entonnoir V-funnel

### C . Essai de l'entonnoir V- funnel

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 l de béton passant à travers une ouverture étroite. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autocompactant.

En outre, la grande fluidité des BAP est un de leurs atouts majeurs puisqu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en oeuvre. Cependant, si cette propriété est nécessaire, elle n'est pas suffisante pour qu'un béton soit considéré comme autoplaçant. La stabilité est également une caractéristique primordiale dans le cas des BAP car l'homogénéité des propriétés de la structure finale en dépend. Elle fait donc l'objet de la partie suivante.

### III. 6.2 . La ségrégation

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Cependant du fait de leur fluidité, les BAP présentent un risque de ségrégation important.

#### III. 6.2.1.Définition

C'est la propriété d'un mélange de se séparer en différentes phases sous l'action des forces extérieures (gravité, malaxage insuffisant, vibration excessive, transport, excès d'eau, etc....) C'est à dire un risque de séparation entre la phase suspendante et les gros granulats.

**III. 6.2.2.Types De Ségrégations** On rencontre deux types de ségrégation : dynamique et statique.

#### III. 6.2.2.1.La Ségrégation Dynamique

On parle de ségrégation dynamique lorsque cette séparation se produit pendant la phase de remplissage du coffrage.

##### A. L'essai à la L- Box

L'essai de la boîte en L permet de caractériser 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 blocages inacceptables, Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L.

La Partie, verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe, Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe.

Il est recommandé l'utiliser trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm, le mode opératoire de cet essai est le suivant :

- ✓ La partie verticale du dispositif est remplie de béton (Volume nécessaire de l'ordre de 13 l). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min.
- ✓ La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement **H1** et **H2**).
- ✓ Le rapport **H1/H2** permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à **0,8**.

Un essai proche de celui que nous venons de décrire est **l'essai à la boîte en U (U-Box)** présenté sur la figure.

Il est utilisé au Japon et en Angleterre, il ne semble pas à celui de **la boîte en L** mais le principe est sensiblement le même.



Figure III.4 Capacité de remplissage.

S'il y a blocage des granulats et formation de voûtes au droit des armatures, le remplissage du coffrage ne se fera pas correctement.

L'essai que nous venons de présenter permet de s'assurer que l'écoulement se fait correctement, mais il donne peu d'informations sur le comportement du matériau après le passage à travers les armatures, mais ce dernier peut être adapté en fonction de la structure dans laquelle sera utilisée le béton (forme et renforcement).

Néanmoins certaines précautions de formulation décrites dans la partie suivante permettent de limiter les risques de blocage quelle que soit la configuration choisie :

**Diamètre maximal des granulats (D max)** Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats compris entre 16 et 20 mm.

**Volume de gros granulats** La quantité de gros granulats a une forte influence sur la capacité du béton à passer à travers des armatures, moins il y a de gros granulats, plus la capacité de remplissage est élevée. Selon la norme, il est préconisé l'utilisation d'un rapport **sable /Gravions (G/S)** de l'ordre de **1**.

## **B. La ségrégation statique**

La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise, Pour l'étude du phénomène de ségrégation statique, on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître.

### **B.1 Présentation des essais**

Les essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation statique sur béton frais sont multiples :

- **Essai au cylindre**
- **Essai au tamis**
- **Essai sur une colonne sans vibration**
- **Essai à la palette**

Parmi ces derniers on étudiera l'essai de la **stabilité au tamis**.

### **B.2 Mode opératoire de l'essai :**

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau.

Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm.

Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis.

Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

### **B.3. Ressuage**

La formulation des **BAP** est une étape délicate nécessitant de trouver un compromis entre différentes caractéristiques éventuellement contradictoires, Cependant des variations de qualités de constituants ou de composition peuvent perturber cet équilibre et ainsi modifier les propriétés des BAP à l'état frais en générant des phénomènes de ségrégation.

#### **B.3.1 Définition**

C'est un phénomène négatif présenté par la remontée d'eau en surface du béton fraîchement placé, qui engendre de multiples conséquences plastiques, finition des surfaces, gain locale en eau, l'enrobage d'armatures en eau et fissuration avant prise.

## **III 7. Interactions super plastifiants-ciment**

### **III. 7.1.Introduction**

#### **Pourquoi disperser les particules ?**

Pourquoi faut-il disperser les grains de ciment ?

Les particules de ciment et d'ajouts (calcaire, cendres, fumées de silice, ...) ont une très forte tendance à flocculer quand elles entrent en contact avec l'eau.

Les floccs de ciment emmagasinent donc une quantité non négligeable d'eau de malaxage.

Cette eau de malaxage, qui n'est plus disponible pour donner de la maniabilité au béton, fait qu'il est impossible de fabriquer un béton sans adjuvant qui ait une fluidité satisfaisante lorsque son rapport E/C est inférieur à 0,40.

Or, selon les types de ciment (riche en silicates ou riche en aluminates), l'eau chimiquement nécessaire pour hydrater 100 kg de ciment est comprise entre 26 kg et 34 kg.

En effet, l'adsorption de ces dispersantes influence les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciments :

On a vu que les grains de ciment contiennent plusieurs phases minérales de différentes réactivités. Leur hydratation transforme la surface des particules, libérant des ions au sein de la solution et créant ainsi des charges à la surface des particules.

Ces charges favorisent la floculation des particules de ciment.

Lorsqu'un super plastifiant s'adsorbent sur un grain de ciment, ses fonctions acides dissociées modifient les charges de surface de la particule et minimisent les interactions entre les particules par la force de répulsion. L'évolution de la charge de surface permet de suivre l'adsorption des superplastifiants.

Les super plastifiants à l'interface eau/ciment vont également induire une force répulsive à courte distance due à l'encombrement stérique entre deux couches de polymères adsorbés sur des particules voisines.

L'amplitude des effets stériques et l'importance relative des effets électrostatiques et stériques varient en fonction du type et des masses molaires des super plastifiants.

Pour les super plastifiants sulfonés (**PNS et PMS**), les effets électrostatiques sont prédominants.

Pour les polyacrylates, les effets stériques sont prédominants, en particulier pour les polymères possédant des longues chaînes latérales hydrophiles. A cause de leur faible densité de charge, l'effet électrostatique de cette classe de superplastifiants est réduit par rapport à celui des polymères sulfonés.

De nombreuses études ont montré que les superplastifiants ont une adsorption sélective. En effet, les polymères sulfonés s'adsorbent préférentiellement sur les phases aluminates des ciments et entrent en compétition avec les ions sulfates dans les réactions qui contrôlent l'hydratation du C3A :

- ✓ L'adsorption des lignosulfonates sur les ciments montre que l'affinité et la masse de polymère adsorbé augmentent avec la teneur en C3A et diminue avec la teneur en sulfates de métaux alcalins des ciments.
- ✓ Leur adsorption est principalement influencée par leur masse molaire et par leur teneur en groupes carboxyliques (à teneur en groupes sulfonates constante), tandis que l'adsorption des polycarboxylates est influencée par les longueurs de la chaîne principale et des chaînes latérales et par leur teneur en groupes carboxyliques.

l'effet des principaux ions présents dans la suspension de ciment ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{OH}^-$ ), sur les polymères, en ajoutant une solution ionique de composition similaire, montre que l'adsorption des lignosulfonates n'est influencée par aucun des ions étudiés, ni par le pH dans le domaine étudié. Seule une augmentation de la force ionique augmente la masse de polymère adsorbé.

L'adsorption des polycarboxylates est influencée par les ions calcium et sulfates ainsi que par la charge de surface des particules.

### **III. 7.2. Influences Des Différents Paramètres**

#### **III. 7.2.1. Influence Du Dosage En Fluidifiant**

Les effets d'un adjuvant sont généralement croissants avec la concentration en adjuvant.

Toutefois, pour chaque formulation d'un béton il existe un dosage au-delà duquel l'effet de l'adjuvant est insignifiant : ce dosage est appelé **point de saturation**.

Les bétons ainsi surdosés présentent alors un fort ressuage et une ségrégation des gros granulats.

#### **III. 7.2.2. Influence De La Température**

La perte de maniabilité est d'autant plus rapide que la température est élevée.

De plus, la stabilité des dispersants peut être très notablement altérée, ce qui diminue leur efficacité.

#### **III. 7.2.3. Influence Du Malaxage.**

Un malaxage violent, avant ou après l'addition de fluidifiant, augmente la diminution du slump.

Ceci est aussi remarqué sans utilisation de dispersant.

#### **III. 7.2.4. Influence Du Dosage En Ciment.**

La vitesse de perte du slump dans le temps est d'autant plus grande que la quantité de ciment dans le béton est plus importante.

Ceci s'explique par la "consommation" (absorption) de l'adjuvant par le ciment.

#### **III. 7.2.5. Influence D'un Retardateur.**

Il est parfois utile d'utiliser un retardateur pour pallier la perte d'ouvrabilité (surtout en période estivale).

En retardant les premières réactions d'hydratation, l'efficacité du fluidifiant est alors prolongée

#### **III. 7.2.6. Effet De La Nature Du Polymère.**

Le choix du polymère dans une suspension concentrée tels que les coulis de ciment est difficile et constitue un métier à part entière. L'architecture du polymère dépend du cahier des charges. Il est important de contrôler :

L'adsorption ou pas du polymère sur la surface des grains de ciment

les parties hydrophiles et hydrophobes de la chaîne

la densité et l'emplacement des charges (positif ou négatif voire les deux)

la taille de la chaîne principale, des greffons

la rigidité, comportement du polymère dans le solvant.

L'adsorption d'un polymère sur la surface des particules dépend de tous ces paramètres mais aussi de sa concentration.

Nous pouvons aussi contrôler le caractère **hydrophile/hydrophobe** de la surface des particules en adsorbant des polymères.

### III. 7.3. Modifications des réactions d'hydratation en présence de fluidifiant.

En s'adsorbant sur les hydrates en cours de formation, les fluidifiants entrent en interaction avec tous les processus physico-chimiques de l'hydratation.

Leur rôle ne se limite donc pas à un simple effet dispersant.

L'adsorption est un processus élémentaire qui concerne tous les sites favorables, quelle que soit la nature minéralogique de la surface.

C'est ainsi que l'adsorption des molécules d'adjuvants va se produire, non seulement sur les hydrates recouvrant les grains de ciment, mais aussi sur les germes d'hydrates formés à partir des ions en solution, modifiant leur vitesse de croissance et par la suite leur morphologie.

Les dispersants montrent en général un effet retardateur dû à leur interaction avec l'hydratation de  $C_3S$  l'adsorption des fluidifiants perturbe la croissance des germes de portlandite, allongeant la durée de la période dormante.

Il peut néanmoins exister des nuances dans l'affinité d'une molécule pour les différents sites.

La quantité de dispersant adsorbée sur le ciment ou sur le ciment hydraté dépend du type d'adjuvant et de la composition minéralogique du ciment.

Les quantités adsorbées sur les phases  $C_3S$ ,  $C_2S$ , cendres volantes, fumée de silice, laitier et filler sont inférieures à celles adsorbées sur  $C_3A$ ,  $C_4AF$  et  $CaO$ .

### III. 7.4. Le Trio $C_3a$ - Sulfates - Adjuvant.

#### III. 7.4.1. Importance des sulfates réactifs.

Les réactions entre les sulfates ou les fluidifiants à base de sulfonates et les aluminates de calcium peuvent se résumer en une **compétition** de cinétique de réaction dont dépendra le maintien d'ouvrabilité.

Sulfate et sulfonate sont chargés négativement et sont très attirés par les surfaces de  $C_3A$  anhydre ou hydraté.

Si le " vainqueur " de cette compétition est le sulfate, il s'en suivra un développement normal des réactions instantanées d'hydratation (formation d'ettringite stabilisant les aluminates), et une faible adsorption du fluidifiant par les aluminates hydratés reportant ainsi leur effet dispersant sur les silicates.

En revanche, si le “ vainqueur ” est le fluidifiant (du fait de sa forte attirance pour les aluminates), la stabilisation des aluminates par formation d’ettringite étant perturbée, ces derniers vont fortement s’hydrater générant un raidissement s’apparentant à une fausse prise, entraînant une plus forte adsorption du fluidifiant et diminuant ainsi leur effet dispersant.

### III 8. Caractérisation des bétons autoplaçant à l’état frais

#### III. 8.1 Essai d'étalement

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement.

Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP.

Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement.

La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm.

La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement.

Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies.

La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme, L’important est de procéder toujours de la même manière.

Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché.

Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton.

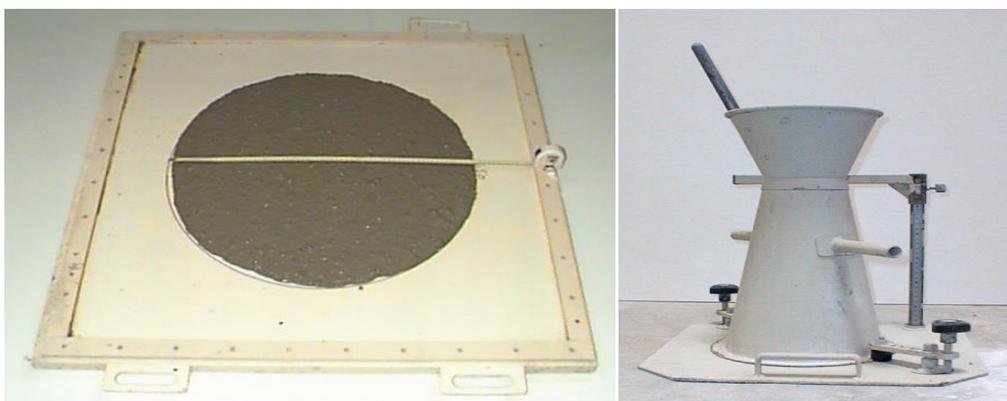


Figure III.5 : cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement

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

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

### III. 8.2 Essai De Boite En L

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton.

Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature  $\varnothing$  14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte.

On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale.

Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton ( $h_1$  et  $h_2$ ), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement.

Le rapport  $h_2/h_1$  devrait être supérieur à 0,80.

L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.



Figure. III.6 Schéma de la boîte en L

### III.8.3 Essai d'entonnoir

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure 3 est rempli de béton jusqu'en haut.

Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-compactant.

Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton **BAP**



Figure III.7 Essai d'entonnoir

### III.8.4. Essai D'Étalement Modifié

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature  $\varnothing$  16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre.

Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

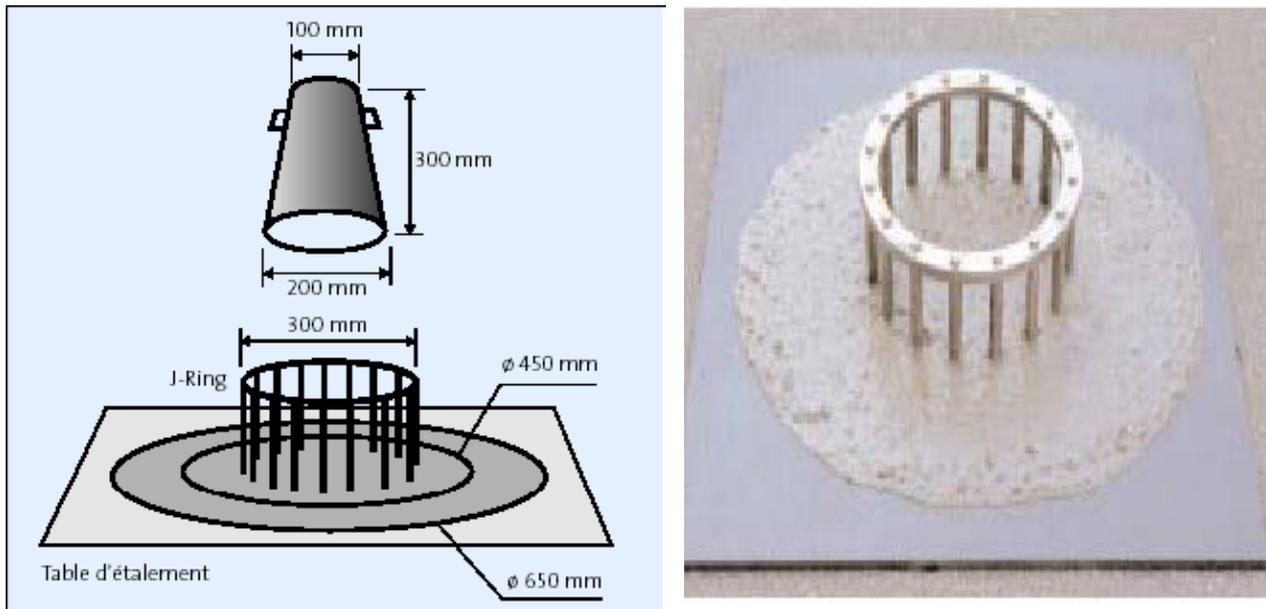


Figure III.8 -Essai d'étalement modifié

### III.8.5.Essai De Stabilité Au Tamis

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau.

Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm.

Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis.

Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

L'AFGC a proposé en plus un essai de mesure du ressuage, qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif).

Le tableau ci-après donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un **BAP**.

Tableau III.1 valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP.

Etalement	60cm à 75cm
H2/H1	$\geq 0.8$
Laitance	$\leq 15 \%$

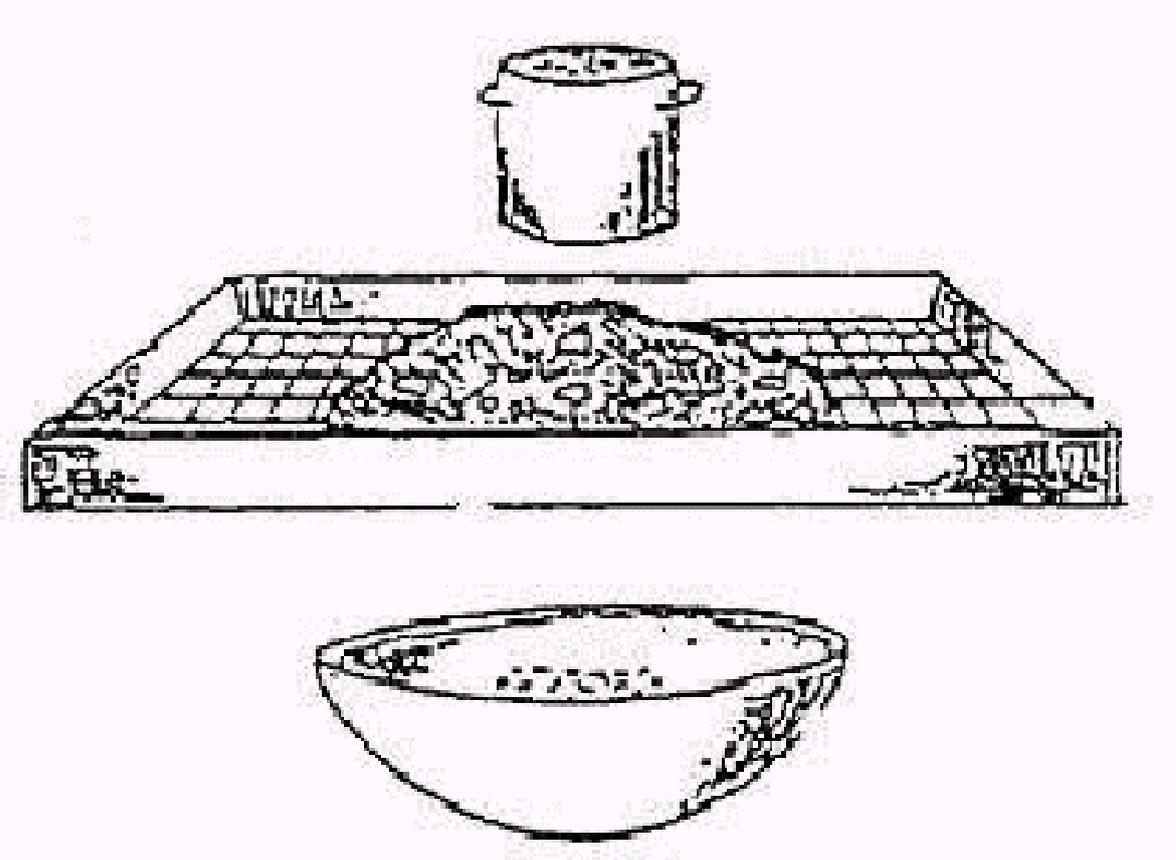


Figure III.9 Essai de stabilité au tamis

# CHAPITRE IV: MATERIAUX ET METHODES

## IV. Matériaux et méthodes

Dans cette partie, nous exposons les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser le travail expérimental. Les mélanges des bétons ont été effectués selon les normes et les essais sur béton frais et durci sont aussi réalisés selon les deux méthodes choisies. Pour cela, le plan de travail que nous avons élaboré est partagé en cinq étapes :

**1<sup>er</sup> étape :** Analyse physico-chimiques et mécanique des constituants du béton.

**2<sup>ème</sup> étape :** Optimisation de la composition de béton de référence.

a) Calcul de la composition par la méthode de **G. DREUX**.

b) Calcul de la composition par la méthode **japonaise**.

**3<sup>ème</sup> étape :** Etude rhéologique sur pâte (ciment + fines + eau + adjuvants).

**4<sup>ème</sup> étape :** Préparation des gâchées selon deux méthodes (**DREUX. Japonaise**).

**5<sup>ème</sup> étape :** interprétation des résultats et conclusion.

### IV.1. Matériaux utilisés

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes caractéristiques des constituants ainsi que les étapes que nous avons suivies pour la détermination de la composition d'un BAP.

Aussi, on détermine les différentes caractéristiques qui entrent dans la composition de nos bétons. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant de béton avec différents dosages d'ajouts.

#### IV.1.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment composé CPJ, de classe 42.5, il provient de la cimenterie de Sour El Ghozlane (Bouira) du groupe GICA.

Les résultats des essais physiques et chimiques de ce ciment sont inscrits dans les tableaux ci-dessous :

##### IV.1.1.1. Caractéristiques physiques

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau ci-après.

**Tableau IV.1.** Essais physiques du ciment

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
01	Consistance normale.	%	25 - 27
02	Début de prise : (DP)	h.min	2 :30
03	Fin de prise : (FP).	h.min	4 :30
04	Masse spécifique.	g/cm <sup>3</sup>	2.8 – 3.2
05	Surface spécifique.	cm <sup>2</sup> /g	2900 - 3900

- La masse spécifique d'un ciment varie entre 2,9 et 3,2 g/cm<sup>3</sup>, critère qui est compatible à la valeur obtenue avec l'essai au pycnomètre qui est de 3.1 g /cm<sup>3</sup>.
- Début de prise 2 heures et 30minutes.
- Fin de prise 4 heures et 30 minutes.

#### IV.1.1.2. Composition chimique

Concernant la composition chimique et minéralogique du ciment elles sont résumées dans les tableaux ci-après.

**Tableau IV.2.** Composition chimique du ciment

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>1</sub>	RI	PAF	Σ
%	20.71	5.45	3.63	55.32	2.15	0.65	0.23	2.37	0.83	4.38	4.28	100

**Tableau IV.3.** Composition minéralogique du ciment

Eléments	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO	Gypse	Calcaire	Pouzzolane
%	58	18	05	13	01	05	05	07

#### IV.1.2. Les granulats

##### IV.1.2.1. Sable

Les sables utilisés sont : sable concassé de carrière El HACHIMIA (S<sub>1</sub>), et sable fin roulé (S<sub>2</sub>) de (BOUSAADA).

##### IV.1.2.2. Les graviers

- **Le gravillon 3/8 (G<sub>3/8</sub>)** : Le gravier utilisé dans notre béton provient de la carrière de Oued El Bardi (Bouira)
- **Le gravillon 8/15 (G<sub>8/15</sub>)** : Le gravier utilisé dans notre béton provient de la carrière de Oued El Bardi (Bouira)

#### IV.1.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable de la ville de Bouira.

#### IV.1.4. Les adjuvants

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant réducteur d'eau dit « **ADVA Cast 260** » fabriqué par GRACE, ce superplastifiant est très efficace, produisant un béton à forte affaissement à faible

dosage sans perte de résistance. Sa plage d'utilisation est fixée par la fiche technique, ainsi que l'agent de viscosité (voir annexe).

#### IV.1.5. Les additifs

##### IV.1.5.1. La fumée de silice

L'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation.

Dans notre essai on a utilisé la fumée de silice du produit SIKA.

##### IV.1.5.2. Les fillers calcaires

Les fillers sont insérés progressivement dans des mélanges cimentaires de plus en plus complexes de manière à déterminer les mécanismes d'action des fillers en contact avec les différents constituants de notre béton (à savoir le ciment, la fumée de silice, l'adjuvant et les granulats).

#### IV.2. Méthodes d'élaboration

##### IV.2.1. Méthode de DREUX GORISSE

La formulation de la composition du béton témoins a été faite selon la méthode de « **DREUX GORISSE** » basée sur l'analyse granulométrique (sable et différentes fractions de gravier).

La densité théorique calculée du béton frais =  $2113.03 \text{ kg/m}^3$

Le tableau suivant représente les dosages des matériaux qui sont calculés par la méthode de DREUX GORISSE, (pour les détails de la formulation voir annexe).

**Tableau IV.4.** Les masses des constituants pour  $1 \text{ m}^3$  (méthode de DG).

Types de Matériaux	Dosage $\text{kg/m}^3$
Ciment CEMII 42.5 GICA SEG Bouira	350
Sable 0/1 BOUSSAADA	194.5
Sable 0/3 Carrière el Hachimia	488.78
Gravier (3/8) Carrière el Hachimia	197.36
Gravier (8/15) Carrière el Hachimia	777.38
Eau de robinet Bouira	105
Adjuvant superplastifiant ADVA Cast 260	1.2%

### IV.2.2. Méthode japonaise

Dans notre formulation on choisit :  $G/S = 0.9$ , le rapport :  $E/C+F$  selon la fluidité (donnée par l'essai étalement), on vise l'étalement 650 mm à 750mm, donc on doit prendre le rapport  $E/C+F=0.3$  et ajouté le superplastifiant avec différents dosages de fines.

La densité théorique du béton frais =  $2358.11 \text{ kg/m}^3$

Le présent tableau représente les différents dosages des matériaux qui sont donnés par la méthode Japonaise, (pour les détails de la formulation voir annexe).

**Tableau IV.5.** Les masses des constituants pour  $1 \text{ m}^3$  (méthode Japonaise).

Types de Matériaux	Dosage $\text{kg/m}^3$
Ciment CEMII 42.5 GICA SEG Bouira	350
Fines (fumée de silice et/ou fillers de calcaires)	35
Sable 0/1 BOUSSAADA	172.65
Sable 0/3 Carrière el Hachimia	741.265
Gravier (3/8) Carrière el Hachimia	236.84
Gravier (8/15) Carrière el Hachimia	118.42
Eau de robinet Bouira	115.5
Adjuvant superplastifiant ADVA Cast 260	1.2%

### IV.3. Résultats et discussions

#### IV.3.1. Consistance normale (EN 196-3 / NF P 15-473)

Les résultats de l'essai de consistance pour notre ciment est inscrit dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.6.** Consistance normale du ciment.

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
01	-Consistance normale.	%	25 - 30

- La consistance du ciment est de 27,5 %, cette valeur est dans la fourchette selon les exigences de la norme.

#### IV.3.2. Temps de prise (EN 196-3 / NF P 15-473)

Les résultats de l'essai du temps de prise pour notre ciment est inscrit dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.7.** Temps de prise du ciment

N°	Caractéristiques	Unité	Résultats
01	-Début de prise : (DP)	h.min	2 :30
02	-Fin de prise : (FP).	h.min	4 :30

- Le temps de début et de fin de prise est conforme à la fiche technique du produit.

### IV.3.3. Résistances mécaniques (EN 196-1)

Les résultats des essais mécaniques de prise pour notre ciment est inscrit dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.8.** Résistances mécaniques du ciment

Résistance (MPa)	7J	28J
Flexion	5.36	5.83
Compression	35.78	43.3

- La classe de résistance de ciment est conforme à la fiche technique du produit.

### IV.3.4. Equivalent de sable

Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable ( $S_1$ ) sable concassé de carrière El Hachimia est inscrit dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.9.** Equivalent de sable

Essai	M(g)	h1 (cm)	h2 (cm)	h1-h2 (cm)	ESV(%)
1	120	13.3	10.8	2.5	81.2
2	120	12.9	10.3	2.6	80.15
Moy	120	13.1	10.55	2.55	80.67

- La valeur moyenne de l'équivalent de sable visuel est de :  $ESV=80.67$ , cette valeur est comprise :  $75 < ESV < 85$  : donc le sable est propre, il convient aux bétons à haute qualité.

### IV .3.5 Masses volumiques

Le tableau suivant représente la masse volumique du ciment (essai du pycnomètre).

**Tableau IV.10.** Masses volumiques du ciment

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Masse volumique	$g/cm^3$	3.1

- La masse volumique du ciment est de  $3,1 g/cm^3$ , cette valeur est conforme à la fiche technique du ciment.

**Tableau IV.11.** Masse volumique de sable de la carrière EL HACHIMIA.

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Masse volumique.	$Kg/m^3$	1453
-Masse spécifique.	$g/cm^3$	2.29
-Teneur en eau.	%	1.40

**Tableau IV.12.** Masse volumique de sable fin de Boussaâda

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Masse volumique.	$Kg/m^3$	1322
-Masse spécifique.	$g/cm^3$	2.437
-Teneur en eau.	%	1.21

- Nous avons utilisé deux types de sable qui sont le sable de carrière EL HACHIMIA (sable grossier) et le sable de Boussaâda (sable fin).

#### IV.4. Analyse granulométrique



Figure IV.1. Essai de l’analyse granulométrique LABO LCTP BOUIRA

#### IV.4.1. Les sables

##### IV.4.1.1. Sable EL HACHIMIA 0/3

Le tableau suivant représente l’analyse granulométrique du sable de carrière d’EL HACHIMIA 0/3, la prise d’essais est de 1500g.

Tableau IV.13. Analyse granulométrique du sable de la carrière d’EL HACHIMIA 0/3.

Ouverture de tamis en mm	Refus cumulés	Refus %	Tamisats cumulés	Tamisats %	Mf
	3.15	00	0	0	
2,5	379	25	374	24.93	3.12
1,25	755	50.33	740	49.33	
0,63	986	65.73	971	64.73	
0,315	1253	83.53	1101	73.33	
0,16	1311	87.43	1240	82.66	
0,08	1370	91.33	1410	94.00	
Fond du moule	1500	100	1500	100	

**IV.4.1.2. Sable de BOUSAADA 0/1**

Le tableau suivant représente l'analyse granulométrique du sable de Boussaâda 0/1, la prise d'essai est de 2000g.

**Tableau IV.14.** Analyse granulométrique du sable de Boussaâda 0/1

Ouverture de tamis En mm	Poids (g)		Pourcentage (%)		Mf
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats	
0,63	00	00	00	100	0.64
0,315	33	33	9.42	90.58	
0.16	160	193	55.14	44.86	
0.125	34.85	227.85	65.10	34.90	
0.08	104.55	332.40	94.97	5.03	
<0.08	27.60	350	100	00	

L'analyse granulométrique montre que le module de finesse du sable S<sub>1</sub> est Mf<sub>1</sub>=3.12, donc le sable est grossier, il nécessite une correction. Pour cela nous avons utilisé le sable de Boussaâda S<sub>2</sub> avec un Mf<sub>2</sub> = 0.64.

**IV.4.1.3. Correction du sable selon d'ABRAMS**

Le tableau suivant représente l'analyse du sable corrigé selon la méthode d'ABRAMS.

**Tableau IV.15.** Sable corrigé selon la méthode d'ABRAMS

Ouverture du tamis en mm	Refus cumulé			(%)		Tamisats du mélange	Mf
	Sable01	Sable 02	Mélange				
5	0	0	00	00	00	99.08	2.67
2.5	25	20.5	00	00	20.5	75.07	
1.25	50.33	41.27	00	00	41.27	50.67	
0.63	65.73	53.89	00	00	53.89	35.27	
0.315	83.53	68.49	9.42	1.69	70.18	24.21	
0.16	87.43	71.69	55.14	9.97	81.66	10.92	
0.08	91.33	74.89	94.97	17.09	91.98	0.5	-
<0.08	100	82	100	18	100	00	-

L'analyse granulométrique ainsi que le calcul du module de finesse ( $M_f = 2.67$ ) montrent que le sable possède des caractéristiques lui permettant d'être utilisé pour la fabrication du béton.

#### IV.4.2. Les graviers

##### IV.4.2.1. Le gravier 3/8 ( $G_{3/8}$ )

Le gravier utilisé dans notre béton provient de la carrière de Oued El Bardi (Bouira), la prise d'essais est de 1600g.

Le tableau suivant représente l'analyse granulométrique du gravier  $G_{3/8}$ .

**Tableau IV.16.** Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Ouverture de tamis (mm)	Poids (g)		Pourcentage (%)	
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats
08	0	0	0	100
6.30	122	122	7.62	92.38
5	1172	1294	73.25	26.75
4	259	1553	16.18	83.82
3.15	27	1580	1.68	98.32
Fond	20	1600	1.25	98.75

- D'après les résultats de l'analyse granulométrique du tableau précédent on remarque que le gravier possède une dimension minimale de 3mm et dimension maximale inférieure à 8 mm.

##### IV.4.2.2. Le gravier 8/15 ( $G_{8/15}$ )

Le gravier utilisé dans la fabrication des bétons provient de la carrière de Oued El Bardi (Bouira), la prise d'essais est de 3000 g.

Le tableau suivant représente l'analyse granulométrique du gravier  $G_{8/15}$ .

**Tableau IV.17.** Analyse granulométrique du gravillon 8/15.

Ouverture de tamis (mm)	Poids (g)		Pourcentage (%)	
	Refus partiels	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats
16	00	00	00	100
14	759	759	25.30	74.7
12,50	395	1154	38.46	61.54
10	784	1938	64.60	35.4
08	608	2546	84.86	15.14
Fond	454	3000	100	00

- D'après les résultats de l'analyse granulométrique du tableau précédent on remarque que le gravier possède une dimension minimale de 8 mm et dimension maximale inférieure à 16 mm.

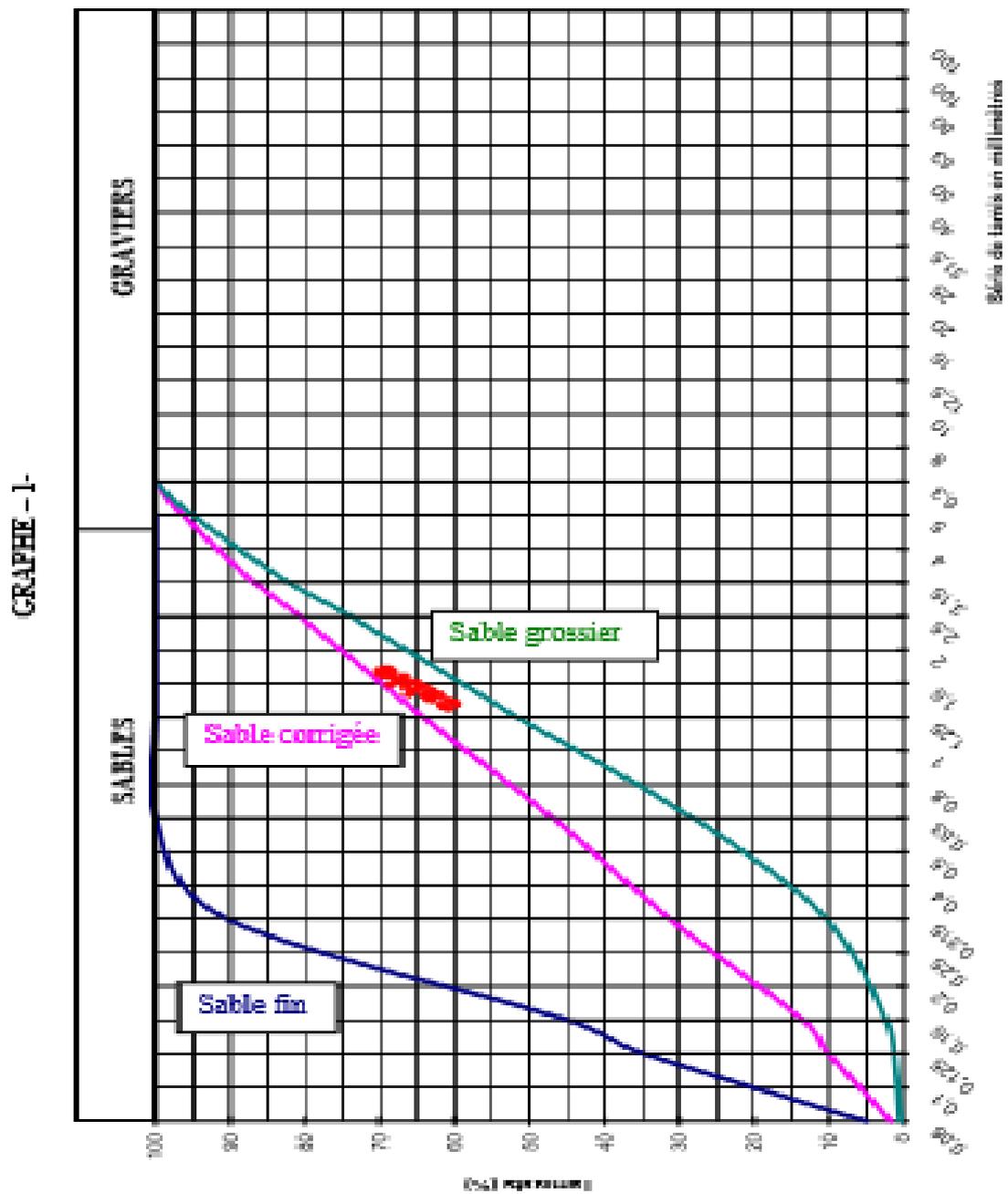


Figure IV.2. Correction du sable selon ABRAMS

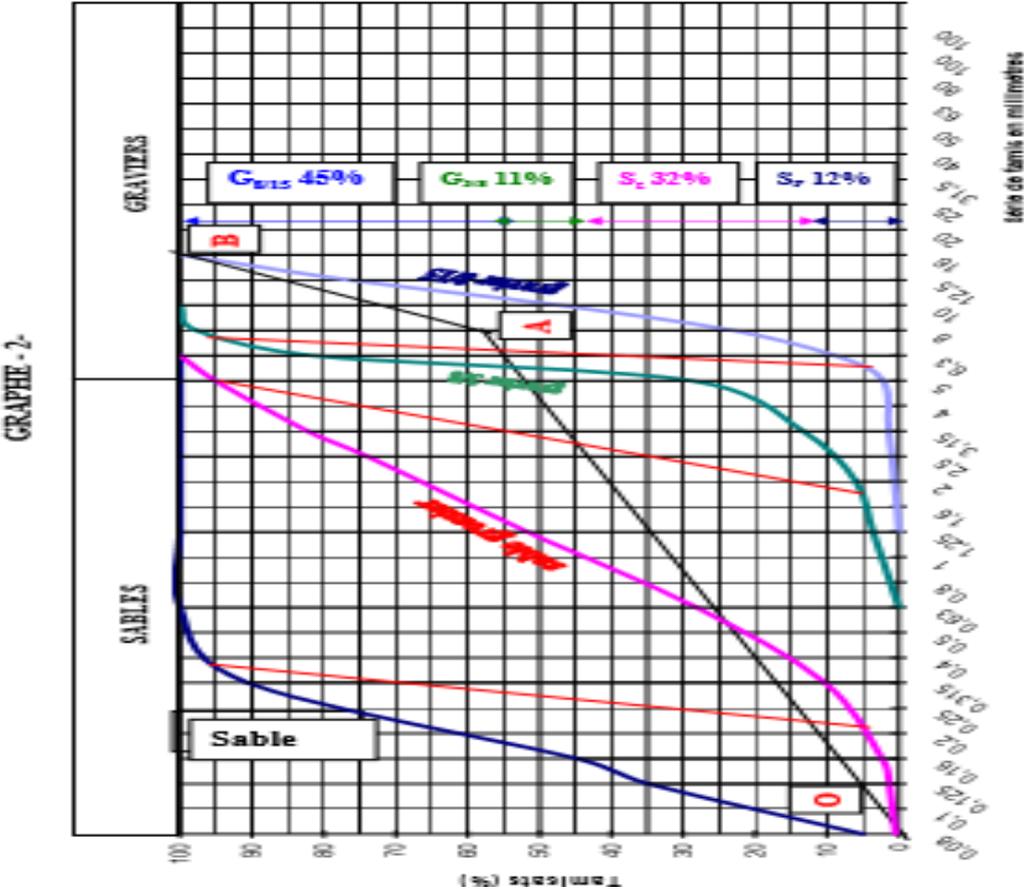


Figure IV 3. Composition du mélange selon DREUX G.

IV.5. Essai de Los Angeles : NF P18- 573



Figure IV.4. Essai de Los Angeles LABO LCTP BOUIRA

Le tableau suivant représente le résultat du coefficient Los Angeles.

**Tableau IV.18.** Caractéristiques du G8/15 de Oued El Bardi (Bouira)

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Coefficient Los Angeles.	%	29.92

#### IV.6. Essai Micro Deval : NF P 18-572



**Figure IV.5.** Essai de Micro Deval LABO LCTP BOUIRA

##### IV.6.1. Caractéristiques du G<sub>8/15</sub> de Oued El Bardi (Bouira).

Le tableau suivant représente le résultat du coefficient Micro Deval.

**Tableau IV.19.** Caractéristiques du G8/15 de Oued El Bardi (Bouira)

Caractéristiques	Unité	Résultats
-Coefficient Micro DEVAL.	%	16.80

#### IV.7. Interprétation des résultats

L'analyse granulométrique du gravier (8/15) ainsi que leurs résistances aux choc dynamique et l'usure par frottement ont montré que le gravier possède de bonnes caractéristiques qui permet son utilisation pour la fabrication des bétons.

#### IV.8. Formulation du béton témoin par la méthode de DREUX GORISSE

La formulation de la composition du béton e référence (béton ordinaire) a été faite selon la méthode de « DREUX GORISSE » basée sur l'analyse granulométrique (sable et différentes fractions de gravier).

Le résultat de la formulation de Dreux Gorisse est la suivante :

Les dosages en matériaux secs seront donc en  $\text{kg/m}^3$  :

- Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$ .
- Sable 1 =  $2.43 \times 80.04 = 194.5 \text{ kg/m}^3$
- Sable 2 =  $2.29 \times 213.44 = 488.78 \text{ kg/m}^3$
- Gravier (3/8) =  $2.69 \times 73.37 = 197.36 \text{ kg/m}^3$
- Gravier (8/15) =  $2.59 \times 300.15 = 777.38 \text{ kg/m}^3$
- Eau total =  $105 \text{ l/m}^3$
- Adjuvant 1.2%

La densité théorique du béton frais =  $2113.03 \text{ kg/m}^3$

#### IV.8.1 Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le béton ordinaire (béton témoin).

**Tableau IV.20.** Essais sur béton frais (béton témoins dosé à  $350 \text{ kg/m}^3$ ).

Essais	Boite en L	Stabilité au tamis (%)	Affaissement (cm)	E/C
Méthode de Dreux	/	7 %	Affaissement 8cm	0.3

#### IV.8.2 Essais sur béton durci

##### IV.8.2.1 Résistance à la compression

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression réalisée sur le béton ordinaire (béton témoin).

**Tableau IV.21.** Essais sur béton durci résistance à la compression (béton témoins dosé à  $350 \text{ kg/m}^3$ ).

N° 01	Béton durci dosé à $350 \text{ kg/m}^3$		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
Béton	15.112	27.3	32.7

### IV.8.2.2 Résistance à la traction par fendage

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage réalisés sur le béton ordinaire (béton témoin).

**Tableau IV.22.** Essais sur béton durci résistance à la traction (béton témoins dosé à  $350\text{kg/m}^3$ ).

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance à la traction par fendage (MPa)	
		7J	28J
Béton de référence	15.07	2.37	3.76

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus pour le béton témoin (béton ordinaire) montrent que la valeur de l'affaissement est de 8 cm, c'est-à-dire notre béton est plastique. La résistance mécanique à la compression à 28 jours est de 32,7 MPa, ce béton est destiné pour la réalisation des structures de génie civil (bâtiment).

### IV.9. Formulation des bétons autoplaçants par la méthode JAPONAISE

La formulation des bétons autoplaçants a été faite selon la méthode « JAPONAISE » basée sur différents dosages d'additifs.

Les dosages en matériaux secs seront donc en  $\text{kg/m}^3$  :

#### IV.9.1. Les masses des constituants pour $1\text{ m}^3$

- Eau =  $115.5\text{ l/m}^3$

- Ciment =  $350\text{ Kg/m}^3$

- Fines =  $35\text{ Kg /m}^3$

- Gravier =  $355.27\text{ l/m}^3$

$G_{3/8} = \frac{2}{3} = 236.84\text{ l/m}^3 = 637\text{kg/m}^3$

$G_{8/15} = \frac{1}{3} = 118.42\text{ l /m}^3 = 306,71\text{ kg/m}^3$

- Sable =  $394.73\text{ l/m}^3$

SF =  $71.05\text{ l/m}^3 = 172.65\text{ kg/m}^3$

$S_G = 323.67\text{ l/m}^3 = 741.265\text{ kg/ m}^3$

- La densité théorique du béton frais =  $2358.11\text{ kg/m}^3$

Dans notre essai on fixe le dosage du superplastifiant à 1.2%

#### IV.9.2. BAP formulé avec ajout de 10% de fumée de silice

##### IV.9.2.1. Essais sur béton frais

Les figures suivantes représentent respectivement l'essai d'étalement, l'essai de la boîte en L et l'essai de la stabilité au tamis réaliser sur le BAP avec 10% de fumée de silice.



**Figure IV.6.** Essai d'étalement BAP (dosage 10% fumé de silice)



**Figure IV.7.** Essai boîte en L BAP (dosage 10% fumé de silice)



**Figure IV.8.** Essais de la stabilité au tamis BAP (dosage 10% fumé de silice)

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 10% de fumée de silice.

**Tableau IV.23.** Essais sur béton frais (BAP : dosage 10% fumé de silice).

	Boite en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 10% fumé de silice)	$H_2/H_1=0.87$	8.75%	75	0.3

#### IV.9.2.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression réalisés sur le BAP avec 10% de fumée de silice.

**Tableau IV.24.** Résistance à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 10% de fumé de silice)	15.198	26.3	33.2

La figure suivante représente la machine utilisée pour détermination des résistances mécaniques des bétons élaborés.



**Figure IV.9.** Résistance à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice)

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage réalisés sur le BAP avec 10% de fumée de silice.

**Tableau IV.25.** Résistance à la traction par fendage (BAP : dosage 10% fumé de silice).

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance à la traction par fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 10% de fumé de silice)	<b>15.22</b>	<b>2.87</b>	<b>3.76</b>

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus pour le BAP avec 10% de fumée de silice montrent que les valeurs de l'étalement, de l'essai de la boîte en L sont conformes aux exigences de la AFGC pour les BAP. La résistance mécanique à la compression à 28 jours qui est de 32,2 MPa, elle est égale à celle du béton ordinaire.

### IV.9.3. BAP formulé avec ajout de 10% de fillers calcaire

#### IV.9.3.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 10% de fillers calcaire.

**Tableau IV.26.** Essais sur béton frais Méthode Japonaise (dosage 10% fillers de calcaires)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( Cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 10% de fillers de calcaires)	<b>H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>=0.95</b>	<b>10.75%</b>	<b>95</b>	<b>0.3</b>

La figure suivante représente l'essai d'étalement réalisé sur un BAP avec un dosage de 10% de fillers calcaire.



Figure IV.10. Essais d'étalement BAP (dosage 10% fillers de calcaires)

#### IV.9.3.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP (dosage 10% fillers de calcaires).

Tableau IV.27. Résistance à la compression BAP (dosage 10% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 10% de fillers de calcaires)	<b>14.09</b>	<b>26.7</b>	<b>35.2</b>

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP (dosage 10% fillers de calcaires).

Tableau IV.28. Résistance à la traction BAP (dosage 10% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 10% de fillers de calcaires)	<b>14.23</b>	<b>2.67</b>	<b>3.77</b>

- **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus pour le BAP avec 10% de fillers calcaire montrent que la valeur de, de l'essai de la boîte en L sont conformes aux exigences de la AFGC pour les BAP, pour l'essai l'étalement nous avons obtenu une valeur de 95 cm, nous avons remarqué une légère ségrégation entre les granulats et la pâte cimentaire. La résistance mécanique à la compression à 28 jours qui est de 35,2 MPa, elle est supérieure à celle du béton ordinaire et celle du BAP avec 10% de fumée de silice.

#### IV.9.4. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 10% de fillers de calcaires et 10% de fumée de silice

##### IV.9.4.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP : dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires).

**Tableau IV.29.** Essais sur béton frais (BAP : dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaire)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( Cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 10% de fillers de calcaires et 10% de fumé de silice)	$H_2/H_1=0.85$	9.73%	90	0.275

##### IV.9.4.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP : dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires).

**Tableau IV.30.** Essais à la compression BAP (dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage 10% de fillers de calcaires et 10% de fumé de silice)	14.67	31.3	44.58

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP : dosage 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires).

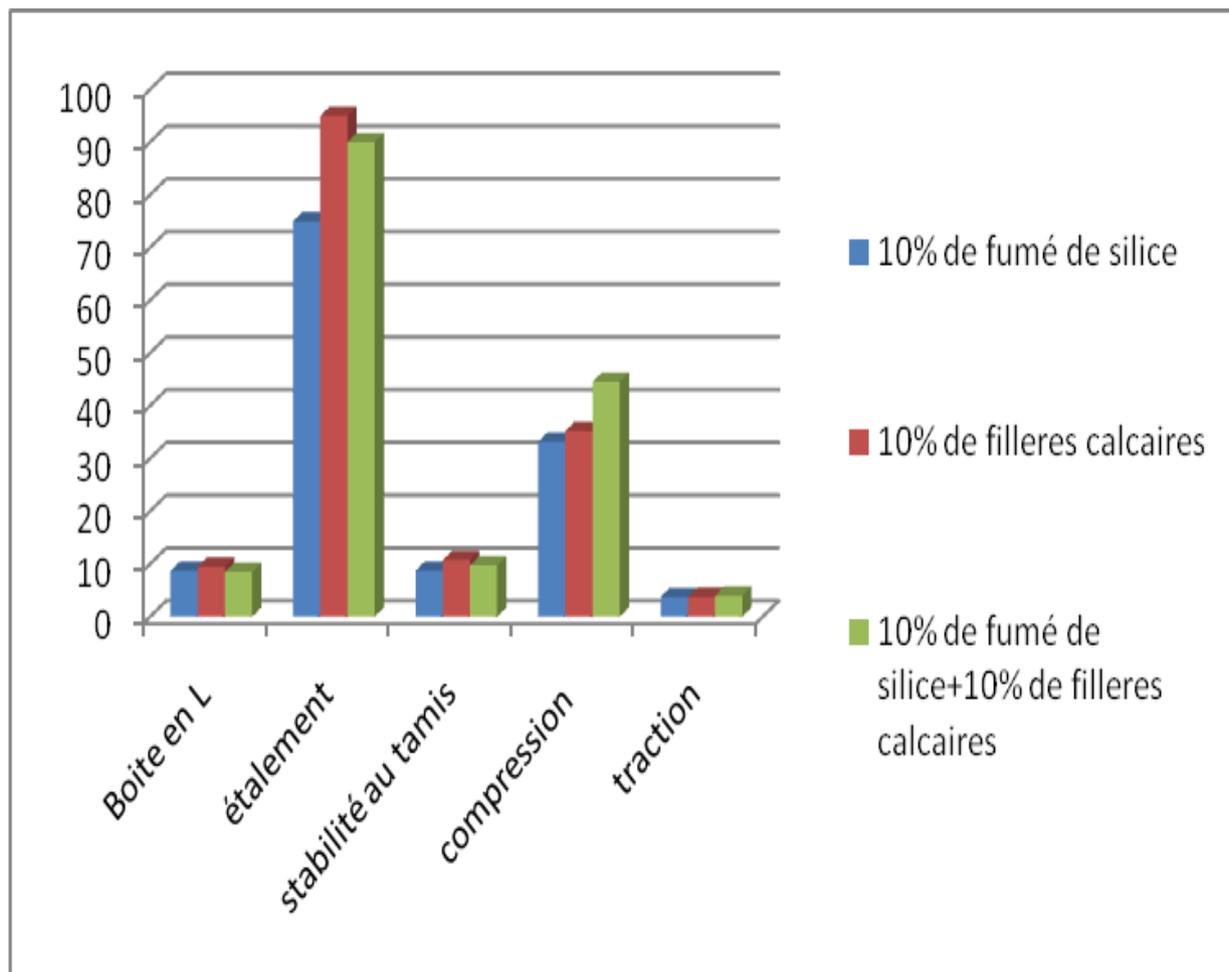
**Tableau IV.31.** Essais à la traction BAP (dosage 10% fumé de silice+10% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage 10% de fillers de calcaires et 10% de fumé de silice)	<b>14.55</b>	<b>3.43</b>	<b>3.98</b>

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus pour le BAP avec 10% fumé de silice+10% fillers de calcaires montrent que les valeurs de l'étalement, de l'essai de la boîte en L sont conformes aux exigences de la AFGC pour les BAP. La résistance mécanique à la compression à 28 jours qui est de 44,58 MPa, elle est supérieure à celles du béton ordinaire, du BAP avec 10% de fumée de silice et du BAP avec 10% de fillers calcaire.

La figure suivante représente l'histogramme qui résume résultats obtenus pour les bétons autoplaçants : BAP 10% fumée de silice, BAP 10% de fillers calcaire et BAP 10% fumé de silice+10% fillers de calcaires.



**Figure IV.11.** Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents aditifs à 10%

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L, la stabilité au tamis et la traction par fendage les trois types de BAP (10% de fumée de silice, BAP 10% de fillers calcaire et le BAP 10% fumé de silice+10% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches. Par contre pour l'essai d'étalement les BAP : 10% de fillers calcaire et 10% fumé de silice+10% fillers de calcaire présentent des valeurs plus élevées que celle du BAP 10% de fumée de silice. Pour la résistance à la compression c'est le BAP 10% fumé de silice+10% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.

### IV.9.5. BAP formulé avec ajout de 20% de fumée de silice

#### IV.9.5.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 20% fumé de silice.

**Tableau IV.32.** Essais sur béton frais Méthode Japonaise (dosage 20% fumé de silice)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement (cm)	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 20% fumé de silice)	$H_2/H_1=0.80$	7.45%	72	0.275

#### IV.9.5.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 20% fumé de silice.

**Tableau IV.33.** Essais à la compression BAP (dosage 20% fumé de silice)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 20% de fumé de silice)	14.91	26.6	34.23

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec 20% fumé de silice.

**Tableau IV.34.** Essais à la traction BAP (dosage 20% fumé de silice)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 20% de fumé de silice)	14.87	2.78	3.78

#### IV.9.6. BAP formulé avec ajout de 20% de fillers de calcaires

##### IV.9.6.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 20% de fillers calcaire.

**Tableau IV.35.** Essais sur béton frais (dosage 20% fillers de calcaires)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement (cm)	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 20% de fillers de calcaires)	$H_2/H_1=0.90$	10.23%	93	0.275

##### IV.9.6.2. Essais sur béton durci

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 20% de fillers calcaire.

- **Résistance à la compression**

**Tableau IV.36.** Essais à la compression BAP (dosage 20% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 20% de fillers de calcaires)	15.30	28.6	39.89

- **Résistance a la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec 20% de fillers calcaire.

**Tableau IV.37.** Essais à la traction BAP (dosage 20% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 20% de fillers de calcaires)	15.09	2.84	4.13

### IV.9.7. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 20% de fillers de calcaires et 20% de fumée de silice

#### IV.9.7.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires.

**Tableau IV.38.** Essais sur béton frais BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( Cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 20% de fillers de calcaires et 20% de fumé de silice)	$H_2/H_1=0.80$	9.00%	89	0.236

#### IV.9.7.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires.

**Tableau IV.39.** Essais à la compression BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage 20% de fillers de calcaires et 20% de fumé de silice)	14.87	34.32	46.89

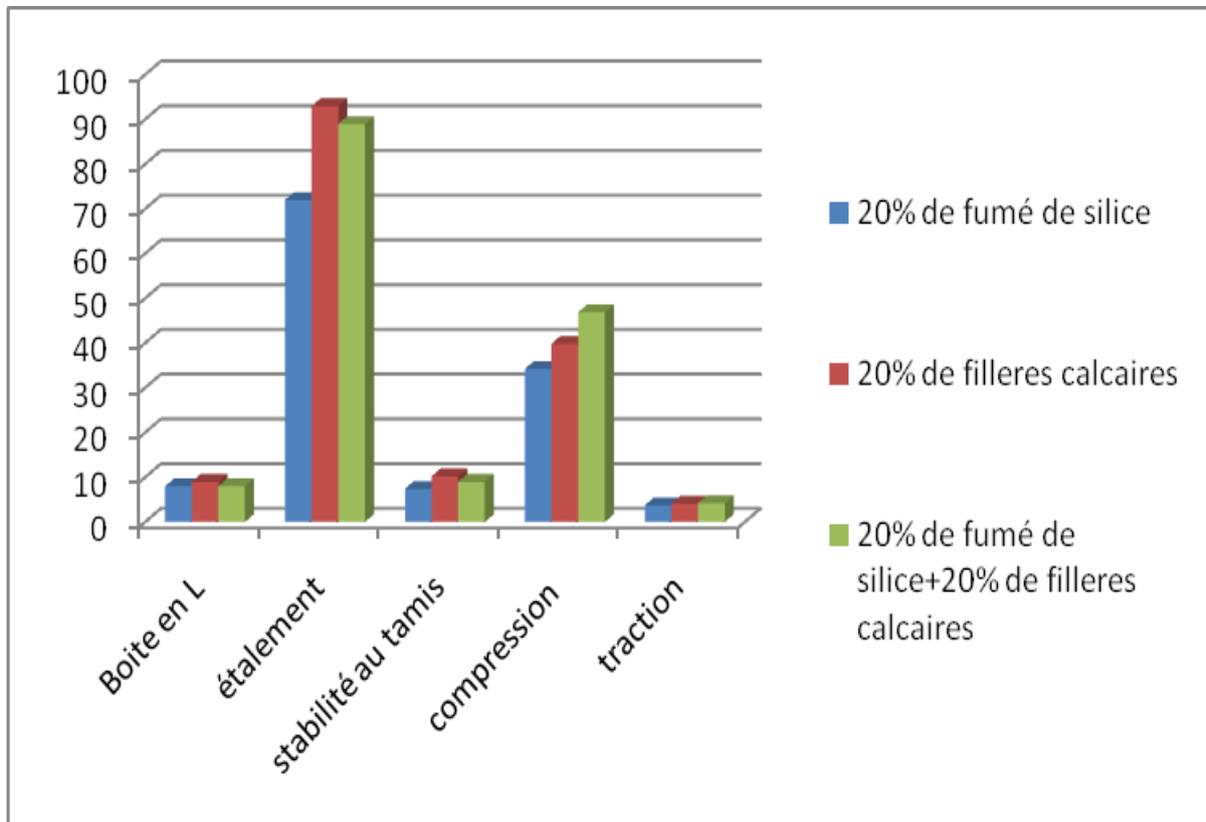
- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires.

**Tableau IV.40.** Essais à la traction BAP (dosage 20% fumé de silice+20% fillers de calcaires)

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance à la traction par fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage 20% de fillers de calcaires et 20% de fumé de silice)	14.95	3.64	4.23

La figure suivante représente l’histogramme qui résume résultats obtenus pour les bétons autoplaçants : BAP 20% fumée de silice, BAP 20% de fillers calcaire et BAP 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires.



**Figure IV.12.** Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents aditifs à 20%

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L, la stabilité au tamis et la traction par fendage les trois types de de BAP (20% de fumée de silice, BAP 20% de fillers calcaire et le BAP 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches. Par contre pour l'essai d'étalement les BAP : 20% de fillers calcaire et 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaire présentent des valeurs plus élevées que celle du BAP 20% de fumée de silice. Pour la résistance à la compression c'est le BAP 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.

#### IV.9.8. BAP formulé avec ajout de 30% de fumée de silice

##### IV.9.8.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 30% fumé de silice.

**Tableau IV.41.** Essais sur béton frais BAP (dosage 30% fumé de silice)

	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( Cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 30% fumé de silice)	$H_2/H_1=0.73$	5.20%	67	0.254

##### IV.9.8.2. Essais sur béton durci

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 30% fumé de silice.

**Tableau IV.42.** Essais à la compression BAP (dosage 30% fumé de silice)

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 30% de fumé de silice)	14.12	34.2	43.14

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec 30% fumé de silice.

**Tableau IV.43.** Essais à la traction BAP (dosage 30% fumé de silice)

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 30% de fumé de silice)	<b>14.18</b>	<b>3.54</b>	<b>4.20</b>

**IV.9.9. BAP formulé avec ajout de 30% de fumée de fillers calcaires**

**IV.9.9.1. Essais sur béton frais**

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 30% fillers calcaire.

**Tableau IV.44.** Essais sur béton frais BAP (dosage 30% fillers de calcaires)

	Boite en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( Cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 30% de fillers de calcaires)	<b>H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>=0.88</b>	<b>10.12%</b>	<b>90</b>	<b>0.254</b>

**IV.9.9.2. Essais sur béton durci**

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 30% de fillers calcaire.

**Tableau IV.45.** Essais à la compression (dosage 30% fillers de calcaires)

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 30% de fillers de calcaires)	<b>15.63</b>	<b>38.65</b>	<b>51.90</b>

- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec 30% de fillers calcaire.

**Tableau IV.46.** Essais à la traction (dosage 30% fillers de calcaires)

N°	Moy poids Kg	Béton durci	
		Résistance à la traction par fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage à 30% de fillers de calcaires)	<b>15.33</b>	<b>3.67</b>	<b>4.61</b>

#### IV.9.10. BAP formulé avec un mélange d'ajout de 30% de fillers de calcaires et 30% de fumée de silice.

La figure suivante représente le malaxage du mélange du BAP avec un dosage de 30% fillers de calcaires + 30% de fumé de silice.



**Figure IV.13.** Malaxage du mélange (dosage 30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice)

#### IV.9.10.1. Essais sur béton frais

Le tableau suivant représente les résultats des essais à l'état frais réalisés sur le BAP avec 30% fillers calcaires + 30% de fumé de silice.

**Tableau IV.47.** Essais sur béton frais BAP (30% fillers calcaires + 30% de fumé de silice).

	Boite en L	Stabilité au tamis (%)	Etalement ( cm )	E/C+F
Méthode Japonaise (dosage 30% de fillers calcaires et 30% de fumé de silice)	<b>H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>=0.79</b>	<b>6.2%</b>	<b>78</b>	<b>0.206</b>

**IV.9.10.2. Essais sur béton durci**

- **Résistance à la compression**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la compression du BAP avec 30% fillers calcaires + 30% de fumé de silice.

**Tableau IV.48.** Essais à la compression BAP (30% fillers calcaires+30% de fumé de silice).

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance à la compression (MPa)	
		7J	28J
(dosage 30% de fillers de calcaires et 30% de fumé de silice)	<b>14.68</b>	<b>46.45</b>	<b>66.68</b>

La figure suivante représente l'aspect des éprouvettes du mélange du BAP avec un dosage de 30% fillers de calcaires + 30% de fumé de silice.



**Figure IV.14.** Aspect des éprouvettes du mélange BAP (dosage 30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice).

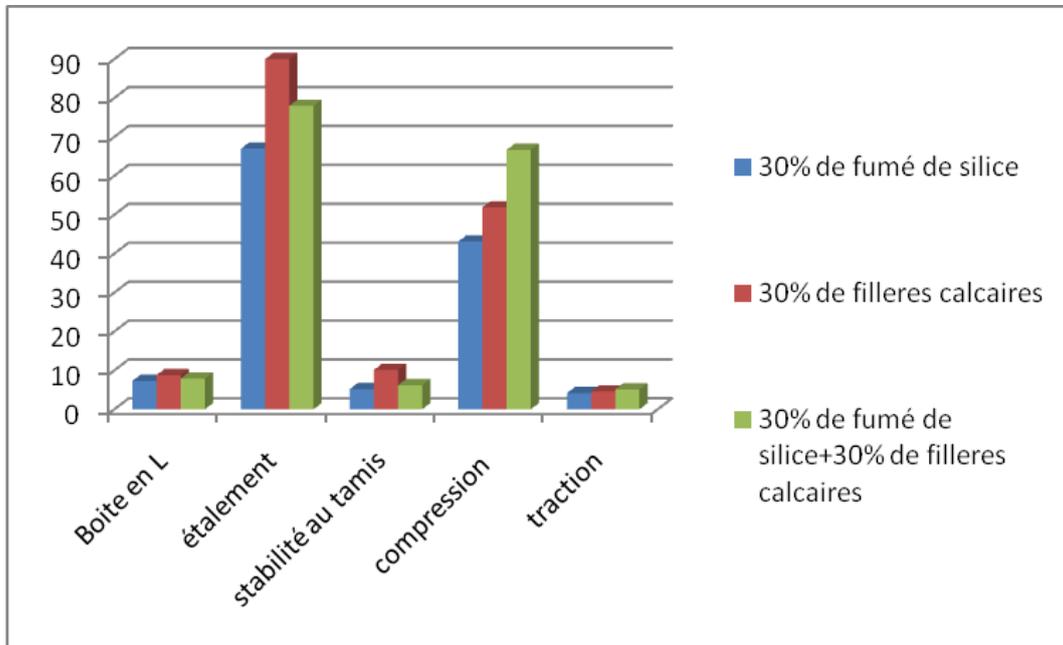
- **Résistance à la traction par fendage**

Le tableau suivant représente les résultats de la résistance à la traction par fendage du BAP avec un dosage de 30% fillers de calcaires + 30% de fumé de silice.

**Tableau IV.49.** Essais à la traction BAP (30% fillers de calcaires+30% de fumé de silice).

N°	Béton durci		
	Moy poids Kg	Résistance au fendage (MPa)	
		7J	28J
(dosage 30% de fillers de calcaires et 30% de fumé de silice)	<b>14.75</b>	<b>3.99</b>	<b>5.13</b>

La figure suivante représente l'historgramme qui résume les résultats obtenus pour les bétons autoplaçants : BAP 30% fumée de silice, BAP 30% de fillers calcaire et BAP 30% fumé de silice + 30% fillers de calcaires.



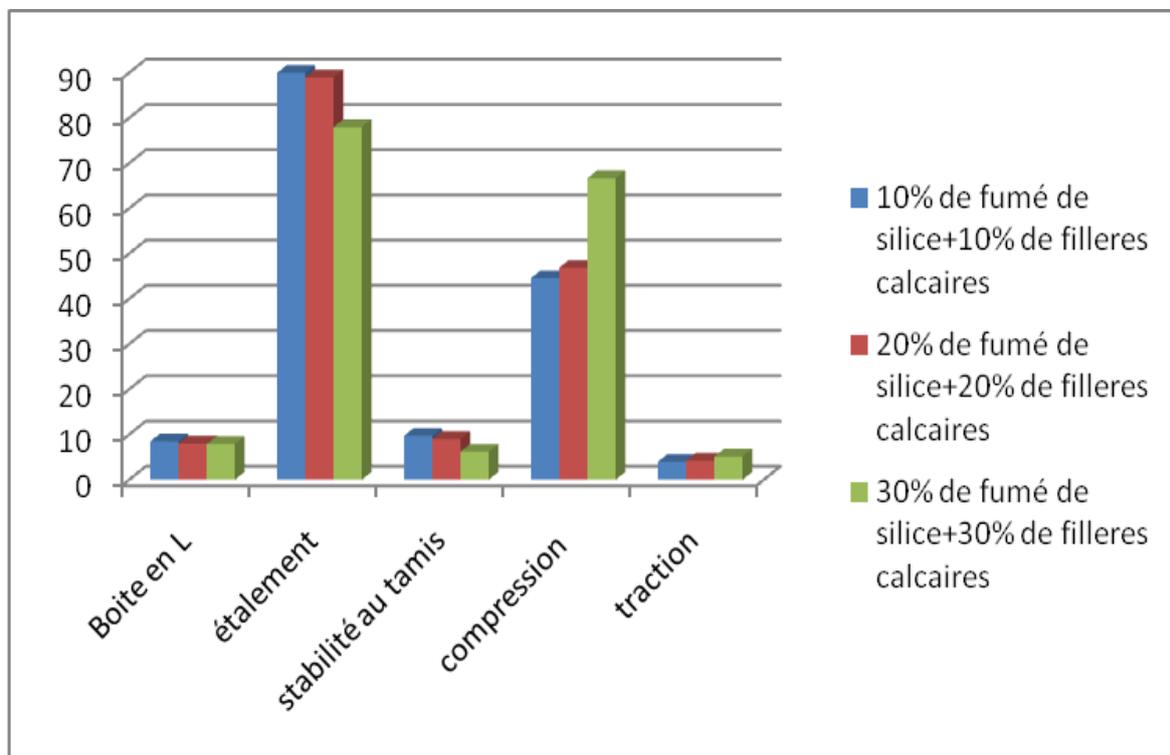
**Figure IV.15.** Résultats comparatifs des essais sur BAP à différents additifs à 30%.

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L et la traction par fendage les trois types de de BAP (BAP 30% de fumée de silice, BAP 30% de fillers calcaire et le BAP 30% fumé de silice + 20% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches. Par contre pour l'essai d'étalement et la stabilité au tamis,

le BAP : 30% de fillers calcaire présente des valeurs plus élevées que celles des BAP 30% de fumée de silice et le BAP 30% fumé de silice + 30% fillers de calcaire. La résistance à la compression c'est le BAP 30% fumé de silice+30% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.

La figure suivante représente l'histogramme qui résume les résultats obtenus pour les bétons autoplaçants qui sont formulés avec un mélange d'additif (fumée de silice + fillers calcaire).



**Figure IV.16.** Comparaison des mélanges à différents dosages d'additifs.

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L, étalement, stabilité au tamis et la traction par fendage des trois types de de BAP (BAP 10% de fumée de silice + 10% de fillers calcaire, BAP 20% de fumée de silice + 20% de fillers calcaire et le BAP 30% fumé de silice + 30% fillers de calcaires) présentent des résultats proches et conforme aux recommandations de l'AFGC. La résistance à la compression est proportionnelle au dosage des additifs, c'est le BAP 30% fumé de silice+30% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin. Cette augmentation de la résistance peut être expliquer par la présence des fines particules (fumée de silice + fillers calcaire) qui présentent une finesse élevée, elles pénètrent dans les pores et augmentent la compacité du béton, ce qui provoque une augmentation de la résistance mécanique.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

---

### Conclusion Générale

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire constituent une contribution à l'étude de l'effet des additions minérales (fumée de silice et fillers calcaire) sur les caractéristiques rhéologiques (état frais) et les propriétés mécaniques (état durci) des bétons autoplaçants avec des dosages de 10%, 20% et 30% par rapport au poids du ciment.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- **Le béton ordinaire :** Les résultats obtenus pour le béton témoin (béton ordinaire) montrent que la valeur de l'affaissement est de 8 cm, c'est-à-dire notre béton est plastique. La résistance mécanique à la compression à 28 jours est de 32,7 MPa.
- **Le BAP avec 10% :** D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L, la stabilité au tamis et la traction par fendage les trois types de de BAP (10% de fumée de silice, BAP 10% de fillers calcaire et le BAP 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches. Par contre pour l'essai d'étalement les BAP : 10% de fillers calcaire et 10% fumé de silice+10% fillers de calcaire présentent des plus élevé que celle du BAP 10% de fumée de silice. La résistance à la compression c'est le BAP 10% fumé de silice + 10% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.
- **Le BAP avec 20% :** D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L, la stabilité au tamis et la traction par fendage les trois types de de BAP (20% de fumée de silice, BAP 20% de fillers calcaire et le BAP 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches. Par contre pour l'essai d'étalement les BAP : 20% de fillers calcaire et 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaire présentent des plus élevé que celle du BAP 20% de fumée de silice. La résistance à la compression c'est le BAP 20% fumé de silice + 20% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.
- **Le BAP avec 30% :** D'après les résultats comparatifs sur les essais réalisés sur les BAP, on remarque que pour les essais de la boîte en L et la traction par fendage les trois types de de BAP (BAP 30% de fumée de silice, BAP 30% de fillers calcaire et le BAP 30% fumé de silice + 20% fillers de calcaires) présentent des résultats très proches.

Par contre pour l'essai d'étalement et la stabilité au tamis, le BAP : 30% de fillers calcaire présente des valeurs plus élevées que celles des BAP 30% de fumée de silice et le BAP 30% fumé de silice + 30% fillers de calcaire. La résistance à la compression c'est le BAP 30%

## Conclusion générale

---

fumé de silice + 30% fillers de calcaire qui présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres BAP et au béton témoin.

- La résistance à la compression à 28 jours des BAP élaborés est inversement proportionnelle avec le rapport E/L.
- Les BAP avec fillers calcaires présentent des résistances mécaniques à la compression à 28 jours plus élevées par rapport aux BAP avec le même dosage de fumée de silice.
- La densité des BAP formulé avec des fillers calcaires est plus élevée que celles des BAP élaborés avec le même dosage de fumée de silice, cela peut être expliqué par le phénomène de ressuage qui se manifeste dans les BAP avec fillers calcaires.

Les résultats de notre étude montrent que le BAP 30% fumé de silice+30% fillers de calcaire présente de bonnes caractéristiques à l'état frais et une valeur la plus élevée de la résistance à la compression par rapport aux autres BAP et au béton témoin. Cette augmentation de la résistance peut être expliquée par la présence des fines particules (fumée de silice + fillers calcaire) qui présentent une finesse élevée, elles pénètrent dans les pores et augmentent la compacité du béton, ce qui provoque une augmentation de la résistance mécanique.

En perspectives, il serait intéressant de compléter cette étude avec d'autres caractérisations, tel que la DRX et le MEB pour voir l'état de la microstructure des bétons autoplaçants réalisés.

# REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

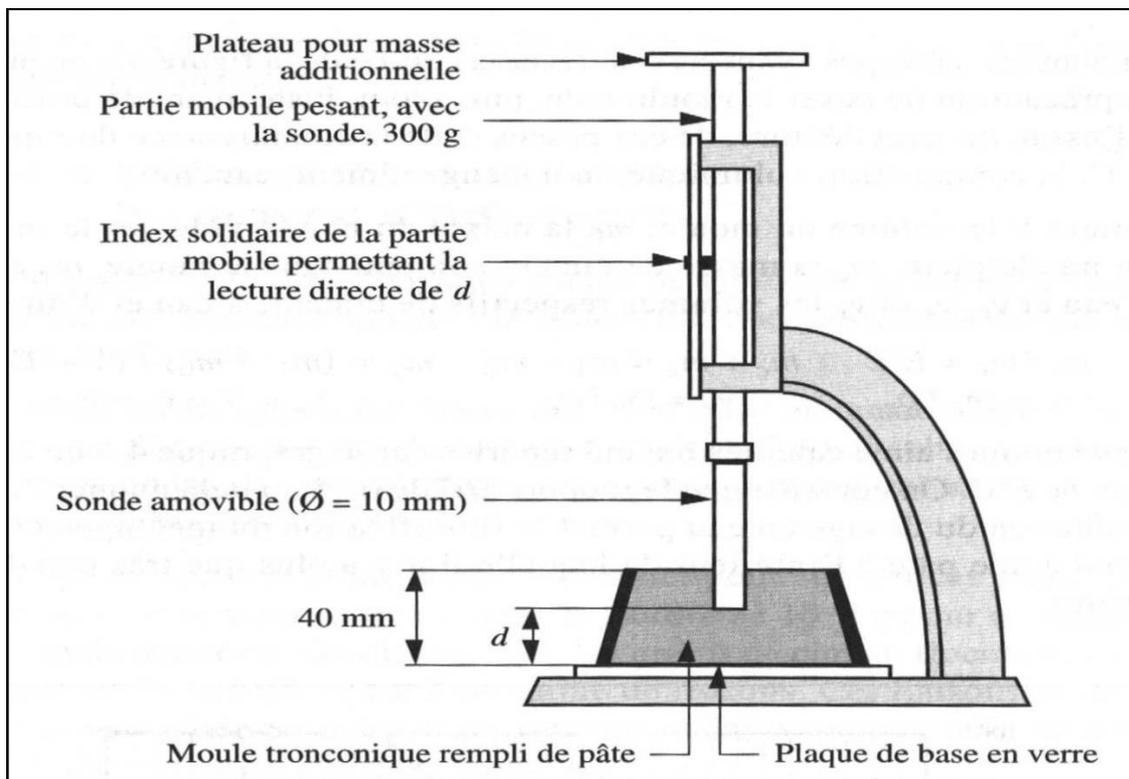
## Références bibliographiques

---

- [1] **DREUX. G.** «Nouveau guide du béton». **Ed, Eyrolles, PARIS, (1998).**
- [2] **Centre d'information sur le ciment et ses applications**, « les bétons aux nouvelles performances, chapitre 03 » fiche technique N°G11.
- [3] **F.Gabrysiak**, « Matériaux ; les bétons chapitre 04 »
- [4] **A. ADAM** « Guide pratique pour l'emploi des ciments » **Editions S.D.T.B.T.P**
- [5] **Cerilh 1964**, « Influence des accélérateurs et des retardateurs sur certains propriétés des ciments », **P. T N°170.**
- [6] **Paco Diederich, Thèse doctorat** « contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaire sur le comportement auto laçant du béton » **UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER.**
- [7] **R.DUPAIN-R.LANCHON-J.C.SAINT ARROMAN** «Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais au laboratoire, granulats, sols ciments et bétons »
- [8] **BEN AICHA Mouhcine, Thèse doctorat**, « Formulation des différentes bétons : **BAP, BHP et BFUP**) à haute teneur en additions minérales, optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons » **Université'Aix Marseille**
- [9] **M.VENUAT** « Adjuvants et traitement des mortiers et bétons »
- [10] **R.SIERRA** « les adjuvants du béton utilisés en technique routière, construction ».
- [11] **FRANÇOIS CUSSIGH** « les bétons autoplaçants BAP » Ingénieur Vinci construction,
- [12] **BEN SEBTI SALAH EDDINE** « Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux », **Thèse doctorat spécialité Matériaux.**
- [13] **R.BERTRANDY** « Influence des fillers calcaires sur la maniabilité des bétons » **anales de L'I.T.B.T.PN°328** Mai 1975.
- [14] **A.JOISEL.** « Composition des bétons Hydrauliques » **Annales I.T.B.T.P N°58,**
- [15] **J.FAURY**, « **le béton** » Editions dunod.
- [16] **G.DREUX** « Contribution à l'étude de l'influence de la propreté du sable sur les qualités du béton » **anales I.T.B.T.P N° 198. juin 1964.**
- [17] **R. VALETTE**, « Manuel de composition des bétons » **Edition Eyrolles.**

# ANNEXES

## 1. CONSISTANCE NORMALISEE (EN 196-3 / NF P 15-473)



Trouver le rapport E/C pour lequel la sonde de consistance s'arrête à :

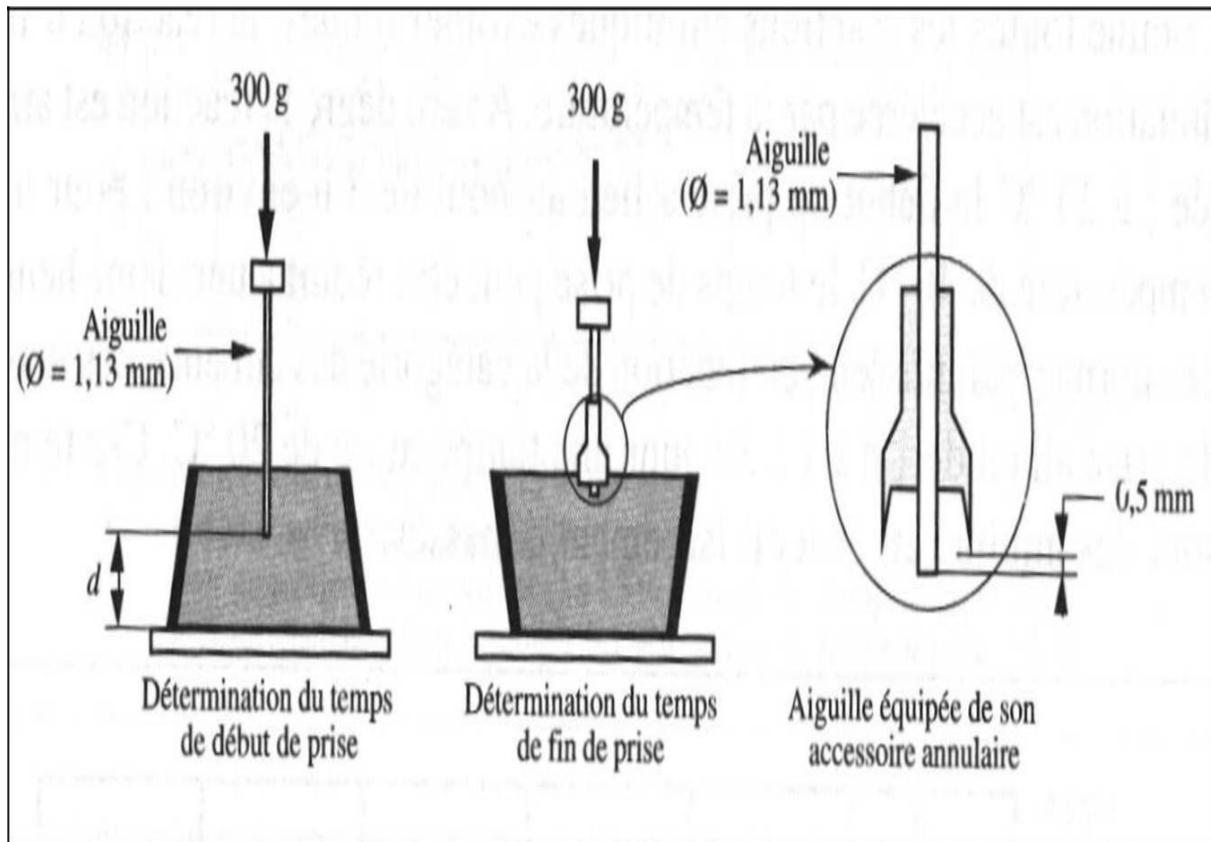
$$d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$$

La demande est de 30% par rapport à la masse du ciment.

## 2. TEMPS DE PRISE (EN 196-3 / NF P 15-473)

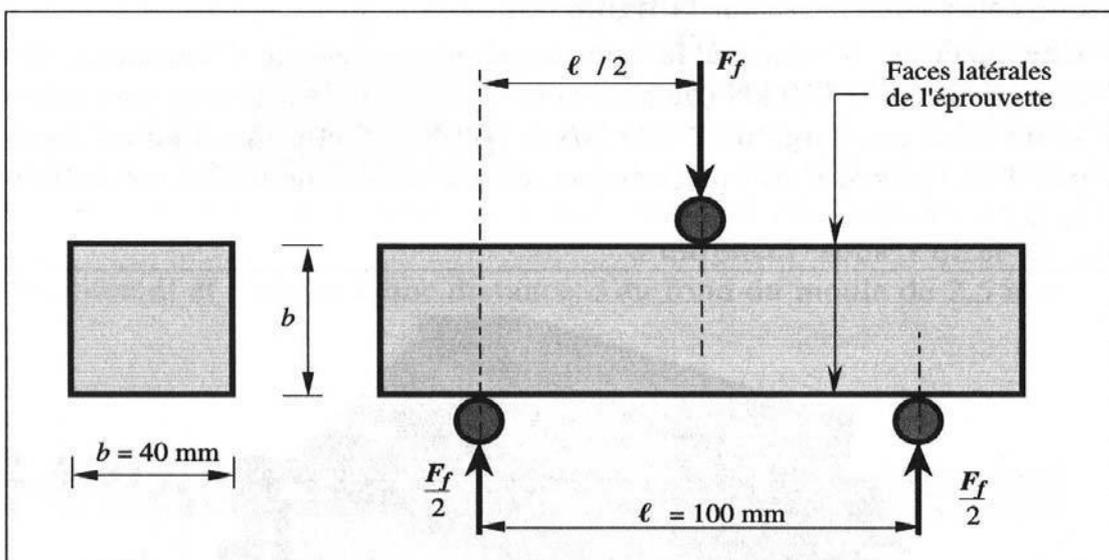
On fait la mesure sur une pâte à consistance normalisée. Le temps de début de prise correspond au temps au bout duquel l'aiguille de Vicat s'arrête à  $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$  du fond.

On retourne le moule tronconique. Le temps de fin de prise correspond au temps au bout duquel l'aiguille de Vicat munie de son accessoire annulaire ne s'enfonce plus que de 0,5 mm dans la pâte.



### 3. RESISTANCES MECANIQUES (EN 196-1)

Mesures sur 3 éprouvettes cylindriques  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$  conservées sous eau à  $20^\circ\text{C}$  jusqu'à l'échéance de mesure.

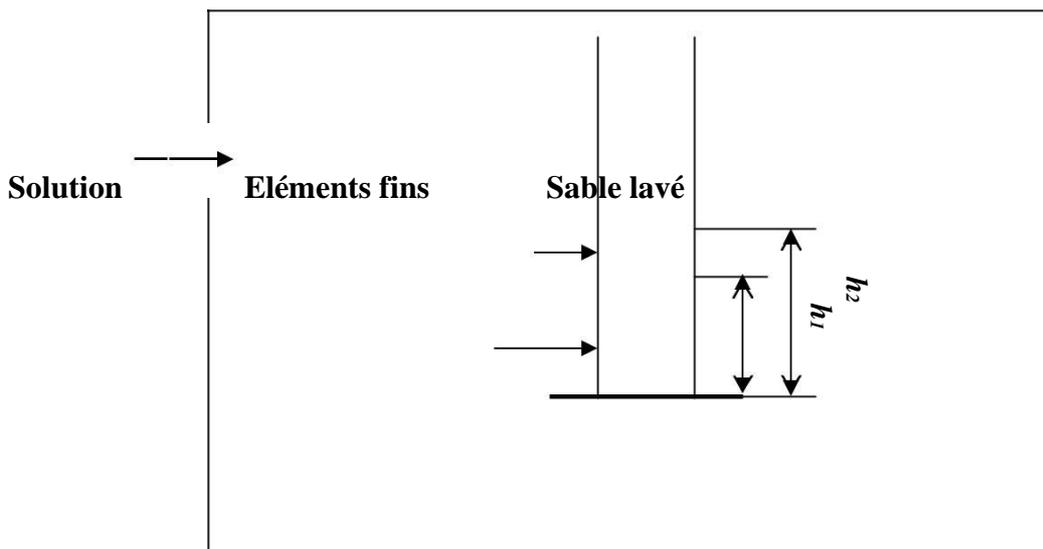


#### 4. EQUIVALENT DE SABLE

**Principe :** L'essai est fait sur un « sable », on utilise que la fonction des granulats qui traverse le tamis de 5mm. Laver l'échantillon, dans des conditions normalisées, et laisser repasser. Après le temps prescrit, mesurer figure : 07

- La hauteur  $h_1$  sable propre + éléments fins.
- La hauteur  $h_2$  sable propre seulement.

Par définition, l'équivalent de sable est :  $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$



**On distingue :**

L'équivalent de sable visuel (ESV).

L'équivalent de sable proprement dit (ES), suivant que la hauteur de sable  $h_2$  est mesurée à vue (pour ESV) ou sons de poids d'un piston (pour ES).

**Produits utilisé pour le lavage du sable lors de l'essai :**

Composition (pour 1L solution) :

111 ± 1g de chlorure de calcium.

480 ± 5g de glycérine.

12 à 13g de solution aqueuse de formaldéhyde.

**Solution lavante :** Verser 125 cm<sup>3</sup> de solution dans un récipient, et compléter à 5L avec de l'eau. Avec de l'eau totale, cette solution ne peut être conservée plus de 2 à 4 semaines.

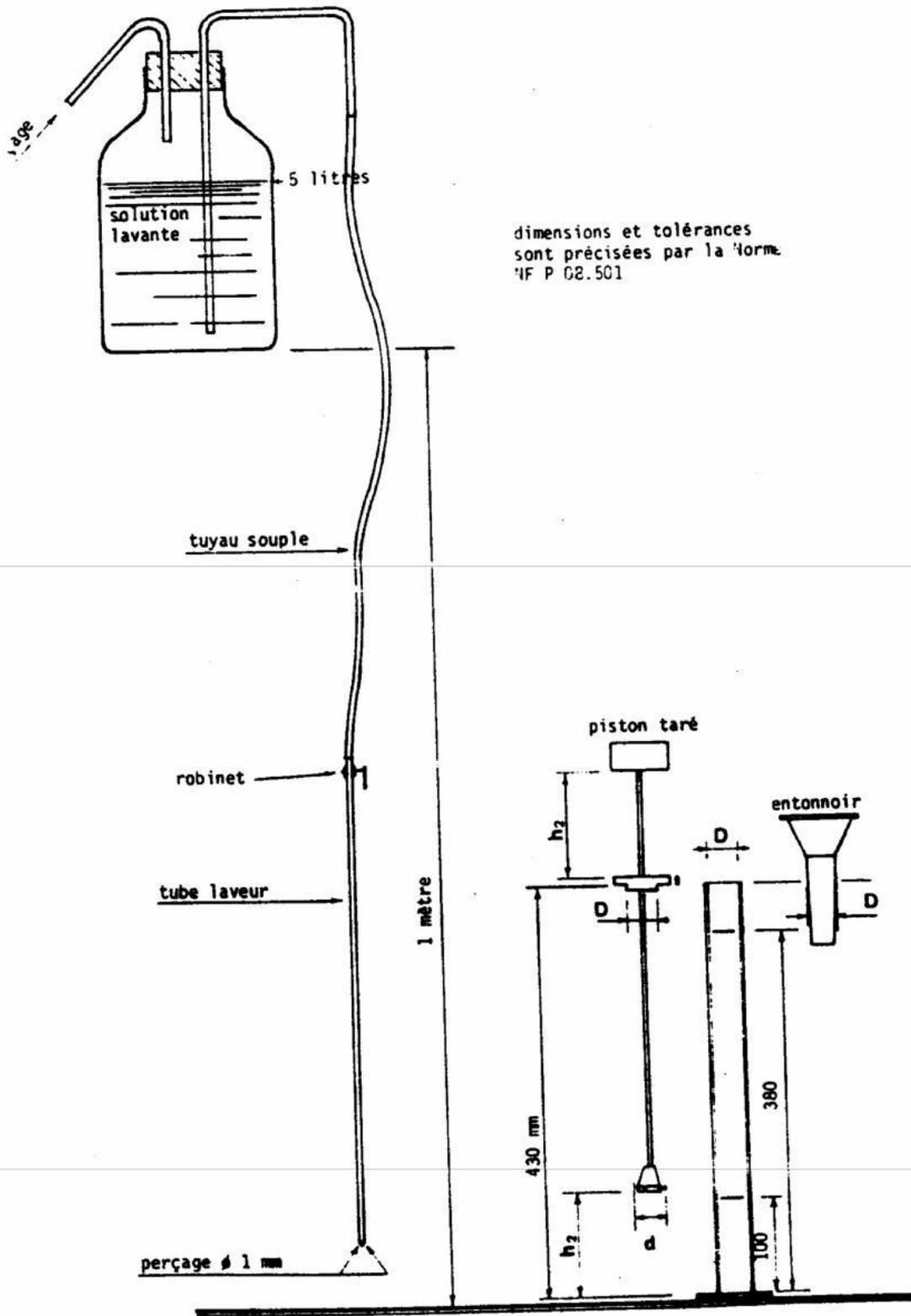


Fig. 8.

## **Mode opératoire :**

Le matériel et le sable tamisé sont supposés préparés :

TM Solution lavante dans une bonbonne de 5l à 1m au-dessus du font éprouvettes.

TM Dispositif si phonique amorcé, et relié au tube laveur.

TM Deux éprouvette propres (on prendra la moyenne de deux résultats).

L'ensemble du processus est schématisé (figure : 09).

1) Emplir les éprouvettes jusqu'au 1<sup>er</sup> trait.

2) Verser la quantité de sable voulue.

3) Eliminer les bulles d'air (frapper contre la paume de la main). Laisser reposer 10mn.

4) Boucher les éprouvette, et les agiter : mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal, 20cm d'amplitude, 90 allers et retour en 30s.

Cette agitation est confiée à une machine, qui peut être électrique (elle s'arrête d'elle-même après 90 cycles) ou manuelle (moins chère, moins lourde, ne nécessitant pas de courant électrique ; un chronomètre permet d'obtenir un mouvement régulier).

5) laver et remplir les éprouvettes, avec le tube laveur.

TM Rincer le bouchon, au-dessus de l'éprouvette.

TM Faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette.

TM Laver le sable, pour cela, descendre et remonter lentement le tube laveur, que l'on tourne entre les doigts, dans la masse du sable ; on fait ainsi remonter les particules fines.

TM Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.

laisser reposer 20mn. Eviter toute vibration. Tolérance faible :  $\pm 10s$  ; car la hauteur du floculat dépend de la durée du repos.

Mesurer a vue  $h_1$  et  $h_2'$  .

La mesure de  $h_2'$  n'est pas toujours aisée. ESV, qui en résulte, est donc entaché d'incertitude.

Ce qui conduit a faire la mesure plus précise suivante :

TM descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser au contact du sable.

Mesurer  $h_2'$  .

TM noter la température.

- Bien entendu, ces opérations sont identiques pour les deux éprouvettes.

## 5. MASSES VOLUMIQUES

### 5.1 METHODE DE L'EPROUVETTE GRADUEE :

C'est la plus simple :

Mettre dans une éprouvette graduée un volume «  $V_1$  » d'eau

(figure : 1).

Peser une masse «  $M$  » du corps (de l'ordre de 300g), et l'introduire dans l'éprouvette. Bien éliminer les bulles d'air.

Lire le nouveau volume «  $V_2$  ».

Le volume absolu est  $V = V_2 - V_1$ , et la masse volumique

$M$

absolue :  $\overline{V_2 - V_1}$ .

### 5.2 METHODE DU PYCNOMETRE

#### I. Principe

Mesure de la masse volumique par pesés dans l'eau avec un volume constant.

La méthode du pycnomètre est utilisée pour les matériaux fins .

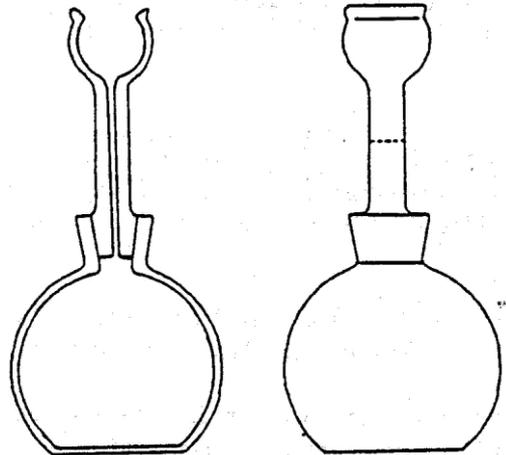
#### II. Appareillage

- c) Balance précise à 0,1 mg
- d) Pycnomètre de 50 ml
- e) Récipient thermorégulé
- f) Liquide d'immersion :  
eau distillée ou autre liquide convenable.

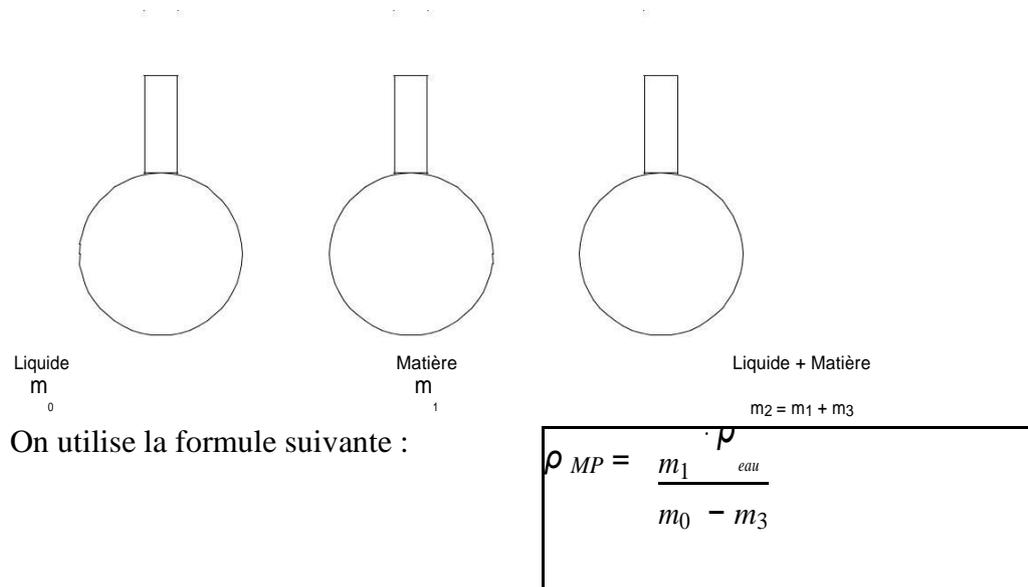
#### III. Mode opératoire

- Poser le pycnomètre sur la balance, faire le zéro.
- Remplir le pycnomètre de liquide jusqu'au repère
- Peser le volume de liquide ( $m_0$ )
- Vider le pycnomètre
- Introduire le lot de matière à tester dans le pycnomètre
- Peser le lot ( $m_1$ )
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec le liquide.
- Peser l'ensemble eau + matière ( $m_2$ )
- $m_2 = m_1$  (masse échantillon) +  $m_3$  (masse d'eau)

Répéter l'essai sur 3 échantillons.



#### IV. Expression du résultat



#### 6. ESSAI DE LOS ANGELES : NF P18- 573

##### Principe :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires 4-6.3mm, 6.3-10mm, 10-14mm, 10-25mm, 16-31.5mm, 25-50mm, la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre. La classe 10-25mm doit contenir 60% de 10-16mm, la classe 16-31.5mm contient 60% de 16-25mm et la classe 25-50mm 60% de 25-40mm.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par :  $100 \frac{m}{M}$ , cette quantité est appelée le coefficient Los Angeles du matériau ( $L_A$ ).

##### Préparation de l'échantillon :

TM Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

## Annexes A

---

TM Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante.

TM La masse de l'échantillon pour l'essai sera de 5000g ± 5g.

### Mode opératoire :

- Introduire avec précaution la charge de boulet correspondant à la classe granulaire choisie puis l'échantillon pour essai.
- Faire effectuer à la machine 500 rotation à une vitesse régulière 30 à 33 tr/min.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- Laver le refus au tamis de 1.6mm, égoutter et sécher à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus une fois sécher, soit  $m_1$  le résultat de la peser.

### Expression des résultats :

Le coefficient Los Angles ( $L_A$ ) est par définition le rapport  $100 \frac{m}{5000}$

Où :

$m = 5000 - m_1$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6 mm, en gramme.

## 7. ESSAI MICRO DEVAL : NF P 18-572

### Principe :

L'essai consiste à introduire un échantillon en présence d'une charge abrasive dans des cylindres en rotation pour mesurer à la fin l'usure des granulats.

### Préparation de l'échantillon :

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des trois classes granulaires types.

Pour effectuer un essai sec ou un essai en présence de l'eau :

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera de 500g ± 2g.

### Mode opératoire :

## Annexes A

---

*f* Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive puis les 500 g de matériau préparé. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 - 6.3	2000 ± 5
6.3 – 10	4000 ± 5
10 – 14	5000 ± 5

Pour effectuer un essai en présence d'eau on ajoutera 2.5litre.

- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de  $(100 \pm 5)$  tr/min pendant 2 heures ou 12000 tr.

- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement l'intérieur de cylindre.

Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.

Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.

Sécher le refus à 1.6mm à 105°C jusqu'à masse constante.

Peser ce refus au gramme près ; soit  $m_0$  le résultat de la pesée.

### Expression des résultats :

Le coefficient Micro Deval est par définition le rapport :

Où :

$m = 500 - m_0$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm.

On a donc : le coefficient Micro Deval (MDE)

### 8. AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS (NF P 18-451/ISO 4109) :

Caractérise uniquement le seuil de cisaillement du béton to.

Deux bétons peuvent avoir le même seuil (même affaissement) mais des viscosités très différentes.

Affaissement	Classes	Désignation
0-4	Ferme	F (S1)
5-9	Plastique	P (S2)
10-15	Très Plastique	TP (S3)
>16	Fluide	F (S4)

Type d'ouvrage	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
Béton compacté au rouleau	0
Bétons extrudés (poutrelles) Bétons secs (préfabrication) Béton à démoulage immédiat (parpaing)	3
Béton projeté	5
Mise en place à la pompe	> 7
Mise en place à la benne (banches, planchers, ...)	TP
Pieux, parois moulées	> 18
Béton auto-plaçant / auto-nivelant	> 22 (étalement > 650 mm)

## 9. ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 par 800 mm<sup>2</sup>), puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette

## 10. ESSAI DE BOITE EN L

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante: la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature  $\varnothing$  14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la

hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton ( $h_1$  et  $h_2$ ), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement. Le rapport  $h_2/h_1$  devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.

### **11. ESSAI DE LA STABILITE AU TAMIS**

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

### 1.METHODE DE DREUX GORISSE :

La formulation de la composition des bétons a été faite d'après la méthode « **DREUX GORISSE** » basée sur l'analyse granulométrique (sable et différentes fractions de gravier).

Données de bases :

- A-** Dosage de ciment : **C = 350 Kg/m<sup>3</sup>**
- le rapport **E/C = 0.3**
  - le dosage en eau : **E = 350 × 0.3 = 105 l/m<sup>3</sup>**

**B-** Caractéristiques techniques du sable :

Masse volumique, Masse spécifique et module de finesse qui est égale à 2,67.

**C-** Caractéristiques techniques des granulats :

- Dimension maximale des granulats (**D<sub>max</sub> = 16 mm**).
- Les granulats concassés.
- Masse volumique apparente et masse spécifique.

Sur le graphe d'analyse granulométrique (**Graphe : 2**), on trace la courbe granulaire de référence OAB.

Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulats.

$X = 16\text{mm}$ . Point B

$Y = 100\%$ .

Point de brisure A à pour coordonnées :

$f$  En l'abscisse :

$$D \leq 25, X = \frac{D}{2},$$

$f$  En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D + K + K_s + K_p}$$

Les valeurs de  $K$  et  $K_s$  et  $K_p$  sont données par des tableaux.

Dosage de ciment  $C = 350 \text{ kg/m}^3 \rightarrow K = -2$ , pour les granulats concassés.

Pour le dosage en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$ , et avec un granulats concassés et une vibration normale et le module de finesse :

$M_f = 3.12$  est :

$$K_s = 6 M_f - 15$$

$$K_s = 6(3.12) - 15$$

$$K_s = 3.72$$

## Annexes B

$$Kp = K + (5 \text{ à } 10)$$

$$Kp = -2 + 10$$

$$Kp = 8$$

$$x = \frac{D}{2} = \frac{16}{2} = 8mm$$

$$X = 8mm$$

$$Po \text{ int } A \quad Y = 50 - \frac{D}{\sqrt{6}} - 2 + K + K_s \Rightarrow y = 55.12$$

$$y = 50 - \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{6}} - 2 + 3.12 + 8$$

### DOSAGE DES GRANULATS :

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (Graphe -2-) que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $G_{3/8}$ ,  $G_{8/15}$

Les résultats obtenu sont :

Sable 1 ( $S_1$ ) —————> **12%**

Sable 2 ( $S_2$ ) —————> **32%**

Gravier ( $G_{3/8}$ ) —————> **11%**

Gravier ( $G_{8/15}$ ) —————> **45%**

#### • COEFFICIENT DE COMPACTITE $\gamma$ :

$D=16$ , béton molles, vibration faible  $\gamma=0.8$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable concassé et gravier concassé

= - 0.01 ; donc  $\gamma = 0.800 - 0.02$

$\gamma = 0.78$

• **DETERMINATION DE VOLUME DES GRANULATS :**

$$V = C \cdot V = 350 = 113 \text{ l}$$

$$C = 3.10C \quad 3.1 \quad m^3$$

$$V_g = V_T - V_C \quad \text{---} \quad \text{/}$$

$$V_g = 1000 \gamma - V_C$$

$$V = 1000 (0.780) - 113 = 667 \quad l$$

$$g \quad m^3 \text{ /}$$

$$V = 667 \quad l \text{ /} \\ m^3$$

**DETERMINATION DU VOLUME ABSOLU DE CHAQUE GRANULAT :**

- Volume absolu du sable 1 =  $667 \times 0.12 = 80.04 \text{ l}$
- Volume absolu du sable 2 =  $667 \times 0.32 = 213.44 \text{ l}$
- Volume absolu de gravier (3/8) =  $667 \times 0,11 = 73.37 \text{ l}$
- Volume absolu de gravier (8/15) =  $667 \times 0.45 = 300.15 \text{ l}$

Les masses spécifiques sont :

- Sable 0/1 =  $2.43 \text{ g/cm}^3$
  - Sable 0/3 =  $2.29 \text{ g/cm}^3$
  - Gravier (3/8) =  $2.69 \text{ g/cm}^3$
  - Gravier (8/15) =  $2.59 \text{ g/cm}^3$
- Les dosages en matériaux secs seront donc en  $\text{kg/m}^3$  :
- Ciment =  $350 \text{ kg/m}^3$ .
  - Sable 1 =  $2.43 \times 80.04 = 194.5 \text{ kg/m}^3$
  - Sable 2 =  $2.29 \times 213.44 = 488.78 \text{ kg/m}^3$
  - Gravier (3/8) =  $2.69 \times 73.37 = 197.36 \text{ kg/m}^3$
  - Gravier (8/15) =  $2.59 \times 300.15 = 777.38 \text{ kg/m}^3$
  - Eau total =  $105 \text{ l/m}^3$
  - Adjuvant 1.2%

\* La densité théorique du béton frais =  $2113.03 \text{ kg/m}^3$

### 2. METHODE JAPONAISE :

- Les plages qui se sont dessinées pour chaque constituant .
- Volume de gravillons est limite en fonction de  $G/S=0.9$ ( proche de 1)
- Volume de la pâte est :330 à 400 Kg/m<sup>3</sup> ( C+ F ).
- La masse de ciment :  $M_c = 350 \text{ Kg/m}^3$   
 $M_f = 35 \text{ Kg/m}^3$

Le dosage de superplastifiant est proche de son dosage de saturation :

Dans notre cas on fixe le dosage du superplastifiant à 1.2%

#### • LES DONNES DE BASE :

on choisir :  $G/S= 0.9$  , le rapport :  $E/C+F$  selon la fluidité ( donnée par l'essai étalement), on vise l'étalement 650 mm à 750mm , donc on doit prendre le rapport  $E/C+F=0.3$  et ajouté le superplastifiant .

### III.2.1.OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BAP :

Volume de la pâte pour  $1\text{m}^3$  du BAP :

- $350 \text{ Kg/m}^3$  du ciment.
- $35 \text{ Kg/m}^3$  de filler de calcaire ou de fumé de silice.
- $E/C+F=0.3$ .
- $SP = 1.2 \%$  .
- $G/S = 0.9$

#### a) Détermination de la masse de chaque constituant :

- $C = 350 \text{ Kg/m}^3$
- $F = 35 \text{ Kg/ m}^3$
- $E/C+F = 0.3$

Donc :

$$E = 0.3 \times (350 + 35) = 115.5 \text{ l/ m}^3$$

- Volume de la pâte =  $250 \text{ l/m}^3$  .
- Volume de granulats sec =  $750 \text{ l/m}^3$

$$G/S = 0.9$$

$$G + S = 750$$

$$G = 750 - S$$

$$\frac{750 - S}{S} = 0.9$$

$$G = 750 - S$$

$$S = 750 / 1.9 = 394.73 \text{ l/m}^3$$

## Annexes B

---

$$G = 750 - 394.73 = 355.27 \text{ l/m}^3$$

### b) Les masses des constituants pour 1 m<sup>3</sup> :

- Eau = 115.5 l/m<sup>3</sup>
- Ciment = 350 Kg/m<sup>3</sup>
- Fines = 35 Kg /m<sup>3</sup>
- Gravier = 355.27 l/m<sup>3</sup>

$$G_{3/8} = \frac{2}{3} = 236.84 \text{ l/m}^3 = 637 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{8/15} = \frac{1}{3} = 118.42 \text{ l/m}^3 = 306,71 \text{ kg/m}^3$$

- Sable = 394.73 l/m<sup>3</sup>

$$SF = 71.05 \text{ l/m}^3 = 172.65 \text{ kg/m}^3$$

$$S_G = 323.67 \text{ l/m}^3 = 741.265 \text{ kg/ m}^3$$

\* La densité théorique du béton frais = 2358.11 kg/m<sup>3</sup>

Dans notre essai on fixe le dosage du superpastifiant à 1.2%

# ADVA ® Cast 260

Superplastifiant à base de béton haute performance pour une maniabilité étendue – HRWR

## La description

ADVA Cast 260 Superplasticiser est un adjuvant réducteur d'eau haut de gamme pour béton à haute résistance.

Le superplastifiant ADVA Cast 260 est basé sur un polymère carboxylé synthétique et est fabriqué dans des conditions étroitement contrôlées pour donner un produit homogène. Il ne contient aucun chlorure ajouté.

Le superplastifiant ADVA Cast 260 est formulé pour répondre aux spécifications standard pour les adjuvants chimiques pour béton, ASTM C 494, type G et BS 5075, partie III.

## Dispersion

ADVA Cast 260 Superplasticiser est un adjuvant de dispersion supérieur ayant une capacité marquée à disperser les agglomérats de ciment normalement trouvés dans une suspension ciment-eau. Cette capacité dépasse celle des adjuvants réducteurs d'eau à haute portée normaux, ce qui entraîne des doses plus faibles et un meilleur contrôle.

## Les usages

ADVA Cast 260 Superplasticiser a été développé pour permettre au béton d'atteindre des performances particulièrement élevées à la fois dans les états plastiques et durcis.

Il est particulièrement utile pour conférer des caractéristiques d'ouvrabilité exceptionnelles aux mélanges de béton, de sorte que des coulées importantes ou difficiles peuvent être effectuées, tout en maintenant

excellentes propriétés de rétention des affaissements, particulièrement dans des conditions climatiques chaudes.

Il permet également de produire du béton fluide avec de très faibles rapports eau / ciment pour obtenir des résistances plus élevées.

## Avantages

- ADVA Cast 260

Le superplastifiant est très efficace, produisant un béton à forte affaissement à faible dosage sans perte de résistance.

- ADVA Cast 260 est ajouté à l'eau de mélange du béton pour un dosage rapide.

## Annexes B

---

- Le béton plastique présente une cohésion, une fluidité et une fluidité élevées. Le béton avec ADVA Cast 260 conservera les propriétés d'affaissement pendant plus de deux heures, même à des températures ambiantes élevées.
- L'ajout d'ADVA Cast 260 au béton ordinaire permettra une réduction de l'eau jusqu'à 30%.
- Le faible rapport eau / ciment conduit à une excellente durabilité du béton

Bonne finition de surface, offrant un aspect concret très esthétique.

Propriétés typiques

Apparence:

Liquide ambre

Gravité spécifique

$1,10 \pm 0,02$  à  $20^\circ \text{C}$ .

Entraînement à l'air: 1,0% env.

Teneur en chlorure: Nil

Durée de conservation dans les fûts du fabricant. 12 mois à compter de la date de fabrication.

Stockage Stockage en vrac. 12 mois à compter de la date de livraison.

Compatibilité

Avec les ciments: ADVA Cast 260 peut être utilisé avec tous les types de ciments Portland, y compris les ciments résistants aux sulfates.

Avec d'autres adjuvants: ADVA Cast 260 est entièrement compatible avec d'autres produits normalement utilisés dans le béton - y compris les entraîneurs d'air, retardateurs ou accélérateurs, adjuvants de fumée de silice, adjuvant réducteur de retrait Eclipse™, Grace Cemfiber® et DCI® S Corrosion Inhibitor - sans entraver leur performance. ADVA Cast 260 ne doit pas être utilisé en combinaison avec le superplastifiant NSFC et MSFC. La plupart des réducteurs d'eau de type A ou Type

Les retardateurs de réduction d'eau D sont compatibles avec le superplastifiant ADVA Cast 260 tant qu'ils sont ajoutés séparément au béton. Des précautions doivent être prises lors de l'utilisation du superplastifiant ADVA Cast 260 avec un retardateur, car un retard excessif peut se produire si les dosages d'adjuvants sont trop élevés. Un pré-test du béton doit être effectué pour optimiser les dosages et les temps d'addition de ces adjuvants. Les adjuvants ne doivent pas se toucher avant d'entrer dans le béton.

Méthode d'utilisation

Le superplastifiant ADVA Cast 260 est fourni prêt à l'emploi. Lors de la production de béton à haute ouvrabilité, il peut être ajouté dans sa forme fournie à l'eau de dosage, avant l'addition du composant cimentaire. Après l'ajout de ciment, un cycle de mélange supplémentaire d'au

## Annexes B

---

moins 2 minutes est recommandé pour permettre à l'ADVA Cast 260 de disperser efficacement les composants du mélange.

### Taux d'addition

Gamme: 400ml -3000ml par 100kg de ciment. (0,4% - 3% [v / w] en poids de ciment).

Les taux d'addition du superplastifiant ADVA Cast 260 peuvent varier selon le type d'application. Comme pour la plupart des produits de ce type, l'ampleur de l'effet obtenu avec ADVA Cast 260 dépend de la quantité de produit utilisée et de la nature spécifique du béton et de ses matériaux constitutifs.

Il est donc nécessaire d'évaluer les performances dans les conditions du site en utilisant les matériaux du site pour déterminer le dosage optimal et l'effet sur les plastiques et les propriétés du béton durci, telles que la cohésion, la rétention de l'ouvrabilité, les caractéristiques de prise, le gain précoce de résistance, la résistance ultime à la compression et rétrécissement quand ceux-ci sont de conséquence. À titre de guide pour ces essais, un niveau d'addition de 0,8% à 1,2% d'ADVA Cast 260 volume / poids de ciment est recommandé.

### Effets du surdosage

Les effets du surdosage ADVA Cast 260 sont fonction du degré de surdosage. Lors de la production de béton à haute ouvrabilité, le surdosage augmentera le niveau d'ouvrabilité et peut induire le début de la ségrégation.

En fonction de l'étendue de la surdose, il se produira également une augmentation du temps de prise, en particulier à basse température et / ou lors de l'utilisation de ciment résistant au sulfate ou de matériaux de remplacement du ciment.

Il est préférable que les adjuvants liquides pour le béton soient introduits dans un mélangeur au moyen d'un équipement de distribution automatique. Un tel équipement est disponible auprès de Grace et les détails seront fournis sur demande.

### Emballage

L'ADVA Cast 260 est fourni dans des récipients réutilisables de 1000 litres. Alternativement, les livraisons en vrac peuvent être organisées.

### Espace de rangement

Le superplastifiant ADVA Cast 260 ne contient aucun produit inflammable ni ingrédients. Il commencera à geler à environ 0 C (32 F), mais reviendra à sa pleine résistance après la décongélation et une agitation complète. En entreposage, et pour une distribution adéquate, le superplastifiant ADVA Cast 260 doit être maintenu à des températures supérieures à 00C (320F).

## **Annexes B**

---

### Santé et sécurité

Consulter la fiche de données de sécurité ADVA Cast 260, ou consulter Emirates Chemicals LLC.

### Service technique

Le service technique est disponible pour vous assister dans l'utilisation correcte de nos produits et ses ressources sont à votre entière disposition sans engagement.

### Contact:

Alfaiha pour les produits d'ingénierie P.O. Box 910109 JORDAN-AMMAN

Tel: +962 6 5661001

Fax: +962 6 5655682

Email: [Info.amman@alfaihaengineering.com](mailto:Info.amman@alfaihaengineering.com)