

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE**  
*Faculté des Sciences de l'Ingénieur*  
*Département de Génie Civil*

N° Ordre :

N° Série :

**THESE**

*Présentée pour l'obtention du diplôme de*

**DOCTORAT EN SCIENCES**

*Spécialité : Matériaux*

*Par*

**Mr. BENSEBTI Salah Eddine**  
Magistère en Génie Civil

*Intitulé :*

**Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants**  
**à Base de Matériaux Locaux**

**Directeur de thèse : Professeur HOUARI Hacène**

**U. M. Constantine**

*Devant la commission d'examen composée de :*

<b>Président</b>	<b>Mr M. L. SAMAI</b>	Professeur	U. Mentouri – Constantine
<b>Examineur</b>	<b>Mr N. CHIKH</b>	Professeur	U. Mentouri – Constantine
<b>Examineur</b>	<b>Mr M. BELACHIA</b>	Professeur	U. 20 Août 55 – Skikda
<b>Examineur</b>	<b>Mr A. BENOUIS</b>	M. C.	U. 08 mai 45 – Guelma
<b>Invitée</b>	<b>Mme. S. AGGOUN</b>	M. C.	U. Cergy Pontoise, France

**Soutenue le 02 Juillet 2008**

## Remerciements

Je voudrai faire des remerciements particuliers au :

Professeur **M.L. SAMAI**

pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury, pour tous les conseils qu'il m'a souvent prodigué et pour la rigueur respectueuse qu'il a toujours représenté.

Messieurs **CHIKH, BELACHIA, BENOUIS**

de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de critiquer mon travail.

Je voudrai remercier, mon directeur de thèse :

Le Professeur **H. HOUARI**

Qui a été toujours disponible et surtout pour ses qualités scientifiques et humaines qui m'ont permis de finir ma thèse dans les meilleures conditions.

Qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi à :

Salima **AGGOUN**

Mon co-encadreur, qui a été, et est, la personne sur qui j'ai pu toujours compter.

Je la remercie pour son aide précieuse et pour ses encouragements, sans lesquels je n'aurais jamais fini cette thèse.

Mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont pu, de près ou de loin, contribuer à l'aboutissement de mon travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude pour toute l'aide apportée, envers Mme BENTALHA, Mr. CHABANE et Mr. FERKOUS.

Je remercie, Mr. ABDOU, Melle. BENKECHEKACHE, Melle BOUKNI et Mme CHIBANE, qui m'ont toujours soutenu.

Je voudrais aussi remercier toute l'équipe de GRANITEX qui a mis à ma disposition toute leur gamme de produits.

Je terminerai par une pensée très spéciale vers la personne qui m'a accompagnée aidée et surtout compris tout au long de cette recherche.

## **Résumé**

Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'articule autour de la formulation et les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) confectionnés à partir d'une gamme de constituants produites localement (contexte algérien).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans les coffrages les plus ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

Un travail de formulation de bétons autoplaçants en utilisant la méthode Japonaise est présenté. Il s'avère que cette méthode ne permet pas d'atteindre du premier coup les résultats espérés. La limitation de l'étalement relatif à 5 et du temps d'écoulement relatif à 1 sont contestables. En effet, ces limitations doivent être revues. C'est le travail que nous avons mené, sur des coulis, des mortiers et des bétons, et qui nous a permis de déterminer de nouvelles valeurs, en l'occurrence ; un étalement relatif de 8 et un temps d'écoulement relatif de 2,5.

Vu la fluidité importante des BAP, une partie a été consacrée à l'étude du risque de ségrégation statique qui n'est pas des moindres. Il s'est avéré qu'il est très important de vérifier la stabilité du système de granulats dans la masse du béton. Dans cette partie nous avons proposé et validé un processus expérimental permettant la caractérisation de la ségrégation statique des BAP

Pour valoriser ce nouveau type de béton nous présentons une étude de quelques propriétés à l'état durci des BAP que nous comparons à celles d'un béton ordinaire.

## **Abstract**

The research presented in this thesis is articulated around mix design and properties of self compacting concrete SCC made with produced locally components.

Self compacting concrete (SCC) is a new type of concrete that can fill all corners of formwork without vibration. In order to achieve this property, SCC must have good deformability and no blocking around reinforcements.

It is important, also, to note that the mixture should not undergo any form of segregation. Segregation can be "dynamic" when it occurs during a flow or "static" when it occurs in the formwork (packing of the gravels of mixture).

we presented a mix design work of SCC using the Japanese method. It is showed that this method does not make it possible to reach the expected results. The limitation of relative spreading to 5 and the relative flow time to 1 are contestable. Indeed, these limitations must be examined. It is the work which we undertook. We determine new values; a relative spreading out of 8 and a relative flow time of 2,5.

Considering the important fluidity of SCC, we present a study of the static risk of segregation which is not the least. It is proved that it is very important to check the stability of the aggregate system in the mass of the concrete. In this part we proposed and validated an experimental process allowing the static characterization of segregation of the SCC

To develop this new type of concrete we present a study of some properties in a hardened state of SCC which we compare with those of an ordinary concrete.

## ملخص

إن العمل المقدم في هذه المذكرة يتمحور حول تصميم الخرسانة الذاتية القولية المتكونة من مواد مصنعة محليا.

الخرسانة الذاتية القولية هي خرسانة قادرة على السيولة و تعمير كل أجزاء و أنحاء القالب الذي توضع فيه مهما يكن شكل أو تسليح هذا القالب. و يكون هذا التعمير تحت تأثير الوزن الذاتي فحسب، بمعنى آخر، لا يحتاج هذا النوع من الخرسانة لأي نوع من أنواع عمليات الرص.

في الجزء الأول من المذكرة نقدم حوصلة للأعمال المنشورة في مجالي التصميم و التخصيص لهذا النوع من الخرسانة.

في الجزء الثاني، نقدم بحثا تجريبيا حول كيفية تصميم الخرسانة الذاتية القولية، و في الجزء الثالث قدمنا دراسة تجريبية لمقاومة الخرسانة الذاتية القولية للانفصال الجزيئي للمكونات.

وفي الأخير، الجزء الرابع، قدمنا فيه دراسة لعدد من الخصائص للخرسانة الذاتية القولية في حالتها الصلبة.

في الأخير لقد تبين لنا بعد الدراسة أن سلوك الخرسانة الذاتية القولية في حالتها الصلبة يقارب كثيرا سلوك الخرسانة العادية.

## SOMMAIRE

### INTRODUCHAMP

<b>CTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
-----------------------------	----------

### CHAPITRE I

#### BETONS AUTOPLAÇANTS

#### TERMINOLOGIE – CONCEPTS - RHEOLOGIE

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Qu'est ce qu'un béton Autoplaçant ? .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3. Influence des granulats sur les propriétés des BAP: .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP : .....</b>	<b>7</b>
I.4.1. les fillers calcaires : .....	8
I.4.1.1. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques : .....	8
I.4.1.2. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP : .....	9
<b>I.5. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP : .....</b>	<b>9</b>
I.5.1. les superplastifiants : .....	9
I.5.2. les agents de viscosité (ADV) ou agent Colloïdaux : .....	11
<b>I.6. L'aspect empirique de la formulation des BAP : .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7. Les Approches de formulation des BAP : .....</b>	<b>14</b>
I.7.1. L'approche Basées sur l'optimisation des Mortiers : .....	14
I.7.2. L'approche basée sur l'optimisation du volume de pâte : .....	14
I.7.3. L'approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire : .....	15
I.7.4. Méthode basée sur un plan d'expérience : .....	15
I.7.5. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE : .....	16
<b>I.8. Les Méthodes de formulation des BAP : .....</b>	<b>16</b>
I.8.1. Approche Japonaise .....	16
I.8.2. Les travaux d'Ozawa et al .....	18
I.8.3. Les travaux de Tangtermsirikul et Van : .....	19
I.8.4. Méthode Suédoise : .....	20
I.8.5. Méthode Française : .....	21
I.8.5.a. Le rhéomètre BTRHEOMTM .....	22
I.8.5.b. Le model des suspensions solides : .....	23
I.8.5.c. Un processus rationnel pour la formulation des Béton Autoplaçants : .....	26
I.8.6. La Méthode de Sakata et coll. ....	28

<b>I.9. Discussion et comparaison entre les différentes formulations :</b>	<b>29</b>
<b>I.10. Essais et techniques de caractérisation des BAP :</b>	<b>31</b>
I.9.1. Les Propriétés Essentielles Recherchées	31
I.9.2. Les essais de caractérisation des BAP	32
I.9.2.1. Essai d'étalement « Slump Flow »	33
I.9.2.2. La mesure de la vitesse d'écoulement	33
I.9.2.3. L'essai à la boîte « the Box test »	33
I.9.2.4. Essai de la table à fluidité (ASTM C 124)	34
I.9.2.5. L'essai du « L-Flow Meter »	34
I.9.2.6. L'essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »	35
I.9.2.7. Essai de facilité de remplissage « Filling ability » ou « U-shaped apparatus method »	36
I.9.2.8. Essai de la capacité de remplissage « Essai du Caisson » « Filling Capacity »	39
I.9.2.9. L'essai de la passoire [81] « Essai de la Boîte »	40
I.9.2.11. Les essais caractérisant la ségrégation	41
I.9.2.11.a. Les méthodes de mesure sur béton frais	41
• Méthode de Sidky, Legrand et Barrioulet (1981)	41
• Méthode japonaise du cylindre (Umehara et coll., 1994)	42
• Méthode japonaise de la palette métallique (Tangtermsirikul et coll., 1991)	43
• Méthode du tamis (Fujiwara et coll., 1992) [81][41][89]	44
• Méthode de Popovics (1973) [89]	44
• Essai de l'entonnoir [89]	44
• La méthode proposé par V.K. BUI et al [21]	45
I.9.2.11.b. Les méthodes de mesure sur béton durci	46
• Méthode des ultrasons [89]	46
• Méthode du comptage des granulats	46
• c) Méthode des rayons gamma (d'après Popovics, 1973)	46
I.9.2.12. Rhéologie – Ouvrabilité : lien Direct ?	46
<b>I.10. Conclusion :</b>	<b>47</b>

## CHAPITRE II

### FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS A BASE DE MATERIAUX LOCAUX

<b>II.1. Introduction :</b>	<b>49</b>
<b>II.2. Présentation de la méthode Japonaise d'Okamura et al. :</b>	<b>49</b>
<b>II.3. Formulation des bétons d'étude "Application de la méthode Japonaise":</b>	<b>52</b>
II.3.1. Formulation de la variété des BAP étudiés	52
II.3.2. Détermination du dosage en gravier :	53
II.3.3. Détermination du dosage en sable :	53
II.3.4. Optimisation de la composition du mortier :	53
II.3.4.a. Détermination des compositions des mortiers d'étude :	54
II.3.4.b. Les compositions des mortiers étudiés :	55
II.3.4.c. Résultats des essais sur mortiers :	58

II.3.4.d. Représentations graphique des résultats sur mortiers : .....	60
II.3.5. Détermination des compositions des bétons : .....	63
II.3.6. Gâchées d'essais et caractérisation des bétons : .....	63
II.3.7. Etude sur coulis pour la détermination du dosage de saturation en superplastifiant pour un liant : .....	68
II.3.7.a. L'essai au cône de Marsh : .....	68
II.3.7.b. Détermination du dosage de saturation sur coulis : .....	69
II.2.7 Bilan de l'étude : .....	71
Démarche proposé pour la formulation des BAP .....	71
Conclusion : .....	71

## CHAPITRE III

### ETUDE DE LA SEGREGATION STATIQUE DANS LES BETONS AUTOPLACANTS

<b>III.1. Introduction :</b> .....	<b>73</b>
<b>III.2. Etude de la ségrégation statique :</b> .....	<b>74</b>
<b>III.3. Proposition d'une procédure d'essai de mesure de l'indice de ségrégation :</b> .....	<b>75</b>
<b>III.4. Programme Expérimental :</b> .....	<b>77</b>
III.4.1. Matériaux utilisés : .....	77
III.4.2. Compositions étudiées : .....	77
<b>III.5. Résultats et Discussions :</b> .....	<b>79</b>
<b>III.6. Conclusion :</b> .....	<b>82</b>

## CHAPITRE IV

### ETUDE DES PROPRIETES DES BETONS AUTOPLACANTS A L'ETAT DURCI

<b>IV.1. Introduction :</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.2. Compositions étudiées :</b> .....	<b>84</b>
IV.2.1. Propriétés étudiées : .....	85
IV.2.2. Formulation des bétons étudiés : .....	85
IV.2.3. Conduite des essais : .....	86



---

IV.2.3.1. Malaxage et mise en place :.....	86
IV.2.3.2. Cure et conservation des éprouvettes : .....	86
IV.2.3.3. Caractéristiques des formules retenues :.....	87
<b>IV.3. Résultats et discussions : .....</b>	<b>88</b>
IV.3.1. Performances mécaniques :.....	88
IV.3.1.1. Résistance à la compression : .....	88
Influence de l'âge :.....	88
Influence du rapport Fillers/Liant : .....	89
Influence des fibres : .....	90
IV.3.1.2. Résistance à la traction par flexion :.....	91
Influence de l'âge :.....	91
Influence du rapport Fillers/Liants :.....	92
Influence des fibres : .....	92
IV.3.2. Variation dimensionnelle et pondérale : .....	93
IV.3.2.1. Retrait total dans différents milieux de conservation : .....	93
IV.3.2.2. Perte en masse dans différents milieux de conservation :.....	95
IV.3.3. Fluage en flexion : .....	96
IV.3.4. Résistances mécaniques après un cycle de chauffage :.....	99
Méthodologie d'essai et corps d'épreuve : .....	99
IV.3.5. Retrait total après un cycle de chauffage : .....	101
IV.3.6. Perte en masse après un cycle de chauffage : .....	107
<b>IV.4. Conclusion : .....</b>	<b>111</b>
 <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>116</b>
 <b>ANNEXE .....</b>	<b>124</b>

---

## **LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS**

$\rho$	Masse volumique absolue.
$\rho_c$	Masse volumique absolue du ciment.
$\rho_f$	Masse volumique absolue du filler.
$\Gamma_m$	Étalement relatif d'un mortier au mini- cône.
$\mu m$	Micromètre.
$\rho_{sp}$	Masse volumique absolue du superplastifiant.
$\tau$	Contrainte de cisaillement.
$\tau_0$	Seuil de cisaillement.
ADV	Agent de viscosité.
AFGC	Association Française de Génie Civil.
BAN	Béton autonivelant.
BAP	Béton autoplaçant.
BAP01 à BAP24	Bétons autoplaçants.
BAP21F0,5	Béton autoplaçant BAP21 renforcé de 05% de fibres métalliques.
BAP24F0,5	Béton autoplaçant BAP24 renforcé de 05% de fibres métalliques.
BV21	Béton Vibré à même résistance à la compression que le BAP21.
C	Dosage en ciment.
d	Diamètre d'étalement d'un mortier.
$d_0$	Diamètre inférieur du mini – cône pour mortier.
$d_i$	Taille des grains i.
Dmax	Diamètre maximal des granulats.
E	Dosage en eau.
$e_g$	Dosage volumique de l'eau de gâchage.
F	Dosage en fillers.
f	Dosage volumique en filler.
$F_c$	Résistance à la compression du béton.
$f'_c$	Résistance à la compression du béton.
G	Dosage en gravillon.

g	Dosage volumique en gros gravillon.
$G_{inf}$	Teneur en gros gravillon de la partie inférieure du béton.
$G_{mil}$	Teneur en gros gravillon de la partie du milieu du béton.
gr	Gramme
$G_{sup}$	Teneur en gros gravillon de la partie supérieure du béton.
ISS	Indice de ségrégation statique.
K	Rapport entre $D_{max}$ et le diamètre des armatures.
kg	Kilogramme.
m	Masse.
M01 à M105	Mortiers.
MBE	Mortier du béton équivalent.
MF	Module de finesse.
$R_b$	Risque de blocage du béton.
$R_m$	Temps d'écoulement relatif d'un mortier au mini – entonnoir.
S	Dosage en Sable.
s	Dosage volumique en sable.
$S_i$	Coefficient de ségrégation de Sidky.
sp	Dosage volumique en superplastifiant.
SP ou $S_p$	Dosage en Superplastifiant.
$SP_C$	Dosage de saturation en superplastifiant du ciment.
$SP_F$	Dosage de saturation en superplastifiant du filler.
t	Temps.
v	Volume d'air.
$V_{crit}$	Volume critique en granulats.
$V_e$	Volume de l'eau.
$V_p$	Volume de la pâte.
$V_s$	Volume du solide.
$V_v$	Volume des vides.
$V_w$	Volume de l'eau.
W	Dosage en eau.
$y_i$	Proportion volumique de grains de taille i.

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

<b>Figure I.1. :</b> Composition d'un béton ordinaire « BO » et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO et d'un BAP.....	6
<b>Figure I.2. :</b> Zone de satisfaction des exigences pour les bétons fluides (Nagataki et coll.) .....	7
<b>Figure I.3 :</b> Relation entre dosage en Superplastifiant et l'étalement. ....	10
<b>Figure I.4 :</b> Relation entre le rapport E/C et l'étalement pour différents dosages en NPC.....	10
<b>Figure I.5 :</b> Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP. ....	12
<b>Figure I.6. :</b> Notion d'excès de pâte : .....	14
la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	14
<b>Figure I.7. :</b> Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers.....	17
<b>Figure I.8. :</b> Relation entre les termes $\Gamma_m$ et $R_m$ pour différents dosages en superplastifiants ( $S_p/P$ ) et différents rapports volumiques eau sur poudre ( $V_w/V_p$ ).....	18
<b>Figure I.9. :</b> Piston pour tester l'aptitude au remplissage de mortier. ....	18
<b>Figure I.10. :</b> Relation entre les teneurs critiques en grains de taille D en fonction du rapport du diamètre des grains sur le diamètre des ouvertures dans le piston. ....	19
<b>Figure I.11. :</b> Variation de $V_{crit}$ en fonction de $D_{ca}$ .....	20
<b>Figure I.12. :</b> Courbes pour détermination du volume minimal de pâte.....	21
<b>Figure I.13. :</b> Les paramètres rhéologiques déterminé à l'aide du BTRHEOM <sup>TM</sup> .....	22
<b>Figure I.14. :</b> Représentation de L'effet de paroi. ....	24
<b>Figure I.15. :</b> Courbes théoriques de l'influence du confinement. ....	25
<b>Figure I.16. :</b> Résumé de la méthode de formulation de BAP de Sakata et coll. ....	28
<b>Figure I.17. :</b> Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement.....	33
<b>Figure I.18. :</b> Essai du « Box test » .....	34

<b>Figure I.19.</b> : Test du « L-flow Meter » .....	35
<b>Figure I.20.</b> : Essai de l'entonnoir en forme de « V » . .....	35
<b>Figure I.21.</b> : Le « U-shaped apparatus test method» .....	36
<b>Figure I.22.</b> : Schématisation de la facilité de remplissage. ....	37
<b>Figure I.23.</b> : L'effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement et la viscosité. ....	37
<b>Figure I.24.</b> : L'effet du dosage en superplastifiant sur la facilité de remplissage .....	38
<b>Figure I.25.</b> : L'essai du U. ....	38
<b>Figure I.26.</b> : Essai de Capacité de Remplissage « Essai du Caisson ». ....	39
<b>Figure I.27.</b> : Essai du Caisson. ....	40
<b>Figure I.28.</b> : Essai de la boite (ou de la passoire) .....	40
<b>Figure I.29.</b> : Appareil pour tester l'aptitude au remplissage d'un béton en continu sur chantier. . ....	41
<b>Figure I.30.</b> : Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet. ....	42
<b>Figure I.31.</b> : Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de la résistance à la ségrégation. ....	42
<b>Figure I.32.</b> : Montage pour mesurer la résistance à la ségrégation d'un mortier. « Pulling Test » .....	43
<b>Figure I.33.</b> : Méthode du Tamis. ....	44
<b>Figure I.34.</b> : Essais des Entonnoirs SS et LS. ....	45
<b>Figure I.35</b> : Equipement de l'essai proposé par V.K. BUI et al .....	45

## **CHAPITRE II**

<b>Figure II.1.</b> : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers .....	50
<b>Figure II.2.</b> : Relation entre les termes $\Gamma_m$ et $R_m$ pour différents dosages en superplastifiant ( $S_p/P$ ) et différents rapports volumiques eau sur poudre ( $V_e/V_p$ ). Le superplastifiant a essentiellement un effet sur l'étalement, alors que la teneur en eau affecte fortement les deux paramètres.....	51
<b>Figure II.3.</b> : Relation entre l'étalement relatif « $\Gamma_m$ » et l'écoulement relatif « $R_m$ » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F.....	61

<b>Figure II.4.</b> : Relation entre l'étalement relatif « $\Gamma_m$ » et l'écoulement relatif « $R_m$ » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F.....	61
<b>Figure II.5.</b> : Relation entre l'étalement relatif « $\Gamma_m$ » et l'écoulement relatif « $R_m$ » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F.....	62
<b>Figure II.6.</b> : Relation entre l'étalement relatif « $\Gamma_m$ » et l'écoulement relatif « $R_m$ » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F.....	62
<b>Figure II.7.</b> : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en superplastifiant d'un coulis de ciment pur et un coulis de fillers pur.....	69
<b>Figure II.8.</b> : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en superplastifiant pour des coulis avec des rapports F/C+F différents.....	69

### **CHAPITRE III**

<b>Figure III.1.</b> Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton .....	73
<b>Figure III.2.</b> : Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet. ....	74
<b>Figure III.3.</b> : Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de la résistance à la ségrégation. ....	75
<b>Figure III.4.</b> Les différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique. ....	76
<b>Figure III.5.</b> Relation entre la stabilité au tamis et l'indice de ségrégation.....	80
<b>Figure III.6.</b> Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'indice de ségrégation.....	81
<b>Figure III.7.</b> Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation.....	82

### **CHAPITRE IV**

<b>Figure IV.1.</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.....	89
<b>Figure IV.2.</b> : Influence du rapport F/L sur la résistance à la compression.....	89

<b>Figure IV.3. :</b> Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la compression du BAP21. ....	90
<b>Figure IV.4. :</b> Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la compression du BAP24. ....	90
<b>Figure IV.5. :</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps. ....	91
<b>Figure IV.6. :</b> Influence du rapport F/L sur la résistance à la traction/flexion. ....	92
<b>Figure IV.7. :</b> Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la traction par flexion du BAP21. ....	92
<b>Figure IV.8. :</b> Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la traction par flexion du BAP24. ....	93
<b>Figure IV.9 :</b> Retrait des bétons étudiés dans le milieu Ambiant. ....	94
<b>Figure IV.10 :</b> Retrait des bétons étudiés dans le milieu couvert. ....	94
<b>Figure IV.11 :</b> Gonflement des bétons étudiés dans le milieu immergé. ....	95
<b>Figure IV.12 :</b> Perte en masse dans le milieu ambiant. ....	95
<b>Figure IV.13 :</b> Perte en masse dans le milieu couvert. ....	96
<b>Figure IV.14 :</b> Gain en masse en milieu immergé. ....	96
<b>Figure IV.15.</b> Dispositif utilisé pour la mesure du fluage en flexion [23] ....	97
<b>Figure IV.16. :</b> Evolution de la flèche dans le temps des poutrelles 10x10x120 chargés à 45% de leur charge de rupture. ....	98
<b>Figure IV.17:</b> les deux (02) cycles de chauffage adoptés ....	100
<b>Figure IV.18. :</b> Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode ambiant. ....	102
<b>Figure IV.19. :</b> Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode couvert. ....	102
<b>Figure IV.20. :</b> Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode immergé. ....	103
<b>Figure IV.21. :</b> Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode ambiant. ....	103

<b>Figure IV.22.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode couvert. ....	103
<b>Figure IV.23.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode immergé.....	104
<b>104</b>	
<b>Figure IV.25.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21F0,5 conservé dans un mode couvert. ....	104
<b>Figure IV.26.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21F0,5 conservé dans un mode immergé.....	105
<b>Figure IV.27.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode ambiant. ....	105
<b>Figure IV.28.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode couvert. ....	105
<b>Figure IV.29.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode immergé.....	106
<b>Figure IV.30.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode ambiant. ....	106
<b>Figure IV.31.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode couvert. ....	106
<b>Figure IV.32.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode immergé.....	107
<b>Figure IV.33.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode ambiant. ....	108
<b>Figure IV.34.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode couvert. ....	108



<b>Figure IV.35.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode immergé. ....	108
<b>Figure IV.36.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode ambiant. ....	109
<b>Figure IV.37.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode couvert. ....	109
<b>Figure IV.38.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode immergé. ....	109
<b>Figure IV.39.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode ambiant. ....	110
<b>Figure IV.40.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode couvert. ....	110
<b>Figure IV.41.</b> : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode immergé. ....	110

---

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

<b>Tableau I.1. :</b> Coefficients permettant de trouver la quantité de gros granulats .....	29
<b>Tableau I.2. :</b> Les propriétés essentielles des BAP frais. ....	32

### CHAPITRE II

<b>Tableau II.1. :</b> Désignation des bétons d'étude.....	52
<b>Tableau II.2. :</b> Désignation des mortiers sans fillers .....	56
<b>Tableau II.3. :</b> Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,17) .....	57
<b>Tableau II.4. :</b> Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,26) .....	57
<b>Tableau II.5. :</b> Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,33) .....	57
<b>Tableau II.6. :</b> L'étalement relatif au mini cône ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M01 à M80.....	58
<b>Tableau II.7. :</b> Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M01 à M80 .....	58
<b>Tableau II.8. :</b> L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M81 à M95.....	59
<b>Tableau II.9. :</b> Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M81 à M96 .....	59
<b>Tableau II.10. :</b> L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M96 à M101.....	59
<b>Tableau II.11. :</b> Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M96 à M101 .....	59
<b>Tableau II.12. :</b> L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M96 à M101.....	60
<b>Tableau II.13. :</b> Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M96 à M101 .....	60

<b>Tableau II.14.</b> : Compositions des mortiers retenus.....	63
<b>Tableau II.15.</b> : Compositions et paramètres de formulation des bétons formulés.....	63
<b>Tableau II.16.</b> : Résultats des essais réalisés sur les bétons formulés.....	64
<b>Tableau II.17.</b> : Evolution de l'étalement des compositions obtenues en fonction de l'augmentation du dosage en superplastifiant.....	64
<b>Tableau II.18.</b> : Evolution de l'étalement du BAP01 (F/C+F =0) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.....	65
<b>Tableau II.19.</b> : Evolution de l'étalement du BAP02 (F/C+F =0,17) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.....	65
<b>Tableau II.20.</b> : Evolution de l'étalement du BAP03 (F/C+F =0,26) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.....	65
<b>Tableau II.21.</b> : Evolution de l'étalement du BAP04 (F/C+F =0,33) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.....	65
<b>Tableau II.22.</b> : Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées. ....	66
<b>Tableau II.23.</b> : Compositions des bétons corrigées et ajustées.....	66
<b>Tableau II.24.</b> : L'étalement relatif au mini cône ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) et la vitesse relative d'écoulement à l'entonnoir ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers des bétons ajustés.....	67
<b>Tableau II.25.</b> : Dosages de saturation en superplastifiant déterminés expérimentalement et calculés pour des coulis à F/C+F différents. ....	70

### **CHAPITRE III**

<b>Tableau III.1.</b> : Compositions des mélanges réalisés avec le sable de mer « roulé ».....	78
<b>Tableau III.2.</b> : Compositions des mélanges réalisés avec le sable concassé. ».....	78
<b>Tableau III.3.</b> Résultats des essais.....	79

### **CHAPITRE IV**

<b>Tableau IV.1</b> : Désignations et notations des bétons étudiés .....	85
<b>Tableau IV.2</b> : Compositions des bétons étudiés.....	85

<b>Tableau IV.3 :</b> Caractéristiques intrinsèques des compositions retenues.....	87
<b>Tableau IV.4 :</b> Propriétés des bétons à l'état frais. ....	87
<b>Tableau IV.5 :</b> Résistances à la compression sur 16x32 exprimées en MPa.....	88
<b>Tableau IV.6 :</b> Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 .....	91
<b>Tableau IV.7. :</b> Charges de rupture à 7 jours en flexion 4 points des poutrelles 10x10x120 .....	97
<b>Tableau IV.8. :</b> Charges appliquées aux poutrelles pour la mesure du fluage. ....	97
<b>Tableau IV.9. :</b> Flèches instantanées et à 90 jours des bétons étudiés. ....	98
<b>Tableaux IV.10 :</b> Résistance à la compression sur cylindres 16x32 des bétons après un cycle de chauffage.....	100
<b>Tableaux IV.11 :</b> Résistance à la flexion sur prismes 7x7x28 des bétons après un cycle de chauffage.....	101

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le sujet de recherche s'articule autour de la formulation et les propriétés des bétons autoplaçants "BAP" confectionnés à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans les coffrages les plus ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais pour des projets d'envergure. Ces bétons connaissent un essor important, car ils présentent deux intérêts technico-économiques majeurs :

- Une diminution du temps de personnel lors de la mise en place du béton en chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais étant donné la complexité sans cesse croissante des coffrages (forme, ferrailage,...)
- L'obtention d'une meilleure qualité du béton in-situ. Pratiquement indépendante du savoir faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

Hormis le Japon, l'intérêt des autres pays pour ces bétons n'est apparu que récemment, mais il est en pleine augmentation comme le montre la multiplication du nombre d'équipes dans le domaine et aussi le nombre de publications produites.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

La thèse consiste en l'étude de la formulation de ce type de béton ainsi qu'une investigation sur certaines propriétés de ce matériau.

En première partie, il est présenté une synthèse bibliographique sur le matériau, les différentes approches et méthodes élaborées pour sa formulation et les différentes techniques permettant sa caractérisation.

Cinq approches pour la formulation des BAP ont été recensées en l'occurrence; L'approche basée sur l'optimisation des mortiers, celle basée sur l'optimisation du volume de pâte, une autre basée sur l'optimisation du squelette granulaire, une approche par les plans d'expériences et l'utilisation du mortier du béton équivalent "MBE" pour formuler les BAP.

En continuité avec cette première partie, on expose un certain nombre de méthodes de formulation issues des différentes approches. Ainsi, on présente : la méthode Japonaise d'Okamura et al, les travaux d'Ozawa et al, Les travaux de Tangtermsirikul et Van, un processus de formulation proposé par Petersson et al, la méthode proposée par T. SEDRAN et coll, la méthode de Sakata et coll, et bien d'autres méthodes et processus.

Vient ensuite une partie consacrée aux méthodes et techniques d'essais les plus utilisés pour la caractérisation des BAP à l'état frais. Le matériau étant d'apparition récente, il n'existe pas encore d'essais normalisés, ce qui a fait que le nombre d'essais publiés est presque égal au nombre d'équipes de recherche qui existe dans le domaine. Chaque laboratoire a confectionné une procédure, un appareil ou même une technique qui lui est propre.

Il est toutefois important de noter que le "Guide Européen pour les bétons autoplacants"(The European Guidelines for Self-Compacting Concrete; Spécification, Production and Use) a limité le nombre d'essais recommandés.

En troisième partie, une recherche expérimentale consacrée à la formulation de BAP en utilisant des constituants disponibles localement. La recherche est initialement basée sur les recommandations de la méthode Japonaise.

L'optimisation des formulations des BAP s'est effectuée à partir de résultats d'essais sur coulis, mortiers et bétons. Plusieurs teneur en fillers ont été envisagées (Fillers/ Liant = 0 ; 0,17 ; 0,26 et 0,33).

Après des corrections des compositions des bétons, plusieurs compositions ont été retenues. Ces dernières ont permis de rectifier quelques recommandations de la méthode Japonaises d'Okamura (en l'occurrence la manière de doser l'adjuvant et l'eau), ainsi une nouvelle procédure pour la recherche de la composition des BAP a été proposée et validé par des essais de confirmation.

L'intérêt majeur du processus de formulation que nous avons développé et proposé réside dans le fait de concevoir un mortier pour notre BAP qui offrirait un « étalement relatif égal à 8 » et un « temps d'écoulement relatif proche de 2,5 », valeurs nettement supérieures aux prescriptions préconisées par Okamura (à savoir respectivement 5 et 1). C'est dans cette partie que ressort nettement le caractère local de la formulation.

Etant donné que le risque de ségrégation est d'autant plus important que le béton est fluide, s'assurer de la non-ségrégabilité des BAP est essentiel et inévitable. C'est ainsi qu'en quatrième partie de notre travail on présente une étude de la résistance à la ségrégation.

L'étude de la ségrégation a été effectuée en utilisant les différents essais recommandés (essai au tamis, le V-Funnel, la boîte en L, l'appréciation visuelle) ainsi qu'une procédure proposée (analogue à l'essai à la colonne). La procédure expérimentale a été vérifiée sur un ensemble de 23 compositions différentes.

En dernière partie, quelques propriétés à l'état durci des bétons autoplacants et les bétons autoplacants renforcés de fibres ont été étudiées. Il s'agit essentiellement de la résistance à la compression, à la traction par flexion, les variations dimensionnelles et

pondérales dans des milieux de conservations différents (ambient, couvert et immergé) ainsi que le fluage en flexion.

Les résultats des essais obtenus dans le cadre de cette thèse de doctorat ont permis aussi d'étudier l'influence des paramètres de la composition (Fillers/Liant, Eau/Liant, Dosage en superplastifiant, introduction de fibres) sur les différentes propriétés à l'état frais et durci du béton autoplaçant.

Hormis les nombreux phénomènes et propriétés étudiés, la mise au point d'une nouvelle démarche pour la formulation des BAP et la mise en place d'une procédure pour la caractérisation de la résistance à la ségrégation verticale des BAP représentent les deux points les plus importants de la thèse.



# **CHAPITRE I**

# **BETONS AUTOPLAÇANTS**

**TERMINOLOGIE – CONCEPTS -  
RHEOLOGIE**

## **CHAPITRE I**

### **BETONS AUTOPLAÇANTS**

#### **TERMINOLOGIE – CONCEPTS - RHEOLOGIE**

##### **I.1. Introduction**

Le processus de Formulation d'un béton c'est de tenter, au moindre coût, de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges exprimé en grandeurs mesurables.

Le cahier des charges contient au minimum deux clauses fixant la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams.

Pour des chantiers plus spécifiques, le processus devient plus complexe car d'autres clauses peuvent être rajoutées au cahier de charges, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal...etc.

A la complexité croissante du cahier de charges, vient s'ajouter la multiplication des sources de matériaux. De plus en plus de produits industriels sont employés comme liants (cendres volantes, les fumées de silice, les fillers calcaires ou siliceux, les laitiers...), et les granulats peuvent être roulés, concassés, semi-concassés, de nature minéralogique différentes [81].

Ajoutons à cela l'importante évolution dans le domaine du calcul des structures qui a fait que ces dernières soient de plus en plus complexes. En effet, beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle [49]. Chose qui a incité les chercheurs à concevoir des bétons qui seraient mieux adaptés aux nouvelles structures. Ces bétons qui sont très fluides et qui se mettent en place sous le seul effet de leur poids propre sont connus sous le nom de « Bétons Autonivelants (BAN)» ou « Bétons Autoplaçants (BAP) »

Si on se limite au seul examen de la fabrication, le BAP représente un surcoût par rapport à un béton classique, mais présente beaucoup d'avantages qui le rendent économique et largement compétitif, parmi lesquels :

- l'absence de vibration, ceci réduit les nuisances sonores et les maladies professionnelles,
- la réduction du coût de la main d'œuvre,
- l'utilisation de béton fluide qui permet le bétonnage dans les milieux confinés (très ferrailés),
- l'absence de ségrégation en gardant un squelette homogène qui permet d'avoir des bétons compacts et durables,
- un impact positif sur l'organisation des chantiers.

Pour formuler des bétons conventionnels, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable – gravillons sur une courbe de référence.

Mais, la mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre 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.

Vu la complexité de la formulation du BAP et sa caractérisation, la première partie de cette thèse constitue une mise au point des concepts utilisés tout au long du mémoire. On tente d'apporter des éclaircissements sur les notions de conception, de rhéologie,...etc. Cette partie est consacrée à la présentation des propriétés des BAP à l'état frais (fluidité, ouvrabilité, homogénéité) et les différents essais empiriques et rhéologiques qui caractérisent les BAP. Les développements sont illustrés par des résultats issus de la bibliographie.

## **I.2. Qu'est ce qu'un béton Autoplaçant ?**

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieur pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autoplaçants (« Self-compacting concrete », traduit par béton autoplaçant ou béton autonivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier [91].

Les bétons autoplaçants « BAP » se distinguent donc des bétons dits ordinaires « BO », ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique) [81] [91].

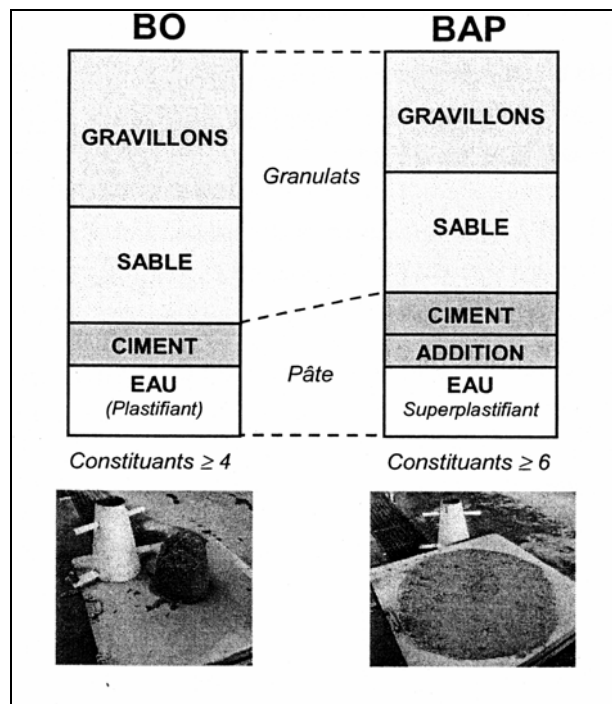
Pour parvenir à ce cahier de charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (Figure I.1).

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [91][49]

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

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux

bétons un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.



**Figure I.1. :** Composition d'un béton ordinaire « BO » et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO et d'un BAP.  
( [91] )

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

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

### I.3. Influence des granulats sur les propriétés des BAP:

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

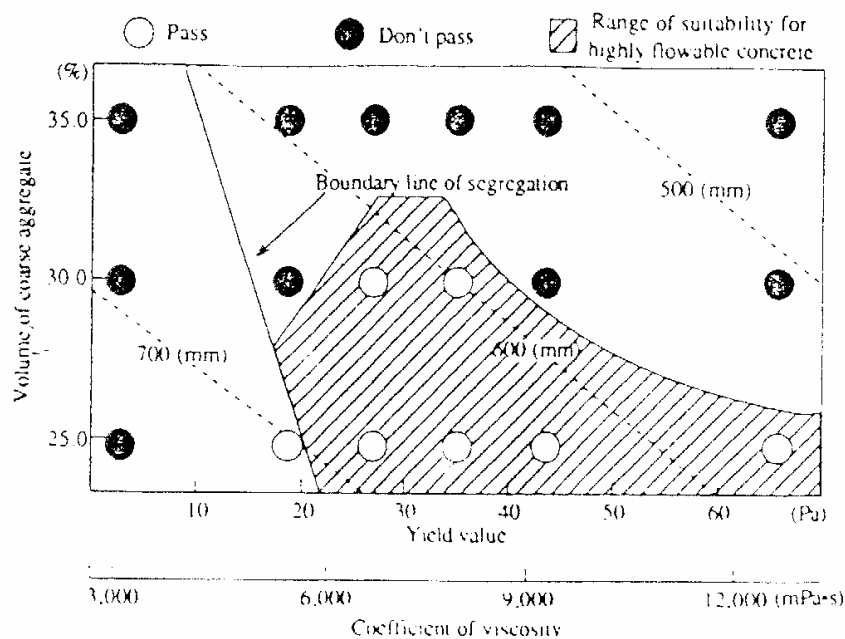
Selon Yurugi et coll. (1989) (cité par [54]), le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente et plus la capacité de remplissage diminue.

Okamura et coll. (1993) (cité par [54]) mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation.[67][81]

Khayat et coll. (1994) (cité par [54]) ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de  $300 \text{ L/m}^3$  avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de diamètre maximum 20 mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6.[48]

D'autre part, les études ont montré que le fait de diminuer la taille des granulats concassés jusqu'à un diamètre de 13 mm n'affecte pas la résistance à la compression pour des bétons (Défal = 500 à 600 mm) de rapport E/C de 0.6 contenant 30% en masse de laitier en substitution au ciment avec différents dosages en superplastifiants (4.62% de type naphthalène et 4.62% poly-carboxylique de la masse des liants). Ces bétons autoplaçants développés avec 4% d'air entraîné, présentent une bonne durabilité car le rapport E/C est en général faible. En effet, le retrait par séchage est inférieur de 10 à 20% par rapport à un béton ordinaire (cure de 7 jours à  $20^\circ\text{C}$ ) ; il varie de  $6 \times 10^{-4}$  à  $8 \times 10^{-4}$  à 26 semaines, ce qui est inférieur à la limite de la norme JASS5 ( $8 \times 10^{-4}$ ) (Kasai et coll. 1991, cité par [54]).

Nagataki et coll. (1995) [59] ont optimisé des bétons autoplaçants en étudiant 18 formulations de béton. Ces bétons de rapport E/C de 0.45 contiennent différentes teneurs en gros granulats concassés de diamètre maximum 20 mm (de 24.5 à 34.5%), avec un dosage en ciment portland normal variant de 390 à 450  $\text{Kg/m}^3$ . les teneurs en superplastifiant (naphthalène) et en agent entraîneur d'air sont respectivement 3 et 0.033% de la masse du ciment. Les bétons développés ont été évalués vis-à-vis de la fluidité (diamètre d'étalement), la résistance à la ségrégation (pourcentage du mortier passant des mailles de 5 mm d'ouverture) et la capacité de remplissage des coffrages ferrailés. Egalement les caractéristiques rhéologiques des mortiers correspondants aux bétons étudiés ont été évaluées par la détermination de la viscosité et du seuil de cisaillement. L'étude a permis de définir une marge dans laquelle toutes les recommandations de fluidité et de stabilité sont satisfaites (la zone hachurée sur la figure I.2)



**Figure I.2. :** Zone de satisfaction des exigences pour les bétons fluides (Nagataki et coll.) [59] [54]

En effet, sur la figure I.2, on montre les relations existant entre l'étalement, le volume des gros granulats, la viscosité et le seuil de cisaillement du mortier ainsi que l'aptitude à remplir les coffrages ferrailés (indiqué par les cercles blanc et noircis). A environ 700 mm d'étalement, on assiste à un blocage des coffrages ferrailés par la sédimentation des gros granulats. Ceci est dû au phénomène de la ségrégation qui peut avoir lieu à cause de la haute fluidité du mélange qui affecte sa stabilité. D'autre part, pour des étalements proches de 500 m, le mélange est très cohésif et visqueux, ceci provoque un manque de déformabilité et empêche le passage du béton à travers les espaces entre armatures.

#### **I.4. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP :**

L'utilisation des additions minérales est intéressante sur le plan rhéologique car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton. D'autre part, le grand volume d'additions minérales utilisées dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie du ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton. En général, une matière pouzzolanique tel que la cendre volante améliore la déformabilité du béton (particules sphériques et lisses), le laitier est supposé d'améliorer la résistance et la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation. (Khayat et Guizani, cités par [54])

Généralement les BAP contiennent une quantité de ciment et de fines de l'ordre de  $500 \text{ kg/m}^3$  de dimension inférieure à  $80 \mu\text{m}$ . les additions utilisées sont en général des cendres volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau ou les fillers calcaires. Nous allons nous intéresser dans notre cas à la formulation des BAP avec les fillers calcaires parce qu'ils sont les plus utilisés pour des raisons de coût essentiellement.

##### ***I.4.1. les fillers calcaires :***

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ,
- Une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , déterminées en utilisant la granulométrie lazer.

##### **I.4.1.1. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques :**

Neto et Campitelli (rapporté par M. NEHDI en [60]) utilisent le « tow-points » test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire. Notons que les auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

Brookbans (cité par [60]), a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air.

#### **I.4.1.2. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP :**

A. Ghezal [37], a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3  $\mu\text{m}$  et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

Ogawa et coll. (1995) (rapporté par [54]) ont développé des formulations de bétons fluides (Détal =  $650 \pm 30$  mm) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C =  $0,55 \pm 5\%$ , contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 L, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de  $51 \pm 1\%$ ,  $8 \text{ kg/m}^3$  de superplastifiant (Naphtalène) et  $3 \text{ kg/m}^3$  d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.

Les mêmes bétons ont été étudiés vis à vis du retrait suivant la norme (JIS A1129) à une température de  $20^\circ\text{C}$  et une humidité relative de 60%. On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire, présentent une réduction très significative du retrait ( $< 400$  ( $\mu\text{m/m}$ ) et de la fissuration des surfaces.

### **I.5. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP :**

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques).

Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité.

#### ***I.5.1. les superplastifiants :***

Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméla mine sulfoné, polycarboxylate ou de naphtalène sulfonate.

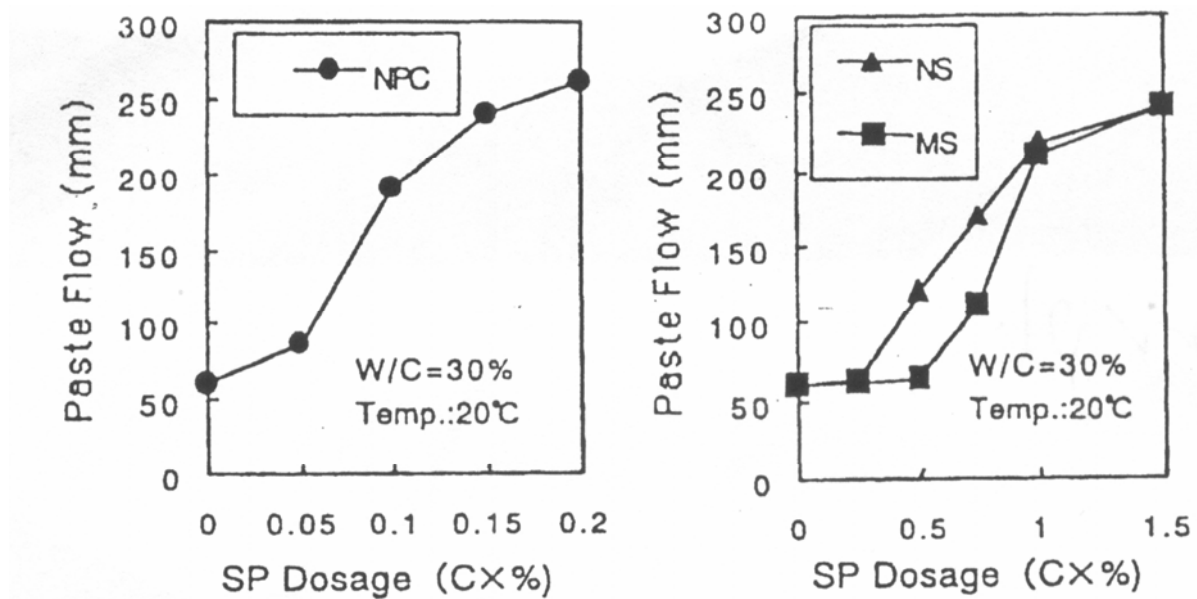
Y.Miura et al. (Rapporté par L. HASNI [41]) ont étudié les propriétés d'un mortier autoplaçant avec un nouveau fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères. Les auteurs ont comparé les propriétés rhéologiques d'un mortier de E/C = 0,5 adjuvanté par le FPC, un fluidifiant de type polycarboxylate PC et un fluidifiant de type naphtalène sulfonate NS.

Pour un étalement de 240mm, ils ont constaté que le dosage en PC et en FPC est plus faible que celui d'un NS. Par ailleurs, la viscosité plastique est plus élevée avec le FPC.

Kazuhiisa et al. [47] ont utilisé un nouveau fluidifiant, le NPC, dans les formulations des BAP, les auteurs ont aussi comparé le NPC avec d'autres fluidifiants comme le NS et le MS.

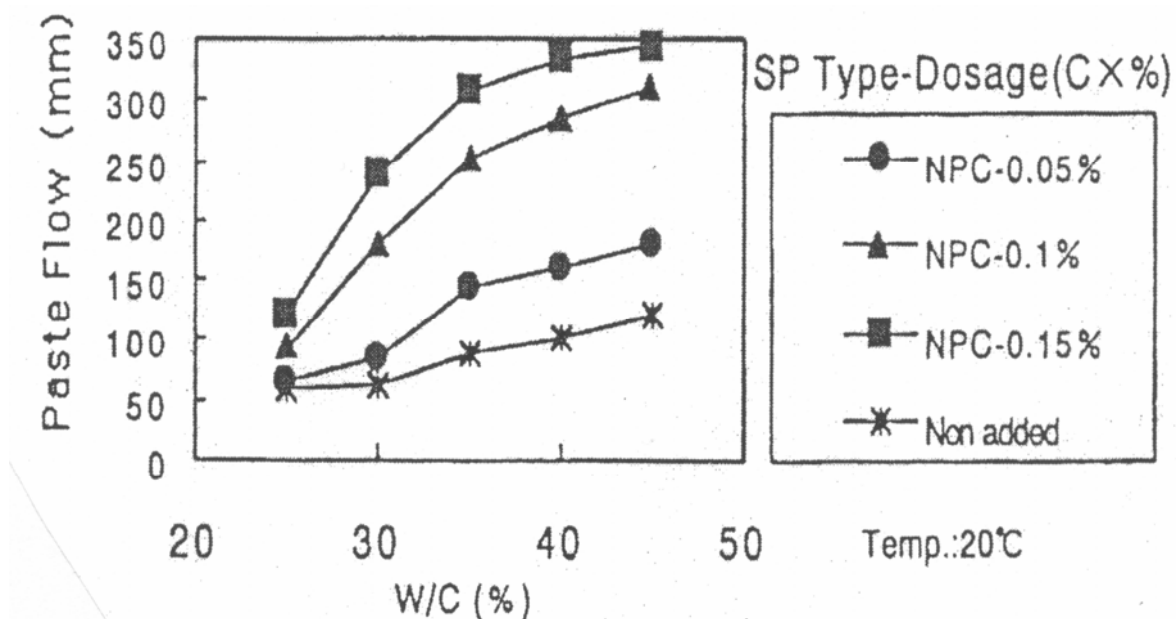
Les résultats ont donné des courbes (Figures I.3 et I.4) qui montrent que pour un étalement de 250 mm, le dosage en NPC est beaucoup plus faible que le dosage en NS et MS.

Ils remarquent que l'étalement est augmenté significativement pour un rapport E/C compris entre 0,3 et 0,4 lorsque le NPC est augmenté de 0,05% à 0,1%.



**Figure I.3 :** Relation entre dosage en Superplastifiant et l'étalement.

Tiré de [47]



**Figure I.4 :** Relation entre le rapport E/C et l'étalement pour différents dosages en NPC.



Tiré de [47]

### ***1.5.2. les agents de viscosité (ADV) ou agent Colloïdaux :***

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés.

Ces produits sont des hypocycloïdes extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

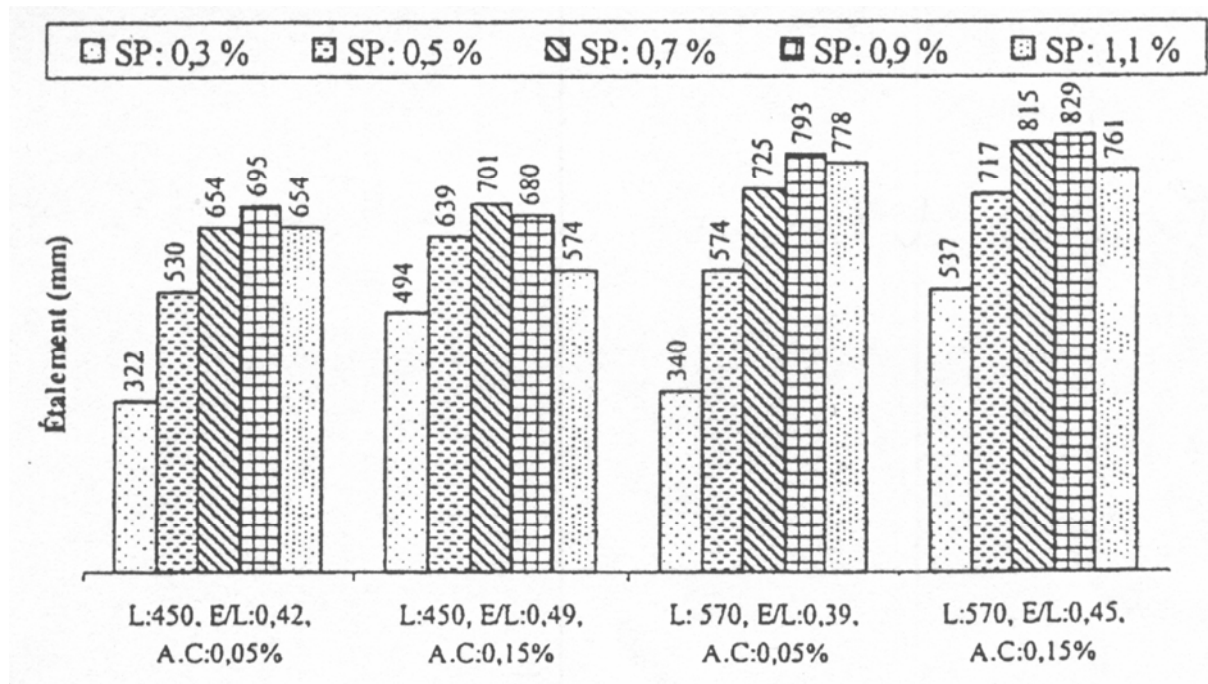
Les produits les plus utilisés pour la formulation des BAP sont :

- les dérivés cellulosiques : "hydroxy propyl méthyle cellulose" (HPMC), "Hodroxyethyl cellulose" (HEC), "carboxy methyl cellulose" (CMC),
- les ploymères issus de la biotechnologie, qui sont des polysaccharides obtenus par fermentation (gomme de Xanthane de welan, biopolymère p3,...)

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons, par contre ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants (Khayat, 1993) [49]. Les types les plus utilisés sont des dérivés de cellulose et de polysaccharides de source microbienne. Se sont des polymères solubles dans l'eau qui forment des solutions visqueuses par adsorption des longues chaînes sur la périphérie des molécules d'eau. En outre, les molécules adjacentes des chaînes de polymères peuvent développer des forces attractives entre elles et bloquer le mouvement de l'eau en causant un gel et l'accroissement de la viscosité (Izumi, 1990). Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats [54].

Certains auteurs, proposent d'autres agents de viscosité pour la formulation des BAP. Selon ces auteurs les polysaccharides sont difficiles à disperser dans un béton et leur dispersion dans l'eau pourrait induire une attaque bactérienne de la solution, ce qui limiterait le temps d'utilisation. Les auteurs proposent l'utilisation, combinée de silice précipitée (particules de dimension 50  $\mu\text{m}$ ) renfermant 20% de matière sèche et de polysaccharide dispersé dans une huile végétale.

A. Ghezal [37] a utilisé des BAP de 450  $\text{kg/m}^3$  et de 570  $\text{kg/m}^3$  de liant avec différents dosages en superplastifiant et différents dosage en agent colloïdal (gomme de welan), et un rapport E/L qui varie entre 0,42 et 0,45. L'auteur remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en agent de viscosité et il a constaté que quatre facteurs principaux sont capables d'entraîner un effet très significatif : le dosage en liant, le rapport E/L, le dosage en superplastifiant et le dosage en gomme de welan. Les résultats ont donné l'histogramme présenté dans la figure I.5.



**Figure I.5 :** Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP. [37]

Au niveau de la stabilité, les bétons contenant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Par exemple Kasai et coll. (1991) ont développé des bétons fluides (Détal = 500 à 600 mm) de rapport E/C de 0,6 et contenant 30% de remplacement massique du ciment par du laitier avec différents dosages de mélanges (A et B) de superplastifiants et d'agent colloïdal combinés (4,62% de type A et 4,62% B de la masse des liants). Ils ont enregistré un ressuage de 0,3 mL/cm<sup>2</sup> (essai réalisé sur un cylindre de diamètre 15 cm et de hauteur 30 cm, le moyen de mesure n'est pas déterminé). Ceci est inférieur à la spécification de la norme JASS5 (0.5 mL/cm<sup>2</sup>) (rapporté par [54]).

D'autre part, une étude faite par Yurugi et coll. (1989) sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) a relevé que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0,03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées).[54]

Fukute et coll. (1995) ont développé un béton fluide (E/C = 0,48) fait avec un ciment à base de laitier et ont utilisé un agent colloïdal fait avec de la cellulose (dosage de 0,3% de la masse de l'eau), un superplastifiant à base de polycarboxilique (dosage de 3% de la masse du ciment), et un AEA (dosage de 5,8 kg/m<sup>3</sup>). Les gros granulats ont un diamètre maximum de 20 mm. Ils ont recommandé un diamètre d'étalement de 650 ± 5 cm, une vitesse d'étalement horizontal inférieure à 3,3 cm/s et une différence de hauteur dans le "Box test" de 2 cm. L'étude de la résistance à la ségrégation pour le cas de l'étalement horizontal, a montré que le béton développé est uniforme même après un étalement de 7,2 m dans un coffrage de dimensions 2 x 1,1 x 7,2 m. Ceci est attribué à la combinaison de l'agent colloïdal et du superplastifiant qui améliorent respectivement la déformabilité et la résistance à la ségrégation du béton. Les temps de prise initial et final ont été prolongés de 2 à 3,5 heures par rapport au béton témoin ordinaire (E/C = 0,55; prise initiale à 6 heures). Ceci a été attribué à la présence de l'agent colloïdal et du superplastifiant. [54].

Ces bétons fluides développés ont présenté des résistances à la compression par fendage et des modules d'Young comparables aux bétons ordinaires ( $E/C = 0,55$ ). La variation de ces propriétés suivant la longueur d'étalement horizontal est également minimale ( $L = 7,2$  m). Les profondeurs de pénétration des ions chlore et de la carbonatation sont plus faibles pour les bétons fluides développés ( $E/C = 0,48$ ) que pour les bétons ordinaires (réduction de 2 mm pour les ions chlore et de 2,5 mm pour la carbonatation à 4 mois de début de l'essai) [54].

### **I.6. L'aspect empirique de la formulation des BAP :**

La 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.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports  $E/C$  sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer)[91].

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400  $l/m^3$ .
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350  $kg/m^3$ . En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200  $kg/m^3$ .
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle ; la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel [91]. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est

rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

## I.7. Les Approches de formulation des BAP :

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes :

### I.7.1. L'approche Basées sur l'optimisation des Mortiers :

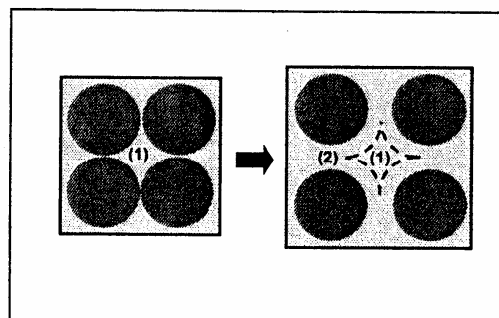
Okamura [67][81][89][91], le concepteur des BAP propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport 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* (cité par [91]) 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* (cités par [91]) montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

### I.7.2. L'approche basée sur l'optimisation du volume de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh *et al* introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure I.6. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage [91].



**Figure I.6. :** Notion d'excès de pâte :  
la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

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.[91]

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Petters-soa et Bai [91]. 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.

### ***1.7.3. L'approche basée 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.

Reprenons la figure I.6, 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 (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) 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 [78][79][81] 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 (Bétonlab Pro2), qui permet aussi 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.

### ***1.7.4. Méthode basée sur un plan d'expérience :***

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat *et al* (Cité par [91]) 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 superplastifiant 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. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

### ***1.7.5. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE :***

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) [77] pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un

béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode [39]. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

O. HADDAD, S. AGGOUN et al [39], ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. NACHBAUR et al. [58] ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des béton d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adapté aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés.

## **I.8. Les Méthodes de formulation des BAP :**

Les méthodes de formulation des bétons autoplaçants proposées dans la littérature sont issues d'une ou de plusieurs des approches vues dans paragraphe I.7 et sont toutes basées sur les constats suivants :

- lors de l'écoulement en milieu confiné, ce sont les gros gravillons qui sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formulateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant.
- Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en superplastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc le blocage. Au contraire une variation du dosage en superplastifiant a peu d'influence sur la viscosité mais un surdosage peut entraîner des problèmes de ressuage.

Le formulateur doit donc établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation.

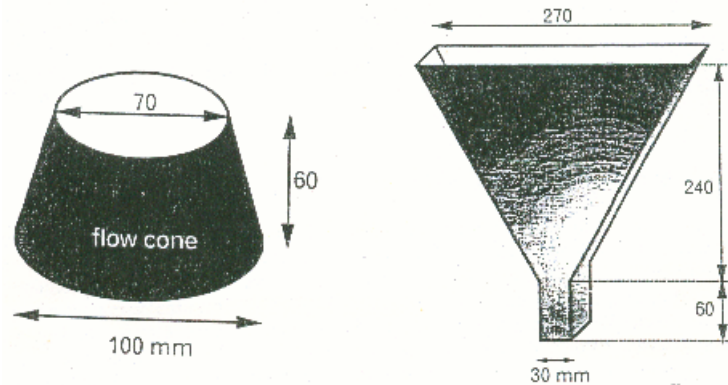
### ***I.8.1. Approche Japonaise*** [89][91] :

Les chercheurs de l'université de Tokyo Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants [66][67].

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50 % de leur compacité (les chercheurs ne précisent pas dans leur article comment la compacité est mesurée). Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

De même, pour assurer une ouvrabilité suffisante au mortier, ils fixent le volume de sable égal à 40 % du volume total du mortier. Notons que les auteurs excluent du terme sable les fines inférieures à 90  $\mu\text{m}$ , qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants.

Enfin, l'optimisation de la pâte s'effectue sur des mortiers dont la teneur volumique en sable est égale à 40 %. Ces mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir. (Figure I.7)



**Figure I.7. :** Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers. (Tiré de [81])

Les auteurs en tirent – à partir des essais – deux grandeurs adimensionnelles :

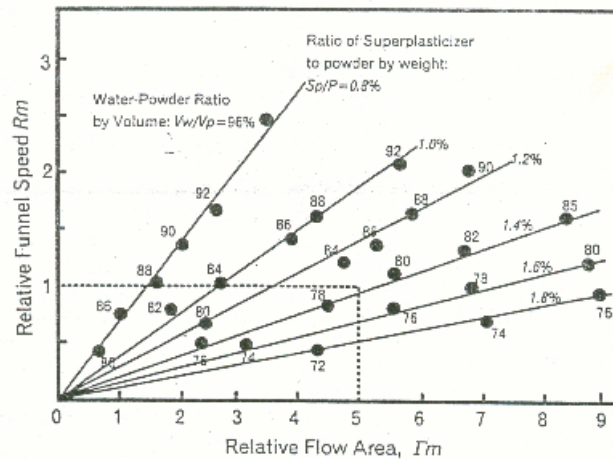
- l'étalement relatif  $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$
- la vitesse relative d'écoulement  $R_m = \frac{10}{t}$

où  $d$  (en mm) est le diamètre final de la galette de mortier,  $d_0$  est le diamètre inférieur du cône (100 mm) et  $t$  (en s) le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Selon les auteurs, le terme  $\Gamma_m$  caractérise la fluidité du mortier (plus  $\Gamma_m$  est grand plus le mortier est fluide) alors que le terme  $R_m$  caractérise la viscosité (plus  $R_m$  est petit, plus la viscosité est grande).

***D'après leur expérience, il faut avoir simultanément  $\Gamma_m = 5$  et  $R_m = 1$  pour obtenir un béton autoplaçant acceptable.***

D'un point de vue pratique, l'expérience montre que l'on a une relation linéaire entre  $\Gamma_m$  et  $R_m$ , pour un dosage en superplastifiant donné et pour différents rapports volumiques eau sur poudre. (Figure I.8)



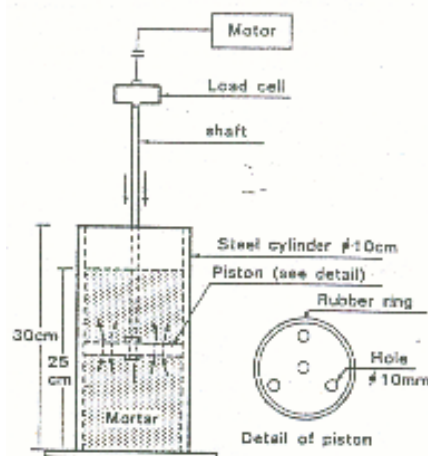
**Figure I.8. :** Relation entre les termes  $\Gamma_m$  et  $R_m$  pour différents dosages en superplastifiants ( $S_p/P$ ) et différents rapports volumiques eau sur poudre ( $V_w/V_p$ ).  
(Tiré de [81])

Cette méthode de formulation présente l'intérêt de sa simplicité. Toutefois, aux dires même de ses concepteurs (Okamura et Ozawa), elle est très sécuritaire.

### I.8.2. Les travaux d'Ozawa et al (Cité par [81]) :

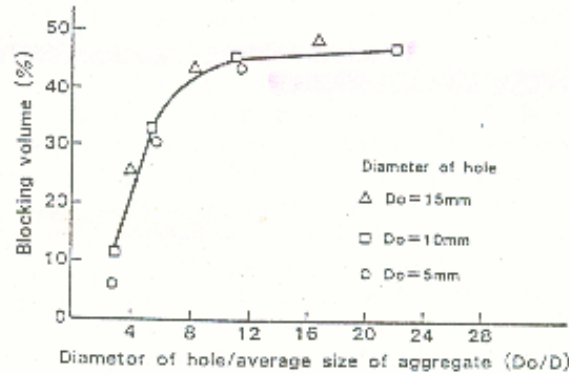
En tenant compte du confinement pour optimiser la teneur en gravillon, Ozawa et al. ont étudié l'écoulement de mortiers dans le montage présenté sur la figure I.9.

Le montage est constitué d'un cylindre contenant du mortier et d'un piston avec des trous. Le piston est enfoncé à vitesse constante et le mortier s'écoule au travers de trous effectués dans le piston. Répétant la mesure dix fois sur une même composition, les auteurs ont mesuré le fréquence d'apparition d'un blocage du piston en fonction du dosage en sable et pour un rapport eau sur liant constant. Ils ont montré, pour chaque sable, l'existence d'une teneur critique  $V_{crit}$  en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Ils ont ensuite déterminé la teneur critique pour trois sables d'étendue granulaires réduites (0.6-1.2, 1.2-2.5, 2.5-5 mm) et pour différents diamètres  $D_0$  de trous dans le piston.



**Figure I.9. :** Piston pour tester l'aptitude au remplissage de mortier. (Tiré de [81])





**Figure I.10. :** Relation entre les teneurs critiques en grains de taille D en fonction du rapport du diamètre des grains sur le diamètre des ouvertures dans le piston.  
(Tiré de [81])

Selon les auteurs  $V_{crit}$  est une teneur critique en dessus de laquelle le blocage est systématique.

Comme le montre la figure I.10, pour une nature de granulat donnée, les termes  $V_{crit}$  sont une fonction du rapport entre le diamètre du sable D et  $D_0$  ; plus ce rapport est important, plus la teneur critique est faible. Finalement, ils ont évalué la probabilité de blocage de trois sables constitués des sables précédents et ont montré que le risque de blocage pourrait être estimé de la façon suivante:

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \quad (I.1)$$

où  $V_i$  est la teneur réelle en grains de taille  $d_i$ ,  $V_{crit,i}$  est la teneur critique en grains de taille  $d_i$  et  $R_b$  est le risque de blocage. Une valeur proche de 1, indique une forte probabilité de blocage.

### I.8.3. Les travaux de Tangtermsirikul et Van :

Tangtermsirikul et Van ont appliqué l'approche d'Ozawa et al. pour évaluer le risque de blocage de bétons dans l'essai de la boîte en L. Ils ont, pour cela, fait l'hypothèse simplificatrice que le phénomène était indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. L'équation I.1, s'écrit alors pour un béton :

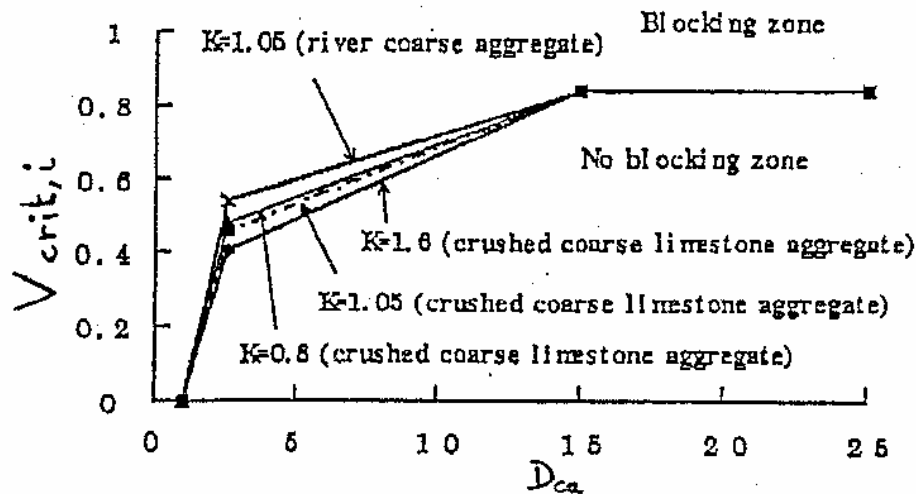
$$R_b = (1 - V_p) \sum_{granulats} \frac{y_i}{V_{crit,i}} \quad (I.2)$$

Où  $y_i$  est la proportion volumique de grains de taille  $d_i$  rapportée au volume de granulats et  $V_p$  est la teneur en pâte.

On peut donc en déduire, pour chaque rapport gravillon sur sable, la teneur en pâte minimale pour éviter un blocage en écrivant  $R_b = 1$ .

Sur la base de nombreux essais, les auteurs ont proposé les courbes maîtresses présentées sur la figure I.11. On voit que ces courbes dépendent de :

- la nature du granulat (un granulat roulé présente moins de risque de blocage qu'un granulat concassé)
- du rapport K entre le diamètre des armatures et le diamètre maximal des gravillons



**Figure I.11. :** Variation de  $V_{crit}$  en fonction de  $D_{ca}$ .

$D_{ca}$  est le rapport du diamètre  $d_i$  des granulats sur l'espace libre entre deux armatures.  
 $d_i = M_{i-1} + 3/4(M_i - M_{i-1})$  où  $M_i$  et  $M_{i-1}$  sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire  $i$ ;  $K$  est le rapport entre le diamètre maximal du gravillon et le diamètre des armatures.

(Tiré de [81])

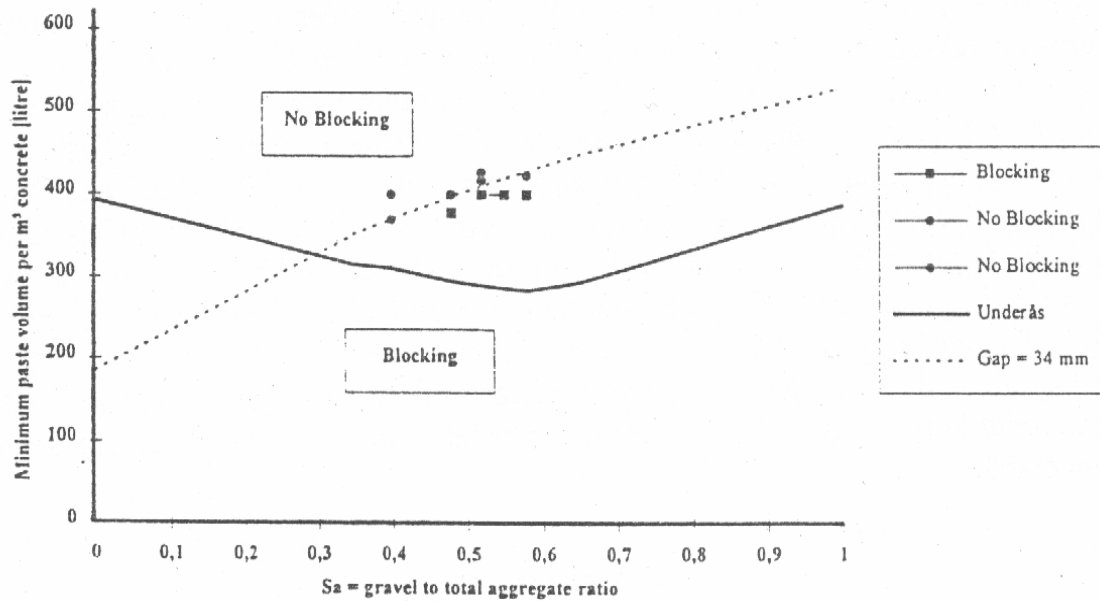
Selon T. Sedran [81], cette approche probabiliste des risques de blocage est intéressante, car elle décrit les phénomènes mis en jeu. Toutefois, d'un point de vue pratique, il est nécessaire de déterminer la courbe maîtresse décrivant les termes  $V_{crit,i}$  pour chaque nouveau type de granulat, ce qui nécessite de nombreux essais sur bétons. De plus, ces courbes sont issues d'ajustement sur des expériences et incluent donc indirectement des effets d'interactions granulaires qui ne sont pas pris en compte par la théorie, étant donnée la nature additive du terme  $R_b$ . Ces effets d'interactions, ne seront pas les mêmes si on change de granulométrie pour une même nature de granulat, donc la courbe maîtresse devra être de nouveau établie.

#### **I.8.4. Méthode Suédoise :**

Petersson et al. (Cité par [81]) ont repris l'approche précédente (celle de Tangtermsirikul et Van) et l'ont intégré dans le processus de formulation suivant :

A l'aide de l'équation I.2., il estiment, pour un confinement donné et pour chaque rapport gravillon sur sable, le volume de pâte critique pour le blocage.

Ils mesurent par ailleurs la compacité du mélange sable plus gravillon pour déterminer la quantité minimale de pâte nécessaire pour remplir les vides entre granulats. La figure I.12 présente les résultats où les auteurs ont déterminé la relation entre le volume de pâte et le rapport  $S_a$  (gravillon/granulats) pour différents espacements entre armatures.



**Figure I.12.** : Courbes pour détermination du volume minimal de pâte.

La courbe en gras détermine la quantité de pâte minimale pour remplir la porosité entre les granulats. La courbe en pointillés détermine le volume de pâte minimal pour éviter le blocage. (Tiré de [81])

Il faut toutefois noter que cette valeur est une valeur par défaut puisque le volume de pâte doit être supérieur au volume de pâte indiqué sur la courbe en gras pour écarter les granulats et avoir un étalement suffisant du béton. Les auteurs ne donnent pas de précision à ce propos et c'est une lacune de la méthode de formulation.

La composition de la pâte est déterminé, d'une part, par la résistance visée qui impose le rapport eau sur liant, et d'autre part, à l'aide de mesures rhéologiques sur le mortier dont on a enlevé les grains de dimensions supérieure à 250 µm. L'optimisation du mortier vise à réduire le seuil de cisaillement tout en ayant une viscosité suffisante en jouant sur la nature des liants, le dosage en eau et en superplastifiant. Les bétons ainsi formulés sont ajustés comme dans la méthode de formulation d'Okamura et Ozawa. Ceci est, d'ailleurs, en accord avec l'approche adoptée par les chercheurs de l'université de Tokyo (Okamura et Ozawa [65] ainsi que Ouchi et al. [69]).

#### ***1.8.5. Méthode Française :***

Des chercheurs ont proposé une première méthode de formulation des BAP qui a été développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique, permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire.

T. SEDRAN, F. DE LARRARD, F. HOURST et C. CONTAMINES, [81] chercheurs au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées « LCPC, Paris » ont présenté une nouvelle méthode rationnelle pour la formulation des bétons autoplaçants. Cette méthode est basée sur les concepts qui seront présentés ci-après :

- le modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique, permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques

des constituants (compacités propres), des proportions du mélange et de la distribution granululaire.

- La rhéométrie au BTRHEOMTM,

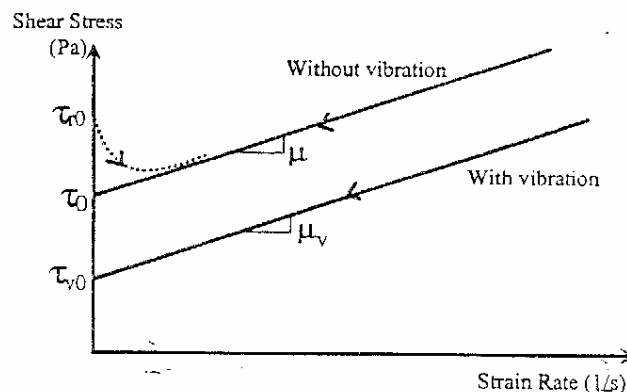
La méthode en question n'est applicable qu'aux BAP sans agent de viscosité.

#### I.8.5.a. Le rhéomètre BTRHEOMTM : [45][81]

Le nouveau type de rhéomètres développé au LCPC a été adapté pour la caractérisation de la rhéologie à l'état frais des bétons mous à fluides. Le BTRHEOM<sup>TM</sup> est un appareil qui permet de tester un échantillon de béton de 7 litres. Commandé par un ordinateur portable, le BTRHEOM<sup>TM</sup> est contrôlé par une seule personne et peut être utilisé aussi bien au laboratoire que sur site.

La **Figure I.13**, montre un diagramme type obtenu par le rhéomètre. On peut remarquer que les bétons mous à fluides peuvent être considérés comme des fluides de Bingham et le BTRHEOM<sup>TM</sup> permet de déterminer cinq paramètres qui permettent de décrire le comportement du béton :

- le seuil de cisaillement  $\tau_0$  (en Pa) et la viscosité plastique  $\mu_0$  (en Pa.s) du béton non soumis à la vibration,
- le seuil de cisaillement  $\tau_{v0}$  (en Pa) et la viscosité plastique  $\mu_v$  (en Pa.s) du béton sous vibration,
- le seuil de cisaillement au repos  $\tau_{r0}$  (en Pa), qui décrit la thixotropie du béton.



**Figure I.13.** : Les paramètres rhéologiques déterminés à l'aide du BTRHEOM<sup>TM</sup>

Bien sur, puisqu'il s'agit de bétons autoplaçants seuls les propriétés sans vibrations sont considérées.

Il est à noter que le seuil de cisaillement est étroitement lié à l'affaissement du béton. Plus le seuil de cisaillement est grand plus l'affaissement est petit. De ce fait, les BAP ont un très faible seuil de cisaillement (de l'ordre de 0 à 500 Pa) et ils sont souvent caractérisés en matière de viscosité comme étant des fluides newtonien.

Selon T. SEDRAN, et en se basant sur l'expérience du LCPC, il est suggéré que la viscosité soit inférieure à 200 Pa.s afin d'obtenir :

- une mise en place facile
- une meilleure pompabilité

- une meilleure finition
- et un aspect acceptable du béton après décoffrage.

Pour des constituants donnés, la teneur en eau est le paramètre le plus influant sur la viscosité du béton. Donc, le formulateur devra définir l'équilibre entre la résistance du béton qui impose un faible rapport eau sur liant et une bonne ouvrabilité sur le site.

#### **I.8.5.b. Le model des suspensions solides :**

Une partie de l'eau dans le béton frais remplit les interstices entre les grains du squelette granulaire (liants et granulats) ; et ce n'est que l'autre partie seulement qui confère au mélange son ouvrabilité. Donc, le fait d'améliorer la compacité du squelette granulaire permet de diminuer la quantité d'eau tout en conservant la même maniabilité, ou bien permet d'améliorer la maniabilité tout en conservant la même quantité d'eau. En d'autres termes, l'optimisation des performances du béton durci est une question d'assurer une meilleure compacité à son squelette granulaire.

De nos jours, La gamme des constituants disponibles pour la fabrication du béton est très étendue ; les adjuvants et les additions minérales, plusieurs types de ciments et granulats. Mais jusqu'à présent l'ingénieur doit seulement approcher le mélange le plus compact de grains en utilisant des courbes maîtresses qui ne tiennent pas compte des propriétés intrinsèque de chaque constituant. Et d'autre part, les essais technologiques à répétition qui sont d'un intérêt majeur deviennent de plus en plus onéreux à réaliser.

Dans ce contexte, le LCPC a développé un model mathématique connu sous le nom : « Modèle des suspensions solides ».[81] Ce modèle est basé sur l'analyse de l'interaction granulaire entre les différents constituants d'un mélange. Il peut prévoir la compacité de tous les mélanges granulaires secs avec une précision de 1% à partir de quelques propriétés des différents constituants qui sont :

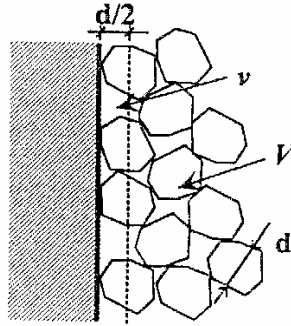
- densité apparente ;
- les compacités des classes unimodales ;
- la granularité du mélange ;
- les proportions massiques des constituants.

Ce modèle fait appel aussi à une valeur dite « la viscosité relative » pour un béton donné. Cette grandeur caractéristique est déterminée à partir des propriétés des constituants du squelette solide et de la teneur en eau.

L'ouvrabilité du béton peut être estimé à partir de la valeur calculée de la viscosité relative ; plus la viscosité relative est petite plus le béton est maniable.

Puisque la compacité du mélange est compromise « diminuée » par la présence de parois. Le modèle tient compte du degré de confinement du mélange.

Cette perte dans la compacité – due au confinement – peut être estimée par le modèle de Ben Aïm, qui stipule que la compacité  $\beta$  est diminuée quand la distance mesurée à partir de la paroi est inférieure à  $d/2$ . Comme le montre la figure I.14.



**Figure I.14. :** Représentation de L'effet de paroi. Tiré de [81]

Donc, la compacité  $\beta$  devient :

$$\beta^* = \left(1 - \frac{v}{V}\right)\beta + \frac{v}{V} k \beta$$

Où :

V est le volume du récipient ;

v est le volume de la zone comprise entre les parois et une distance de  $d/2$  des parois ;

k est un coefficient : A partir d'expériences - selon SEDRAN – les valeurs suivantes ont été trouvées :

$k = 0.87$  pour des granulats roulés

$k = 0.73$  pour des granulats concassés

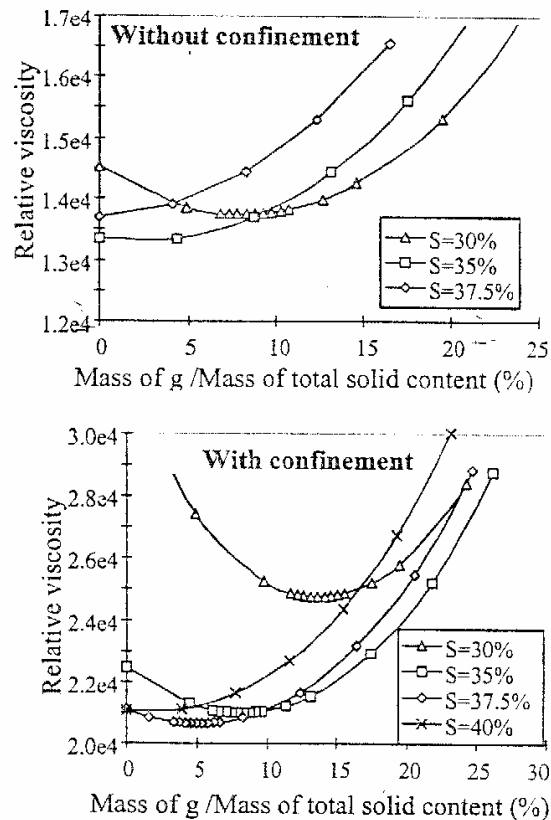
De plus, l'effet de paroi engendré par les tuyaux de pompage (Pumping pipes) de diamètre D peut être décrit par l'expression suivante :

$$\frac{v}{V} = 1 - \frac{(D - d)^2}{D^2}$$

Il ressort donc, que le modèle des suspensions solides est d'un intérêt majeur vu qu'il tient compte de l'effet paroi exercé par les coffrages et les armatures.

Par exemple, si l'on considère un BAP qui passe entre deux barres parallèles espacées de 50 mm (espace libre entre armatures). On peut supposer que l'écoulement du béton est similaire à celui d'un béton qui s'écoule entre deux plaques parallèles espacées de 50 mm. Dans ce cas,

le rapport  $\frac{v}{V}$  à mettre en équation de  $\beta^*$  est  $\frac{v}{V} = \frac{d}{50}$ . (d en mm).



**Figure I.15. :** Courbes théoriques de l'influence du confinement. Tiré de [81]

Afin d'estimer l'influence de tels confinements sur la compacité des bétons, les auteurs ont fait des calculs sur ensemble de matériaux en utilisant le modèle des suspensions solides dans les cas confiné et non-confiné.

Le volume de pâte et la composition du béton ont été fixés. Les pourcentages du sable (S), du gravier fin (g) et du gros gravier (G) ont été optimisés tout en conservant la somme  $S+s+G$  constante et égale à 78.7% du total des constituants solides du béton.

Afin d'éviter la ségrégation, les béton à granularité discontinue ont été exclus. De ce fait, et selon l'expérience, le pourcentage des graviers fins doit être supérieur à 10%. Dans ce contexte, la figure I.15, montre que le béton optimal (celui qui présente la plus petite viscosité relative) contient 30% de sable, en d'autres termes  $(G+g)/S = 1.62$  (en masse) dans le cas non-confiné et 35% de sable, c'est à dire  $(G+g)/S = 1.25$  dans le cas confiné.

La spécificité connue des BAP concernant leur faible rapport gravier/Sable est encore une fois démontrée par ce modèle.

D'une manière générale, le modèle des suspensions solides est d'un intérêt majeur vu qu'il tient compte du confinement et de la nature des constituants d'une manière quantitative. Par exemple, il est connu qu'avec des granulats roulés, un BAP admet un volume plus grand de gros granulats. Le modèle est en accord avec ce constat vu qu'il préconise une compacité plus grande pour les granulats roulés.

**I.8.5.c. Un processus rationnel pour la formulation des Béton Autoplaçants :**

Sur la base des enseignements recueillis d'une part, de la rhéométrie au BTRHEOM<sup>TM</sup> et d'autre part, de ceux dégagés du modèle de suspension solide, SEDRAN propose un processus rationnel pour la formulation des BAP (sans agent de viscosité). [79] [81]

- 1- Initialement, un ensemble de spécification est établi, qui contiennent au minimum les deux critères suivants :
  - a. L'étalement qui doit être compris entre 60 et 70 cm (ou bien un seuil de cisaillement mesuré au BTRHEOM<sup>TM</sup> qui doit nécessairement être inférieur à 500 Pa.) ;
  - b. La viscosité plastique qui doit être inférieure à 200 Pa.s pour assurer une bonne ouvrabilité et un écoulement homogène sur site, mais qui doit aussi être supérieure à 100 Pa.s pour éviter tout risque de ségrégation.
- 2- Pour chaque projet, deux autres spécifications au minimum sont définies :
  - a. La résistance caractéristique à 28 jours ;
  - b. Les conditions de confinement maximal qui peut se présenter sur site (par exemple l'espacement minimal entre les armatures), qui définissent le rapport  $v/V$ . comme il est expliqué dans le paragraphe I.8.5.b.
- 3- Le choix des constituants à utiliser se fait sous la lumière de quelques essais :
  - a. Un ensemble de fractions granulaires permettant la composition d'un squelette granulaire adéquat de granularité continue ;
  - b. Un couple Ciment/Superplastifiant compatible ;
  - c. Un retardateur compatible,
  - d. Des additions minérales fines (fillers calcaires, cendres volantes, laitiers etc.) qui sont nécessaires pour diminuer la teneur en ciment, puisque les BAP nécessitent un volume élevé de fines
- 4- La formulation peut être établie selon les procédures suivantes :
  - a. Une combinaison initiale de liants est à priori fixée (par exemple 70% de ciment et 30% de fillers calcaire). Quand plusieurs additions minérales sont disponibles le choix est gouverné par les expériences locales et/ou par des spécifications spéciales. Par exemple, si l'on recherche une croissance de la résistance au delà de 28 jours, les cendres volantes sont préférables.
  - b. Le dosage de saturation en superplastifiant [26] est déterminé pour la combinaison de liants choisie. Il est possible que cette quantité de superplastifiant puisse conduire à un béton très visqueux, dans ce cas la moitié de la quantité du superplastifiant est choisie.
  - c. La demande en eau du liant est mesurée en présence du superplastifiant. C'est une façon de mesurer la compacité, qui nécessite l'application du modèle de suspension solide.
  - d. Les calculs sont élaborés en utilisant le modèle de suspension solide en tenant compte du confinement (le rapport  $v/V$ ). La viscosité relative est arbitrairement fixée à  $5 \cdot 10^4$  (ce qui correspond à un BAP selon l'expérience du LCPC) et la teneur en eau est minimisée. Le rapport Addition minéral/Ciment est gardé constant (tel qu'il a été fixé dans l'étape 4.a), pendant que les proportions de granulats et de liants sont optimisées.



- e. Le béton obtenu est gâché (un échantillon de 10 à 15 litre est suffisant) et le dosage en eau est ajusté de telle manière à obtenir la viscosité ciblée.
- f. Le dosage en superplastifiant est ajusté de façon à obtenir l'étalement désiré (ou seuil de cisaillement). On peut noter que cela n'influe pas beaucoup sur la viscosité plastique. A ce niveau, le béton obtenu répond aux exigences en matière de seuil de cisaillement (l'étalement) et de viscosité plastique.
- g. La résistance à la compression du béton est mesurée (si le temps le permet) ou bien estimée à l'aide d'une formule empirique. Pour ces raisons la formule classique de FERET a été généralisée pour être appliquée aux bétons contenant des additions minérales fines :

$$F_c = \frac{K_g R_c}{\left(1 + 3.1 \frac{W+A}{C(1+K_1+K_2)+BFS}\right)^2}$$

Où :

- $K_g$  est un coefficient granulaire. On peut admettre les deux valeurs suivantes :  
 $K_g = 5.4$  pour les granulats concassés,  
 $K_g = 4.8$  pour les granulats roulés.
- $R_c$  est la résistance du ciment mesurée sur un mortier ISO (les proportions sable:ciment:eau sont : 3:1:0.5)
- $W$  est le dosage en eau du béton (en  $\text{kg/m}^3$ , la quantité d'eau qui existe dans les additions est à ajouter)
- $A$  est le volume d'air occlus (en  $\text{l/m}^3$ )
- $C$ , PFA, SF, LF et BFS sont respectivement les masses (en  $\text{kg/m}^3$ ) du ciment, cendres volantes, fumée de silice, fillers calcaires, laitiers de hauts fourneaux.
- $K_1 = 0.4 \text{ PFA/C} + 3 \text{ SF/C}$  ( $K_1 \leq 0.5$ ) est le coefficient pouzzolanique
- $K_2 = 0.2 \text{ LF/C}$  ( $K_2 \leq 0.07$ ) est le coefficient d'activité des fillers calcaires.

Si la résistance est très élevée ou bien trop faible, une nouvelle combinaison de liants doit être choisie et le processus est reconduit à partir de l'étape 4.b. De toute façon, le dosage en eau n'a pas grande tendance à changer par rapport à celui de la formule de référence. Donc, une prédiction effectuée à l'aide de la formule de FERET peut être utile pour la détermination la composition finale du liant.

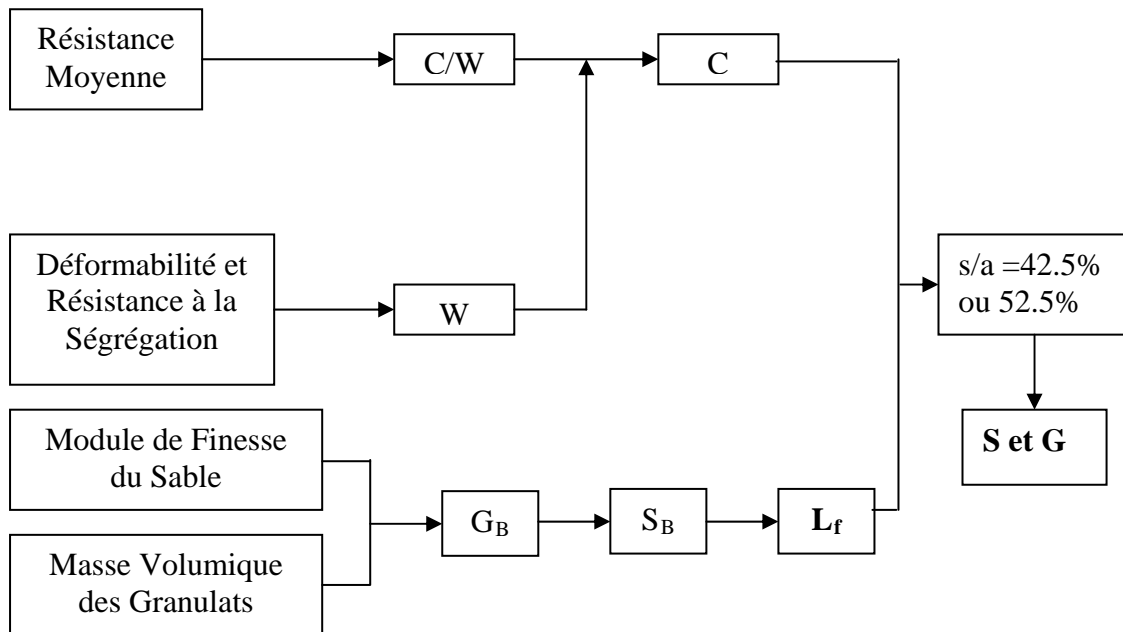
- h. Finalement, l'évolution du comportement rhéologique doit être étudié. Si la prise est jugée non adéquate, un retardateur peut être introduit.

Bien sûr, un essai de remplissage (comme le l'essai au U-box par exemple) peut être effectué dans le laboratoire avant toute utilisation du béton sur chantier.

Il est important de noter que le modèle de suspension solide peut converger, dans certains cas, vers un béton à granularité discontinu. Cela peut se produire si une fraction intermédiaire de grains possède une faible compacité propre (due à sa forme anguleuse). Quoique tels bétons soient optimisés d'un point de vue de compacité, ils présenteront une disposition à la ségrégation. Un squelette granulaire continu doit être préféré même si la demande en eau est légèrement plus importante.

**I.8.6. La Méthode de Sakata et coll. : [89]**

Le schéma sur la figure I.16, résume la méthode formulation mise au point par Sakata et coll. en 1995.



**Figure I.16. :** Résumé de la méthode de formulation de BAP de Sakata et coll.[89]

Cette méthode a été proposée suite aux travaux réalisés sur des BAP à base des matériaux suivants :

- Ciment portland ordinaire
- Filler calcaire d'une densité de 2,73 et de 3000 cm<sup>2</sup>/g de surface spécifique (Blaine)
- Superplastifiant de type condensé de polynaphtalène sulfonate
- Agent colloïdal de type acrylamide

Une des caractéristiques de base de cette méthode est que la quantité totale des granulats (fins ou gros) est constante. On peut cependant faire varier le rapport granulats fins/(gros granulats + granulats fins). Les quantités de superplastifiant et d'agent colloïdal sont fixées d'après des abaques créés à partir des résultats expérimentaux de Sakata et coll. (1995).

Reprenant les éléments de la figure I.16, il faut d'abord trouver le rapport eau/ciment (W/C), sachant la résistance désirée à 28 jours, la relation suivante permet de trouver le rapport eau/ciment :

$$f'_c = 19,2 \times \frac{C}{W} + 5,80 \quad \text{--- (I.3)}$$

$$\frac{W}{C} = \frac{19,2}{f'_c - 5,80} \quad \text{--- (I.4)}$$

La seconde étape consiste à trouver la quantité d'eau (W) nécessaire, selon la consistance désirée du béton. Le mérite de cette méthode est de proposer un béton adapté à chaque situation et ainsi éviter de faire un béton trop autoplaçant pour les besoins et, de ce fait même, trop coûteux. Ainsi, selon l'étalement, la déformabilité et la résistance à la ségrégation, on trouve une teneur en eau adéquate. C'est encore par la consultation d'abaques qu'on trouve la

quantité d'eau efficace dont aura besoin le béton. Selon la quantité d'eau trouvée (W), on peut déduire la quantité de ciment (C).

L'étape suivante consiste à trouver la quantité de filler calcaire. Il faut cependant savoir que le filler calcaire a pour objet de remplacer une certaine partie des granulats. Il faut donc trouver les quantités de base de sable (Sg) et de gros granulats (Gg). La quantité de base de gros granulats est trouvée en multipliant leur masse volumique sèche par le coefficient correspondant au module de finesse du sable, donné dans le tableau I.1 :

<b>M. F. du sable</b>	<b>2.40</b>	<b>2.60</b>	<b>2.80</b>	<b>3.00</b>
<b>Coefficient</b>	<b>0.65</b>	<b>0.63</b>	<b>0.61</b>	<b>0.59</b>

**Tableau I.1. :** Coefficients permettant de trouver la quantité de gros granulats

Ayant trouvé le volume de gros granulats, de ciment, d'eau et d'air (qu'on évalue à 2%), on peut déduire le volume du sable. En multipliant le volume de sable par sa densité on obtient  $S_B$ . La quantité de filler calcaire est le résultat de la multiplication de sa densité par 0,283.

Il s'agit enfin de trouver le rapport granulats fins/(gros granulats et granulats fins), qui sera égale à 42,5% ou à 52,5%, selon le type de béton désiré.

Cette méthode, en maintenant la quantité de granulats constante, n'est pas en contradiction avec la méthode de Okamura et Ozawa, qui prône une quantité maximale de gros granulats.

### **I.9. Discussion et comparaison entre les différentes formulations :**

Etant donné que les différentes méthodes de formulation sont basées sur différents critères, la comparaison est difficile et nous pourrions dire que suivant les méthodes et vu la sensibilité de la formulation des BAP, les formulateurs doivent :

- Etablir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour assurer la fluidité du béton mais aussi son homogénéité,
- Jouer sur les dimensions et le volume des gravillons en gardant une certaine limite qui reste à bien définir pour éviter le phénomène de blocage, car la réduction du volume de la pâte et l'utilisation des gravillons de petites dimensions influe négativement sur la résistance mécanique dans la gamme usuelle des bétons.

L'approche japonaise par sa simplicité présente un cahier des charges qui offre des teneurs en granulats arbitraires et faibles par rapport à d'autres approches, à notre avis pour garantir l'absence de tout blocage. Notons aussi que les auteurs ne précisent pas la nature des gravillons (roulés ou concassés) qui influe sur l'existence ou non de phénomène de blocage.

La méthode présentée par Tangtermsirikul et Van qui optimise la teneur en gravillons en prenant compte de l'effet de confinement et la nature des gravillons est intéressante car on peut en déduire pour chaque rapport gravillon sur sable, la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage. Mais d'un point de vue pratique, il est nécessaire de déterminer la courbe décrivant les termes  $V_{crit}$ , pour chaque nouveau type de granulat, ce qui nécessite de nombreux essais sur le béton. La méthode est alors rendue très lourde.

Petersson et al, ont utilisé la même méthode précédente et ils estiment par un confinement donné et pour chaque rapport gravillon sur sable, le volume de pâte critique pour le blocage. Mais il faut toute fois noter que :

- cette valeur correspond au volume de pâte minimal (courbe en gras sur la figure I.12) car le volume de pâte réel doit toujours lui être supérieur pour avoir un étalement suffisant,
- les auteurs ne donnent pas les limites visées dans leur approche.

Les chercheurs du LCPC ont fait un travail considérable sur la formulation des bétons hydrauliques et sur le problème de rhéomètre, mais leurs études présentent deux limites :

- les paramètres rhéologiques sont propres au BTRHEOM, et que tout le monde n'utilise pas ce rhéomètre. Il reste toujours intéressant de comparer leurs résultats avec d'autres rhéomètres.
- La formulation des BAP utilisée est peu réaliste sur le plan industriel (le dosage en ciment est élevé, la complexité de l'approche imposant des paramètres tels que les coefficients de confinement propres à leur expérience).

De manière générale, toutes les approches de formulation présentées n'avaient pas été appliquées pour des BAP contenant des agents de viscosité, souvent employés pour améliorer la plasticité, et contenant des entraîneurs d'air, utilisés pour l'obtention de meilleurs parements.

D'autre part, la lecture de la littérature ne montre pas si les différentes approches, issues du laboratoire, ont été validées sur site à partir d'essais en vraie grandeur, afin de mieux appréhender le blocage et la ségrégation.

## I.10. Essais et techniques de caractérisation des BAP :

Afin de traiter des différentes caractéristiques et des moyens de les contrôler pour les bétons autoplaçant, nous passerons en revue les propriétés essentielles recherchées ainsi que les différents paramètres qui les contrôlent.

### I.9.1. Les Propriétés Essentielles Recherchées

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même, un des avantages des bétons autoplaçants sera d'**améliorer la maniabilité** du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse **remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration** (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité).[54]

La compacité du béton est une propriété recherchée pour avoir une matrice homogène, afin de favoriser l'amélioration des qualités mécaniques et de la durabilité du béton durci. Les chercheurs visent aussi à aboutir à la **stabilité** des bétons autoplaçants, en proposant différentes solutions (utilisation des agents colloïdaux et des superplastifiants), car en général le critère de fluidité-stabilité est assez difficile à assurer. [54]

Par **stabilité** on entend ; **la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage.**

Aussi, lors de sa mise en place les BAP ne doivent pas présenter des **phénomènes de blocage** (encombrement des granulats aux alentours des zones ferraiées).

Un BAP est donc, un béton qui est capable de remplir les coffrages les plus complexes (de part leurs formes) et les plus ferraiés (densité d'armatures considérable) sans avoir recours à d'autres moyens de mise en place que l'effet du poids propre du béton même. Ce béton ne doit en aucun cas présenter de ségrégation ni de blocage de l'écoulement.

Selon Khayat [48] les propriétés essentielles des BAP frais sont :

- *Une excellente Fluidité (an Excellent deformability)*
- *Une bonne stabilité (a good stability)*
- *Un risque minime de blocage (a low risk of blockage)*

En pratique, il est de première importance de s'assurer que le béton possède effectivement les qualités qu'on lui prête. Pour cela, il existe de nombreux essais empiriques et rhéologiques permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

Ces propriétés peuvent être obtenues par le jeu de paramètres représenté dans le tableau I.2 :

<b>Pour Une Excellente Déformabilité</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. L'augmentation de la fluidité de la pâte :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Par l'utilisation de Superplastifiants haut réducteurs d'eau,</li> <li>b. Par l'adoption d'un optimal rapport Eau/Liant,</li> </ol> </li> <li><b>2. La réduction des frictions intergranulaires :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. En diminuant le volume de gros granulats (un volume de pâte élevé),</li> <li>b. En utilisant un liant de granularité continue</li> </ol> </li> </ol>
<b>Pour Une Bonne Stabilité</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. La réduction des séparations des particules solides :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Par la limitation de la teneur en granulats</li> <li>b. Par la réduction du diamètre maximal des granulats</li> <li>c. Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité :           <ul style="list-style-type: none"> <li>- un petit rapport Eau/liant</li> <li>- l'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité)</li> </ul> </li> </ol> </li> <li><b>2. La minimisation du ressuage :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. En adoptant un petit dosage en eau,</li> <li>b. En adoptant un petit rapport Eau/Liant,</li> <li>c. En utilisant des fines à grande surface spécifique,</li> <li>d. Et en augmentant le dosage en agent de viscosité.</li> </ol> </li> </ol>
<b>Pour Un moindre Risque de Blocage</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Par l'adoption d'un petit rapport Eau/Liant,</li> <li>b. Par l'utilisation d'agent colloïdal,</li> </ol> </li> <li><b>2. Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et diamètre maximal) :</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Par l'utilisation d'un petit volume de granulats,</li> <li>b. En choisissant un petit diamètre maximal des granulats.</li> </ol> </li> </ol>

**Tableau I.2. :** Les propriétés essentielles des BAP frais. [48]

### ***1.9.2. Les essais de caractérisation des BAP***

Pour évaluer la **fluidité**, plusieurs essais normalisés et non normalisés sont recommandés. Ces essais ne mettant pas en relief l'importance du caractère homogène du béton, il est donc avéré nécessaire de développer une autre famille d'essais ; les tests de facilité et capacité de remplissage.

La facilité ou capacité de remplissage (the Self-compactibility) est définie comme l'aptitude du béton à rester homogène et remplir entièrement tous les coins du coffrage sans aucune vibration. (Shindoh 1990) [83]

En ce qui concerne l'**aptitude au remplissage**, les travaux sur les BAP utilisent des tests non normalisés. En fait, pratiquement tous les laboratoires ont bricolé leur propre montage, ce qui complique grandement l'analyse des résultats de la littérature.[54]

Les essais visant à évaluer la **capacité de remplissage** ont généralement comme principe d'évaluer l'habileté du béton à passer à travers une série de barres d'armature en mesurant la quantité de béton ayant franchi ces obstacles.

Les méthodes de mesure de la **ségrégation** se présentent en deux groupes : le premier comprend les méthodes de mesure sur béton frais, alors que le second concerne les méthodes de mesure sur béton durci. Jusqu'à présent, aucune méthode ne fait l'unanimité.

Les différents types de tests sont présentés dans ce qui suit :

### I.9.2.1. Essai d'étalement « Slump Flow »

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure I.17). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton. Selon Nagataki et Fujiwara une valeur de l'étalement comprise entre 500 et 700 mm suffit au béton pour être autoplaçant. Pour un étalement supérieur à 700 mm, le béton risque de subir une ségrégation, et pour des étalements inférieurs à 500 mm, le béton risque de présenter une déformabilité insuffisante pour pouvoir passer à travers les zones fortement armées. [53] [59]

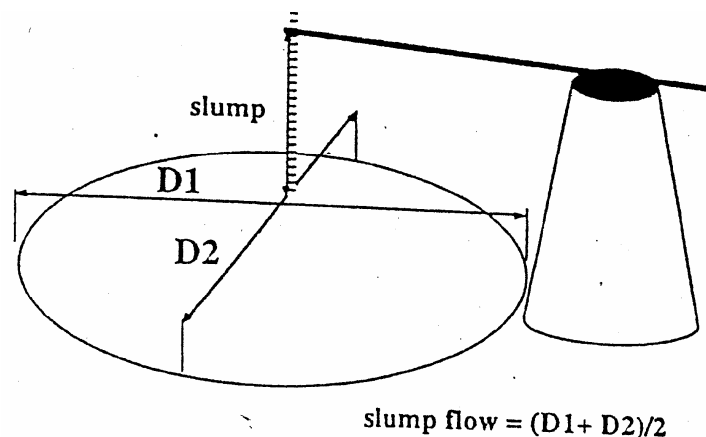


Figure I.17. : Représentation schématique de la mesure de l'affaissement et de l'étalement

### I.9.2.2. La mesure de la vitesse d'écoulement

C'est une mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 4 et 10 secondes. [54] [41]

### I.9.2.3. L'essai à la boîte « the Box test »

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte (Figure I.18). Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable [54]. On note que cet essai est destiné à donner une appréciation sur la fluidité du béton et non sa capacité à

remplir un milieu confiné. C'est pour cela que la zone intermédiaire entre le compartiment A et B (Figure I.19) n'est pas munie d'un système d'armatures.

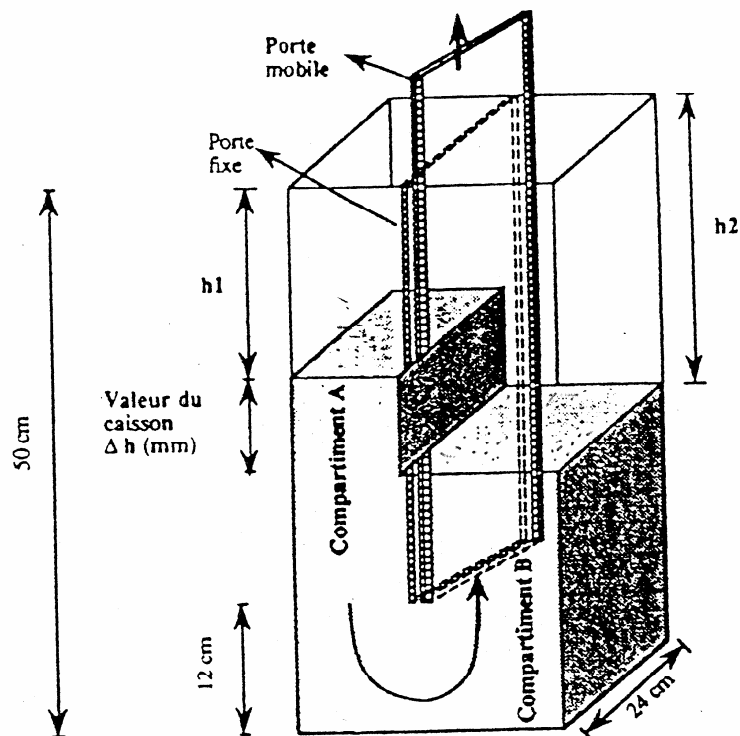


Figure I.18. : Essai du « Box test » (Khayat et coll., 1995)  
[54]

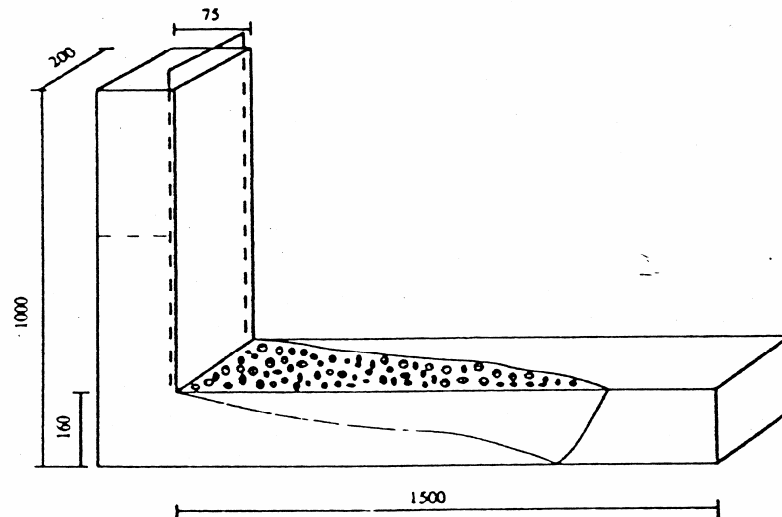
#### I.9.2.4. Essai de la table à fluidité (ASTM C 124)

L'essai d'affaissement est exécuté sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20 mm. Sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente de vitesse égale à 12,5 mm/s introduits par une manivelle. Les nombres d'amplitudes qui correspondent à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont ainsi mesurés [54]. Cet essai est semblable à l'essai d'étalement « DIN 1048 flow table ».

#### I.9.2.5. L'essai du « L-Flow Meter »

Il s'agit d'un coffrage en forme de « L » ayant les dimensions de 4000 x 2000 x Lf mm ; Lf étant la longueur sur laquelle se fait l'étalement qui peut être variable [54].



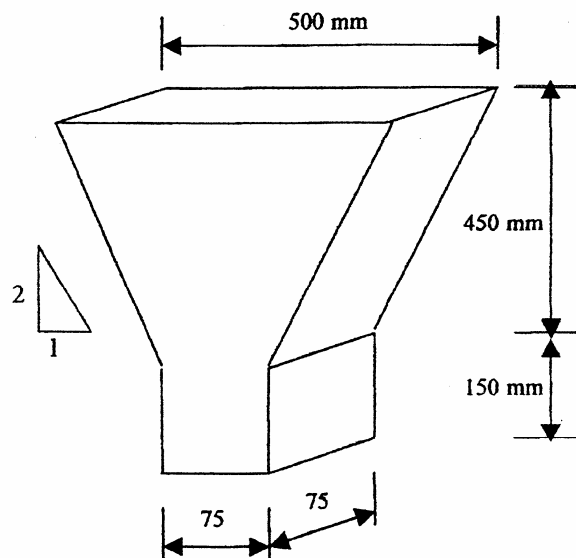


**Figure I.19.** : Test du « L-flow Meter » (Khayat et coll., 1995) [54]

La figure I.19 montre un schéma de ce test utilisé à l'université de Sherbrooke mais ayant des dimensions différentes (1000 x 200 x 1500 mm). On remplit la partie verticale du coffrage avec du béton, puis une porte de séparation est ouverte et le béton coule dans le compartiment horizontal. On note le temps mis par le béton jusqu'à ce que l'étalement cesse et on détermine alors la vitesse et la distance de l'écoulement qui sont des indices de la fluidité du béton.

#### I.9.2.6. L'essai de l'entonnoir en forme de « V » « V-Funnel »

Cet essai consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V » (Figure I.20) le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. D'après Khayat [48] et Manai [54], un temps d'écoulement à l'entonnoir en forme de « V » inférieur à 6 secondes est recommandé pour pouvoir qualifier le béton d'autoplaçant. Cet essai est utilisé aussi pour évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Moins le béton est stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions inter-granulaires et plus la durée de l'écoulement est longue [20] [19].



**Figure I.20.** : Essai de l'entonnoir en forme de « V » [20] [19].

### I.9.2.7. Essai de facilité de remplissage « Filling ability » ou « U-shaped apparatus method »

Afin d'évaluer la facilité de remplissage dans les milieux fortement ferraillés, l'essai avec le « U-shaped apparatus » a été développé (Figure I.21).

Dans cet essai, la hauteur de remplissage « Bh » est mesurée et définie comme étant la facilité de remplissage du BAP. Si la hauteur de remplissage atteint 30 cm ou plus, le béton peut être considéré comme étant un béton ayant une « bonne » facilité de remplissage.

Actuellement, cet essai est l'un des essais recommandé par les spécifications de la JSCE.

La figure I.21 montre une représentation schématique de la facilité de remplissage. Dans cette représentation, la déformabilité peut varier sous le seul effet du dosage en superplastifiant. La facilité de remplissage d'un BAP présentant une petite valeur d'étalement (petit dosage en superplastifiant) peut être augmentée par l'augmentation de son étalement (augmentation du dosage en superplastifiant).

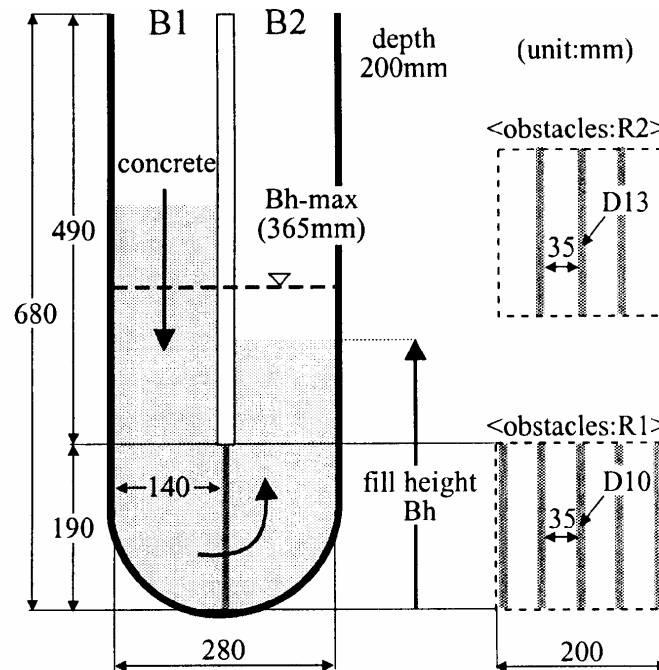
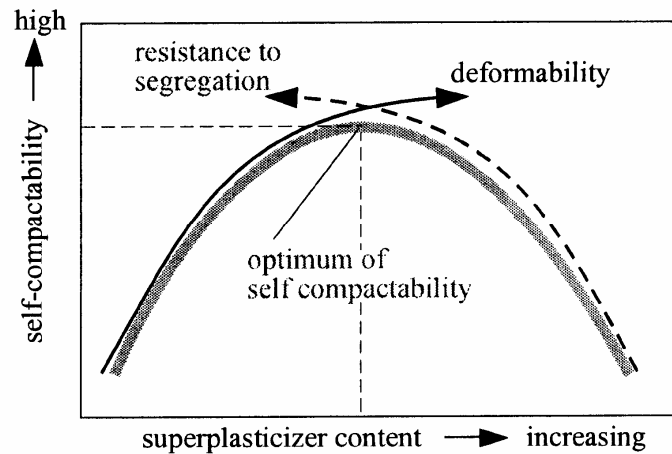


Figure I.21. : Le « U-shaped apparatus test method » [82]

La facilité de remplissage continue à s'améliorer jusqu'à une certaine valeur maximale. Au-delà de ce maximum, elle diminue. Cette diminution dans la facilité de remplissage est due à la ségrégation du béton (la ségrégation provoque la séparation des constituants, s'ensuit un encombrement des gros granulats autour des armatures, ce qui conduit à une obstruction de l'écoulement du béton)

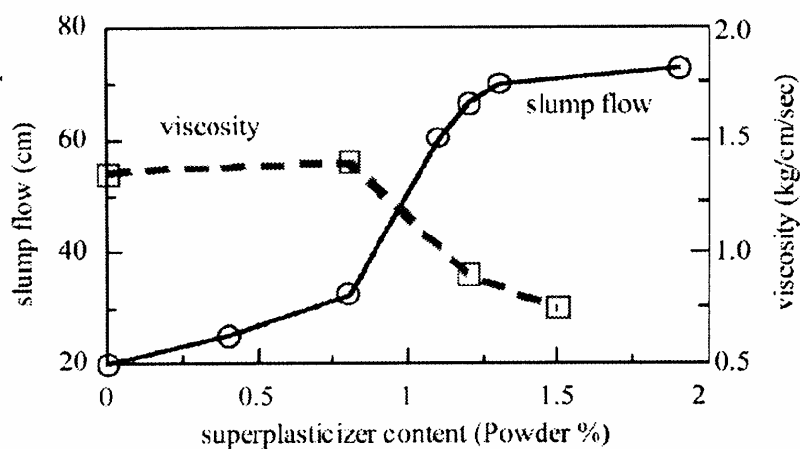
Dans une étude présentée par T. Shindoh [83] (Figure I.22), le mélange optimal a été défini comme étant le mélange présentant le maximum de facilité de remplissage.



**Figure I.22. :** Schématisation de la facilité de remplissage.

[83]

Les figures I.23 et I.24 montrent les résultats d'une série de test présentés par T. Shnidoh [83] dans lesquels le seul paramètre variant est le dosage en superplastifiant. On peut voir sur ces figures que l'augmentation du dosage en superplastifiant augmente la déformabilité (la valeur de l'étalement) mais réduit la viscosité du béton (la viscosité est mesurée au « Pulling test » qui sera présenté dans le paragraphe I.9.2.11.a).



**Figure I.23. :** L'effet du dosage en superplastifiant sur l'étalement et la viscosité.

[83]

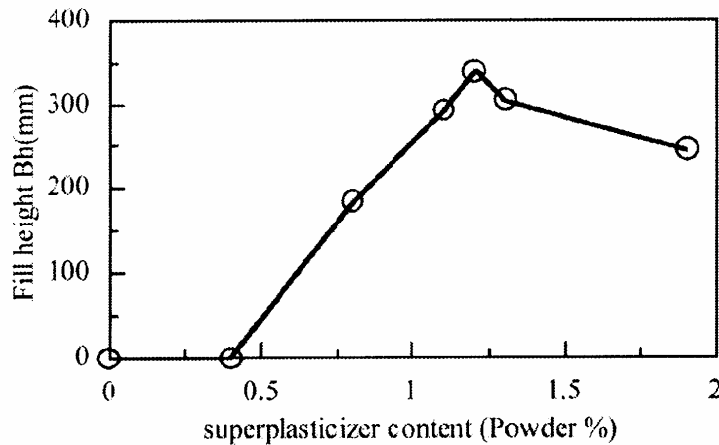


Figure I.24. : L'effet du dosage en superplastifiant sur la facilité de remplissage [83]

Les résultats montrés sur les figures I.23 et I.24 confirment que la hauteur de remplissage obtenue par le « U-shaped apparatus test » est un indice de facilité de remplissage et que le concept présenté sur la figure I.22 est approprié.

Un essai similaire (Figure I.25) est présenté par Sedran [81] et pour lequel quelques légers changements dans les dimensions de l'appareil. L'essai du U, s'appuie aussi sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R2, après remplissage de la partie R1 et ouverture de la trappe. Dans cet essai on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa. Dans ce cas, les auteurs (HAYAKAYA M., MATSUOKA Y., et SHNDOH T., 1993, cités par [81]) (Tangtermsirikul et coll., 1987 ; Okamura et coll., 1994, cités par [89]) estiment qu'un béton sera autoplaçant si H est supérieure à 30 cm.

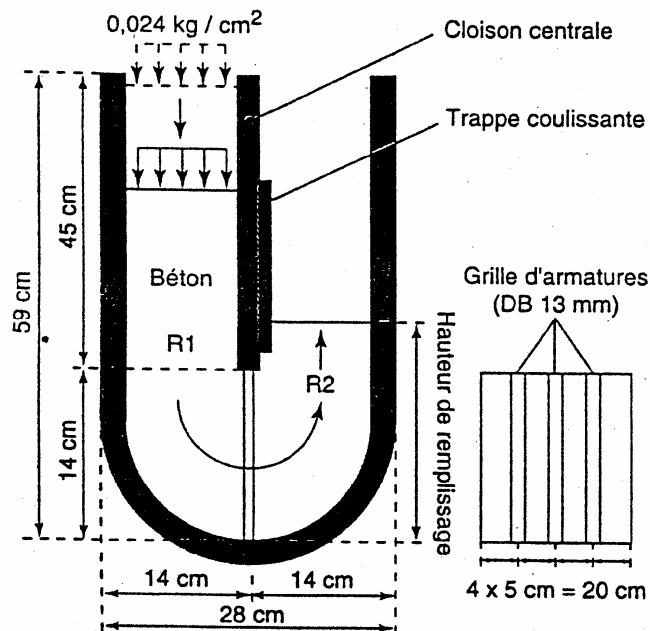


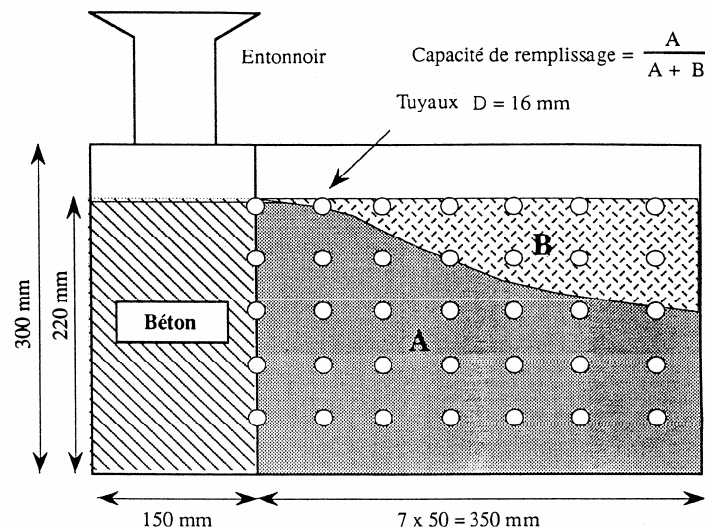
Figure I.25. : L'essai du U. [78] [81] [89]

On retrouve aussi dans la littérature l'**essai du U modifié**, qui ressemble beaucoup à l'essai du U avec la différence qu'il n'y a pas de pression appliquée sur le béton et que c'est la différence de hauteur entre les deux cotés qui est mesurée (Kasai et Coll. Cités par [89]).

#### I.9.2.8. Essai de la capacité de remplissage « Essai du Caisson » « Filling Capacity »

C'est un essai connu aussi sous le nom de « Kajima Test » ou « Fill box test method ». Cet essai est utilisé pour mesurer la capacité de remplissage des BAP dont le diamètre maximal des granulats ne dépasse pas 20 mm.

On utilise une cuvette transparente de dimension 300 x 500 x 300 mm équipé de tuyaux de diamètre 16 mm espacés de 34 mm (Figure I.26). Le béton est versé avec un débit moyen de 0,2 L/s à travers un large entonnoir et s'écoule ensuite entre les tuyaux. On arrête le déversement lorsque la hauteur du béton atteint 220 mm dans la partie non renforcée du récipient. La capacité de remplissage du béton est définie comme étant la *ratio de remplissage*  $F = A/(A + B)$ , A étant l'aire de la zone remplie de béton et B celle de la zone vide. [54][81][89].



**Figure I.26.** : Essai de Capacité de Remplissage « Essai du Caisson ». [54]

Cet appareil est aussi présentée sous une forme légèrement différente par le document *Spécification and Guidelines for Self-Compacting Concrete* [84]. Selon cette référence, dans la cuvette est disposé 35 obstacles en PVC en de diamètre 20 mm espacé de 50 mm. Comme on peut le voir sur la figure I.27. Sur la cuvette est disposé une colonne de remplissage (diamètre 100 mm, hauteur 500 mm) surmontée d'un entonnoir (hauteur 100 mm). Toutefois le mode opératoire et l'interprétation des mesures restent les mêmes.

Cet essai permet d'apprécier à la fois, la **facilité de remplissage** et la **tendance au blocage** des bétons. Il offre donc une bonne appréciation du caractère autoplaçant des bétons, puisque une composition de béton qui présente une bonne facilité de remplissage ne donnerait pas de bonnes performances si elle se trouve susceptible au blocage ou à la ségrégation.

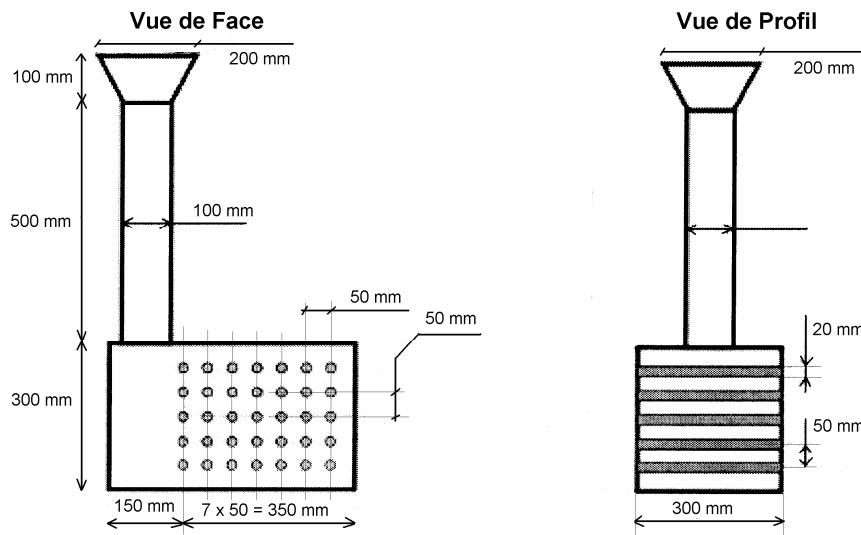


Figure I.27. : Essai du Caisson. [84]

### I.9.2.9. L'essai de la passoire [81] « Essai de la Boite » [89]

C'est un des premiers essais utilisés. Un échantillon de 30 litres de béton est placé dans une boîte dont le fond est constitué d'une grille et d'une trappe amovible (Figure I.28). Les dimensions de la boîte sont 30 cm par 30 cm et les barres, de 16 mm de diamètre, sont distantes de 50 mm (entre axes). Le volume de béton réussissant à passer le treillis donne une idée de la capacité de remplissage (Okamura et coll. Cités par [89]). Pour un béton ayant une excellente capacité de remplissage, la quantité de béton traversant le treillis peut être aussi élevé que 95% de la masse totale de béton contenu dans la boîte.

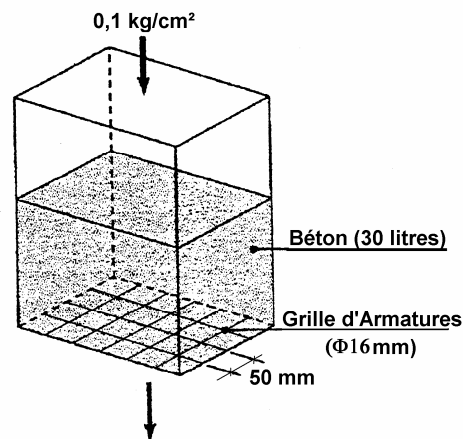


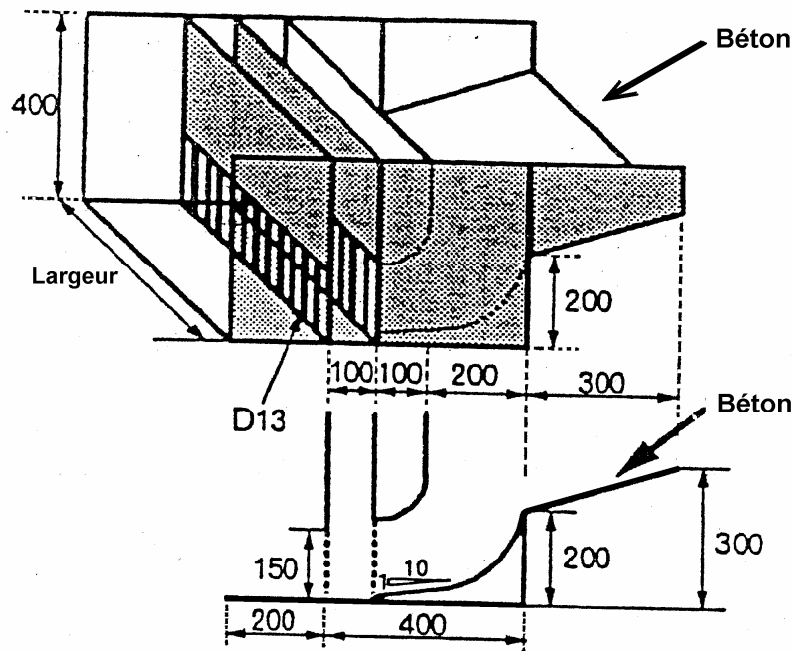
Figure I.28. : Essai de la boîte (ou de la passoire) [89].

Cet essai a notamment permis d'observer les phénomènes de blocage par formation de voûtes dans les bétons très fluides. [81]

### I.9.2.10. L'appareil de Contrôle continu de l'aptitude au remplissage

Sous l'impulsion du Japan Highway Public Corporation, Ouchi et al. (Cités par [81]) ils ont développé l'appareil présenté sur la figure I.29. Ce dernier permet de contrôler en continu l'aptitude au remplissage d'un béton sur chantier. D'après les auteurs, un tel contrôle paraît indispensable à l'acceptation de ce type de béton par les maîtres de l'ouvrage. Cet appareil est destiné à être utilisé lorsque le béton est pompé. Il suffit alors de le poser au dessus de la

trémie de la pompe et les camions toupie déversent le béton au travers de l'appareil. Tout défaut dans le béton se manifeste par un blocage et un arrêt du coulage.



**Figure I.29.** : Appareil pour tester l'aptitude au remplissage d'un béton en continu sur chantier. [81].

La géométrie de l'appareil a été particulièrement étudiée pour éviter que le béton ne ségrége artificiellement en tombant de la toupie, pour maintenir une pression à peu près constante au niveau des armatures et pour pouvoir changer facilement le degré de confinement.

### I.9.2.11. Les essais caractérisant la ségrégation

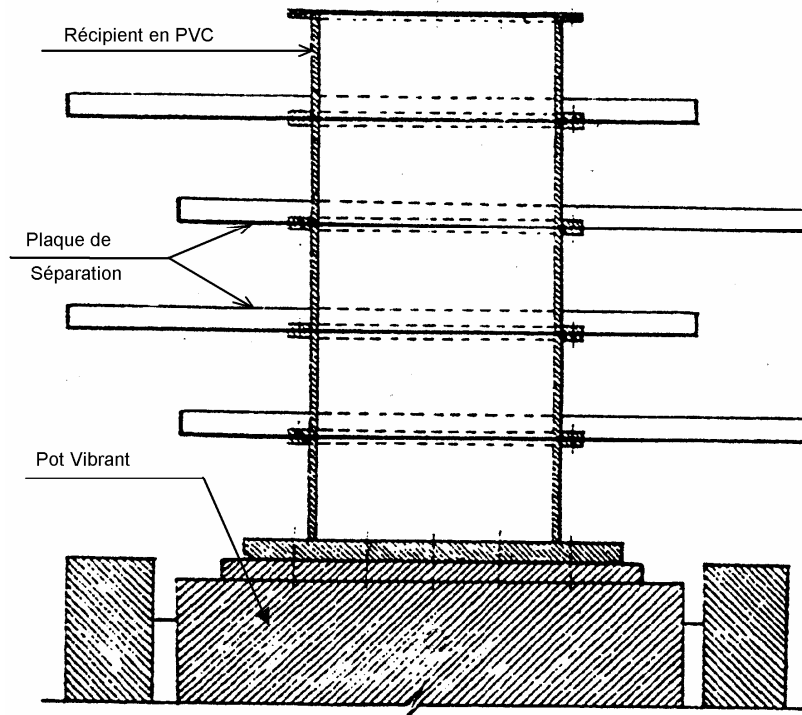
Comme on l'a précisé au paragraphe I.9.2, les méthodes de mesure de la ségrégation sont présentées en deux groupes :

- Celles qui caractérisent le béton en étant frais,
- Et celles qui le caractérisent dans son état durci.

#### I.9.2.11.a. Les méthodes de mesure sur béton frais

- **Méthode de Sidky, Legrand et Barrioulet (1981)**

Un récipient en PVC de 425 mm de haut et de 187 mm de diamètre intérieur (Figure I.30) est rempli de béton puis vibré. On sépare ensuite le béton en cinq couches égales à l'aide de séparateurs incorporés dans le récipient. Chaque couche est analysée (masse de la pâte et masse des granulats) afin de déterminer un coefficient de ségrégation  $S_i$  qui indique la richesse en granulats. Le coefficient de ségrégation est la concentration en granulats d'une couche de béton sur la concentration initiale. Ainsi,  $S_i > 1$  indique un enrichissement en granulats et  $S_i < 1$ , un appauvrissement en granulats.



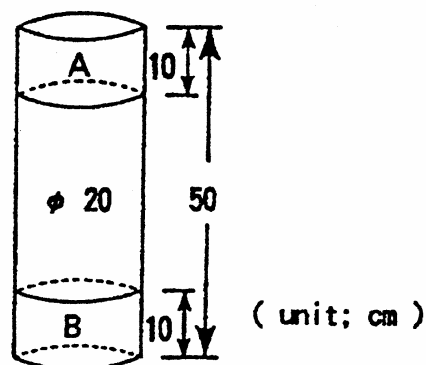
**Figure I.30.** : Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet. [89]

- **Méthode japonaise du cylindre (Umehara et coll., 1994) [89]**

Le béton frais est mis en place dans un cylindre de 500 mm de haut par 200 mm de diamètre (Figure I.31). Cet échantillon est ensuite vibré à l'aide d'une table vibrante. Après avoir laissé reposer le béton pendant une heure, on en prélève 10 cm de chaque extrémité du cylindre. La conception spéciale de l'éprouvette permet de faciliter cette opération. Le béton prélevé est lavé, afin de séparer les granulats du mortier. Les granulats sont ensuite séchés, puis pesés. La résistance à la ségrégation du béton est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$F = A / B$$

Où : A : la masse de granulats secs de la section supérieure,  
B : la masse de granulats secs de la section inférieure.



**Figure I.31.** : Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de la résistance à la ségrégation. [89]

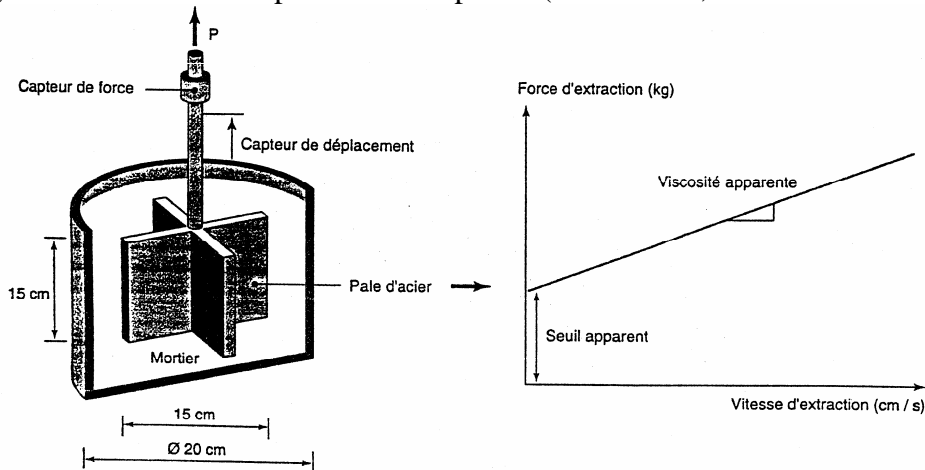


D'après Umehara et coll (1994) (cités par [89]), un béton ayant une bonne résistance à la ségrégation présentera un coefficient de résistance à la ségrégation supérieur à 95 %. Des essais sur un viscosimètre ont permis d'établir une corrélation entre la résistance à la ségrégation et la viscosité de la pâte de ciment. La viscosité devrait en effet être de 1,8 Pa.s.

- **Méthode japonaise de la palette métallique (Tangtermsirikul et coll., 1991)[81]**

C'est un essai appelé aussi le « **Pulling test** ». L'aptitude du béton à rester homogène, lors des différentes phases de son écoulement, est fortement influencée par la nature du mortier qui le compose. Tangtermsirikul et coll. (cités par [81]) ont développé le montage présenté sur la figure I.32, pour qualifier l'aptitude d'un mortier à résister au cisaillement d'un gravillon modèle représenté ici par une palette métallique.

Le principe de l'essai consiste à extraire cette palette d'un échantillon de mortier à diverses vitesses et de mesurer l'effort correspondant. La relation typique entre ces deux grandeurs est indiquée sur la figure I.32, dont on tire un seuil et une viscosité apparente du mortier. La droite est généralement tracée à partir de trois points (trois essais ; trois vitesses différentes).



**Figure I.32.** : Montage pour mesurer la résistance à la ségrégation d'un mortier. « Pulling Test » [81]

La valeur de la viscosité apparente peut alors être déterminée en calculant la pente de la droite que forment les trois points. Le seuil apparent est l'ordonnée du point d'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées.

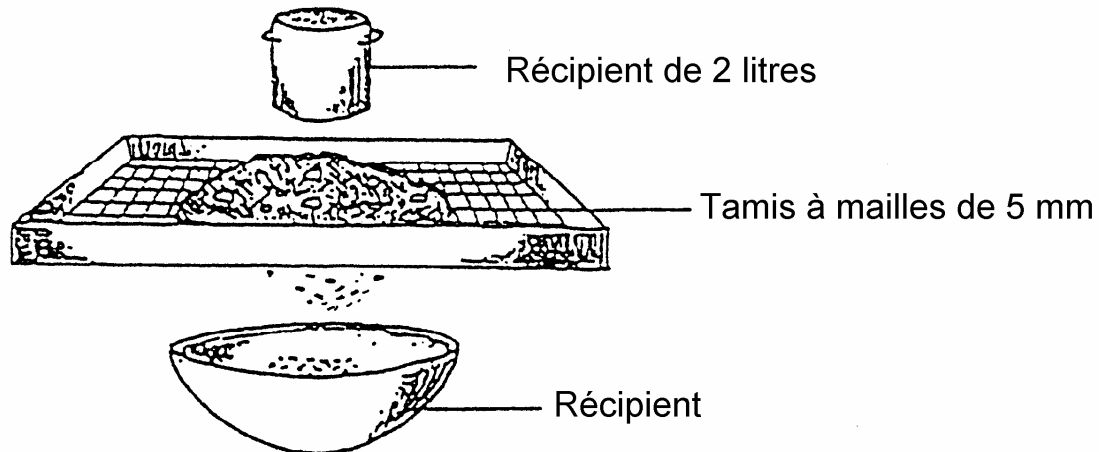
Le seuil apparent est appelée *résistance apparente à la ségrégation* et représente la force minimum requise pour séparer le granulat (la plaque, dans cet essai) du mortier. Cet essai ne donne évidemment pas la résistance réelle du béton à la ségrégation, mais permet néanmoins de comparer les bétons entre eux. Cet essai ne tient pas compte des types de granulats employés, ni de leurs quantités qui pourraient faire varier la résistance à la ségrégation du béton. [89]

L'idée sous-jacente à cet essai est de pouvoir formuler, séparément, le mortier d'un BAP, en supposant que la ségrégation du béton sous écoulement est contrôlée par la viscosité apparente du mortier, alors que la ségrégation statique l'est par le seuil apparent [81].

- **Méthode du tamis (Fujiwara et coll., 1992)** [81][41][89]

Cette méthode consiste à déposer deux (02) litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture (Figure I.33). Après cinq minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2 litres, donne l'indice de ségrégation.

$$SI = \frac{\text{La masse du mortier passant à travers les mailles du tamis (g)}}{\text{La masse du mortier initialement présente dans les 2 litres de béton (g)}} \times 100\%$$



**Figure I.33. :** Méthode du Tamis. [89]

- **Méthode de Popovics (1973)** [89]

Un contenant cylindrique ou prismatique d'environ 15 dm<sup>3</sup> est rempli de béton puis consolidé par vibration pendant un certain laps de temps. La moitié supérieure est ensuite prélevée pour être pesée et lavée sur un tamis, afin de ne garder que les gros granulats (fraction supérieure à 5 mm). Ces derniers sont pesés, puis on répète l'opération pour la partie inférieure du béton. Il est possible de déterminer ensuite un facteur de ségrégation FS :

$$FS = \frac{\text{Contenu en granulats de la partie inférieure}}{\text{Contenu en granulats de la partie supérieure}}$$

Plus le facteur de ségrégation est près de un (01,00), meilleure est la résistance à la ségrégation.

- **Essai de l'entonnoir** [89]

Un bon nombre d'essais retrouvés dans la littérature ayant pour principe la mesure du temps que prend un entonnoir rempli de béton pour se vider complètement. L'essai des entonnoirs LS et SS (L et S pour « Large » et « Small » respectivement), montré sur la figure I.34, est censé mesurer la résistance à la ségrégation.

C'est un essai facile, et représente un critère important lorsque l'essai est effectué sur le chantier.

L'utilisation de deux entonnoirs ayant des pentes d'écoulement différentes, permet de mieux déterminer la résistance à la ségrégation. Le temps de l'écoulement doit être inférieur à 10 secondes pour l'entonnoir SS et à 12 Secondes pour l'entonnoir LS, pour que le béton soit considéré comme ayant une résistance à la ségrégation. Si le béton autoplaçant est sujet à la



Le premier est utilisé pour tester la ségrégation verticale et le deuxième pour la ségrégation horizontale. Après avoir rempli, les moules, il mesurent une profondeur de pénétration d'une sonde. Cette profondeur qui caractérise la résistance à la ségrégation. Selon leurs résultats d'étude, la profondeur de pénétration de la sonde devrait être inférieure à 9 mm pour la ségrégation horizontale et à 8 pour la verticale.

#### **I.9.2.11.b. Les méthodes de mesure sur béton durci**

- **Méthode des ultrasons [89]**

Il est possible de déterminer, à l'aide des ultrasons, la variation de la densité du béton selon la hauteur. En effet, le mortier et les granulats ne transmettent pas le son à la même vitesse, du moins dans les premiers jours du béton. A titre indicatif, le mortier d'un béton de un (01) jour permet une vitesse de son d'environ 3,2 km/s, alors qu'à 5-7 jours, cette vitesse est de 4,2 km/s. Dans les granulats, le son voyage habituellement à environ 5 km/s. ces différences peuvent donc servir à évaluer la quantité de granulats en fonction de la hauteur.

La procédure expérimentale consiste à confectionner trois éprouvettes normalisées (150 x 300 mm) et, selon la consistance du béton, à vibrer la première pendant un laps de temps déterminé  $t$ , une deuxième à un temps  $t + 2$  minutes et la dernière à un temps  $t + 5$  minutes. On teste ensuite le béton à un jour au plus tôt et à 7 jours au plus tard. L'émetteur et le récepteur d'ultrasons devront avoir avec le béton une plus petite surface de contact possible, afin de bien épouser la forme arrondie de l'éprouvette. La fréquence utilisée est habituellement de 50 hertz. Les essais se font à tous les 2 à 4 cm.

- **Méthode du comptage des granulats**

Cette méthode consiste à compte la répartition des granulats d'une certaine dimension en fonction de la hauteur d'un échantillon de béton durci scié longitudinalement. Cette méthode est fastidieuse, mais c'est la plus précise. Cette méthode est très utile pour vérifier la validité d'un autre essai visant à déterminer plus rapidement la résistance à la ségrégation d'un béton. Une façon plus rapide de compter les granulats a été mise au point par Khayat. Un logiciel d'analyse d'images permet, en effet, de réaliser le comptage des granulats. Il faut cependant, pouvoir bien distinguer les granulats du mortier qui l'entoure ; il faut que la différence soit assez marquée pour que le logiciel puisse mettre les granulats d'une couleur et le mortier, d'une autre.

- **c) Méthode des rayons gamma (d'après Popovics, 1973)(cité par [89])**

Cette méthode consiste à mesurer l'uniformité de la distribution des gros granulats dans le mortier à l'aide des rayons gamma. En émettant des rayons gamma d'un côté de l'échantillon, il est possible de connaître la concentration en gros granulats selon l'intensité de rayonnement reçue de l'autre côté de l'échantillon. Il faut répéter cette opération en plusieurs endroits sur l'éprouvette de béton pour arriver à obtenir une bonne image de la résistance à la ségrégation d'un tel béton. Cette méthode peut également être utilisée sur des structures existantes.

#### **I.9.2.12. Rhéologie – Ouvrabilité : lien Direct ?**

La rhéologie est la science des déformations et des écoulements de la matière, des contraintes qui en résultent et des efforts qu'il faut lui appliquer pour les obtenir. Elle est fondée sur l'étude des lois de comportement, qui sont les relations qui existent entre les états de contraintes d'un matériau, ses déformations et la vitesse de déformation.

La rhéologie du béton frais est une science relativement nouvelle. Elle a été longtemps attendue pour permettre de caractériser le béton frais par des tests technologiques.

La question importante et qui se pose d'elle-même est de savoir s'il existe un lien entre les mesures rhéologiques qui nécessitent un équipement sophistiqué et les mesures d'ouvrabilité souvent effectuées avec un appareillage simple et vulgarisé.

Plusieurs chercheurs ont tenté de répondre à cette question. Certains auteurs (Tanigawa et Mori., Tanigawa et al., Kurokawa et al. Christensen) (cité par Sedran [81]) proposent une description complète de l'essai d'affaissement basées sur une simulation aux éléments finis et considérant que le béton est fluide de Bingham. Bien que présentant des hypothèses différentes sur les glissements entre surface et le béton, ces modèles montrent que l'affaissement au cône d'Abrams dépend essentiellement du seuil de béton. Plus précisément, l'analyse dimensionnelle montre que l'affaissement doit être gouverné par le terme  $\frac{\tau_0}{g.M}$  où  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement en Pa, M la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  et g l'accélération de la pesanteur.

Tattersall (cité par [81]) a mesuré, par analogie avec la loi de comportement du béton, un seuil en terme de couple, à l'aide de son appareil, et a vérifié, depuis longtemps, l'existence d'une relation entre l'affaissement et ce paramètre.

La relation directe de l'affaissement avec le seuil de cisaillement a été montrée, plus directement, à l'aide du BTRHEOM par Hu [45] et de Larrard et Ferraris [30], Mizuguchi [57].

## **I.10. Conclusion :**

La lecture de la littérature nous a permis de se familiariser avec le BAP qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Nous avons pu remarquer que dans la littérature il existe un nombre important de méthodes permettant de définir la composition d'un BAP. Il est montré aussi que le nombre d'essais pour la caractérisation de la fluidité, de la capacité de remplissage et la ségrégabilité est presque égal au nombre d'équipes de recherche qui existent dans le monde. Chaque laboratoire a pu concevoir son propre montage.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique documentée, passant en revue les différentes méthodes de formulation japonaises, le processus de formulation de Peterson, la méthode de Sakata, la méthode proposée par Sedran...etc. Ces méthodes sont

essentiellement basées sur l'optimisation du volume de pâte, des mortiers ou encore sur l'optimisation du squelette granulaire.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée aux différents essais et techniques de caractérisation des BAP, essentiellement à l'état frais, en mettant l'accent sur le travail qui a été fait au niveau européen ce qui a constitué le Guide Européen pour les BAP.

C'est dans ce contexte, que le projet de la conception de ce nouveau béton à base de matériaux locaux a vu le jour depuis 2000 au niveau du LMDC en étroite collaboration avec le L2MGC de l'université de Cergy Pontoise, pour la première expérience Algérienne. C'est donc dans ce cadre que s'inscrit cette thèse.

L'étude a pour objectifs de comprendre les rôles joués par les différents constituants qui entrent dans la formulation des BAP, de mettre en évidence les éventuelles interactions et de proposer une procédure expérimentale pour l'étude de la résistance à la ségrégation.

On tentera de répondre aux questions soulevées à la lecture de la bibliographie en conduisant une recherche expérimentale sur les BAP en utilisant les matériaux locaux algériens. L'approche de formulation utilisée est basée sur les fondements de la méthode japonaise d'Okamura. Ainsi l'optimisation des formulations des BAP s'est effectuée à partir des résultats d'essais sur coulis, mortiers et bétons. Plusieurs teneurs en fillers ont été envisagés.

## **CHAPITRE II**

# **FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DE MATERIAUX LOCAUX**

## **CHAPITRE II**

### **FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS A BASE DE MATERIAUX LOCAUX**

#### **II.1. Introduction :**

Dans la littérature, on retrouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les BAP, nous avons retenu pour notre étude la méthode dite « Japonaise » proposé par Okamura et al. Cette méthode qui est purement expérimentale nous semble très pratique et ne demande pas beaucoup de moyen pour son application.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude de la formulation des bétons autoplaçants à base de fillers calcaire comme addition et sans agent de viscosité.

En utilisant la méthode Japonaise pour formuler un ensemble de béton autoplaçant à dosage en fillers différents, on s'est rendu compte que l'application pure et simple des recommandations de cette méthode ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés. C'est ainsi que nous avons lancé un certain nombre d'investigation, sur coulis, mortier et bétons pour essayer d'adapter la méthode pour l'obtention de bétons qui répondent aux exigences d'une bonne fluidité, une stabilité accrue et une capacité de remplissage satisfaisante.

En conclusion de ce chapitre, nous présenterons une nouvelle démarche pour la formulation des bétons autoplaçants.

#### **II.2. Présentation de la méthode Japonaise d'Okamura et al. :**

On reprendra dans ce paragraphe les fondements de la méthode japonaise exposés au paragraphe I.8.1 et que nous développerons en détails.

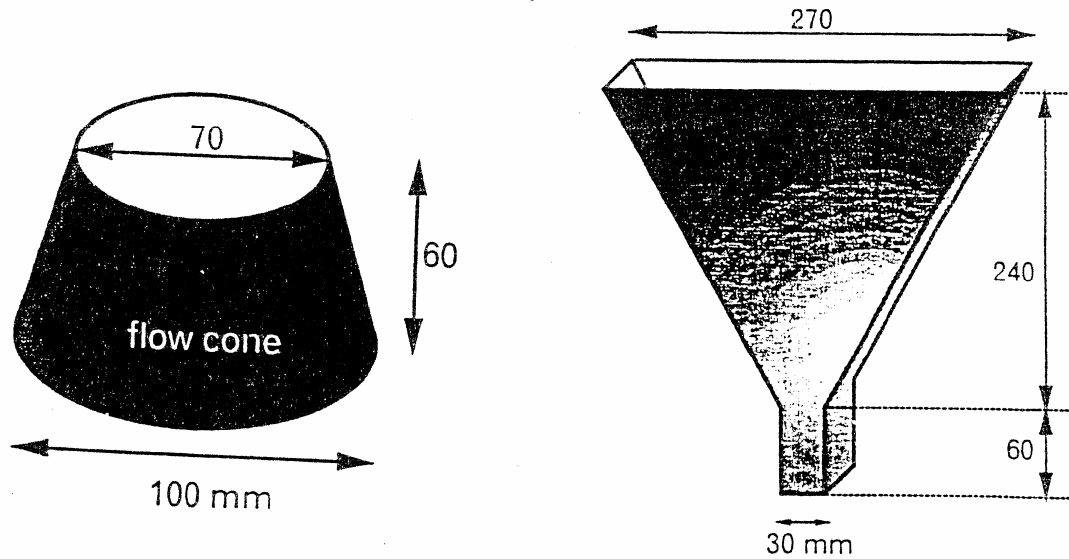
Les chercheurs de l'université de Tokyo (Okamura et Ozawa [65] et Ouchi et al. [69]) ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants.

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50% de leur compacité. On note que les auteurs ne précisent pas comment à été mesuré la compacité des gravillons. Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

De même, afin assurer une ouvrabilité suffisante au mortier, ils fixent le volume de sable égal à 40% du volume total du mortier. Il est important de noter que les auteurs excluent du terme sable toutes les fines inférieures à 90  $\mu\text{m}$ , qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants.

L'optimisation de la pâte s'effectue sur les mortiers dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir (Figure II.1).





**Figure II.1.** : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers (tiré de [81])

A partir de ces essais, les auteurs tirent deux grandeurs adimensionnelles :

- L'étalement relatif  $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ; \_\_\_\_\_ (II.1)
- La vitesse relative d'écoulement  $R_m = \frac{10}{t}$ ; \_\_\_\_\_ (II.2)

Où  $d$  (mm) est le diamètre final de la galette de mortier,  $d_0$  est le diamètre inférieur du cône (100 mm) et  $t$  (en secondes) le temps d'écoulement à l'entonnoir.

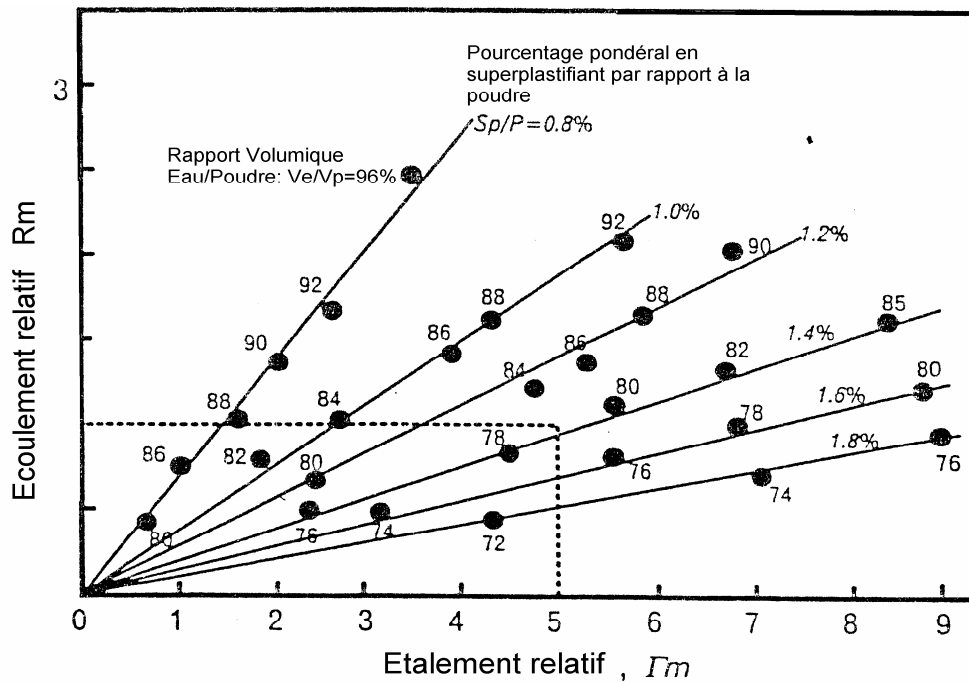
Selon les auteurs, le terme  $\Gamma_m$  caractérise la fluidité du mortier (plus  $\Gamma_m$  est grand plus le mortier est fluide) alors que le terme  $R_m$  caractérise la viscosité (plus  $R_m$  est petit, la viscosité est grande).

D'après leur expérience et les résultats publiés; pour obtenir un béton autoplaçant acceptable il faut avoir simultanément  $\Gamma_m = 5$  et  $R_m = 1$ .

D'un point de vue pratique, l'expérience montre que l'on a une relation linéaire entre  $\Gamma_m$  et  $R_m$ , pour un dosage en superplastifiant donné quand la quantité d'eau varie (fig II.2).

On peut donc déterminer pour chaque dosage en superplastifiant et pour chaque combinaison de fines (ciment + additions fines), le rapport  $R_m/\Gamma_m$ , à l'aide d'un seul mortier.

Une fois le mortier dont le rapport  $R_m/\Gamma_m$  égal à 0,2 (soit 1/5) est identifié, on ajuste juste la quantité d'eau.



**Figure II.2. :** Relation entre les termes  $\Gamma_m$  et  $R_m$  pour différents dosages en superplastifiant ( $S_p/P$ ) et différents rapports volumiques eau sur poudre ( $V_e/V_p$ ). Le superplastifiant a essentiellement un effet sur l'étalement, alors que la teneur en eau affecte fortement les deux paramètres (tiré de [81])

L'ouvrabilité et l'aptitude au remplissage du béton ainsi formulé doivent être vérifiées par des essais (étalement, boîte en L, V-Funnel,...) et procéder à des ajustements de la composition si cela est nécessaire. La résistance en compression est corrigée, si nécessaire, en jouant sur les proportions de liants (une résistance insuffisante sera compensée par une augmentation du volume de ciment au détriment d'une addition minérale moins active).

Cette méthode de formulation présente l'intérêt de sa simplicité. Toutefois, aux dires même des ses concepteurs (Okamura et Ozawa [65]), elle est très sécuritaire. Par sécuritaire, il faut comprendre que le volume de gravillon est sous estimé afin de garantir l'absence de tout blocage. Certes, le fait que la teneur en gravillon soit calculé à partir de sa compacité permet de prendre en compte sa forme : un gravillon roulé sera plus lisse donc présentera moins de risques de blocage qu'un gravillon concassé ; on pourra en mettre d'avantage dans le béton, ce qui est traduit par le fait que la compacité d'un gravillon roulé est plus grande (à étendue granulaire identique) que celle d'un granulats concassé [81]

Il serait important de noter que la marge de sécurité prise pour donner à la méthode un caractère général doit conduire à des bétons trop riches en pâte, donc coûteux et présentant des risques accrus de déformations différées [81]

Ce qu'on peut reprocher aussi à la méthode c'est le fait qu'elle ne considère pas le confinement réel du béton dans la structure qui est le paramètre principal qui devrait piloter le dosage en gravillon.

### II.3. Formulation des bétons d'étude "Application de la méthode Japonaise":

En utilisant une gamme de constituants disponible et très utilisés localement, nous avons entamé un travail de formulation en utilisant la méthode d'Okamura.

Les différents constituants utilisés sont :

- ciment du type CEM II/A de Hamma bouziane,
- des fillers calcaires UF20 de la carrière ENG de Khroub,
- des granulats (sable et gravier) de la carrière Hedna de Ain Smara,
- un superplastifiant Medaplast SP40 de Granitex,
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université Mentouri de Constantine,

Toutes les caractéristiques des constituants utilisés sont rassemblées et présentés en Annexe.

#### II.3.1. Formulation de la variété des BAP étudiés

En appliquant les recommandations de la méthode japonaise exposée dans le titre précédent, nous avons formulé quatre (04) bétons autoplaçants tels que le rapport (Fillers/ciment +fillers) est égal à 0; 0,17; 0,26 et 0,33.

Les quatre bétons sont présentés dans le tableau suivant :

Désignation	Rapport pondéral (Fillers/Ciment+Fillers)
<b>BAP01</b>	0,00
<b>BAP02</b>	0,17
<b>BAP03</b>	0,26
<b>BAP04</b>	0,33

**Tableau II.1. :** Désignation des bétons d'étude.

Les gravillons utilisés sont concassés de la classe 8/15. Comme les auteurs de la méthode n'ont pas précisé la manière avec laquelle ils déterminent la compacité du gravillon, nous avons jugé de la calculer à partir de la masse volumique absolue et apparente de la manière suivante :

La compacité étant le volume solide dans un volume unitaire, elle peut être calculée en divisant la masse volumique apparente par la masse volumique absolue.

$$\text{On a : } \text{Compacité} = \frac{\text{Volume des Solides}}{\text{Volume Total}} = \frac{\text{Volume des Solides}}{\text{Volume Solide} + \text{Volume des Vides}} = \frac{V_s}{V_s + V_v}$$

Et comme ;

$$\text{Masse Volumique Apparente} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume Solide} + \text{Volume des Vides}} = \frac{m}{V_s + V_v}$$

et ;

$$\text{Masse Volumique Absolue} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume des Solides}} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume Solide}} = \frac{m}{V_s}$$

Donc ;

$$\frac{\text{Masse Volumique Apparente}}{\text{Masse Volumique Absolue}} = \frac{\frac{m}{V_s + V_v}}{\frac{m}{V_s}} = \frac{V_s}{V_s + V_v} = \text{Compacité} \quad \text{(II.3)}$$

### II.3.2. Détermination du dosage en gravier :

La masse volumique apparente étant de 1,544 et la masse volumique absolue est égale à 2,70 ; notre gravier présentera alors une compacité  $\gamma$  égale à 0,572.

Le dosage volumique en gravier sera donc 50% de  $\gamma$ , soit alors : 0,286 m<sup>3</sup>.

Le dosage pondéral sera donc : **G** = 0,286 x 2,70 x 1000 = **772 kg**.

### II.3.3. Détermination du dosage en sable :

Le dosage volumique en sable étant 40% du volume total du mortier, il sera calculé comme suit :

En supposant que  $g, s, c, f, sp, e_g$  et  $v$  sont respectivement les volumes de gravier, sable, ciment, fillers, superplastifiant, eau de gâchage et vides on peut écrire (en litres) :

$$g + s + c + f + sp + e_g + v = 1000 \quad \text{(II.4)}$$

$$s + c + f + sp + e_g + v = 1000 - g = \text{Volume du mortier} \quad \text{(II.5)}$$

Et puisque le volume du sable est 40% du volume du mortier on peut écrire :

$$s = 0,4(1000 - g)$$

$$s = 0,4(1000 - 286) = 285,6 \text{ litres}$$

La masse volumique absolue du sable étant 2,67, le dosage pondéral en sable sera :

$$\mathbf{S} = 285,6 \times 2,67 = \mathbf{762 \text{ kg}}$$

### II.3.4. Optimisation de la composition du mortier :

La composition du mortier est optimisée expérimentalement. Le calcul du dosage en ciment et en fillers se fait comme suit :

On notera respectivement par : C, F,  $E_g$  et SP le dosage pondéral du ciment, du fillers, de l'eau de gâchage et du superplastifiant.

Et respectivement par  $c, f, e_g$  et  $sp$  le dosage volumique du ciment, du fillers, de l'eau de gâchage et du superplastifiant.

Sachant que :

$$c + f + sp + e_g = 1000 - g - s - v \quad \text{(II.6)}$$

$$\text{En posant : } a = \frac{F}{C + F} \text{ et } b = \frac{SP}{C + F}$$

Soit  $\rho_c$ ,  $\rho_f$  et  $\rho_{sp}$  respectivement les masses volumiques absolues du ciment, des fillers et du superplastifiant.

On peut écrire donc :

$$a = \frac{\rho_f f}{\rho_c c + \rho_f f} \Rightarrow f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{a}{(1-a)} c \quad \text{(II.7)}$$

Et on peut écrire aussi :

$$b = \frac{\rho_{sp} SP}{\rho_c c + \rho_f f} \Rightarrow sp = \frac{b}{\rho_{sp}} (\rho_c c + \rho_f f) \quad \text{(II.8)}$$

En remplaçant  $f$  de l'équation (II.7) par sa valeur en (II.6), on obtient :

$$sp = \frac{b}{\rho_{sp}} \left( \rho_c c + \rho_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{a}{(1-a)} c \right) = \frac{b}{\rho_{sp}} \left( \rho_c c + \rho_c \frac{a}{(1-a)} c \right) = \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} bc \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right)$$

$$sp = \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} bc \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right) \quad \text{(II.9)}$$

Afin de tenir compte de la quantité d'eau rapportée dans la composition par le superplastifiant, on notera par l'eau totale « E » est la somme de l'eau de gâchage  $E_g$  et de l'eau contenue dans le superplastifiant  $E_{sp}$ . On a donc :  $E = E_g + E_{sp}$

Supposons que  $E_{sp} = k SP$

$$\text{En posant } \frac{E}{C+F} = d \Rightarrow \frac{E_g + E_{sp}}{C+F} = \frac{E_g + k.SP}{C+F} = d \quad \text{(II.10)}$$

Puisque la densité de l'eau est égale à 1, on peut écrire :

$$\frac{e_g + k \cdot \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} bc \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right)}{\rho_c c + \rho_f f} = d \Rightarrow e_g = d \cdot (\rho_c c + \rho_f f) - k \cdot \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} bc \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right)$$

$$e_g = \left( d \cdot \rho_c - k \cdot \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} b \right) \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right) \cdot c \quad \text{(II.11)}$$

En remplaçant dans l'équation (II.6), les expressions (II.7), (II.9) et (II.11) on obtient :

$$c + \frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{a}{(1-a)} c + \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} bc \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right) + \left( d \cdot \rho_c - k \cdot \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} b \right) \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right) \cdot c = 1000 - g - s - v$$

$$c = \frac{1000 - g - s - v}{\left( 1 + \frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{a}{(1-a)} + \left( \frac{\rho_c}{\rho_{sp}} b (1-k) + d \cdot \rho_c \right) \left( 1 + \frac{a}{(1-a)} \right) \right)} \quad \text{(II.12)}$$

L'expression II.12, permet de calculer, pour n'importe quelle combinaison F/C+F et n'importe quel rapport E/C+F choisi, le dosage volumique en ciment du mortier.

A l'aide des expressions (II.7), (II.9) et (II.11) on calcule les volumes de fillers, de superplastifiant et d'eau de gâchage.

#### II.3.4.a. Détermination des compositions des mortiers d'étude :

En utilisant les différentes expressions présentées ci-dessus, on va établir les différentes compositions des mortiers qu'on testera pour rechercher ceux qui donneront à la fois un étalement relatif au mini cône égal à 5 et un temps relatif à l'entonnoir égal à 1.

Le volume du gravier "g" étant retrouvé à 286 litres et celui du sable "s" à 285,6 litres, on supposera que le volume d'air est de l'ordre de 2%, soit 20 litres (valeur moyenne).

Les masses volumiques absolues du ciment, du fillers et du superplastifiant étant :  
 $\rho_c = 3,1 \text{ kg/l}$ ,  $\rho_f = 2,7 \text{ kg/l}$ ,  $\rho_{sp} = 1,19 \text{ kg/l}$

La masse d'extrait sec du superplastifiant est de l'ordre de 40%, ce qui laisse entendre que l'apport en eau du superplastifiant qui est de 60% de la masse de ce dernier. Ce qui permet d'écrire  $E_{sp} = k.SP = 0,6 SP$ , la valeur du coefficient k est donc 0,6.

En remplaçant dans l'expression (II.12), on trouve :

$$c = \frac{408,4}{\left(1 + 1,148 \frac{a}{(1-a)} + (1,042.b + 3,1d) \left(1 + \frac{a}{(1-a)}\right)\right)} \quad \text{(II.13)}$$

Rappelons que dans l'expression (II.13)  $a = \frac{F}{C+F}$ ,  $b = \frac{SP}{C+F}$  et  $d = \frac{E}{C+F}$

#### II.3.4.b. Les compositions des mortiers étudiés :

Il est important de rappeler que le travail de formulation que nous effectuons consiste à retrouver les compositions de quatre bétons autoplaçants. Chaque béton présente un rapport F/C+F différent (soit 0; 0,17; 0,26 et 0,33)

En fixant, en premier temps, le rapport F/C+F = 0, nous avons fait varier le dosage en eau (E/C+F de 0,22 à 0,44) pour différents dosage en superplastifiant (SP/C+F = 0,5% à 2,6%)

Ainsi les différentes désignations des mortiers étudiés sont rassemblées dans le tableau (II.2) :

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F	Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M01	0	0,005	0,22	M11	0	0,008	0,22
M02	0	0,005	0,24	M12	0	0,008	0,24
M03	0	0,005	0,26	M13	0	0,008	0,26
M04	0	0,005	0,28	M14	0	0,008	0,28
M05	0	0,005	0,29	M15	0	0,008	0,29
M06	0	0,005	0,32	M16	0	0,008	0,32
M07	0	0,005	0,35	M17	0	0,008	0,35
M08	0	0,005	0,38	M18	0	0,008	0,38
M09	0	0,005	0,41	M19	0	0,008	0,41
M10	0	0,005	0,44	M20	0	0,008	0,44
<b>Mortiers</b>				<b>Mortiers</b>			
Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F	Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M21	0	0,011	0,22	M31	0	0,014	0,22
M22	0	0,011	0,24	M32	0	0,014	0,24
M23	0	0,011	0,26	M33	0	0,014	0,26
M24	0	0,011	0,28	M34	0	0,014	0,28
M25	0	0,011	0,29	M35	0	0,014	0,29
M26	0	0,011	0,32	M36	0	0,014	0,32
M27	0	0,011	0,35	M37	0	0,014	0,35
M28	0	0,011	0,38	M38	0	0,014	0,38
M29	0	0,011	0,41	M39	0	0,014	0,41
M30	0	0,011	0,44	M40	0	0,014	0,44
<b>Mortiers</b>				<b>Mortiers</b>			
Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F	Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M41	0	0,017	0,22	M51	0	0,02	0,22
M42	0	0,017	0,24	M52	0	0,02	0,24
M43	0	0,017	0,26	M53	0	0,02	0,26
M44	0	0,017	0,28	M54	0	0,02	0,28
M45	0	0,017	0,29	M55	0	0,02	0,29
M46	0	0,017	0,32	M56	0	0,02	0,32
M47	0	0,017	0,35	M57	0	0,02	0,35
M48	0	0,017	0,38	M58	0	0,02	0,38
M49	0	0,017	0,41	M59	0	0,02	0,41
M50	0	0,017	0,44	M60	0	0,02	0,44
<b>Mortiers</b>				<b>Mortiers</b>			
Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F	Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M61	0	0,023	0,22	M71	0	0,026	0,22
M62	0	0,023	0,24	M72	0	0,026	0,24
M63	0	0,023	0,26	M73	0	0,026	0,26
M64	0	0,023	0,28	M74	0	0,026	0,28
M65	0	0,023	0,29	M75	0	0,026	0,29
M66	0	0,023	0,32	M76	0	0,026	0,32
M67	0	0,023	0,35	M77	0	0,026	0,35
M68	0	0,023	0,38	M78	0	0,026	0,38
M69	0	0,023	0,41	M79	0	0,026	0,41
M70	0	0,023	0,44	M80	0	0,026	0,44

Tableau II.2. : Désignation des mortiers sans fillers

En deuxième série, le rapport F/C+F a été fixé égal à 0,17 et les différents mortiers qui ont été étudiés sont rassemblés dans le tableau (II.3). Le nombre d'essais est plus réduit puisque la première série d'essais nous a permis d'avoir un ordre de grandeur sur les résultats préconisés.

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M81	0,17	0,011	0,31
M82	0,17	0,011	0,32
M83	0,17	0,011	0,34
M84	0,17	0,011	0,35
M85	0,17	0,011	0,36

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M86	0,17	0,014	0,31
M87	0,17	0,014	0,32
M88	0,17	0,014	0,34
M89	0,17	0,014	0,35
M90	0,17	0,014	0,36

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M91	0,17	0,017	0,31
M92	0,17	0,017	0,32
M93	0,17	0,017	0,34
M94	0,17	0,017	0,35
M95	0,17	0,017	0,36

**Tableau II.3.** : Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,17)

La troisième et quatrième série d'essais ont été consacrées aux mortiers dont le rapport F/C+F a été fixé à 0,26 et 0,33. Les différents mortiers sont définis dans les tableaux (II.4) et (II.5).

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M96	0,26	0,014	0,31
M97	0,26	0,014	0,32
M98	0,26	0,014	0,34

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M99	0,26	0,017	0,31
M100	0,26	0,017	0,32
M101	0,26	0,017	0,34

**Tableau II.4.** : Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,26)

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M102	0,33	0,011	0,32
M103	0,33	0,011	0,34

Mortiers	F/C+F	SP/C+F	E/C+F
M104	0,33	0,014	0,32
M105	0,33	0,014	0,34

**Tableau II.5.** : Désignation des mortiers avec fillers (F/C+F = 0,33)



Chaque mortier étant défini par les trois paramètres **F/C+F**, **SP/C+F** et **E/C+F** qui sont respectivement noté dans l'expression (II.13) par **a**, **b** et **d**, nous déterminerons donc les différentes proportions des mortiers à l'aide des expressions (II.13), (II.7), (II.9) et (II.12).

Des gâchées de 4 litres étant réalisées et testées au mini cône et à l'entonnoir, les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (II.6) à (II.13) et les figures (II.3) à (II.6),

### II.3.4.c. Résultats des essais sur mortiers :

Dans les tableaux II.6 à II.13, nous présenterons les résultats des essais effectués sur les mortiers présentés dans les tableaux II.2 à II.5 et qui sont au nombre de 105 mortiers.

Sur le tableau II.6, nous présentons les résultats de l'étalement relatif obtenus sur les mortiers sans fillers.

#### Mortiers avec F/C+F = 0 :

Dosage en Superplastifiant "%"								
E/C	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2	2,3	2,6
<b>0,22</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,24</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	1,18	3,00	5,76
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	5,50	6,47	6,84
<b>0,28</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	6,67	7,01	7,41
<b>0,29</b>	0,00	0,21	0,32	0,52	1,89	<b>6,84</b>	7,70	7,70
<b>0,32</b>	0,00	1,10	1,48	1,25	2,80	7,70	8,00	8,61
<b>0,35</b>	0,82	2,86	3,10	3,95	7,85	9,08	9,89	9,56
<b>0,38</b>	1,19	4,29	5,67	5,82	8,92	10,39	10,56	10,90
<b>0,41</b>	4,76	6,29	7,40	7,27	9,89	11,60	11,96	12,18
<b>0,44</b>	5,76	6,84	8,46	9,89	11,32	12,18	14,21	15,00

Tableau II.6. : L'étalement relatif au mini cône ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M01 à M80

Le tableau II.7, regroupe les temps d'écoulement relatifs des mortiers sans fillers.

Dosage en Superplastifiant "%"								
E/C	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2	2,3	2,6
<b>0,22</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,24</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,10
<b>0,26</b>	-	-	-	-	-	0,25	0,30	0,36
<b>0,28</b>	-	-	-	-	0,45	0,52	0,66	0,72
<b>0,29</b>	-	-	-	0,63	0,77	<b>1,00</b>	1,04	1,06
<b>0,32</b>	-	0,67	0,83	1,25	1,49	1,47	1,43	1,67
<b>0,35</b>	-	1,74	2,42	2,63	3,94	3,70	3,85	3,23
<b>0,38</b>	0,56	3,26	4,76	5,00	6,25	5,88	5,00	4,55
<b>0,41</b>	5,26	6,25	6,25	6,65	7,14	6,67	6,25	6,67
<b>0,44</b>	5,26	6,67	7,69	8,00	9,09	7,14	7,69	7,14

Tableau II.7. : Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = \frac{10}{t}$ ) des mortiers M01 à M80

Dans les tableaux II.8 et II.9 sont représentés respectivement les étalement relatifs et le temps d'écoulement relatifs des mortiers dont la teneur en fillers est de 17% (teneur calculé par rapport au total ciment + fillers)

**Mortiers avec F/C+F = 0,17 :**

	Dosage en Superplastifiant "%"		
E/C+F	1,1	1,4	1,7
0,31	1,20	2,81	4,89
0,32	1,73	3,73	5,90
0,34	2,42	5,62	7,00
0,35	2,8	7,20	9,02
0,36	4,01	9,11	10,04

**Tableau II.8. :** L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M81 à M95

	Dosage en Superplastifiant "%"		
E/C+F	1,1	1,4	1,7
0,31	0,51	0,91	1,29
0,32	0,93	1,62	2,00
0,34	1,89	2,75	2,98
0,35	2,38	3,98	4,52
0,36	3,01	4,50	4,72

**Tableau II.9. :** Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M81 à M96

Pour les mortiers dont la teneur en fillers est de 26%, les résultats des essais d'étalement relatif et de temps d'écoulement relatifs sont regroupés dans les tableau II.10 et II.11

**Mortiers avec F/C+F = 0,26 :**

	Dosage en Superplastifiant "%"	
E/C+F	1,4	1,7
0,31	2,72	4,51
0,32	3,20	5,10
0,34	4,10	6,70

**Tableau II.10. :** L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M96 à M101

	Dosage en Superplastifiant "%"	
E/C+F	1,4	1,7
0,31	0,68	0,73
0,32	0,93	1,30
0,34	2,01	2,40

**Tableau II.11. :** Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M96 à M101

En ce qui concerne les mortiers dont le rapport F/C+F est égal à 0,33 (teneur en fillers de 33%), les résultats sont présentés dans les tableaux II.12 et II.13.

**Mortiers avec F/C+F = 0,33 :**

E/C+F	Dosage en Superplastifiant "%"	
	1,1	1,4
<b>0,32</b>	2,95	3
<b>0,34</b>	3,84	<b>5,03</b>

**Tableau II.12.** : L'étalement relatif ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) des mortiers M96 à M101

E/C+F	Dosage en Superplastifiant "%"	
	1,1	1,4
<b>0,32</b>	0,52	0,3
<b>0,34</b>	0,76	<b>0,92</b>

**Tableau II.13.** : Vitesse relative d'écoulement ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers M96 à M101

Les valeurs en gras dans les tableau II.6 à II.13 représentent les valeurs recherchées (selon Okamura) et qui correspondent au mortier qu'il faut retenir pur confectionner un bon BAP

**II.3.4.d. Représentations graphique des résultats sur mortiers :**

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures II.3 à II.6. Cette forme de représentation permet de trouver facilement le mortier recherché, en l'occurrence le mortier qui offrirait à la fois un étalement relatif proche de 5 et un temps d'écoulement relatif proche de 1.

Sur la figure II.3, nous pouvons constater que pour chaque dosage en superplastifiant la relation entre l'étalement relatif et le temps d'écoulement relatif est linéaire. Toutefois ce qu'on peut remarquer que les différentes droites qui représentent cette relation n'ont pas le même origine. Pour les grands dosage (supérieurs à 1,7%), l'étalement relatif est important même si le temps d'écoulement relatif est égal à zéro. La même remarque peut être faite pour les droites de la figure II.4.

En d'autres termes, il est possible d'obtenir des mortiers qui présenteraient un étalement relatif proche de 4 tout en présentant un temps relatif égal à zéro. Chose que ne retrouve pas Okamura dans ses résultats [67].

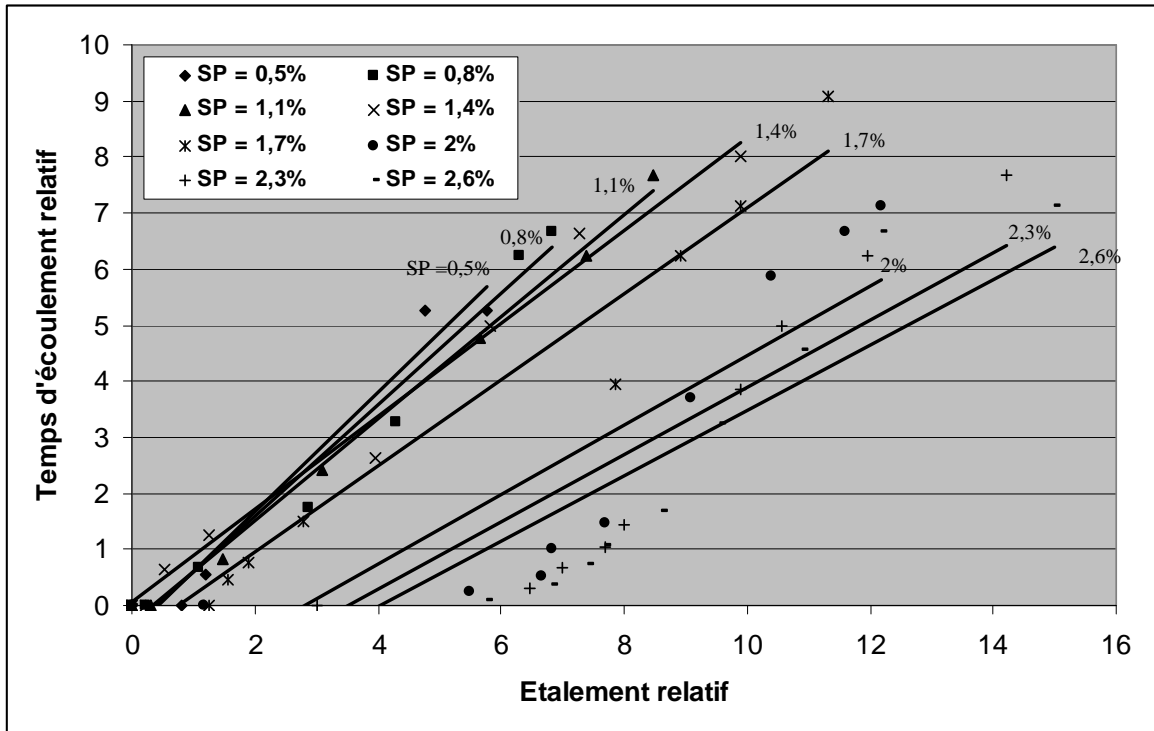


Figure II.3. : Relation entre l'étalement relatif «  $\Gamma_m$  » et l'écoulement relatif «  $R_m$  » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F. (Cas de F/C+F = 0)

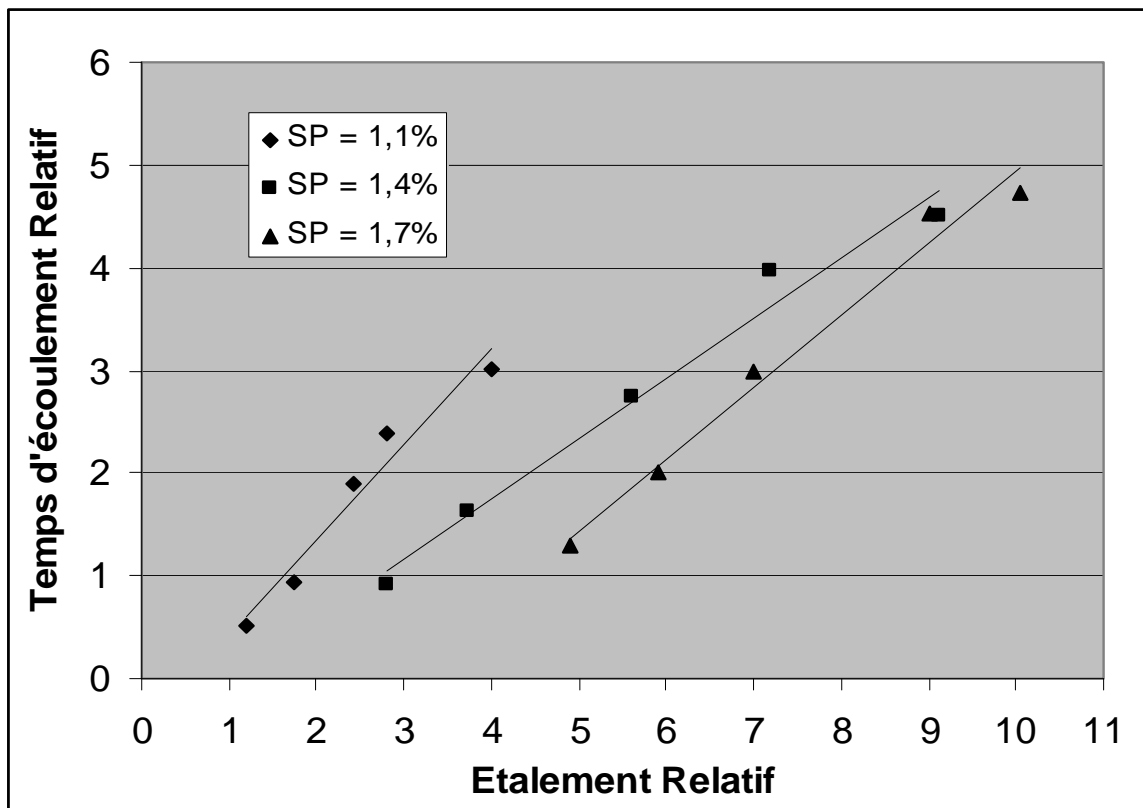
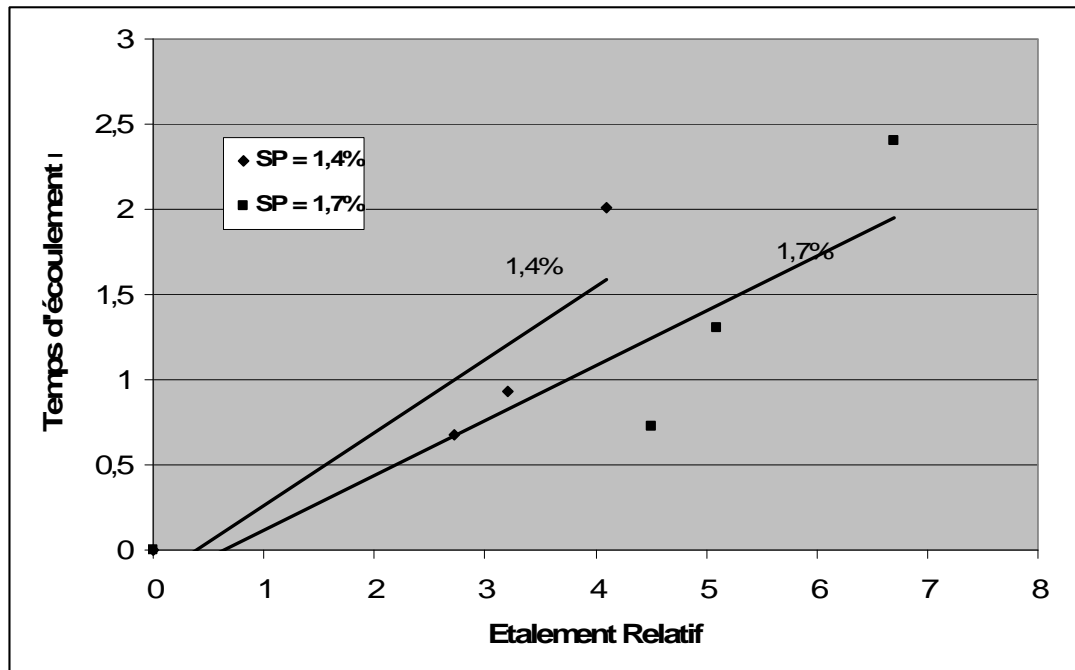
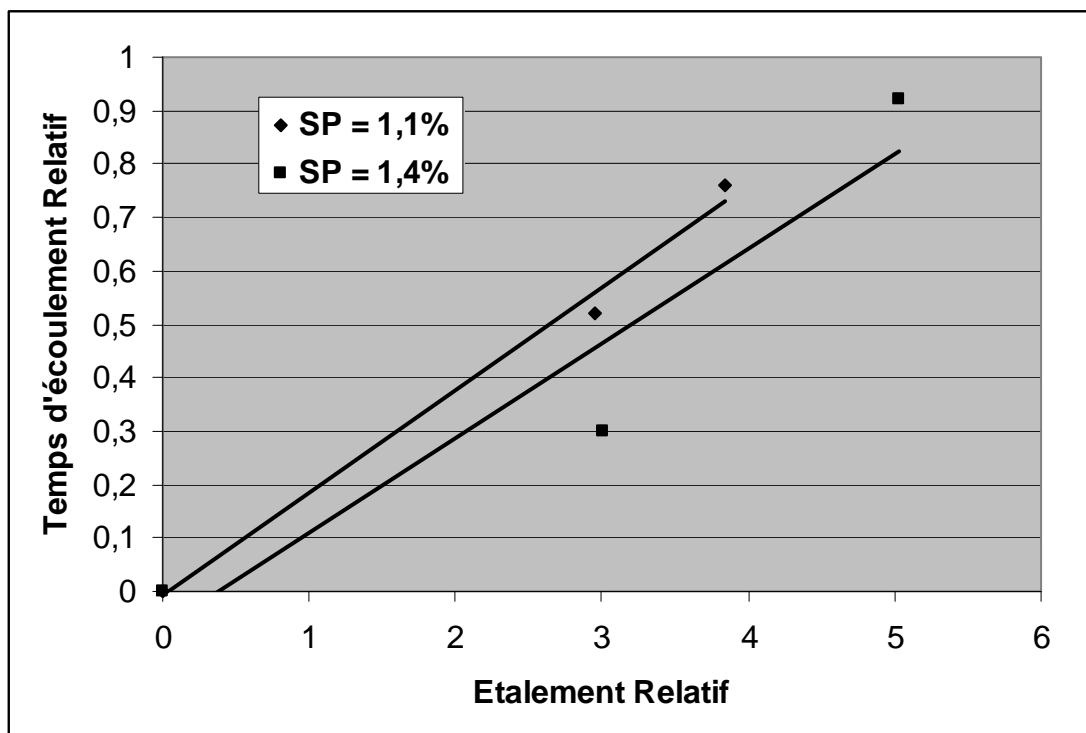


Figure II.4. : Relation entre l'étalement relatif «  $\Gamma_m$  » et l'écoulement relatif «  $R_m$  » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F. (Cas de F/C+F = 0,17)



**Figure II.5.** : Relation entre l'étalement relatif «  $\Gamma_m$  » et l'écoulement relatif «  $R_m$  » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F. (Cas de F/C+F = 0,26)



**Figure II.6.** : Relation entre l'étalement relatif «  $\Gamma_m$  » et l'écoulement relatif «  $R_m$  » pour différents dosages en superplastifiant (SP/C+F) et différents rapports E/C+F. (Cas de F/C+F = 0,33)

Des résultats obtenus, on peut faire ressortir les compositions de mortiers recherchés qu'on résume dans le tableau II.14 :

F/C+F	E/C+F	SP (%)	$\Gamma_m$	$R_m$
0	0,29	2	6,84	1,00
0,17	0,31	1,7	4,89	1,29
0,26	0,32	1,7	5,10	1,30
0,33	0,34	1,4	5,03	0,92

**Tableau II.14. :** Compositions des mortiers retenus.

On remarque que pour un temps d'écoulement et un étalement fixes, la demande en eau augmente avec l'augmentation de la quantité de fillers. Par contre, la demande en superplastifiant diminue avec l'augmentation de la quantité de fillers.

### II.3.5. Détermination des compositions des bétons :

En adoptant les compositions des mortiers retenus en **II.3.4.d.**, avec les dosages en gros granulats et en sable déterminés respectivement dans les paragraphes **II.3.2.** et **II.3.3.**, nous aurons les compositions de bétons rassemblées dans le tableau II.15.

Désignation	Paramètres de formulation			Dosage en Kg/m <sup>3</sup>					
	F/C+F	E/C+F	SP (%)	G	S	C	F	E	SP
<b>BAP01</b>	0	0,29	2	772	762	659	0	191,5	13,20
<b>BAP02</b>	0,17	0,31	1,7	772	762	524	107	195,9	10,75
<b>BAP03</b>	0,26	0,32	1,7	772	762	457	161	197,8	10,50
<b>BAP04</b>	0,33	0,34	1,4	772	762	400	197	203,3	8,35

**Tableau II.15. :** Compositions et paramètres de formulation des bétons formulés

### II.3.6. Gâchées d'essais et caractérisation des bétons :

Les bétons formulés par la méthode japonaise (présentés dans le tableau II.15), ont été testés pour vérifier si les objectifs visés sont bien atteints. En l'occurrence, un étalement proche de 70 cm. (Selon les prescriptions du Guide Européen pour les béton autoplaçants [87]).

Les essais réalisés pour chaque béton sont :

- L'étalement,
- L'essai de stabilité au tamis,
- L'essai à la boîte en L
- L'essai à l'entonnoir en V

Désignation	F/L	E/L	SP %	Étalement (cm)	Stabilité (%)	Boîte en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP01</b>	0	0,29	2,00	<b>57</b>	0	-	-
<b>BAP02</b>	0,17	0,31	1,70	<b>59</b>	2	-	38
<b>BAP03</b>	0,26	0,32	1,70	<b>63</b>	9	-	27,4
<b>BAP04</b>	0,33	0,34	1,40	<b>62</b>	16	-	-
les cases où les résultats sont indiqués par "-" l'essai n'a pas été concluant que ce soit par blocage ou pas manque de fluidité.							

**Tableau II.16. :** Résultats des essais réalisés sur les bétons formulés.

Ce qu'on peut remarquer en premier lieu, c'est l'étalement qui n'atteint pas les 66 cm recommandé pour un bon béton autoplaçant. Il va falloir donc, procéder à des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (66 cm et plus).

Le dosage du sable étant déjà très élevé, les corrections doivent être opérées sur la composition du coulis. Par conséquent, sur les quantités d'eau et de superplastifiant.

Afin d'ajuster les compositions, nous avons, en un premier lieu augmenté la quantité de superplastifiant et nous avons mesuré l'évolution de l'étalement. Les résultats que nous avons obtenus sont représentés II.17 :

Désignation	F/L	E/L	SP %	Étalement (cm)
<b>BAP01</b>	0	0,29	2,00	<b>57</b>
			2,20	58
			2,40	58
<b>BAP02</b>	0,17	0,31	1,70	<b>59</b>
			1,80	62
			1,90	61
			2,00	62
<b>BAP03</b>	0,26	0,32	1,70	<b>63</b>
			1,80	62
			1,90	63
			2,00	63
<b>BAP04</b>	0,33	0,34	1,40	<b>62</b>
			1,50	62
			1,60	63

**Tableau II.17. :** Evolution de l'étalement des compositions obtenues en fonction de l'augmentation du dosage en superplastifiant.

On peut remarquer à ce stade de l'étude, que l'augmentation du dosage en superplastifiant ne permet pas de faire augmenter sensiblement l'étalement des bétons. Le dosage obtenu par la méthode Japonaise est donc égal (ou supérieur) au dosage de saturation.

La correction des compositions doit donc se faire par l'augmentation du dosage en eau. Cette augmentation qui se traduit par l'augmentation du rapport E/C+F.

Ainsi, nous avons adopté plusieurs rapports E/C+F croissants. Les résultats des essais obtenus sont rassemblés dans les tableaux II.18 à II.21 :

Désignation	F/C+F	E/C+F	SP %	Étalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boite en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP01</b>	<b>0</b>	<b>0,29</b>	<b>2,00</b>	<b>57</b>	<b>0</b>	-	-
<b>BAP01.a</b>	0	0,31	2,00	61	1,3	0	31
<b>BAP01.b</b>	0	0,33	2,00	68	3,6	0,3	19
<b>BAP01.c</b>	0	0,35	2,00	70	5,3	0,68	12,2
<b>BAP01.d</b>	<b>0</b>	<b>0,37</b>	<b>2,00</b>	<b>71,5</b>	<b>13,3</b>	<b>0,8</b>	<b>8</b>
<b>BAP01.e</b>	0	0,39	2,00	77	31,3	0,83	5,7
<b>BAP01.f</b>	0	0,4	2,00	78	34,3	0,95	5,2

**Tableau II.18.** : Evolution de l'étalement du BAP01 (F/C+F=0) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.

Désignation	F/C+F	E/C+F	SP %	Étalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boite en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP02</b>	<b>0,17</b>	<b>0,31</b>	<b>1,70</b>	<b>59</b>	<b>2</b>	-	<b>38</b>
<b>BAP02.a</b>	0,17	0,33	1,70	65	5	0,15	22
<b>BAP02.b</b>	0,17	0,35	1,70	70	15,5	0,7	13,4
<b>BAP02.c</b>	<b>0,17</b>	<b>0,36</b>	<b>1,70</b>	<b>70,4</b>	<b>17,5</b>	<b>0,85</b>	<b>9</b>
<b>BAP02.d</b>	0,17	0,39	1,70	75,8	34,3	0,9	6,6
<b>BAP02.e</b>	0,17	0,4	1,70	79	41,8	1	4

**Tableau II.19.** : Evolution de l'étalement du BAP02 (F/C+F =0,17) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.

Désignation	F/C+F	E/C+F	SP %	Étalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boite en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP03</b>	<b>0,26</b>	<b>0,33</b>	<b>1,70</b>	<b>63</b>	<b>9</b>	-	<b>27,4</b>
<b>BAP03.a</b>	0,26	0,35	1,70	70	22	0,72	13
<b>BAP03.b</b>	<b>0,26</b>	<b>0,36</b>	<b>1,70</b>	<b>71</b>	<b>23</b>	<b>0,77</b>	<b>9</b>
<b>BAP03.d</b>	0,26	0,38	1,70	72,5	29	0,92	7,4
<b>BAP03.e</b>	0,26	0,4	1,70	81	42	1	4,1

**Tableau II.20** : Evolution de l'étalement du BAP03 (F/C+F =0,26) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.

Désignation	F/C+F	E/C+F	SP %	Étalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boite en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP04</b>	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	<b>1,4</b>	<b>62</b>	<b>16</b>	-	-
<b>BAP04.a</b>	0,33	0,34	1,4	65	17	0,1	-
<b>BAP04.b</b>	<b>0,33</b>	<b>0,36</b>	<b>1,4</b>	<b>70</b>	<b>19</b>	<b>0,89</b>	<b>8,3</b>
<b>BAP04.c</b>	0,33	0,38	1,4	79	29,3	0,93	4,9
<b>BAP04.d</b>	0,33	0,4	1,60	82	42	0,97	4,7

**Tableau II.21.** : Evolution de l'étalement du BAP04 (F/C+F =0,33) en fonction de l'augmentation du dosage en eau.



On remarque que l'ajout d'eau permet une augmentation considérable de l'étalement. Cependant, il est essentiel de ne pas perdre de vue l'aspect de la cohésion du béton qui doit être vérifié.

On sait que l'augmentation du dosage en eau provoque une diminution de la cohésion au sein du mélange qui peut entraîner des phénomènes de ségrégations très préjudiciables. C'est pour cette raison que nous avons testé, en plus de l'étalement, pour chaque mélange étudié ; la stabilité au tamis, l'essai à la boîte en L et le temps d'écoulement à l'entonnoir. Ces mesures qui permettent d'apprécier sur la stabilité et la capacité de remplissage du béton.

En analysant les résultats obtenus, on peut déterminer pour chaque béton (BAP1 à 4), le béton à retenir. En se référant au « guide Européen pour les bétons autoplaçants » [87], le béton à retenir est par définition celui qui présente :

- Un étalement proche de 70 cm
- Une stabilité au tamis inférieur ou égale à 23%
- Un rapport à la boîte en L supérieur à 0,75
- Un temps d'écoulement à l'entonnoir inférieur à 10 s

Les paramètres de formulation retenus sont donc rassemblés dans le tableau II.22 :

Désignation	F/C+F	E/C+F	SP %	Etalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boîte en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP01.d</b>	0	0,37	2,00	71,5	13,3	0,8	8
<b>BAP02.c</b>	0,17	0,36	1,70	70,4	17,5	0,85	9
<b>BAP03.b</b>	0,26	0,36	1,70	71	23	0,77	9
<b>BAP04.b</b>	0,33	0,36	1,4	70	19	0,89	8,3

**Tableau II.22. :** Paramètres de formulation et caractéristiques des bétons corrigées et ajustées.

Les paramètres de composition présentés dans le tableau précédent sont ceux des bétons qui répondent aux exigences d'un bon BAP selon les recommandations du « guide Européen pour les bétons autoplaçants » [87].

Les compositions des bétons à retenir sont donc représentées dans le tableau II.23 :

Désignation	Paramètres de formulation			Dosage en Kg/m <sup>3</sup>					
	F/C+F	E/C+F	SP (%)	G	S	C	F	E	SP
<b>BAP01.d</b>	0	0,37	2,00	772	762	659	0	244	13,20
<b>BAP02.c</b>	0,17	0,36	1,70	772	762	524	107	227	10,75
<b>BAP03.b</b>	0,26	0,36	1,70	772	762	457	161	223	10,50
<b>BAP04.b</b>	0,33	0,36	1,40	772	762	400	197	215	8,35

**Tableau II.23. :** Compositions des bétons corrigées et ajustées.

Si on analyse la différence entre les compositions des bétons du tableau II.15, et ceux présentés dans le tableau II.23, on peut remarquer que :

- l'augmentation du dosage en eau a permis la correction des formules pour l'obtention de bon BAP,

- le rapport E/C+F est presque le même quelque soit le rapport F/C+F,
- Le dosage en superplastifiant dépend fortement du rapport F/C+F.

Etant donné que la quantité d'eau a été augmenté les compositions des mortiers des bétons ajustés ne sont plus les mêmes que celles des mortiers des bétons déterminés initialement par l'application de la méthode japonaise. L'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement au mini entonnoir des mortiers ajustés ne restent plus les mêmes que ceux des bétons non ajustés.

Pour les quatre compositions de béton du tableau II.23, nous avons testé les mortiers respectifs en mesurant l'étalement et l'écoulement relatifs. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.24 :

Désignation des Mortiers	Etalement d en (cm)	Temps d'écoulement t en(s)	Etalement relatif $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$	Temps d'écoulement Relatif $R_m = 10/t$
M.BAP01.d	29,50	4,00	7,70	2,50
M.BAP02.c	30,00	3,78	8	2,64
M.BAP03.b	29,00	3,50	7,41	2,86
M.BAP04.b	29,50	3,65	7,70	2,74

**Tableau II.24.** : L'étalement relatif au mini cône ( $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ) et la vitesse relative

d'écoulement à l'entonnoir ( $R_m = 10/t$ ) des mortiers des bétons ajustés.

On remarque que les mortiers des bétons ajustés représentent des caractéristiques très rapprochées. Ce qui confirme encore l'hypothèse qui stipule que la fluidité d'un béton, tous autres paramètres fixes, dépend de la fluidité du mortier qui le compose.

Ainsi, on peut confirmer que pour obtenir des béton autoplaçants qui représenteraient des étalements proches de 70 cm et qui respectent en même temps les conditions de bonne résistance à la ségrégation, de bonne capacité de remplissage et une bonne stabilité, il faudrait concevoir des mortiers qui présentent un étalement relatif proche de 8 et un temps d'écoulement relatif proche de 2,5.

On rappelle que les résultats présentés dans le tableau II.17, montrent bien que le dosage en superplastifiant correspond au dosage de saturation du liant. Le travail d'optimisation de la composition des mortiers ne réside donc que dans l'ajustement de la quantité d'eau à introduire.

A ce niveau de notre recherche, nous constatons que pour entamer un travail de formulation d'un BAP, il serait plus judicieux de déterminer en premier lieu le dosage en superplastifiant qui correspond au dosage de saturation du liant (ciment + fillers). On peut ensuite ajuster la quantité d'eau pour obtenir les caractéristiques recherchées. Ces dernières qui ne sont plus telles qu'elle sont décrites par Okamura [67] [81] (en l'occurrence, un étalement relatif de 5 et un temps d'écoulement relatif de 1), mais un étalement relatif avoisinant 8 et un temps d'écoulement relatif proche de 2,5.

Pour mieux comprendre la relation du dosage de superplastifiant avec la composition du liant, nous avons entamé une étude sur des coulis que nous présentons dans le paragraphe suivant.

### **II.3.7. Etude sur coulis pour la détermination du dosage de saturation en superplastifiant pour un liant :**

Si on analyse les résultats présentés jusqu'à maintenant, on peut facilement remarquer que le dosage en superplastifiant des bétons formulés et retenus diminue avec l'augmentation du rapport F/C+F. Ce qui laisse à comprendre que la consommation en adjuvant des fillers est inférieure à celle du ciment.

Il est vrai que lorsque l'on entame un travail de formulation d'un béton autoplaçant, on commence toujours par fixer le rapport (Fillers/Ciment + Fillers). Ce dernier qui est généralement dicté par des considérations de résistance ciblée et aussi par les considérations de durabilité. (Des dosages minimaux en ciment sont toujours imposés par les normes et les règlements).

Il serait donc très intéressant de pouvoir estimer le dosage de saturation d'un liant défini par un rapport quelconque F/C+F à partir du dosage en saturation des constituants de ce liant, en l'occurrence le ciment et les fillers. C'est ainsi, que nous avons entamé une étude sur des coulis pour essayer de trouver une expression qui permet une telle estimation.

Pour chaque mélange fillers + ciment et un rapport Eau/(Ciment + Fillers) il existe un dosage en superplastifiant au-delà duquel aucun gain de fluidité n'est possible. Ce dosage est appelé dosage de saturation. Pour différents rapports F/C+F et E/(C+F) nous avons déterminé ce dosage en utilisant le cône de Marsh.

#### **II.3.7.a. L'essai au cône de Marsh :**

L'essai au cône de Marsh a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciment avec superplastifiant, en utilisant que ce soit, une approche similaire à celle du cône d'écoulement défini dans les normes ASTM Standard C939 pour les coulis d'injection ou les recommandations de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances [26].

C'est une méthode simple et pratique pour l'obtention d'une mesure relative de la fluidité d'une pâte, cette mesure qui est inversement proportionnelle au temps d'écoulement, en mesurant le temps que prend un certain volume de pâte pour s'écouler du cône à travers une petite ouverture.

Le point de saturation est défini par le dosage en superplastifiant au-dessus duquel le temps d'écoulement au cône de Marsh ne décroît plus d'une manière appréciable.

Le fait qu'une combinaison liant-superplastifiant ne présente pas un point de saturation bien identifiable peut indiquer une incompatibilité.

L'essai au cône de Marsh a été réalisé en respectant les étapes suivantes :

- Le ciment et l'addition sont introduits dans le malaxeur et mixés à sec pendant 30 secondes (vitesse lente),
- L'eau et 1/3 de la quantité de l'adjuvant sont ensuite introduits et malaxés pendant 2 minutes (vitesse lente),
- Le dernier tiers d'adjuvant est introduit et malaxé pendant 2 minutes (vitesse rapide),
- Un litre du coulis est versé dans le cône de Marsh, et l'on mesure instantanément le temps nécessaire pour que le cône se vide.

### II.3.7.b. Détermination du dosage de saturation sur coulis :

Le rapport  $E/(C+F)$  adopté est 0,32. Ce rapport qui permet, sans adjuvant, l'obtention d'une pâte homogène et stable.

Le dosage de saturation est initialement déterminé sur des coulis de ciment pur et sur des coulis de fillers pur. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures II.7. et II.8.

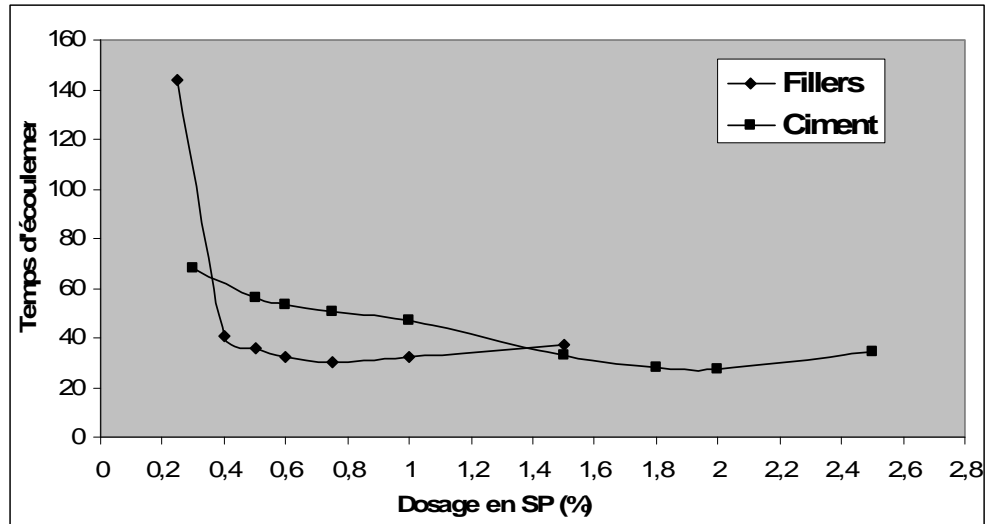


Figure II.7. : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en superplastifiant d'un coulis de ciment pur et un coulis de fillers pur.

Sur la figure II.7, on peut déterminer le dosage de saturation du ciment et du fillers. On remarque que ce dernier est de l'ordre 1,8 à 2% pour le ciment, et de l'ordre de 0,8% pour le fillers.

Pour des coulis confectionnés par le mélange (ciment, fillers) nous avons mesuré le dosage en saturation pour différents rapports  $F/C+F$ , les résultats sont représentés sur la figure II.8.

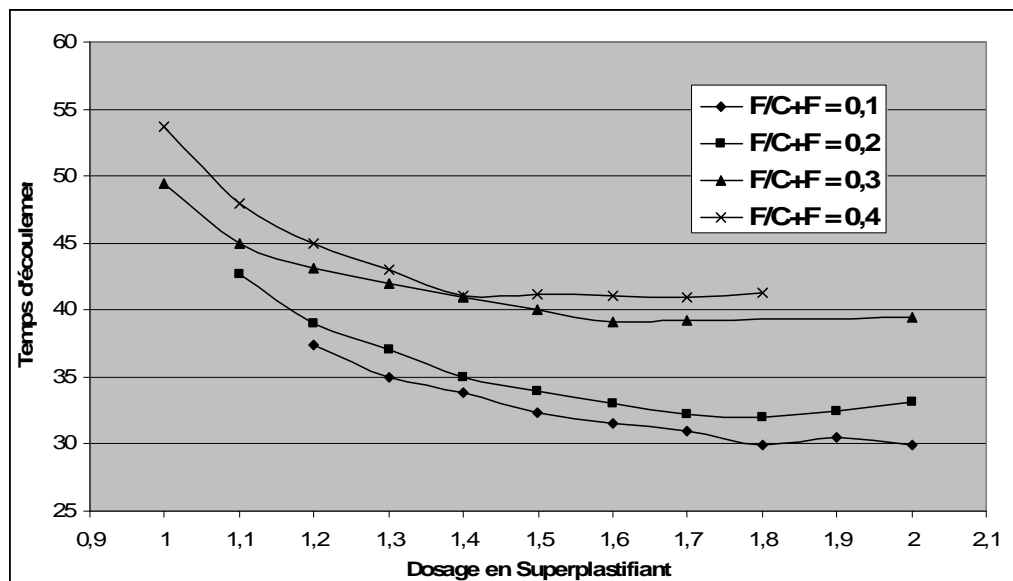


Figure II.8. : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en superplastifiant pour des coulis avec des rapports  $F/C+F$  différents.

Nous remarquons que le dosage en saturation est en relation avec les proportions de ciment et de fillers adoptés. Cette relation qui semble linéaire et obéit à la relation suivante :

$$SP = F \times SP_F + C \times SP_C \quad (II.14)$$

Avec :

SP le dosage de saturation du mélange F+C,

$SP_F$  et  $SP_C$  respectivement les dosage de saturation du coulis de filler et de ciment,

C et F sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange,

On peut déduire de la figure II.8, les valeurs suivantes :

Pour 10% de fillers et 90% de ciment, le dosage en saturation est de l'ordre de : 1,85%

Pour 20% de fillers et 80% de ciment, le dosage en saturation est de l'ordre de : 1,7%

Pour 30% de fillers et 70% de ciment, le dosage en saturation est de l'ordre de : 1,55%

Pour 40% de fillers et 60% de ciment, le dosage en saturation est de l'ordre de : 1,4%

L'application de l'expression II.14, permet d'obtenir les résultats suivants :

Coulis	F/C+F	Dosage de Saturation Expérimental	Dosage de Saturation Calculé
10% de fillers	0,1	1,8	1,88
20% de fillers	0,2	1,70	1,76
30% de fillers	0,3	1,60	1,64
40% de fillers	0,4	1,40	1,52

**Tableau II.25 :** Dosages de saturation en superplastifiant déterminés expérimentalement et calculés pour des coulis à F/C+F différents.

On remarque que la valeur du dosage de saturation déterminée expérimentalement est très proche de celle calculé analytiquement. On peut remarquer aussi que la valeur calculée est toujours légèrement supérieure de la valeur expérimentale (réelle). Ceci est un grand avantage pour l'application de l'expression II.14 qui permet de déduire le dosage recherché avec un léger excès.

En connaissant donc le dosage de saturation d'un coulis de ciment pur et celui d'un coulis de fillers pur, on peut facilement déduire pour n'importe quelle combinaison Ciment-Fillers, le dosage de saturation.

L'adoption de l'expression (II.14) pour la détermination du dosage en superplastifiant pour un béton autoplaçant permet de réduire le nombre de paramètres dans l'étude d'optimisation de la composition des mortiers à un (01) paramètre au lieu de deux (02) puisque la méthode japonaise préconise l'optimisation du mortier en faisant varier à la fois le dosage en eau et en superplastifiant.

Pour optimiser la composition des mortiers, nous proposons de fixer le dosage en superplastifiant à la saturation puis de ne faire varier que le dosage en eau pour obtenir la fluidité voulue. Cette fluidité qui est caractérisée par un étalement relatif proche de 8 et un temps d'écoulement relatif de l'ordre de 2,5.

### II.2.7 Bilan de l'étude :

Sur la base des résultats obtenus par les études élaborés sur les coulis, les mortiers et les bétons, nous proposons une nouvelle démarche pour la formulation des bétons autoplaçant qui permet de définir plus rapidement des compositions qui répondent aux exigences de fluidité, de stabilité et capacité de remplissage nécessaires pour un béton autoplaçant.

#### Démarche proposé pour la formulation des BAP

Nous pouvons constater que le dosage en superplastifiant des bétons étudiés est toujours proche du dosage de saturation. Il est donc plus judicieux de commencer par rechercher et adopter ce dosage, a priori, afin de réduire le nombre de paramètres lors de l'optimisation de la composition du mortier.

Et puisque le liant est souvent une combinaison de ciment et d'additions fines, l'élaboration d'une expression du type de l'expression II.14 permettant l'évaluation du dosage de saturation d'un liant à partir des dosages de saturation de ses composants est essentielle.

En gardant la même manière de doser les granulats de la méthode japonaise nous proposons la démarche suivante :

- La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50% de leur compacité,
- L'optimisation de la pâte s'effectue sur les mortiers dont la teneur volumique en sable est égale à 40%,
- Déterminer le dosage de saturation (en utilisant le cône de Marsh) de chaque composant du liant (ciment et filler) et déduire ensuite le dosage de saturation du liant retenu en utilisant l'expression suivante :

$$SP = F \times SP_F + C \times SP_C$$

Avec :

SP le dosage de saturation du mélange F+C,

$SP_F$  et  $SP_C$  respectivement les dosage de saturation du coulis de filler et de ciment,

C et F sont les proportions rapportées à l'unité du ciment et du fillers dans le mélange,

- Une fois le dosage en superplastifiant déterminé, concevoir des mortiers et faire varier le dosage en eau. Les mortiers sont caractérisés conjointement par l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir (figure II.1) et déduire :

- L'étalement relatif  $\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2}$ ;

- La vitesse relative d'écoulement  $R_m = 10/t$  ;

- D'après les résultats que nous avons obtenus et présentés dans ce chapitre ; pour obtenir un béton autoplaçant acceptable il faut avoir simultanément  $\Gamma_m = 8$  et  $R_m = 2,5$ .
- Effectuer une gâchée d'essais pour vérifier la composition et apporter des corrections si ceci s'avère nécessaire.

#### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un travail de formulation de bétons autoplaçants en utilisant la méthode Japonaise. Il s'avère que cette méthode ne permet pas d'atteindre du

premier coup les résultats espérés. La limitation de l'étalement relatif à 5 et du temps d'écoulement relatif à 1 sont contestables. En effet, ces limitations doivent être revues. C'est le travail que nous avons mené, sur des coulis, des mortiers et des bétons, et qui nous a permis de déterminer de nouvelles valeurs en l'occurrence ; un étalement relatif de 8 et un temps d'écoulement relatif de 2,5.

Nous avons pu aussi constater que le dosage en superplastifiant pour les bétons autoplaçants est toujours proche de celui de la saturation. Il serait donc plus judicieux de le fixer a priori et faire diminuer le nombre de paramètre.

C'est ainsi, que nous avons proposé une procédure pour déterminer le dosage en superplastifiant pour n'importe quelle combinaison de liant en fonction des dosages de saturation des constituant de ce liant. Une expression simple permettant cela a été proposée. A la fin, nous avons proposé une nouvelle démarche pour la formulation des BAP qui obéit au caractère local des constituants que nous utilisons.

Dans ce chapitre plusieurs caractéristiques des coulis, mortiers et bétons ont été mesurées et l'influence de certains paramètres ( $E/C+F$ ,  $F/C+F$  et dosage en superplastifiant) a été appréciée.

## **CHAPITRE III**

# **ETUDE DE LA SEGREGATION STATIQUE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS**



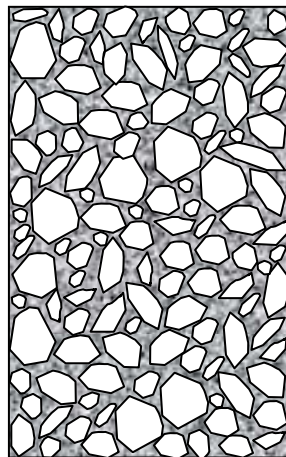
## CHAPITRE III

### ETUDE DE LA SEGREGATION STATIQUE DANS LES BETONS AUTOPLACANTS

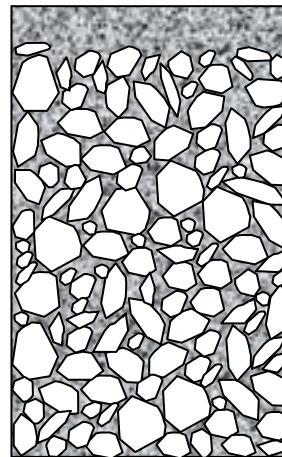
#### III.1. Introduction :

Le Béton autoplaçant « BAP » est un nouveau type de béton pouvant remplir tous les coins et recoins d'un coffrage sans apport extérieur d'énergie. Afin d'assurer une telle propriété, le BAP doit présenter une grande fluidité, une bonne **résistance à la ségrégation** et ne devrait présenter aucune forme de blocage au niveau des mailles d'armature.

Une bonne résistance à la ségrégation se traduit par une distribution régulière des gros granulats dans toutes les parties de l'élément et à tous les niveaux. En d'autres termes, le béton ne doit subir aucune forme de ségrégation horizontale et verticale.



Distribution régulière des  
gros granulats dans la masse  
du béton



Tassement des gros granulats.  
Cas de la Ségrégation  
Statique.

**Figure III.1.** Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton

La ségrégation horizontale est causée par l'écoulement du matériau sur des distances plus ou moins importantes. Elle est aussi amplifiée par les éventuels blocages des gros granulats au voisinage des mailles d'armatures.

La ségrégation verticale (Figure III.1), appelée aussi ségrégation statique, elle est souvent causée par la décantation des gros granulats au fond du volume du béton due à une mauvaise formulation de la pâte.

Les deux formes de ségrégation doivent faire l'objet d'une étude lors du travail de formulation du mélange et peuvent être facilement évitées par l'adoption d'une formulation adéquate.

L'essai à la boîte en L permet de simuler l'écoulement du béton dans un coffrage ferrailé. Cet essai permet de vérifier l'apparition ou non de blocage du béton au niveau des barres d'armature.

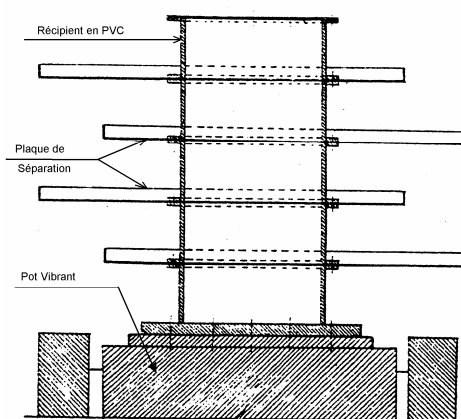
L'appréciation de la ségrégation statique peut être effectuée en se basant sur les résultats de l'essai de stabilité au tamis. Plus le béton est stable « pâte visqueuse et cohésive » plus le risque de la ségrégation statique est moindre. Toutefois, cette manière de procéder reste une appréciation indirecte de la ségrégation statique.

Dans ce chapitre, on présente une nouvelle procédure d'essai pour l'appréciation directe de la résistance à la ségrégation statique des BAP [13][14].

### III.2. Etude de la ségrégation statique :

Les publications dans le domaine de la ségrégabilité des BAP ne sont pas nombreuses. On peut toutefois citer les travaux de V.K. Bui et al. (USA et Australie) [21] qui ont présenté une méthode rapide pour tester la résistance à la ségrégation des BAP. Ces chercheurs ont proposé l'utilisation d'un dispositif similaire à celui du « Compacting Factor » pour apprécier la ségrégation verticale.

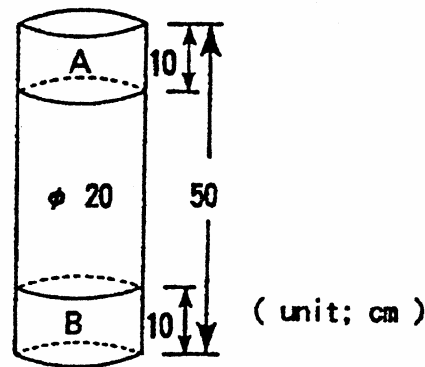
Sidky, Legrand et Barrioulet (1981) [89] ont développés un essai pour les bétons ordinaires qui consiste à remplir un récipient de 425 mm de haut et de 187 mm de diamètre intérieur (Figure III.2) est rempli de béton puis vibré. Ils séparent ensuite le béton en cinq couches égales à l'aide de séparateurs incorporés dans le récipient. Chaque couche est analysée (masse de la pâte et masse des granulats) afin de déterminer un coefficient de ségrégation  $S_i$  qui indique la richesse en granulats. Le coefficient de ségrégation est la concentration en granulats d'une couche de béton sur la concentration initiale. Ainsi,  $S_i > 1$  indique un enrichissement en granulats et  $S_i < 1$ , un appauvrissement en granulats.



**Figure III.2.** : Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet. [89]

On retrouve aussi la méthode japonaise du cylindre (Umehara et coll., 1994) [89] qui est analogue à la méthode de Sidky sauf que le récipient est un cylindre de 500 mm de haut par

200 mm de diamètre (Figure III.3). Le résultat est exprimé par le rapport de la masse des granulats dans la partie supérieure A sur la masse des granulats dans la partie inférieure B.



**Figure III.3.** : Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de la résistance à la ségrégation. [89]

Parmi les essais développés pour la caractérisation de la résistance à la ségrégation, on retrouve l'essai de stabilité au tamis, recommandé par l'Association Française du Génie Civil AFGC. C'est un essai qui consiste à remplir un seau de 10 litre de béton, attendre 15 minutes, puis verser sur un tamis de 5 mm d'ouverture une quantité d'environ 4,8 kg. Enregistrer, après 2 minutes, la quantité de laitance passant par les mailles du tamis. Le rapport de la laitance passée sur la masse de l'échantillon initial offre une grandeur caractérisant la tendance à la ségrégation des BAP [41] [48] [81] [87].

### III.3. Proposition d'une procédure d'essai de mesure de l'indice de ségrégation :

La méthodologie proposée et utilisée pour l'étude des différents mélanges présentés dans ce chapitre est inspirée des travaux de Sidky ainsi que ceux de la méthode Japonaise du cylindre. L'intérêt de cet essai réside que l'opération de séparation des différentes couches de béton se fait après la **stabilisation complète du système** (au moment de fin de prise). Ceci offre une grande facilité à l'opérateur étant donné que le béton ne risque pas de s'écouler. Les erreurs dues aux pertes de matériaux lors des opérations de séparation, de pesage sont donc relativement très minimes.

Les différentes étapes de l'essai proposé sont présentées dans ce qui suit et sont illustrées par la figure III.4.

- le moule utilisé est un cylindre de dimension 110 x 400 mm
- le béton est coulé dans le moule en une seule opération, puis le temps d'attente est proche du temps de fin de prise,
- le moule est séparé en trois parties plus ou moins égales (partie supérieure, partie du milieu et partie inférieure)
- Pour chaque partie, après pesage puis lavage, on détermine le rapport de la masse granulats secs (>5mm) sur la masse totale de la partie considérée,
- Les teneurs en granulats de chaque partie ( $G_{supérieure}$ ,  $G_{milieu}$  et  $G_{inférieure}$ ) sont calculées : c'est le rapport de la masse des granulats secs sur la masse totale de la partie considérée.
- L'indice de ségrégation statique « ISS » est défini comme suit :

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

avec :

$G_{\text{inf}}$  : Teneur en gros granulats dans la partie inférieure,

$G_{\text{sup}}$  : Teneur en gros granulats dans la partie supérieure.



**Figure III.4.** Les différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique.  
[13][14].

### III.4. Programme Expérimental :

L'objectif est de valider la procédure expérimentale présentée précédemment et de situer les résultats obtenus par rapport aux résultats des essais recommandés.

En adoptant comme paramètres d'étude la nature du sable « roulé ou concassé », le dosage en fillers calcaires exprimé par « Fillers/Liant » et le dosage en eau exprimé par « Eau/Liant », vingt trois (23) compositions ont été définies.

#### III.4.1. Matériaux utilisés :

Les 23 compositions qui ont fait l'objet d'étude dans ce chapitre, se subdivisent en : 12 compositions avec un sable roulé et qui ont été réalisées au niveau du laboratoire de génie civil de l'université 20 août 55 de Skikda, et 11 autres compositions avec un sable concassé réalisés au niveau du laboratoire LMDC de Constantine.

Les caractéristiques des différents constituants qui ont été utilisés que ce soit au LMDC ou au laboratoire de génie civil de Skikda sont présentées en Annexe 1. Toutefois, nous rappelons succinctement les différents constituants :

- Un ciment du type CEM II/A de Hamma bouziane,
- des fillers calcaires UF20 de la carrière ENG de Khroub,
- des granulats (sable et gravier) de la carrière Hedna de Ain Smara,
- un sable de mer (roulé (0/3) de la sablière de Filfila, Skikda
- un superplastifiant Medaplast SP40 de Granitex,
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université Mentouri de Constantine et celui du laboratoire de Skikda

#### III.4.2. Compositions étudiées :

En fixant le dosage en superplastifiant à sa saturation, la formulation des bétons de références a été conduite selon les recommandations de la méthode proposée et exposée au chapitre II.

Le dosage en gros granulats étant fixé à 50% de sa compacité et celui du sable à 40% du volume total du mortier.

La composition de la pâte est donc déduite à partir des paramètres Eau/Liant et Fillers/Liant choisis.

Ainsi, pour tous les mélanges, on a défini un indice de ségrégation et réalisé l'ensemble des mesures suivantes :

- l'étalement,
- la stabilité au tamis,
- l'essai à la boîte en L
- l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

Pour chaque mélange étudié, lors des différents essais, des appréciations visuelles de la stabilité du béton sont notées.

Les tableaux III.1 et III.2 regroupent les compositions des différents mélanges étudiés.

Composition au kg par mètre cube de béton						
Référence	Gravier	Sable de mer	Ciment	Filler	Eau	Superplastifiant
BAP01	720,5	743	635,5	0	203	12,7
BAP02	720,5	743	617	0	209,5	12,3
BAP03	720,5	743	599,5	0	216	12
BAP04	720,5	743	535,5	94,5	201,5	13,75
BAP05	720,5	743	520	92	208	11,1
BAP06	720,5	743	510,5	90	216	10,95
BAP07	720,5	743	437,5	187,5	199,5	10,2
BAP08	720,5	743	424,5	182	206,5	9,95
BAP09	720,5	743	421	180,5	216,5	9,85
BAP10	720,5	743	372,5	248,5	198,5	9,4
BAP11	720,5	743	362	241,5	205	9,15
BAP12	720,5	743	361,5	241	217	9,15

**Tableau III.1.** : Compositions des mélanges réalisés avec le sable de mer « roulé ».

(Réalisés au laboratoire de génie civil de l'université de Skikda)

Composition au kg par mètre cube de béton						
Référence	Gravier	Sable Concassé	Ciment	Filler	Eau	Superplastifiant
BAP13	772	762	625	0	199	12,5
BAP14	772	762	607	0	205	12,14
BAP15	772	762	590	0	211	11,79
BAP16	772	762	574	0	217	11,47
BAP17	772	762	558	0	220	11,16
BAP18	772	762	450	157	206	10,25
BAP19	772	762	450	157	224	10,25
BAP20	772	762	450	157	236	10,25
BAP21	772	762	400	200	211	9,6
BAP22	772	762	400	200	222	9,6
BAP23	772	762	400	200	234	9,6

**Tableau III.2.** : Compositions des mélanges réalisés avec le sable concassé. ».

(Réalisés au laboratoire de génie civil de l'université de Constantine)

**III.5. Résultats et Discussions :**

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau III.3.

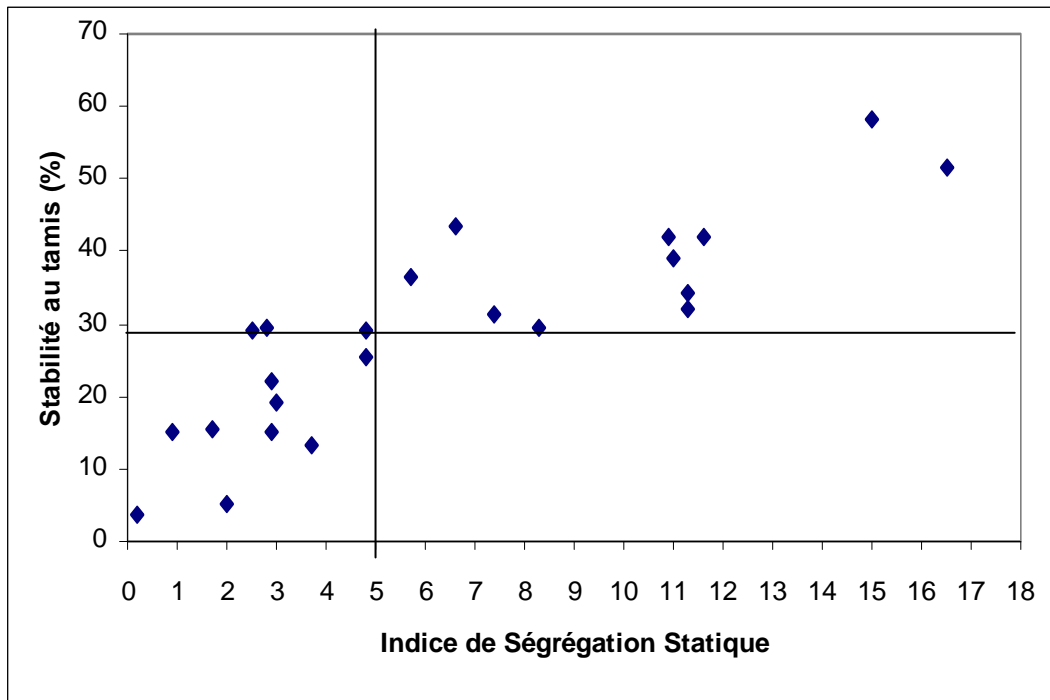
Ref	E/L	F/L	Étalement (cm)	Stabilité (%)	Boîte en L	Entonnoir V (s)	Etude de la Ségrégation				
							Gsup	Gmil	Ginf	ISS	Appréciation Visuelle
BAP01	0,32	0	62,5	15,2	0,9	12	0,351	0,352	0,36	0,9	++
BAP02	0,34	0	66	29	1	9	0,34	0,34	0,365	2,5	+
BAP03	0,36	0	72	36,5	1	5,5	0,312	0,355	0,369	5,7	-
BAP04	0,32	0,15	63	15,4	0,9	17	0,348	0,352	0,365	1,7	+
BAP05	0,34	0,15	66,5	29,3	1	12	0,334	0,342	0,362	2,8	±
BAP06	0,36	0,15	73	43,3	1	7	0,303	0,349	0,369	6,6	-
BAP07	0,32	0,3	66	15,2	1	16	0,331	0,345	0,36	2,9	+
BAP08	0,34	0,3	76	32	1	7,5	0,28	0,35	0,393	11,3	±
BAP09	0,36	0,3	81,5	58,1	1	6,5	0,28	0,38	0,43	15	--
BAP10	0,32	0,4	70	25,4	1	15	0,312	0,35	0,36	4,8	+
BAP11	0,34	0,4	75	39	1	7,5	0,288	0,381	0,398	11	--
BAP12	0,36	0,4	83,5	51,7	1	5,5	0,274	0,416	0,439	16,5	--
BAP13	0,33	0	68	3,6	0,3	19	0,328	0,33	0,33	0,2	++
BAP14	0,35	0	70	5,3	0,68	12,2	0,315	0,326	0,335	2	++
BAP15	0,37	0	71,5	13,3	0,8	8	0,305	0,333	0,342	3,7	++
BAP16	0,39	0	77	31,3	0,83	5,7	0,3	0,315	0,374	7,4	±
BAP17	0,4	0	78	34,3	0,95	5,2	0,281	0,32	0,394	11,3	-
BAP18	0,35	0,26	70	22	0,72	13	0,32	0,329	0,349	2,9	+
BAP19	0,38	0,26	72,5	29	0,92	7,4	0,306	0,346	0,354	4,8	+
BAP20	0,4	0,26	81	42	1	4,1	0,28	0,317	0,389	10,9	--
BAP21	0,36	0,33	70	19	0,89	8,3	0,312	0,328	0,342	3	+
BAP22	0,38	0,33	79	29,3	0,93	4,9	0,286	0,297	0,369	8,3	+
BAP23	0,4	0,33	82	42	0,97	4,7	0,274	0,298	0,39	11,6	--

**Tableau III.3.** Résultats des essais

Appréciation Visuelle de la stabilité : ++ très bonne, + bonne, ± critique - Mauvaise, -- très mauvaise

Selon les recommandations de l'AFGC un béton autoplaçant devrait présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60, un rapport à la boîte en L supérieur ou égal à 0,8 et une stabilité au tamis inférieur à 15%. Quand la stabilité au tamis est entre 15 et 30% la stabilité est jugée critique et il est nécessaire de procéder à des essais spécifiques de ségrégation [84][82].

En premier lieu, il faut remarquer que tous les bétons étudiés ont présenté des étalements supérieurs à 60 cm et des rapports à la boîte en L supérieurs à 0,8 (hormis les BAP13 et 14). Ce qui permet de constater que l'ensemble de ces bétons présente une fluidité acceptable et ne présente pas de risque de blocage. Le point essentiel donc à vérifier pour l'ensemble de ces bétons est la ségrégabilité statique.



**Figure III.5.** Relation entre la stabilité au tamis et l'indice de ségrégation.

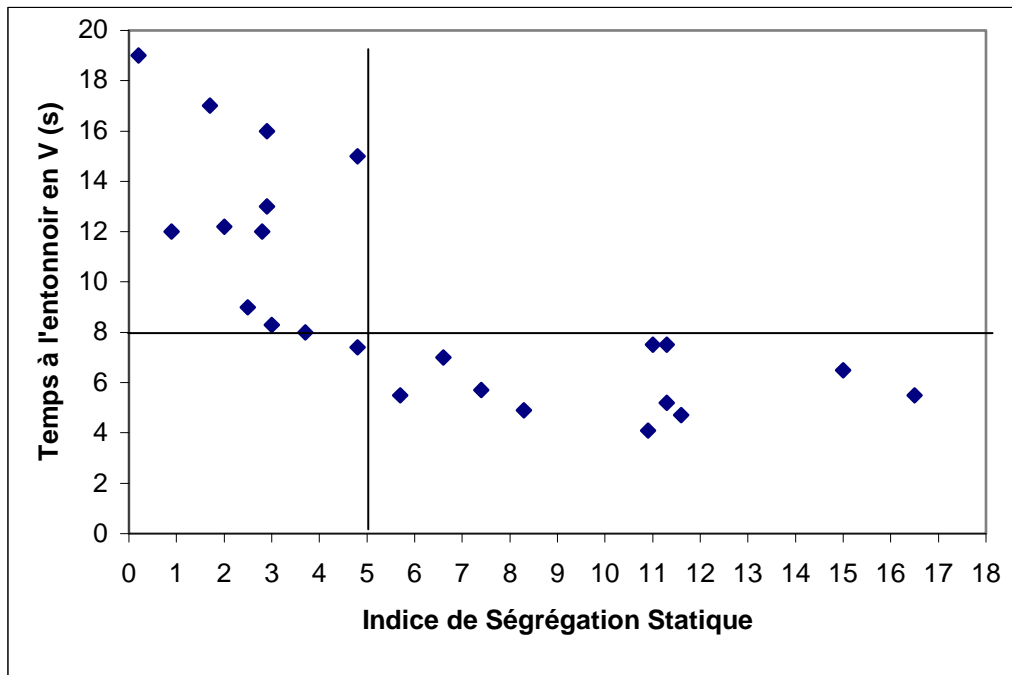
L'appréciation visuelle de nos bétons (en matière de stabilité, de ressuage et de ségrégation) lors des différents essais, a permis de constater la bonne stabilité de tous les bétons dont la valeur au tamis était inférieure à 30%. Il s'avère que tous ces bétons ont présenté un ISS inférieur à 5.

On peut prétendre alors que quand la différence dans la teneur en granulats dans la colonne ne varie pas de plus de 5%, le béton peut être considéré comme très acceptable.

Tous les bétons situés dans le rectangle (voir figure III.5) délimité par une stabilité au tamis de 30% et un indice de ségrégation ISS de 5 sont des BAP de bonne qualité.

Ainsi, on peut prétendre que la limitation à 15% de la stabilité au tamis est trop sévère. A notre sens, cette valeur peut facilement être augmenté sans grand risque à 20%.





**Figure III.6.** Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'indice de ségrégation.

Sur la figure III.6, on peut voir que l'essai d'écoulement ne permet pas de juger de la tendance à la ségrégation statique des BAP. On peut voir sur la figure que pour un temps proche de 8 secondes l'ISS peut varier de 3 à 11, ce qui est en matière de ségrégabilité très significatif. Toutefois, il est toujours utile de noter que :

- Quand le temps à l'entonnoir en V est inférieur à 8 secondes la ségrégation statique est systématique et très importante.
- Quand le temps est supérieur à 10 secondes, le risque de ségrégation statique est minime.

En analysant les résultats représentés sur la figure III.7, on peut noter que le risque de ségrégation statique commence à devenir important quand l'étalement dépasse les 70 cm. Ainsi on peut admettre qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des essais de détermination de l'indice de ségrégation statique si les bétons confectionnés présentent des étalements inférieurs ou égaux à 70 cm.

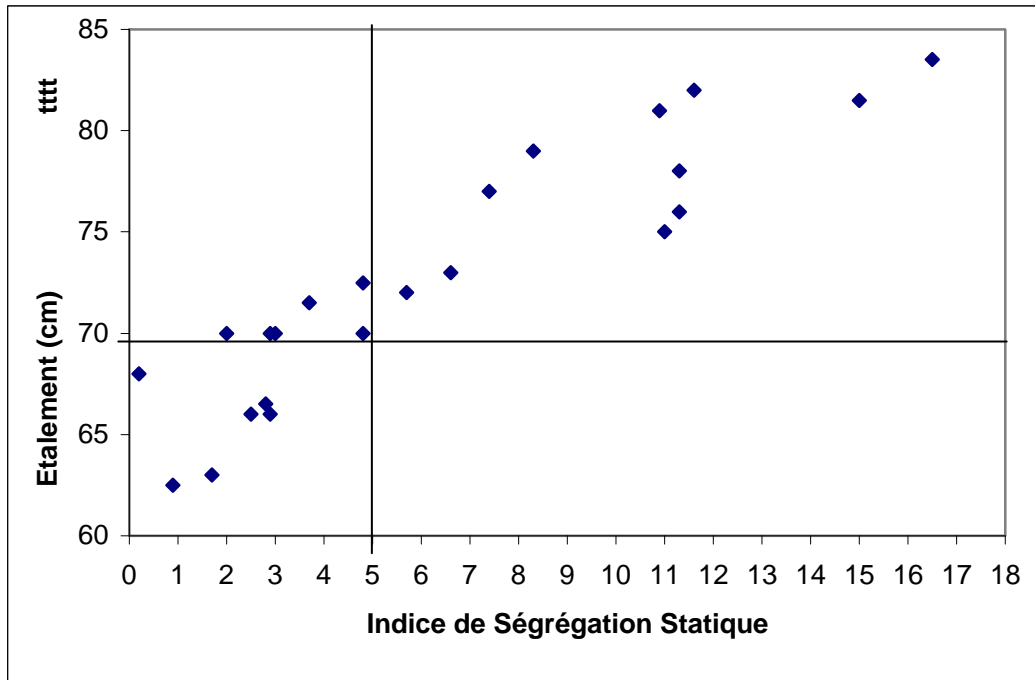


Figure III.7. Relation entre l'étalement et l'indice de ségrégation.

### III.6. Conclusion :

Vu la fluidité importante des BAP, le risque de ségrégation statique n'est pas des moindres. Ainsi, il est très important de vérifier la stabilité du système de granulats dans la masse du béton. Une ségrégation de ce type n'est pas visible et ne peut être constaté dans l'ouvrage que par des techniques très poussées.

Une distribution non uniforme des granulats dans la masse se traduit directement par une résistance différentielle.

Plusieurs auteurs ont publié des essais plus ou moins simples pour la caractérisation de la ségréabilité des BAP. On peut citer les travaux de V.K. BUI et al [21], qui ont proposé un essai de mesure d'une profondeur de pénétration d'une sonde dans une masse de béton. Les auteurs donnent une limite de 9 mm de pénétration de leur sonde au delà de laquelle le risque de ségrégation horizontale est énorme et cette limite est de 7 mm seulement pour la ségrégation verticale. On note que le mode opératoire de l'essai qu'ils proposent est différent selon le type de ségrégation qu'ils étudient (vertical ou horizontale).

Sous la lumière des résultats des essais que nous avons réalisés selon notre procédure sur un ensemble de 23 compositions différentes on peut conclure que :

- Les bétons dont l'étalement est inférieur à 70 cm le risque de ségrégation statique est très minime, voir nul.
- Les résultats ont montré que la limitation de la stabilité au tamis à 15% est assez sévère et on peut admettre un pourcentage de 20% sans grand risque.
- L'essai proposé est un essai très simple qui permet l'appréciation directe de la ségrégation statique dans les BAP.

Des résultats obtenus, il ressort que la limite de l'ISS pour obtenir un bon BAP est de l'ordre de 5. Toutefois, il va falloir procéder à d'autres essais complémentaires en adoptant d'autres paramètres pour pouvoir conclure sur la limite de l'ISS.

Il est important de noter que l'essai que nous proposons permet de caractériser seulement la résistance à la ségrégation verticale (statique). Le risque de ségrégation horizontale, selon notre expérience, est bien apprécié par l'essai à la boîte en L.

## **CHAPITRE IV**

# **ETUDE DES PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS A L'ETAT DURCI**

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE DES PROPRIETES DES BETONS AUTOPLACANTS A L'ETAT DURCI**

#### **IV.1. Introduction :**

Le béton autoplaçant "BAP" a été utilisé comme matériau de structure dans beaucoup d'ouvrages et dans plusieurs pays. Dans la littérature on retrouve aussi que dans plusieurs applications, des tunnels en particulier, le béton autoplaçant renforcé de fibres "BAPRF" a été largement utilisé (Bertil Persson, 28)[70].

Dans le contexte local, l'utilisation des BAP et des BAPRF reste tributaire d'une meilleure connaissance et maîtrise de ces propriétés à l'état durci.

Les objectifs de cette partie de notre étude visant à qualifier les bétons autoplaçants (BAP), étaient de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et leur durabilité d'un point de vue métrologique pour avoir un premier ordre de grandeur dimensionnel de ces caractéristiques et les confronter à celles des bétons ordinaires.

Pour cela, plusieurs formules de BAP : (F/C+F, E/C+F, association matrice BAP-fibres métalliques) ont été comparées à une formule de béton traditionnel de même résistance à la compression.

Les propriétés appréhendées concernent les performances mécaniques, les variations dimensionnelles et pondérales, la tenue au feu et le comportement différé.

#### **IV.2. Compositions étudiées :**

Les bétons qui ont fait l'objet de la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux. La conception de tous les bétons (bétons autoplaçants, béton vibré, bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques) et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire Matériau et Durabilité des Constructions de l'université Mentouri de Constantine.

Tous les essais normalisés ont été effectués dans le cadre des normes AFNOR (et leurs équivalentes de Normes Algériennes NA).

Ce qu'il fallait respecter en premier lieu est de travailler sur des bétons autoplaçants (fibrés ou non) qui répondent aux exigences de l'AFGC [41] et au Guide Européen pour les BAP [87].

Les désignations ainsi que les notations des bétons conçus sont rassemblées dans le tableau IV.1.

Bétons étudiés	
Notations	Désignations
<b>BAP21</b>	Béton autoplaçant de référence avec F/F+C=0.33
<b>BAP24</b>	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.17
<b>BAP21F0,5</b>	BAP21 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
<b>BAP24F0,5</b>	BAP24 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
<b>BV21</b>	Béton Vibré à résistance égale avec celle de BAP21

**Tableau IV.1 :** Désignations et notations des bétons étudiés

#### IV.2.1. Propriétés étudiées :

Pour chacune des compositions énumérées dans le tableau IV.1, On a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- 1- la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours,
- 2- la résistance à la traction par flexion à 7, 14 et 28 jours,
- 3- la variation dimensionnelle et pondérale (retrait et perte en masse) jusqu'à 50 jours
- 4- l'effet d'un cycle de chauffage appliqué à l'age de 28 jours, sur la résistance à la compression, à la flexion, le retrait et la perte en masse des bétons,
- 5- le suivi dans le temps (90 jours) de l'évolution de la flèche à mi-travée de poutrelles 10x10x120 soumises à une flexion 4 points (fluage en flexion)

#### IV.2.2. Formulation des bétons étudiés :

Les bétons autoplaçants sont confectionnés selon la méthode proposée au chapitre II et les bétons avec renforts sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de gravillons par les fibres métalliques.

Le critère de comparaison choisi étant la résistance mécanique en compression, nous avons travaillé sur un type de béton de faible résistance, prévue aux alentours de 25 MPa, conduisant à l'obtention de bétons que l'on peut classer dans la catégorie "bétons de bâtiment".

L'expérience en matière de formulation et de suivis techniques nous a permis de retenir une composition de béton autoplaçant, à partir de laquelle a été formulé celle du béton vibré en conservant la quantité de ciment identique.

Les compositions des bétons retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau IV.2.

Notations	Dosage en kg/m <sup>3</sup> de béton						
	Ciment	filler	Eau	Super plastifiant	gravier	sable	fibres
<b>BAP21</b>	400	200	211	9.60	772	762	-
<b>BAP24</b>	500	100	221	10.80	772	762	-
<b>BAP21F0,5</b>	400	200	211	9.60	745	762	38.25
<b>BAP24F0,5</b>	500	100	221	10.80	745	762	38.25
<b>BV21</b>	400	-	228,5	-	914	851	-

**Tableau IV.2 :** Compositions des bétons étudiés.

### **IV.2.3. Conduite des essais :**

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues.

#### **IV.2.3.1. Malaxage et mise en place :**

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical planétaire d'une capacité de 125 litres.

Les séquences de malaxage suivies sont les suivantes :

- Préhumidification des granulats secs pendant 10 minutes,
- Introduction du liant et malaxage pendant 30 secondes des constituants granulaires,
- Introduction de l'eau de gâchage (plus une partie des adjuvants), puis malaxage pendant 1 minute et 30 secondes,
- Introduction de la partie restante des adjuvant et malaxage pendant 2 minutes,

La mise en place est effectuée dans différents moules destinés aux corps d'épreuve correspondants aux essais programmés.

Les bétons ordinaires ont été mis en place par vibration à l'aide d'une table vibrante. Les bétons autoplaçants n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.

Plusieurs formes de corps d'épreuve ont été coulées pour chacune des compositions :

- pour la résistance mécanique en compression : cylindre 16x32 cm,
- pour la résistance mécanique en traction/flexion : prismes 7x7x28 cm,
- pour les variations dimensionnelles et pondérales (retrait et perte en masse) : prismes 7x7x28 cm munis de plots,
- pour la résistance mécanique résiduelle après un cycle de chauffage : cylindres 16x32 et prismes 7x7x28,
- pour l'évolution de la flèche sous charge maintenue (fluage) : poutrelles 10x10x120 cm.

#### **IV.2.3.2. Cure et conservation des éprouvettes :**

Une fois coulées, les échantillons sont couverts avec un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage est effectué à un jour et les éprouvettes sont ensuite conservées en cure correspondante jusqu'au démarrage des essais respectifs.

Les éprouvettes destinées à l'écrasement pour la détermination des propriétés mécaniques sont conservées dans un milieu de 100% d'humidité relative et à une température de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Les échéances de rupture sont : 7, 14 et 28 jours.

Pour les échantillons destinés aux mesures de retrait et de perte en masse, après démoulage, une mesure initiale de longueur et de masse est effectuée et sert ensuite de référence. La température de conservation des éprouvettes en salle climatisée est de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 3 types de conservation sont étudiés :

- Conservation dans l'air ( $T^\circ = 20 \pm 1^\circ\text{C}$  et HR de 50%)
- Conservation couverte ( $T^\circ = 20 \pm 1^\circ\text{C}$  et HR de 100%)
- Conservation dans l'eau ( $T^\circ = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ )

L'effet de la cure couverte et immergé n'intervient qu'à partir de l'échéance de 2 jours.

**IV.2.3.3. Caractéristiques des formules retenues :**

Les compositions retenues ont été étudiées pour obtenir des compositions à maniabilité constante. C'est-à-dire les deux BAP (F/C+F = 0,33 et F/C+F = 0,17) présentent pratiquement le même étalement. ( $70 \pm 2$ cm)

Les caractéristiques intrinsèques des cinq compositions sont rassemblées dans le tableau IV.3.

Caractéristiques	Bétons				
	BAP21	BAP24	BAP21F0,5	BAP24F0,5	BV21
Rapport F/L	0,33	0,17	0,33	0,17	0
Rapport E/L	0,352	0,368	0,352	0,368	0,571
Rapport G/S	1,013	1,013	0,977	0,977	1,074
Volume de pâte ( $l/m^3$ )	422	428	422	428	357
% de granulats	57,8	57,2	57,8	57,2	64,3
Masse volumique théorique ( $kg/m^3$ )	2354,6	2365,8	2365,8	2377	2393,5
Masse volumique réelle ( $kg/m^3$ )	2363	2362	2379	2365	2379

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques intrinsèques des compositions retenues.

Les propriétés de chacune de ces compositions à l'état frais sont notées dans le tableau IV.4.

Caractéristiques	Bétons				
	Etalement ou affaissement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Rapport à la boîte en L	Temps d'écoulement au V-Funnel (secondes)	% d'air Occlus
BAP21	70	19	0,89	8,3	2,8
BAP24	68	22	0,84	11,2	2,7
BAP21F0,5	64	21	-	36	3,4
BAP24F0,5	60	23	-	44	3,2
BV21	8	-	-	-	3

**Tableau IV.4 :** Propriétés des bétons à l'état frais.

Les essais de ségrégation (stabilité au tamis), à la boîte en L, au V-funnel et d'étalement ont été conduits selon les recommandations de l'AFGC- Bétons autoplaçants.

On remarque que l'introduction des fibres conduit à une diminution appréciable de l'étalement, à une augmentation du temps d'écoulement au V-Funnel et à une augmentation du pourcentage de laitance perdue à l'essai au tamis. Ceci s'explique par le rôle que joue les fibres dans le mélange :

- l'étalement est diminué parce que les fibres, de part leur élancement, bloquent le système lors de son étalement,
- le temps au V-Funnel est considérable, parce que les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage de l'écoulement,



- Quant au mouvement du béton dans la boîte en L, le système est rapidement bloqué par la formation de maillage très réduit au niveau des barres d'armatures de la boîte,
- En ce qui concerne le pourcentage de laitance perdue au tamis qui a augmenté pour les bétons renforcés de fibres, ce qui peut paraître à priori contradictoire, s'explique par le fait que l'on a réduit le dosage de gros granulats, qui retenait une quantité de la laitance, par des fibres lisses qui ne retiennent pas tellement de pâte et qui en même temps forment des conduits laissant échapper la laitance.

### IV.3. Résultats et discussions :

Dans ce paragraphe, nous étudions successivement les effets des additions, des renforts et des conditions de conservation sur les propriétés des bétons de références, des bétons renforcés de fibres et des bétons vibrés.

#### IV.3.1. Performances mécaniques :

Des performances mécaniques du béton, celles qu'on a étudié sont la résistance à la compression et à la traction par flexion, que nous présentons dans ce qui suit :

##### IV.3.1.1. Résistance à la compression :

Trois éprouvettes 16x32 cm sont testées pour chaque échéance d'essais. Nous pourrions comparer les résistances des bétons car les échéances choisies (7,14 et 28 jours) coïncident pour tous les mélanges. Les effets de l'addition minérale et des renforts dans le béton peuvent être quantifiés. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau IV.5.

Notons que le pourcentage des fibres indiqué dans le tableau IV.5 et IV.6 représente le pourcentage volumique rapporté au volume total du béton.

		BAP21	BAP24	BAP21F0,5	BAP24F0,5	BV21
<b>Paramètres de composition</b>	<b>F/L</b>	0,33	0,17	0,33	0,17	0
	<b>E/L</b>	0,352	0,368	0,352	0,368	0,571
	<b>% de fibres</b>	0	0	0,5	0,5	0
<b>Résistance à la compression</b>	<b>7 jours</b>	15,30	18,69	15,25	19,50	14,50
	<b>14 jours</b>	21,20	27,59	21,60	28,60	20,60
	<b>28 jours</b>	25,80	34,90	27,53	35,70	25,68

**Tableau IV.5 :** Résistances à la compression sur 16x32 exprimées en MPa.

Des résultats du tableau IV.5, nous présenterons les différentes influences des paramètres de composition sur la résistance à la compression.

#### Influence de l'âge :

Sur la figure IV.1, les résistances sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut voir que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes.

Nous remarquons que les courbes donnant les résistances des bétons avec un rapport F/L de 0,33 sont plus resserrées que celles des bétons avec un rapport de 0,17.

Nous observons également que le béton avec un rapport F/L de 0,17 renforcé de fibres est nettement plus résistant que tous les autres bétons pour toutes les échéances.

Il est à noter que le béton ordinaire vibré présente les plus faibles résistances.

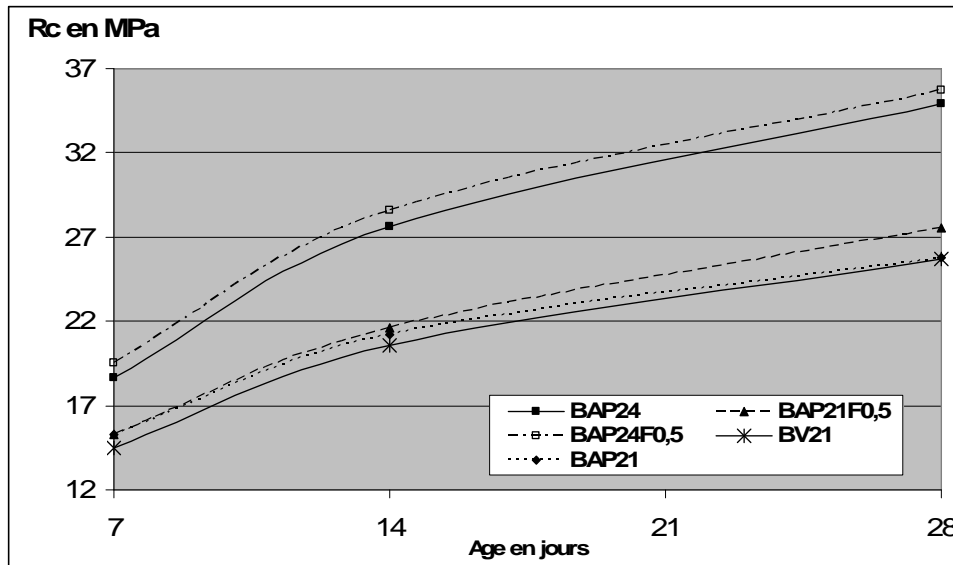


Figure IV.1. : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

#### Influence du rapport Fillers/Liant :

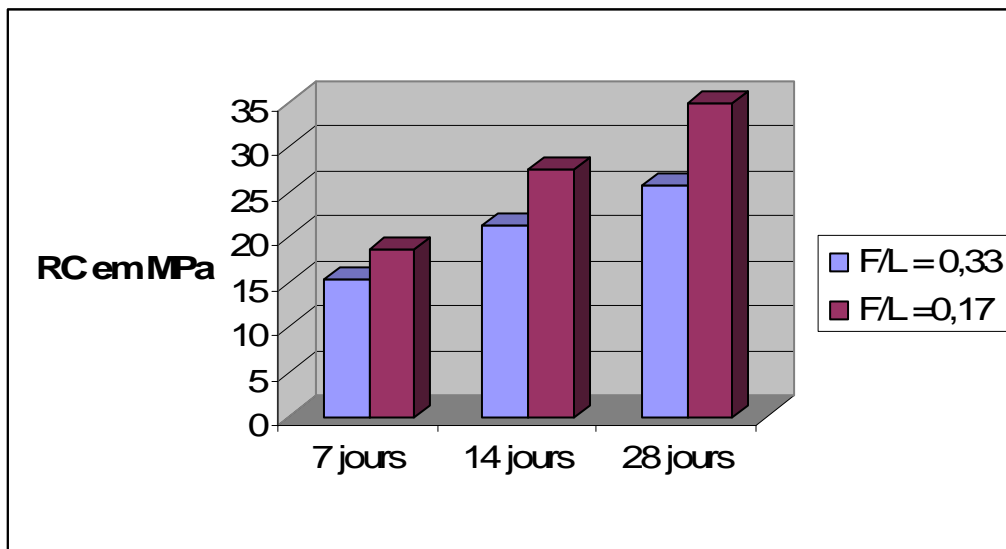
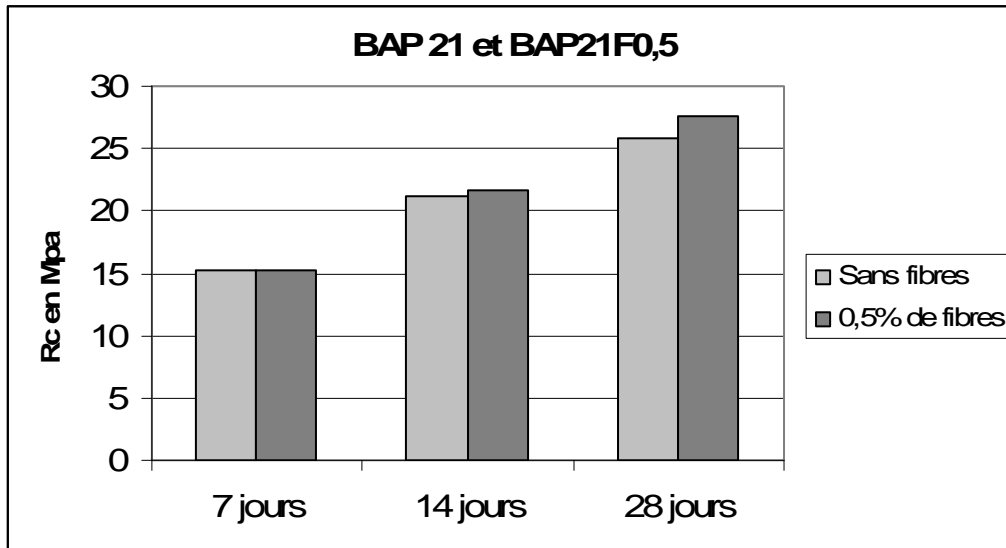


Figure IV.2. : Influence du rapport F/L sur la résistance à la compression.

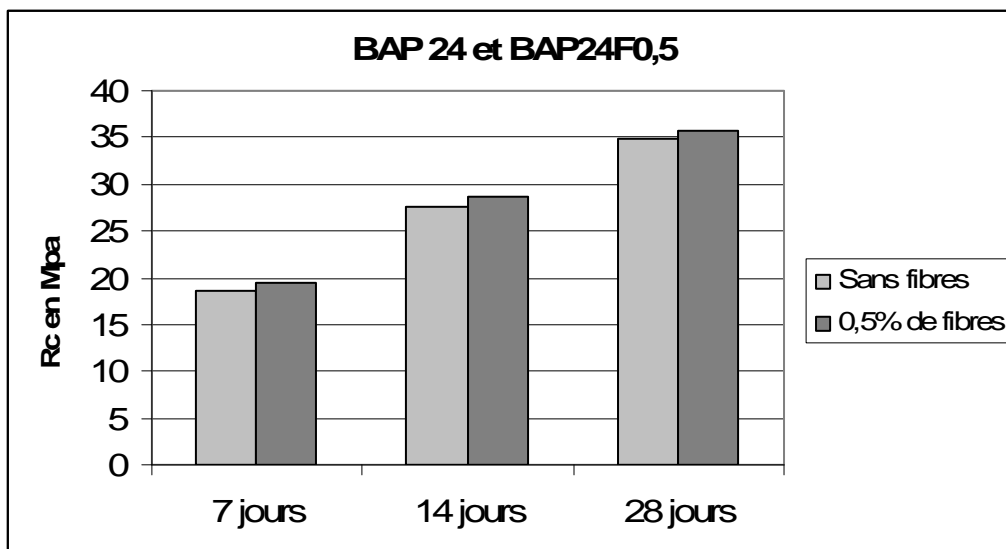
Sur l'histogramme de la figure IV.2, on peut remarquer que l'augmentation du taux de substitution du ciment par du fillers calcaire de 17 à 33%, fait chuter la résistance à la compression de 19% à 7 jours, de 23% à 14 jours et de 27% à 28 jours. Toutefois, il est intéressant de constater que même avec 33% de fillers la résistance à la compression reste dans des limites raisonnables (25 MPa).

**Influence des fibres :**

L'introduction de 0,5% de fibres dans les compositions des BAP21 et BAP24 n'a permis qu'une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 3 à 6% seulement. Sur les IV.3, et IV.4 on peut remarquer que l'introduction de fibres métallique n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP, et cela est vrai quelque soit l'âge du béton.



**Figure IV.3. :** Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la compression du BAP21.



**Figure IV.4. :** Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la compression du BAP24.

### IV.3.1.2. Résistance à la traction par flexion :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28, en utilisant un dispositif de flexion 3 points. Trois éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge. Les charges de rupture des éprouvettes en KN obtenus sont rassemblées dans le tableau IV.6.

		BAP21	BAP24	BAP21F0,5	BAP24F0,5	BV21
Paramètres de composition	F/L	0,33	0,17	0,33	0,17	0
	E/L	0,352	0,368	0,352	0,368	0,571
	% de fibres	0	0	0,5	0,5	0
Résistance à la traction par flexion	7 jours	2,60	2,90	3,80	3,75	3,40
	14 jours	4,10	4,30	5,95	6,17	5,10
	28 jours	5,09	5,19	7,61	7,94	6,32

Tableau IV.6 : Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 exprimées en KN.

Les résultats présentés dans le tableau IV.6 permettent l'étude des influences suivantes :

#### Influence de l'âge :

La figure IV.5 montre que la résistance à la traction par flexion augmente avec l'âge des éprouvettes et que le béton qui a donné les meilleures performances est le BAP24F0,5.

On remarque que la résistance à la traction par flexion du BV21 est supérieure à celle du BAP21 malgré que leurs résistances à la compression sont égales. Ceci est dû essentiellement à la teneur en gravillon qui est plus importante dans le cas du BV21.

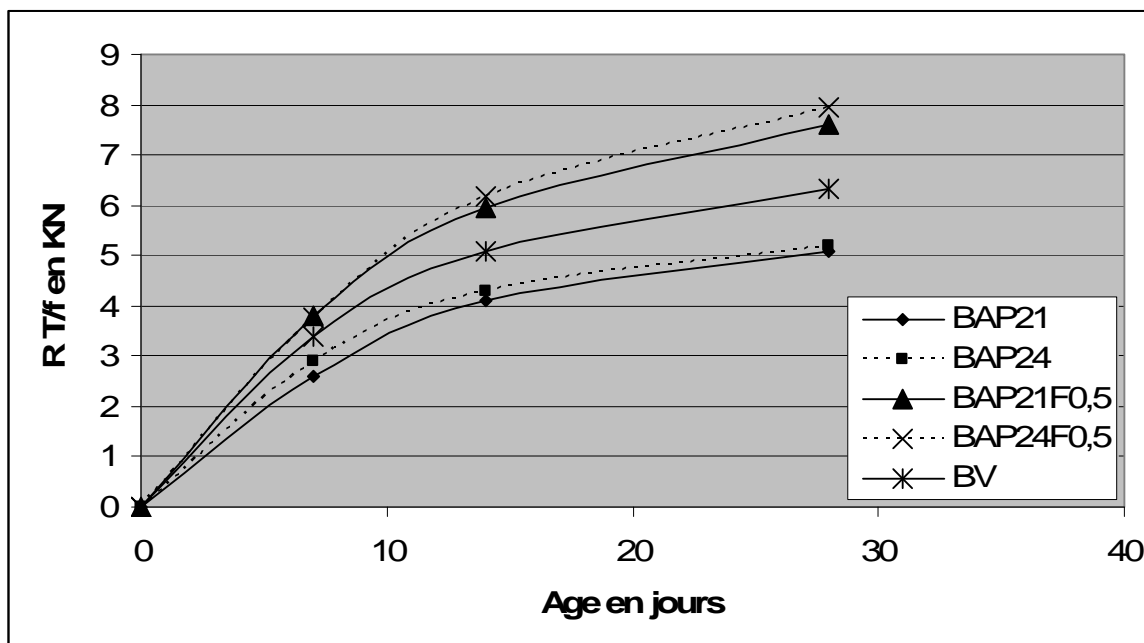


Figure IV.5. : Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps.

**Influence du rapport Fillers/Liants :**

Sur la figure IV.6, on peut voir l'influence du rapport F/L sur la résistance à la traction par flexion des bétons. Il est clair que cette influence est quasiment insignifiante.

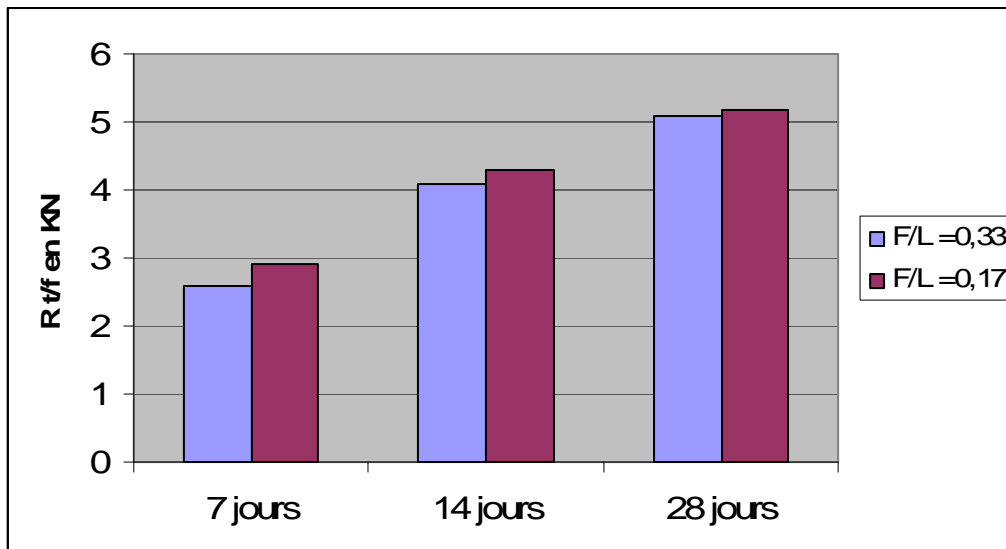


Figure IV.6. : Influence du rapport F/L sur la résistance à la traction/flexion.

**Influence des fibres :**

L'introduction de fibres dans la composition d'un BAP permet une augmentation considérable de sa résistance à la traction par flexion. Sur les figures IV.7 et IV.8, on remarque qu'à 28 jours la résistance à la traction par flexion des bétons BAP21 et BAP24 ont augmenté respectivement de 45% et 43% suite à l'introduction de 0,5% de fibres dans leurs compositions.

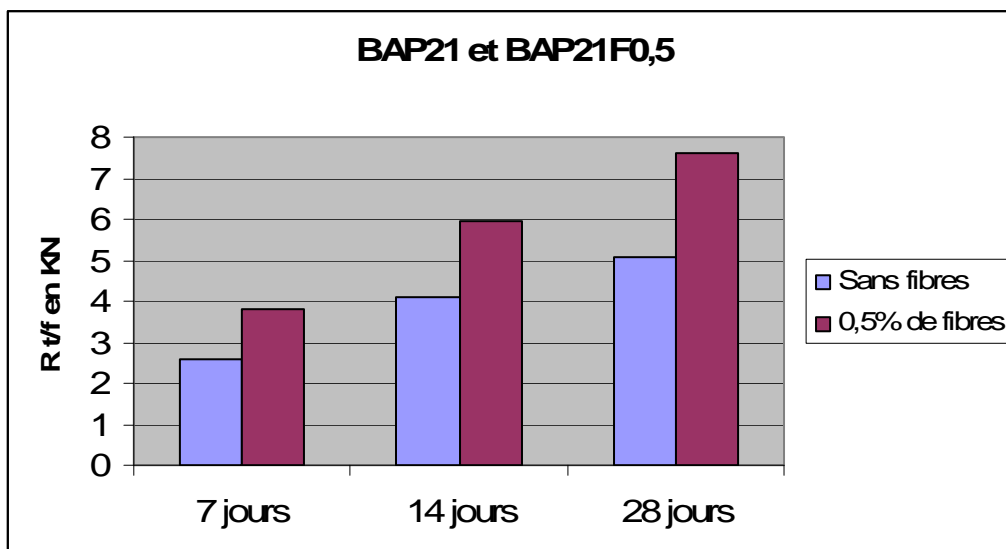
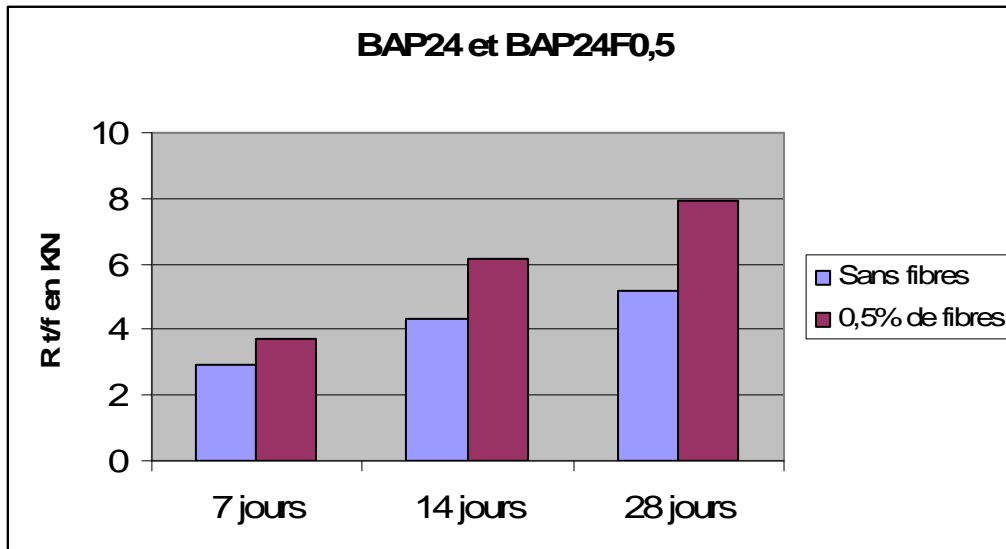


Figure IV.7. : Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la traction par flexion du BAP21.



**Figure IV.8.** : Influence de l'introduction des fibres sur la résistance à la traction par flexion du BAP24.

#### **IV.3.2. Variation dimensionnelle et pondérale :**

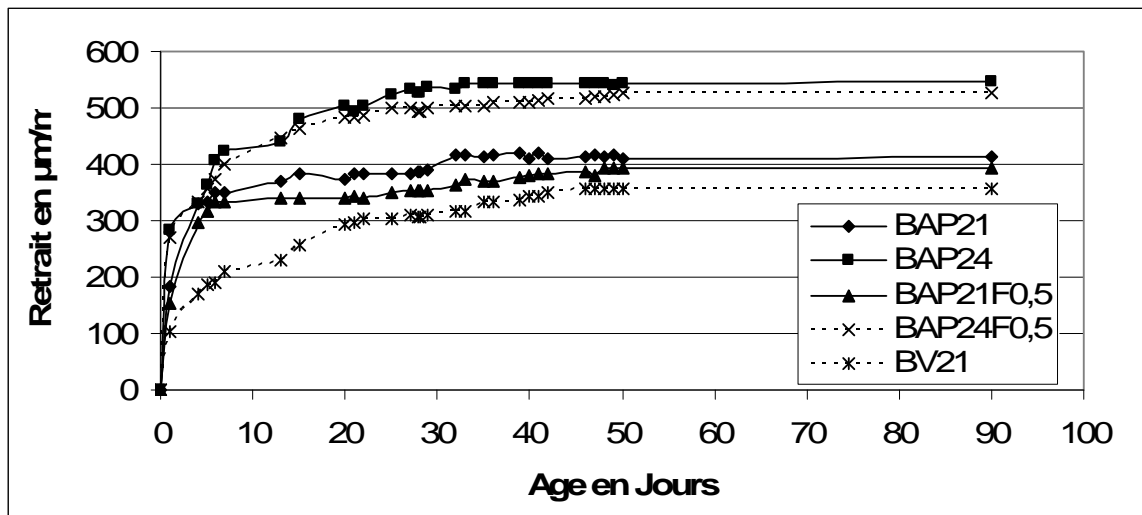
Pour chaque béton, les mesures de retrait et perte en masse sont effectuées longitudinalement sur 18 éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm munies de plots à leurs extrémités. Six d'entre elles sont conservées dans un milieu permettant un échange hydrique libre (salle climatisée à 20°C et 50% de HR), six autres éprouvettes conservées dans un milieu sans aucun échange hydrique (couvertes) et les six dernières sont immergées dans l'eau.

Les mesures de variation dimensionnelles et pondérales commencent à l'âge d'un jour et sont effectués ensuite avec une périodicité qui augmente avec le temps à l'aide d'un retractomètre à comparateur digital (précision  $\pm 0,02$  mm). En ce qui concerne les pesées, elles ont été effectuées sur une balance électrique de précision  $\pm 0,01$  gramme.

##### **IV.3.2.1. Retrait total dans différents milieux de conservation :**

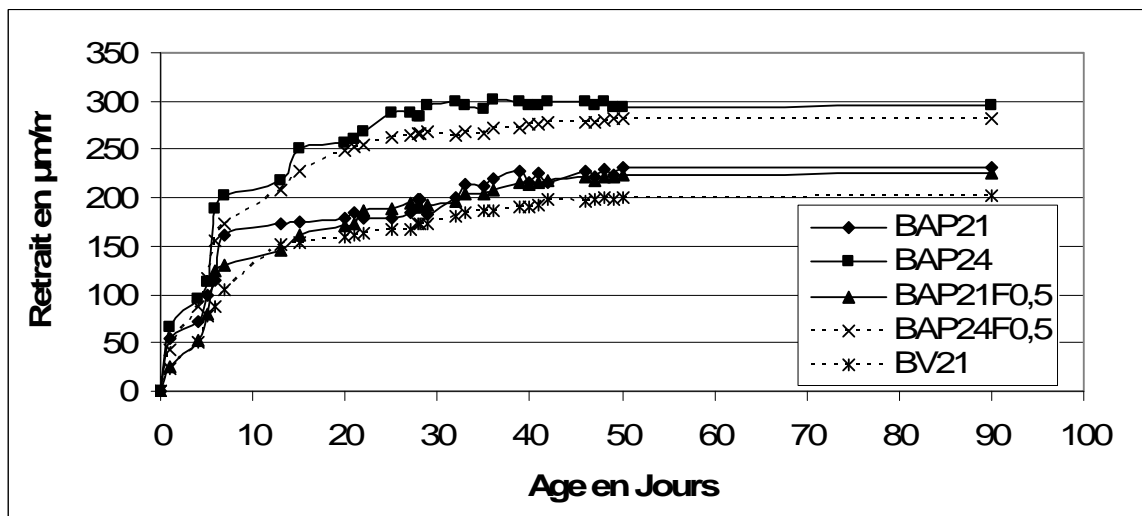
Sur la figure IV.9 nous avons tracé la variation dimensionnelle des différents bétons étudiés dans un milieu ambiant. Nous constatons que le béton qui présente le plus grand retrait est le BAP24. Ce dernier qui est caractérisé par un rapport F/L = 0,17. Le béton BAP21 (F/L = 0,33) à présenté un retrait en milieu ambiant sensiblement inférieur à celui du BAP24, ceci explique que l'augmentation du dosage en fillers est un paramètre important pour la réduction du retrait.

L'introduction de fibres n'affecte pas beaucoup la valeur du retrait des BAP. Sur la figure IV.9, on peut voir que la courbe de retrait d'un béton autoplaçant est presque confondue avec celles de ce même béton renforcé de fibres.



**Figure IV.9 :** Retrait des bétons étudiés dans le milieu Ambiant.

En milieu couvert, l'ordre de classement des bétons par rapport à leur retrait total reste le même. Toutefois l'ordre de grandeur est sensiblement diminué. Par exemple, on peut citer le cas du béton BAP24 qui en milieu ambiant présente un retrait à 90 jours de 540  $\mu\text{m/m}$ , tandis qu'en milieu couvert, à la même échéance d'âge, il ne subit qu'un retrait de 300  $\mu\text{m/m}$ . La cure "Couvert" permet donc une réduction du retrait de l'ordre de 45%.



**Figure IV.10 :** Retrait des bétons étudiés dans le milieu couvert.

Le béton vibré BV21 a présenté des valeurs de retraits inférieures à celles des BAP avec  $F/L = 0,17$ , mais qui restent très proches de celles des BAP avec  $F/L = 0,33$ .

En milieu immergé dans l'eau, le gonflement des tous les bétons a été observé (Figure IV.11). Contrairement au retrait (en milieu ambiant et couvert), le béton qui a présenté le plus grand gonflement est le BAP21 ( $F/L = 0,33$ ). Les fillers qui permettaient la réduction du retrait en milieu ambiant et couvert, sont à l'origine de l'augmentation du gonflement dans un milieu immergé.

Les résultats des essais de suivi de la variation dimensionnelle dans l'eau, nous ont permis de constater que les bétons autoplaçant présentent un aspect plus gonflant dans l'eau que les bétons ordinaires. Ceci est essentiellement dû au volume important de fillers qu'ils contiennent.



Figure IV.11 : Gonflement des bétons étudiés dans le milieu immergé.

#### IV.3.2.2. Perte en masse dans différents milieux de conservation :

La perte (ou gain) en masse des bétons est mesurée sur les mêmes éprouvettes destinées à la mesure du retrait. Les pesées ont été effectuées sur une balance électrique de précision 0,1 gr.

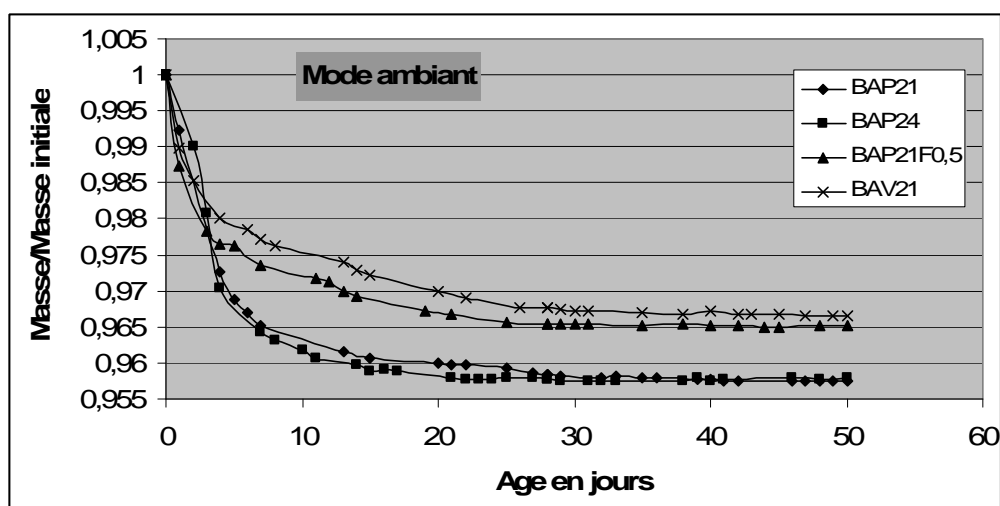


Figure IV.12 : Perte en masse dans le milieu ambiant.

Sur les figures IV.12, IV.13 et IV.14, nous avons présenté l'évolution de la masse des échantillons rapportés aux valeurs initiales de ces derniers.

Sur la figure IV.12, on remarque que les bétons BAP21 et BAP24, en milieu ambiant, présentent pratiquement la même allure de courbe et les mêmes valeurs de pertes en masse.



En milieu couvert, la perte en masse la plus importante est celle du béton renforcé des fibres. Les fibres offrent des orientations privilégiées pour l'évacuation des eaux durant le séchage.

Le béton autoplaçant présente une moindre perte en masse que le béton ordinaire, ceci est dû à la quantité d'eau qui est moindre.

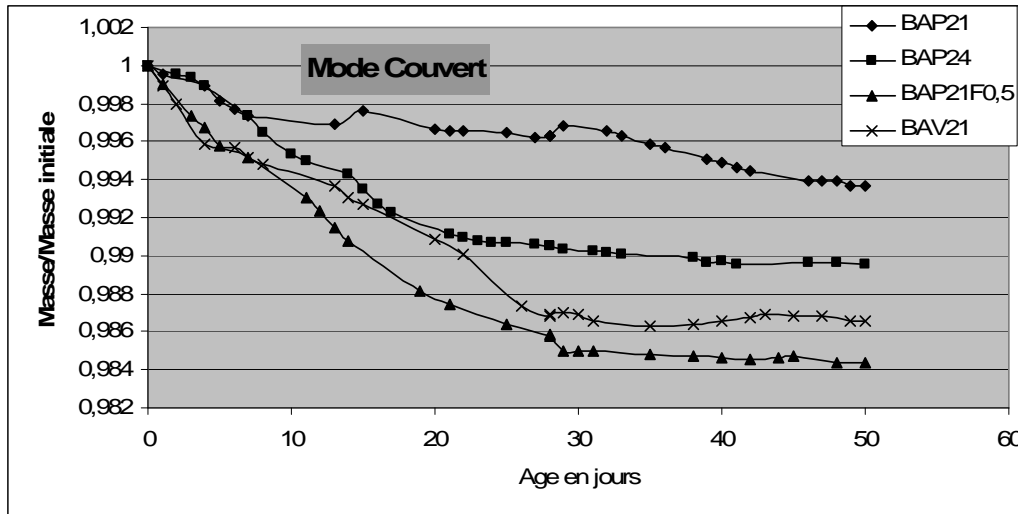


Figure IV.13 : Perte en masse dans le milieu couvert.

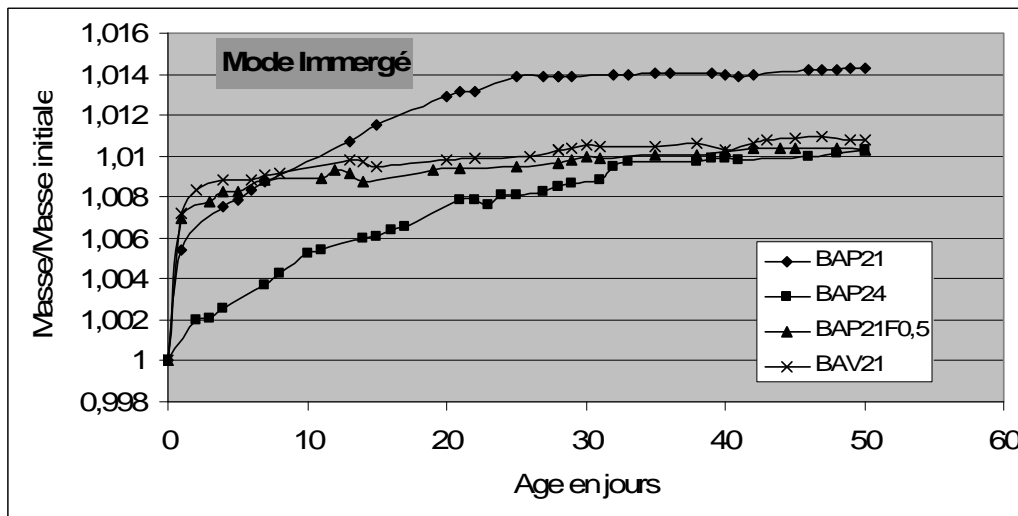


Figure IV.14 : Gain en masse en milieu immergé.

**IV.3.3. Fluage en flexion :**

Le fluage en flexion est mesuré sur une poutrelle de dimension 10x10x120. Cette dernière est soumise à une flexion 4 points selon le schéma représenté sur la figure IV.15. Le dispositif au complet a été conçu et validé par A. CHABANE [23][22]



**Figure IV.15.** Dispositif utilisé pour la mesure du fluage en flexion [23]

La réponse de l'essai est la flèche à mi-travée mesurée à l'aide d'un comparateur de précision 0,01 mm. La mesure de la flèche dans le temps (fluage en flexion) n'a été effectuée que sur les trois bétons : BV21, BAP21, BAP21F0,5.

Le chargement est effectué en fonction de la capacité portante de la poutrelle. En d'autres termes, la charge appliquée à la poutrelle est un pourcentage de sa charge de rupture. Le taux retenu pour cette étude est de 45%. Il a été donc nécessaire de déterminer préalablement les charges de rupture des poutrelles pour les différents bétons étudiés.

Sur la même presse que nous avons utilisé pour la détermination des résistances mécaniques, et en utilisant un dispositif spécialement conçu [5], nous avons déterminé les charges de rupture de poutrelles de dimension 10x10x120.

Les résultats des essais de rupture à l'échéance 7 jours, sur les poutrelles 10x10x120, ont rassemblés dans le tableau IV.7.

<b>Bétons</b>	<b>BV21</b>	<b>BAP21</b>	<b>BAP21F0,5</b>
<i>Charge de rupture mesurée à 7 jours (KN)</i>	4,40	3,80	5,00

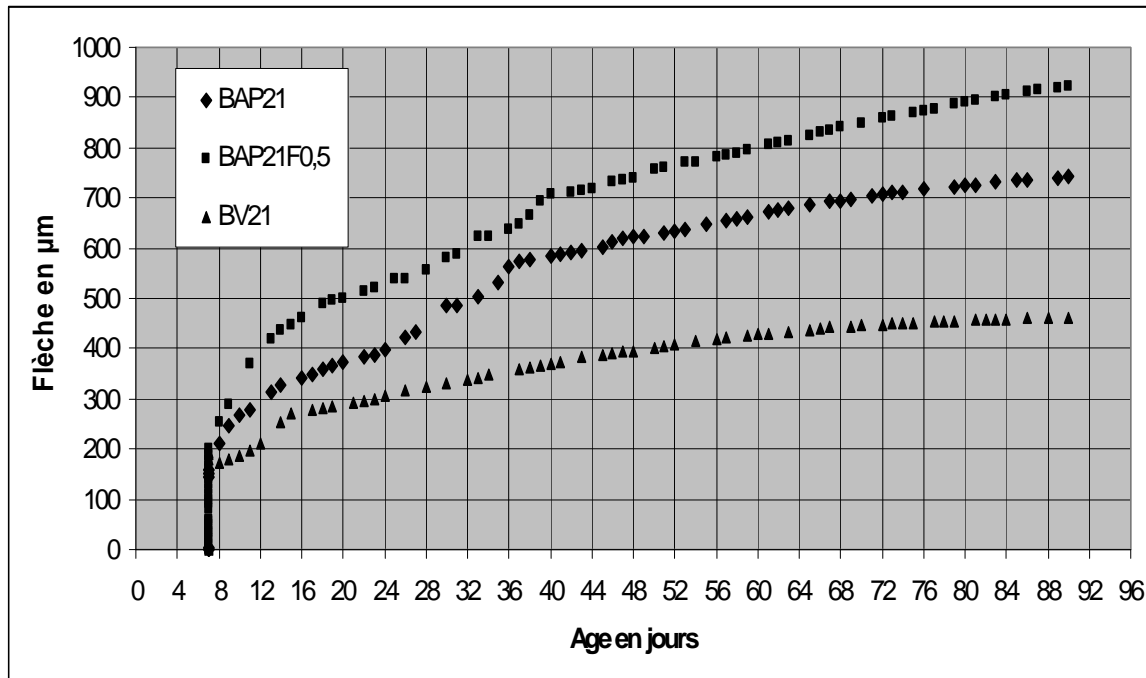
**Tableau IV.7. :** Charges de rupture à 7 jours en flexion 4 points des poutrelles 10x10x120

Puisque les poutrelles seront soumises à des charges égales à 45% des charges de ruptures, les charges à appliquer sont présentées dans le tableau IV.8.

<b>Bétons</b>	<b>BV21</b>	<b>BAP21</b>	<b>BAP21F0,5</b>
<i>Charge de fluage appliquée à 7 jours (KN)</i>	1,98	1,71	2,25

**Tableau IV.8. :** Charges appliquées aux poutrelles pour la mesure du fluage.

Le suivi dans le temps, de la flèche à mi-portée de la poutrelle a donné les résultats qui ont permis de tracer les courbes regroupées dans la figure IV.16 et les valeurs regroupées dans le tableau IV.9.



**Figure IV.16.** : Evolution de la flèche dans le temps des poutrelles 10x10x120 chargées à 45% de leur charge de rupture.

Bétons	Charge Appliquée (kg)	Flèche Instantanée (µm)	Flèche à 90 jours (µm)	Flèche propre à 90 jours (µm)
BAP21	171	159	742	583
BAP21F0,5	225	200	878	678
BV21	198	194	460	266

**Tableau IV.9.** : Flèches instantanées et à 90 jours des bétons étudiés.

L'analyse des courbes de la figure IV.16 et des résultats rassemblés dans le tableau IV.9, permet de faire les constatations suivantes :

- l'allure de l'évolution de la flèche est la même quel que soit le type de béton étudié (BAP ou BV),
- Malgré que les bétons BV21 et BAP21 possèdent la même résistance à la compression à 28 jours, ils présentent des charges de rupture en flexion (sur poutrelles 10x10x120) différentes. En effet, le BAP semble présenter une résistance à la flexion légèrement inférieure que le BV,
- Le béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques présente la meilleure performance vis-à-vis de la résistance à la flexion,
- La plus grande flèche instantanée après un chargement à 45% de la charge de rupture a été enregistrée pour le béton renforcé de fibres,
- Le BAP présente la plus petite flèche instantanée,

- Comparé aux autres bétons, le fluage à 90 jours du BAP21F0,5 est le plus grand,
- On constate que le BAP21 présente un fluage de 60% en plus que le BV21.

Il est donc très important d'investiguer beaucoup plus le comportement différé des BAP sous un chargement maintenu (fluage).

#### **IV.3.4. Résistances mécaniques après un cycle de chauffage :**

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance en compression du béton (ordinaire, BHP, BAP...) varie en fonction de la température à laquelle il est exposé.

La résistance en compression du béton diminue lorsque l'on porte celui-ci à haute température de manière irréversible.

Le comportement à la chaleur va dépendre de la composition, de la nature de ses constituants, de son âge, de sa teneur en eau, de formes et dimensions des pièces et du fait que le béton soit ou non soumis à des contraintes de chargement pendant le chauffage.

De manière globale, les propriétés mécaniques et thermo physiques varient en fonction de la température [16] [63] [55].

L'objectif de cette étude est d'essayer de voir l'effet que pourrait engendrer un chauffage (à des températures modérées, 200°C maximum) sur les résistances mécaniques. En d'autre terme c'est de quantifier l'endurance des bétons étudiés s'il sont soumis à un cycle de chauffage.

Etant donné que nous sommes devant des bétons très riches en pâte, la réponse à cette question serait très intéressante du point de vue de la valorisation de ce nouveau type de bétons.

#### **Méthodologie d'essai et corps d'épreuve :**

Une des étapes importantes de cette partie expérimentale consistait à mettre au point un équipement expérimental et établir un mode opératoire pour la réalisation des manipulations, des essais et l'exploitation des résultats.

L'équipement d'expérimentation – en plus des différents moyens de production d'un béton – consiste en un four qui permet d'atteindre facilement les 200°C, et qui peut être programmé.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé a permis de chauffer les corps d'épreuve avec une vitesse de montée en température de valeur constante.

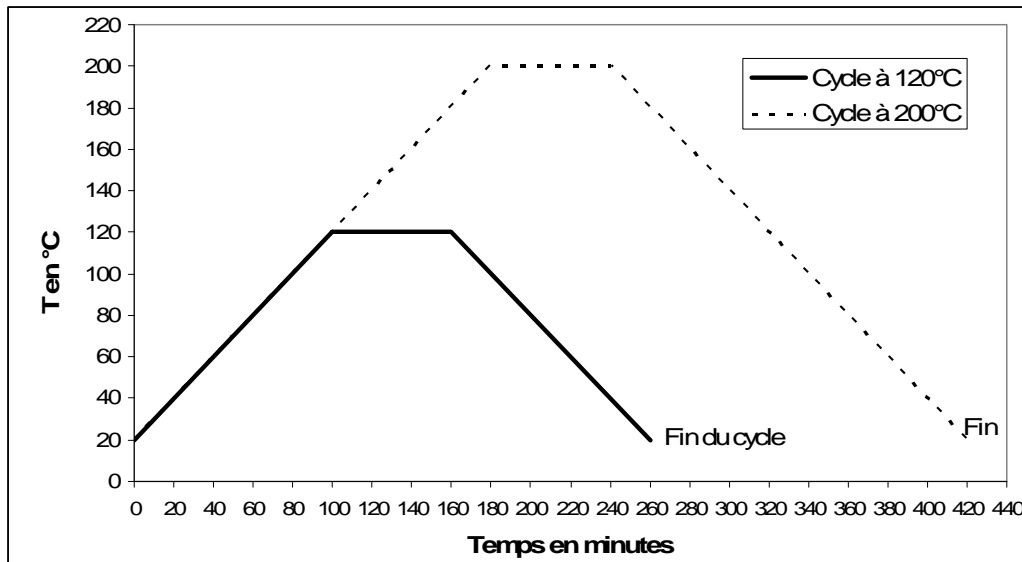
Les éprouvettes sont chauffées à une vitesse de montée en température constante. Selon les recommandations de la RILEM 2000. La vitesse d'échauffement doit être choisie en fonction du diamètre de l'éprouvette pour limiter les gradients thermiques dans l'échantillon. Pour un diamètre de 100 mm, la RILEM recommande une vitesse de 2°C/min, mais pour un diamètre de 80 mm ils passent à 0,5°C/min.

En plus des recommandations de la RILEM, le choix est justifié dans la littérature. En effet les publications (Cast-1998), (Khou-1996) et (Pimi-1996) cité par Menou [55], montrent que des vitesses importantes (de l'ordre de 4°C/min) font souvent état d'écaillage important. Ces auteurs recommandent une vitesse de chauffage de 1°C/min puisqu'elle permet de mieux caractériser le matériau.

Noumowé [63] montre que le refroidissement n'engendre pas des modifications notables si la vitesse de chauffage est lente.

Nous adopterons donc pour notre cas une vitesse de 1°C/min que ce soit pour le chauffage ou pour le refroidissement.

Deux cycles de chauffage sont retenus pour l'étude et sont schématisés sur la figure IV.17.



**Figure IV.17:** les deux (02) cycles de chauffage adoptés

Les résultats des essais mécaniques (compression et flexion) effectués sur des éprouvettes âgées de 28 jours (conservées dans un milieu de 100% d'humidité relative (couvertes) et à une température de 20°C environ) soumises à un cycle de chauffage (défini par les courbes de la figure IV.17) sont regroupés dans les tableaux IV.10 et IV.11.

La mesure de la résistance est effectuée juste après le cycle. C'est-à-dire à une température de l'éprouvette de l'ordre de 20°C. Chaque valeur est une moyenne de 03 mesures. (Soit 3 éprouvettes pour chaque essai sont envisagées).

Pour chaque béton, des essais d'écrasement sont effectués sur trois éprouvettes qui n'ont pas subi de chauffage au même moment que celles qui ont subi un cycle de chauffage afin de servir de témoin.

	<b>BAP21</b>	<b>BAP24</b>	<b>BAP21.F0,5</b>	<b>BAP24F0,5</b>	<b>BV21</b>
<b>Rc (Mpa)</b>	25,80 (100%)	34,90 (100%)	27,53 (100%)	35,70 (100%)	25,68 (100%)
<b>Rc Après un cycle à 120°C (Mpa)</b>	20,88 (80,95%)	33,20 (95,14%)	21,13 (76,75%)	28,96 (81,12%)	21,08 (82,09%)
<b>Rc Après un cycle à 200°C (Mpa)</b>	19,19 (74,40%)	30,64 (87,81%)	24,73 (89,82%)	30,97 (86,75%)	25,32 (98,60%)

**Tableaux IV.10 :** Résistance à la compression sur cylindres 16x32 des bétons après un cycle de chauffage.

Les résultats rassemblés dans le tableau IV.10, montrent que la résistance à la compression est affectée par le chauffage.

Nous pouvons constater des baisses de résistance allant 4,86 à 19,05% pour la température de 120°C, et de 1,4 à 25,6% pour la température de 200°C.

	<b>BAP21</b>	<b>BAP24</b>	<b>BAP21.F0,5</b>	<b>BAP24F0,5</b>	<b>BV21</b>
<b>Rf Initiale (Mpa)</b>	5,09 (100%)	5,19 (100%)	7,61 (100%)	7,94 (100%)	6,32 (100%)
<b>Rf après un cycle à 120°C (Mpa)</b>	5,23 (102,71%)	5,95 (114,64%)	6,31 (82,94%)	6,74 (84,88%)	4,52 (71,52%)
<b>Rf après un cycle à 200°C (MPa)</b>	5,99 (117,75%)	7,96 (153,34)	7,94 (104,34%)	8,02 (101,01%)	5,75 (90,98%)

**Tableaux IV.11 :** Résistance à la flexion sur prismes 7x7x28 des bétons après un cycle de chauffage.

Dans le palier des températures étudié les bétons autoplaçants présentent une résistance à la traction par flexion qui augmente avec l'élévation de température jusqu'à 200°C. La diminution du dosage de filler donne un meilleur comportement à chaleur.

Le béton vibré quand à lui, nous avons pu constater que la résistance à la traction par flexion à légèrement diminué après un cycle de chauffage.

Concernant les BAP avec fibres, le comportement semble être plus complexe parce qu'on enregistre une augmentation puis une diminution de la résistance dans le cas du BAP21F0,5 et une diminution puis une augmentation pour le cas du BAP24F0,5.

#### **IV.3.5. Retrait total après un cycle de chauffage :**

A l'âge de 28 jours, deux éprouvettes de chaque mode de conservation sont retirées et soumises à un cycle de température (défini dans le paragraphe IV.3.4).

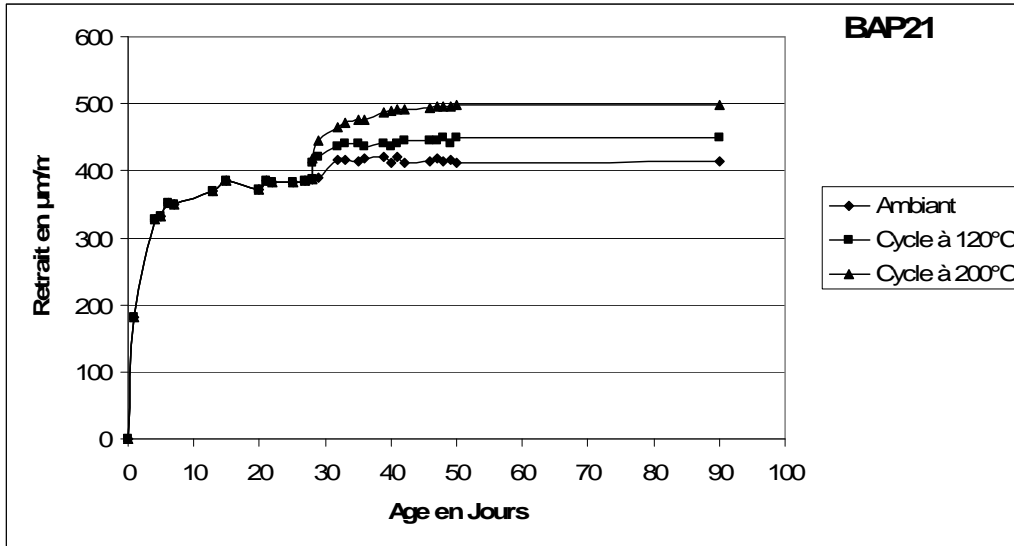
Après le cycle de chauffage une mesure instantanée du retrait est effectuée, puis l'éprouvette est remise dans son milieu de conservation de départ. Le suivi du retrait est ainsi effectué jusqu'à 50 jours.

Dans cette partie on essaiera de voir l'effet que pourrait avoir un cycle de chauffage sur l'évolution du retrait.

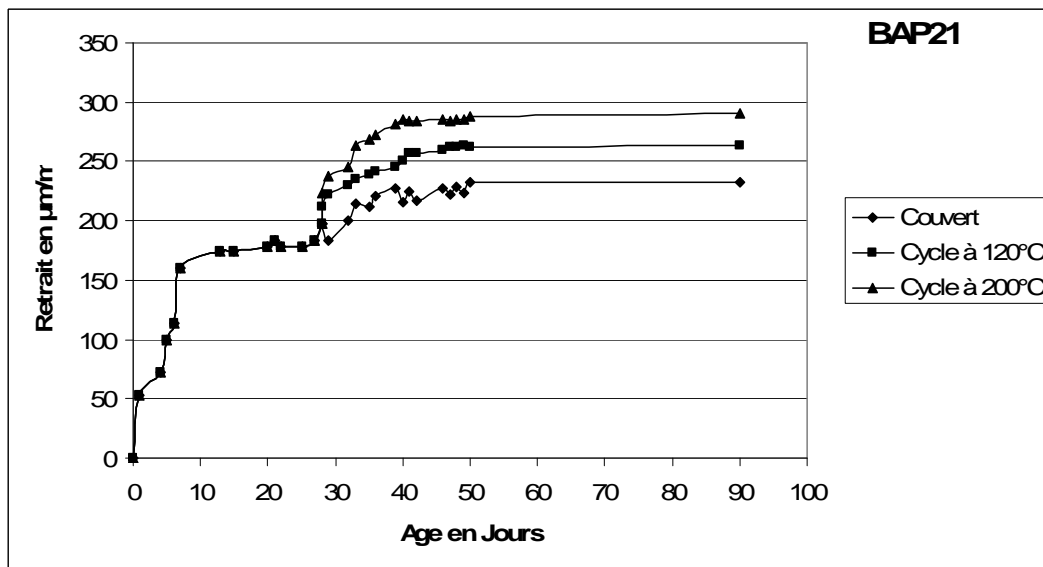
Les résultats obtenus sont représentés sur les figures IV.18 à IV.32. Sur l'ensemble de ces figures on remarque que l'effet d'un cycle de chaleur sur le retrait est le même quelque soit le béton.

- le retrait est augmenté brusquement par le cycle, et cette augmentation est proportionnelle à la température maximale du cycle,
- le retrait continu après le cycle en suivant une parallèle du retrait enregistré sans cycle de chauffage,
- le retrait final est plus important pour les béton ayant subit un cycle de 200°C,
- l'effet d'un cycle de température sur le retrait est plus important dans le cas du mode de conservation couvert (comparé au mode ambiant),

- En mode immergé, ou l'on assiste à un gonflement, l'effet d'un cycle de température est enregistré en deux étapes :
  - Un raccourcissement post-cycle plus ou moins important,
  - Puis une reprise de gonflement d'allure parallèle au gonflement du béton n'ayant pas subi de chauffage.



**Figure IV.18.** : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode ambiant.



**Figure IV.19.** : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode couvert.

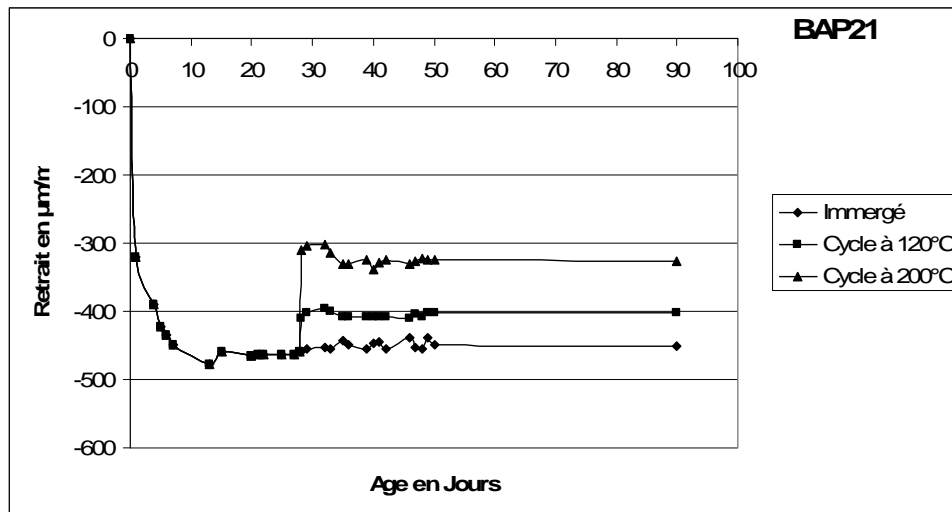


Figure IV.20. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21 conservé dans un mode immergé.

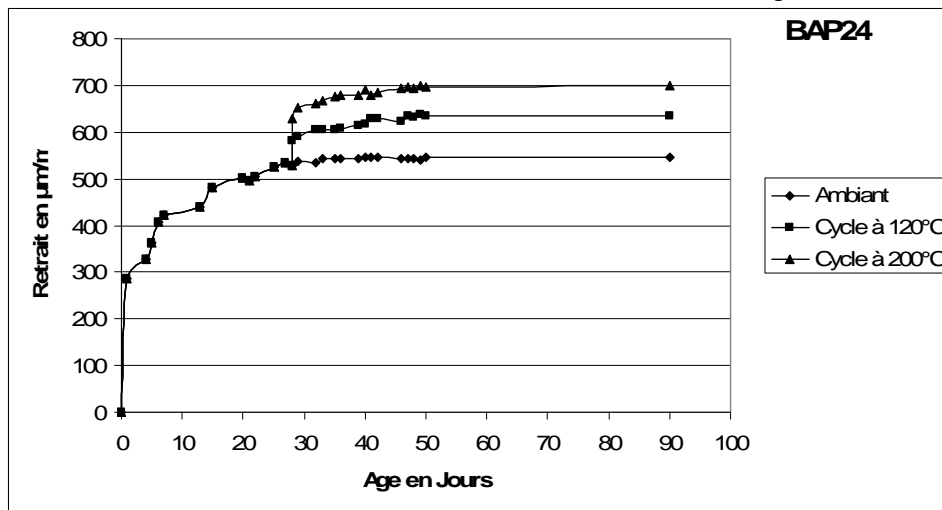


Figure IV.21. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode ambiant.

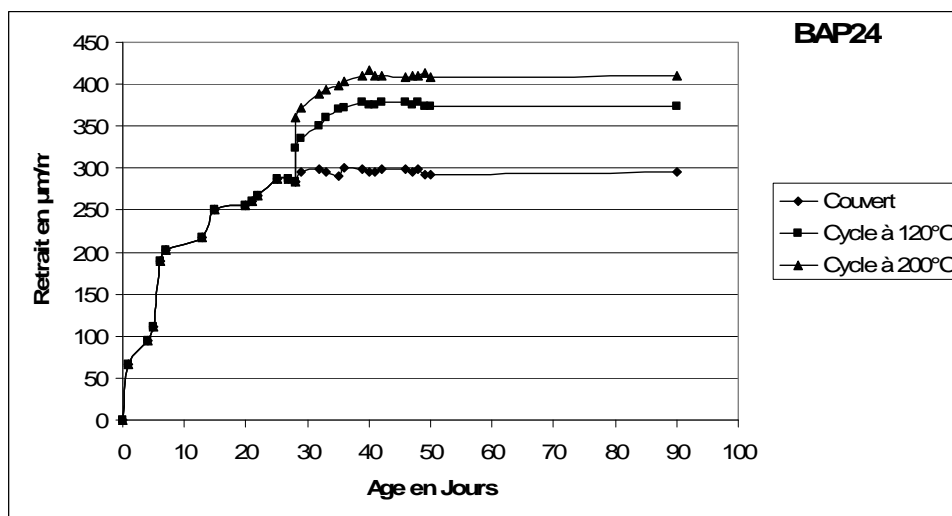


Figure IV.22. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode couvert.



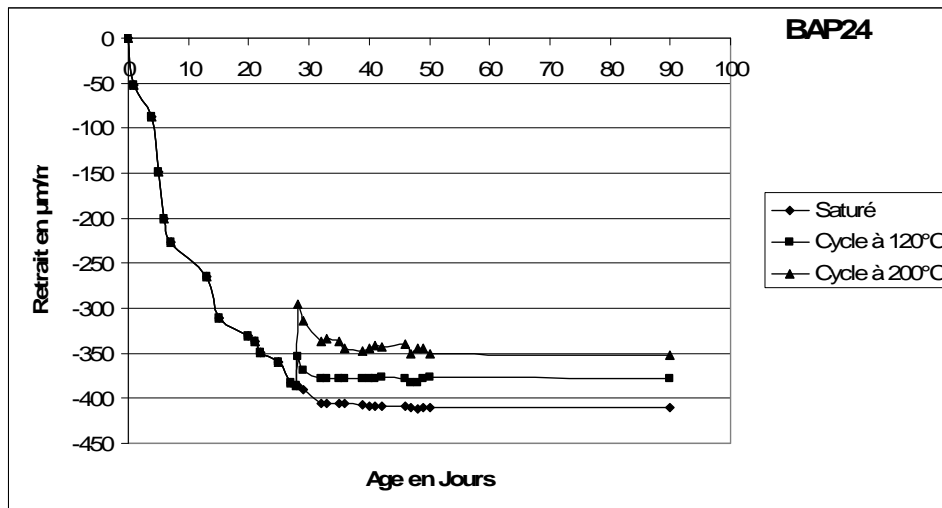


Figure IV.23. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24 conservé dans un mode immergé.

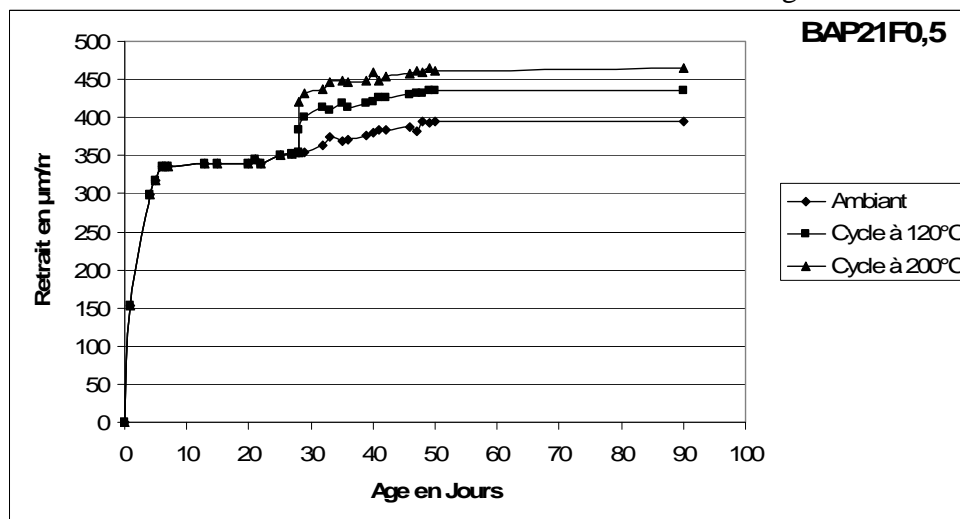


Figure IV.24. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21F0,5 conservé dans un mode ambiant.

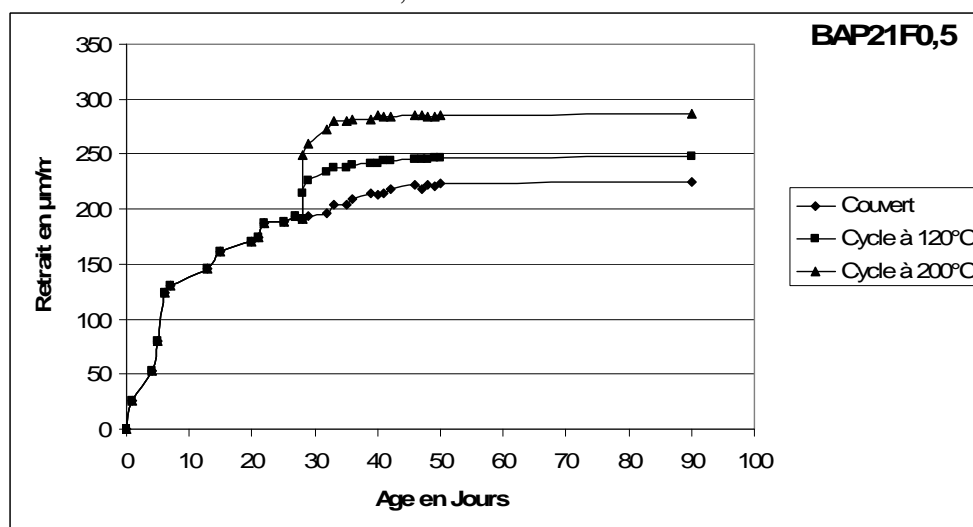


Figure IV.25. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21F0,5 conservé dans un mode couvert.

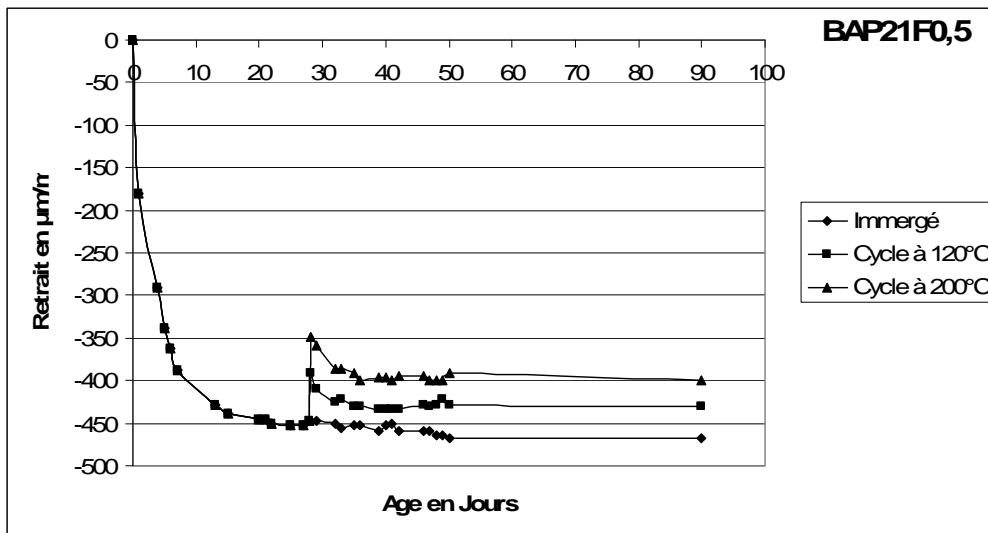


Figure IV.26. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP21F0,5 conservé dans un mode immergé.

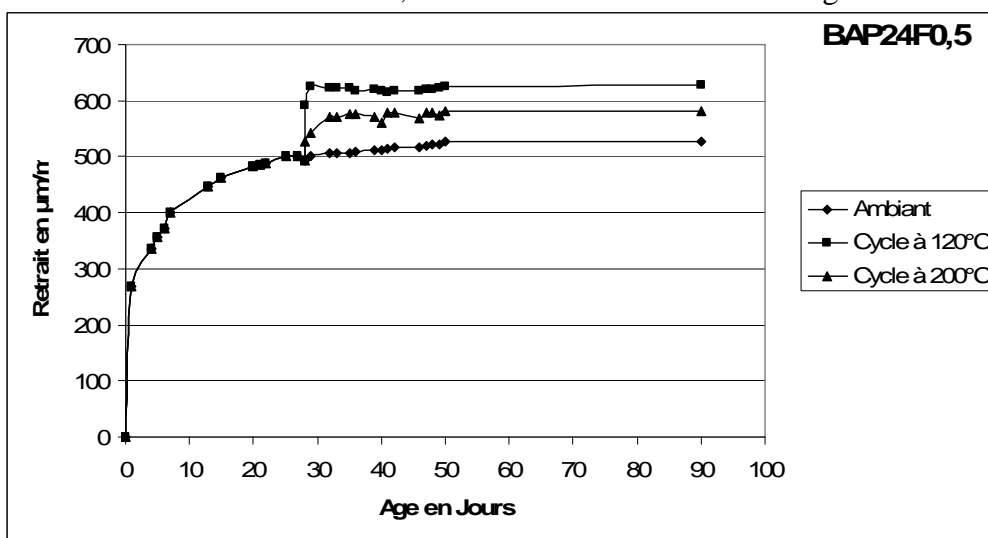


Figure IV.27. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode ambiant.

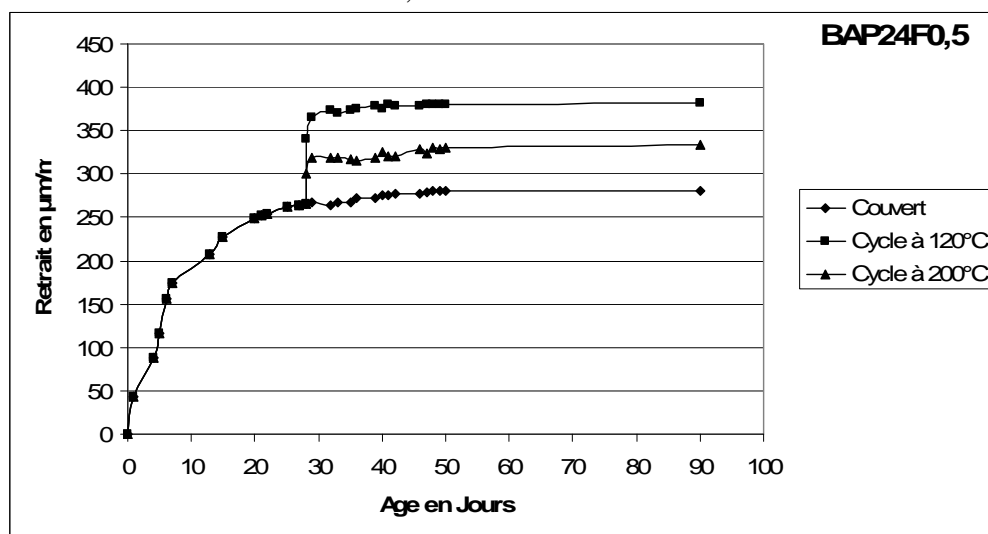


Figure IV.28. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode couvert.



Figure IV.29. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BAP24F0,5 conservé dans un mode immergé.

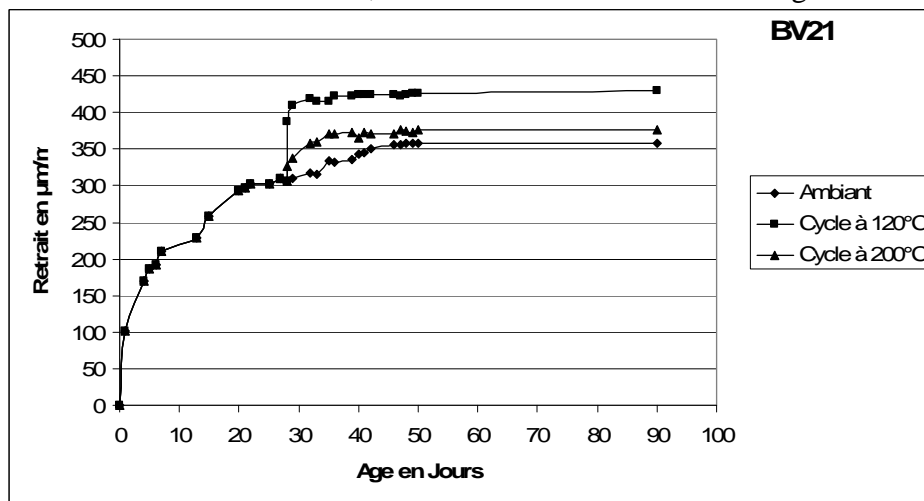


Figure IV.30. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode ambiant.

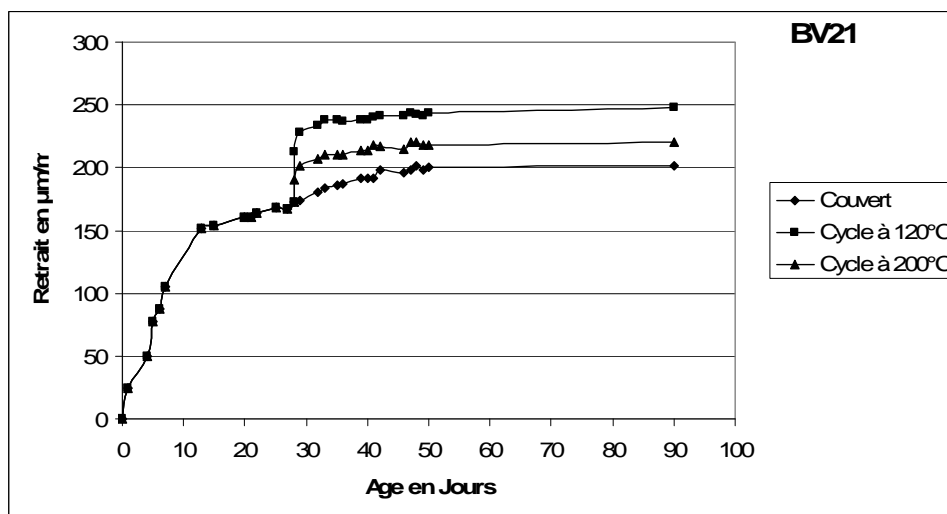
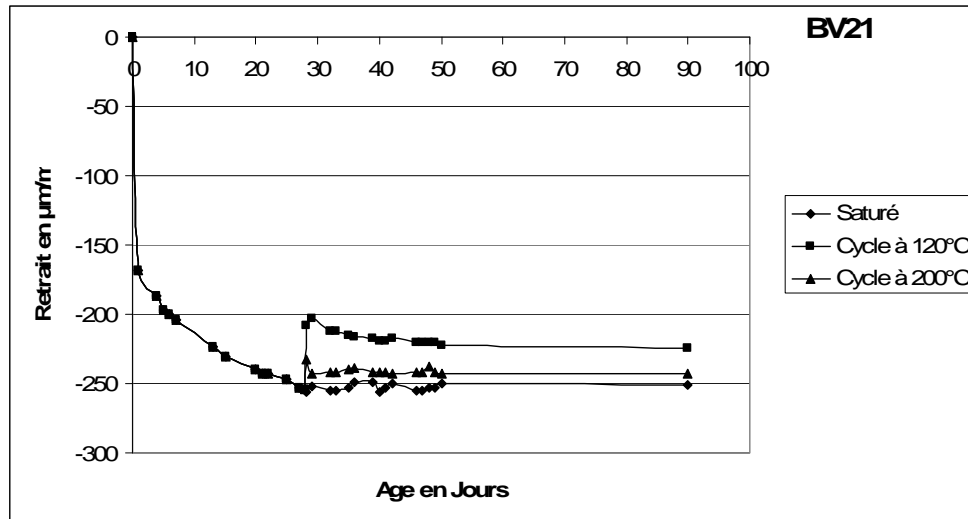


Figure IV.31. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode couvert.



**Figure IV.32.** : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution du retrait du BV21 conservé dans un mode immergé.

#### IV.3.6. Perte en masse après un cycle de chauffage :

Dans ce paragraphe on présentera les résultats de pertes en masse enregistrées avant et après un cycle de chauffage effectué sur les bétons BAP21, BAP24 et BAP21F0,5.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures IV.33 à IV.41.

Le cycle de chauffage provoque dans tous les cas une perte en masse instantanée (enregistrée juste après la fin de cycle). Cette perte instantanée est d'autant plus importante que le mode de conservation est plus humide.

Dans le milieu immergé l'effet du chauffage est très important, des pertes considérables en masse sont enregistrées pour tous les bétons. Toutefois, une fois remis dans le milieu immergé, les éprouvettes reprennent rapidement la quantité d'eau qu'ils ont perdue. Ces remarques sont valables pour tous les bétons étudiés.

En mode ambiant, le cycle à 120°C n'a pas grande influence. Quant au cycle 200°C des pertes en masse considérables ont été enregistrés. Après remise des éprouvettes en mode ambiant, nous avons remarqué une légère reprise de poids, ceci est probablement dû à l'humidité du milieu.

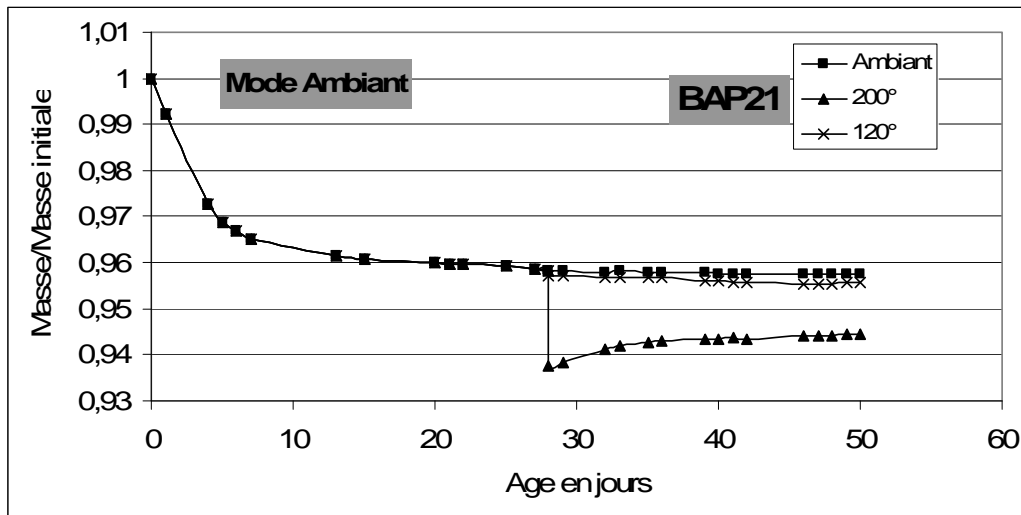


Figure IV.33. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode ambiant.

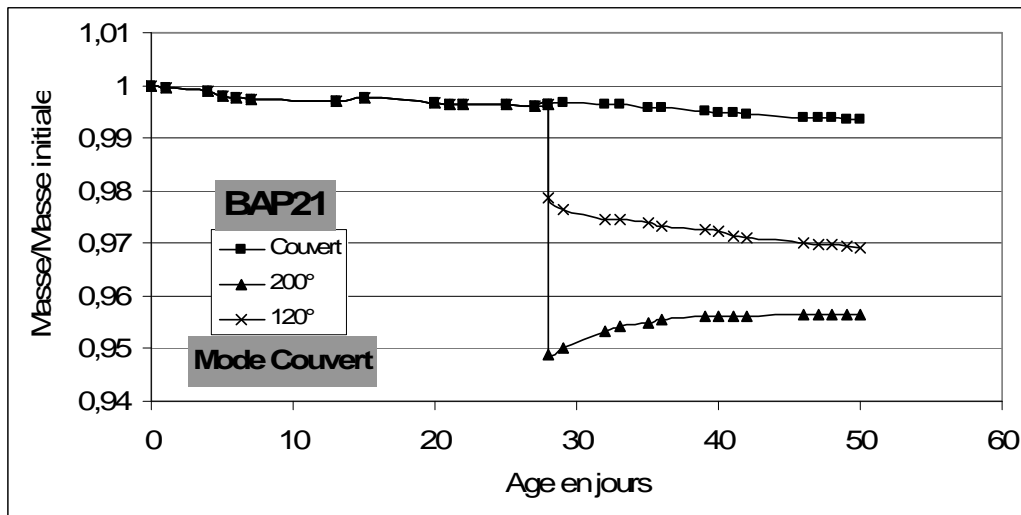


Figure IV.34. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode couvert.

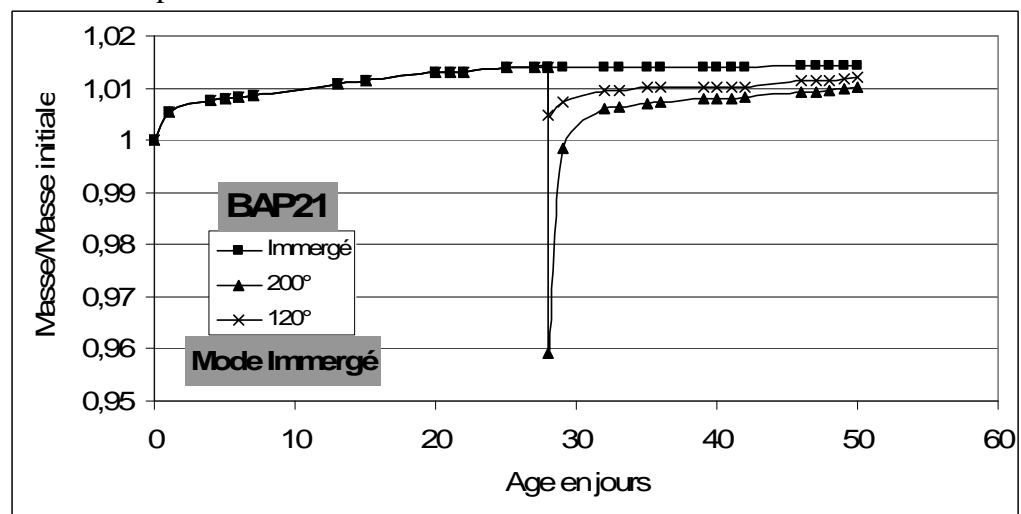


Figure IV.35. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21 conservé dans un mode immergé.

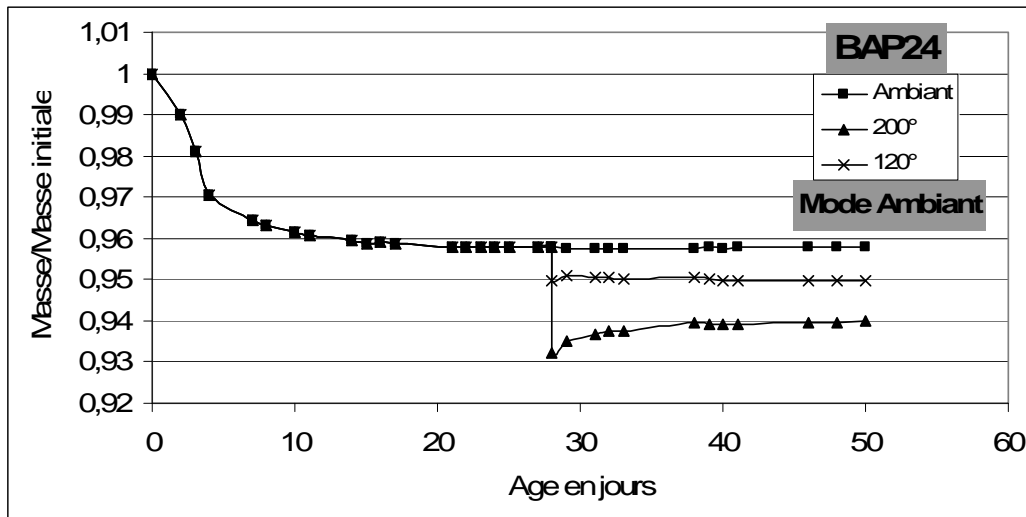


Figure IV.36. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode ambiant.

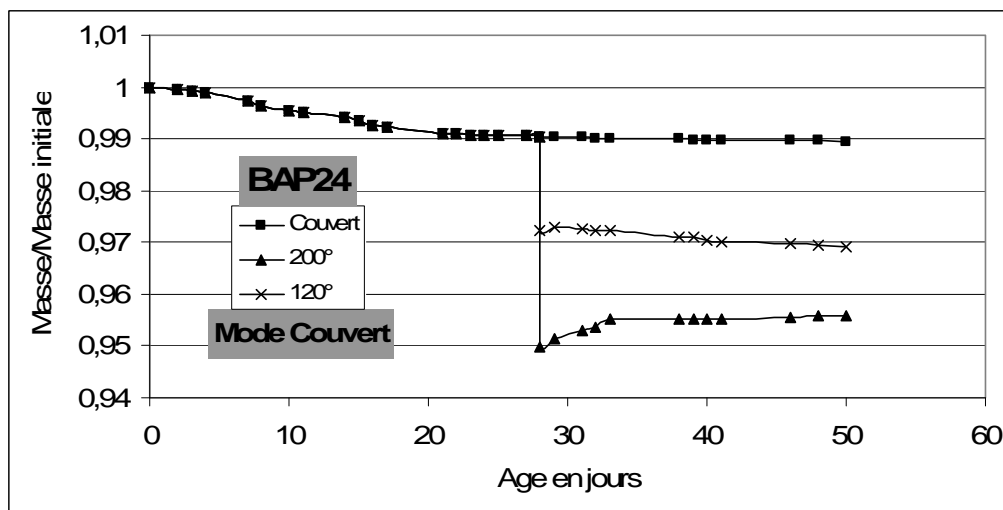


Figure IV.37. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode couvert.

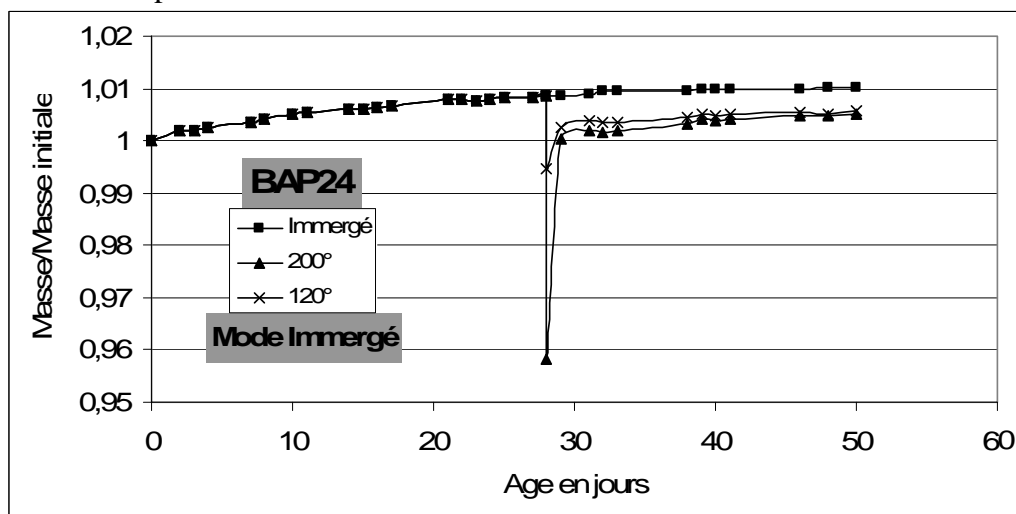


Figure IV.38. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP24 conservé dans un mode immergé.

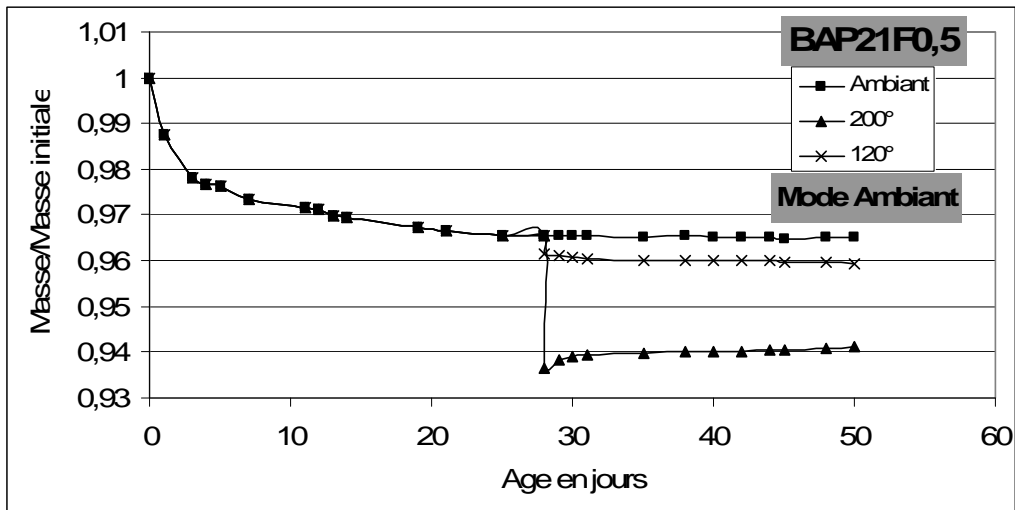


Figure IV.39. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode ambiant.

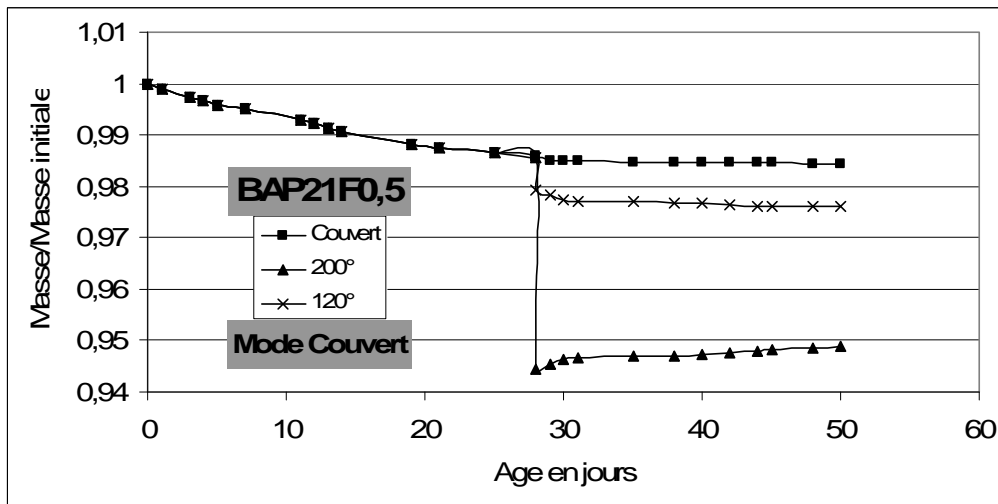


Figure IV.40. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode couvert.

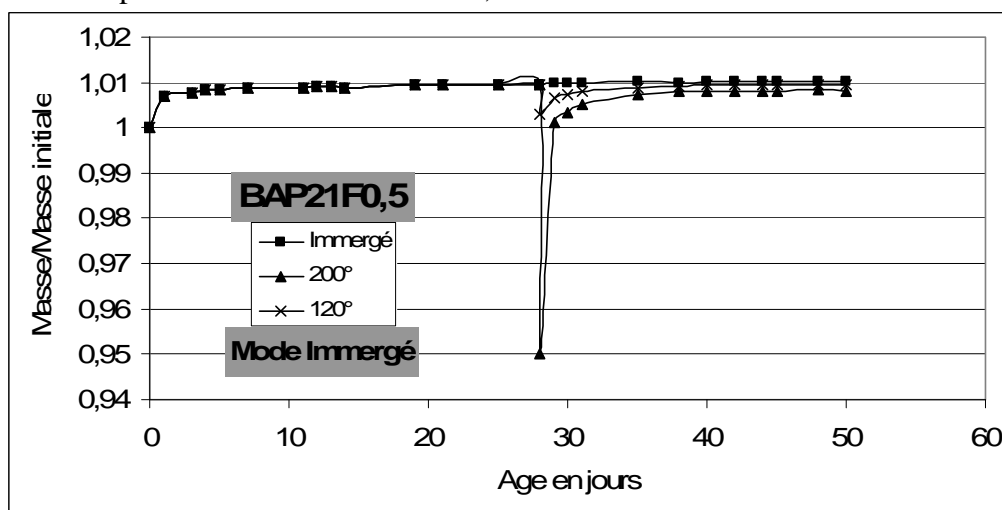


Figure IV.41. : Effet d'un cycle de chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur l'évolution de la perte en masse du BAP21F0,5 conservé dans un mode immergé.

#### IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale des propriétés à l'état durci de bétons autoplaçants, de bétons autoplaçants renforcés de fibres ainsi que celles d'un béton ordinaire.

Cinq compositions différentes ont été envisagées. Deux bétons autoplaçants (BAP21 et BAP24) avec des rapports F/C+F différents (0,17 et 0,33). Deux autres bétons autoplaçants renforcés de fibres (BAP21F0,5 et BAP24F0,5) obtenu par la substitution d'un volume de gros granulats par des fibres métalliques. Un béton ordinaire (BV21) conçu d'une manière à obtenir une résistance à la compression à 28 jours égale à celle d'un béton autoplaçant (BAP21).

Les différentes propriétés étudiées peuvent être résumées en :

- résistances mécaniques à différentes échéances d'âge,
- Variations dimensionnelles et pondérales,
- Fluage en flexion
- L'effet d'un chauffage provoqué à l'âge de 28 jours sur les résistances mécaniques, les variations dimensionnelles et pondérales.

L'analyse des résultats obtenus nous a permis de faire les constatations suivantes :

##### **Résistances mécaniques :**

Les résistances à la compression sont inversement proportionnelle avec le taux de substitution du ciment par des fillers calcaire. L'ordre de grandeur des résistances obtenues nous laisse dans la gamme des résistances usuelles des bétons ordinaire. Il est donc important de noter que la gamme des bétons autoplaçants, en matière de résistances mécaniques, est assimilable aux bétons ordinaires. Ce constat est valable pour les deux propriétés investiguées, en l'occurrence ; la résistance à la compression et à la traction par flexion.

##### **Variations dimensionnelles :**

Le retrait à été mesuré dans trois milieu de conservation : Ambiant, couvert et immergé. L'allure du retrait des BAP et des BAP renforcés de fibres (en milieu ambiant et couvert) et du gonflement (en milieu immergé) sont comparables avec celle du béton vibré. Toutefois l'ordre de grandeur est :

- en milieu ambiant et couvert : le béton qui présente plus de retrait est le BAP24, caractérisé par le plus grand dosage en ciment. Le béton de moindre retrait est le BV21.
- En milieu immergé, le béton qui présente le plus de gonflement est le BAP21 et BAP21F0,5, caractérisés par le plus grand dosage en fillers calcaire.

On peut dire que l'ajout de fillers calcaire est un paramètre à prendre sérieusement en compte quand il s'agit de formuler des bétons destinés vers un milieu immergé (voir humide).

Ainsi, pour les bétons, les résultats obtenus montrent que le retrait total des BAP semble, à priori, plus important que celui du béton vibré.

Cependant, si on compare les retrait du BAP et du BV d'égale résistance en compression on obtient :

- à 28 jours : 390  $\mu\text{m/m}$  pour le BAP et 310  $\mu\text{m/m}$  pour le BV
- à 90 jours : 410  $\mu\text{m/m}$  pour le BAP et 360  $\mu\text{m/m}$  pour le BV



En tenant compte des erreurs de dispersion ( $\pm 20 \mu\text{m/m}$ ) pour les deux séries, le retrait total des deux types de béton peut être considéré comme équivalent.

**Variations pondérales :**

Le suivi de la masse des échantillons a été effectué sur les mêmes éprouvettes destinées à la mesure du retrait. Ce qu'on peut remarquer, c'est que la perte en masse est systématiques dans les milieux ambiants et couverts (l'ordre de grandeur n'est pas le même) et que dans l'eau les bétons présentent une augmentation de la masse.

Les ordres de grandeur de ces variations pondérales sont :

- en milieu ambiant, c'est les bétons autoplaçants qui perdent le plus de leurs masses,
- en milieu couvert, c'est les bétons renforcés de fibres,
- en milieu immergé, c'est le béton autoplaçant avec le plus grand dosage en fillers qui présente la plus grande augmentation de la masse.

Les ordres de grandeur sont toutefois très rapprochés.

**Fluage en flexion :**

Les essais réalisés sur des poutrelles 10x10x120 cm, soumises à une flexion 4 points avec une charge maintenue de l'ordre de 45% de la charge de rupture ont donnés les résultats suivants :

- le béton autoplaçant présente un fluage en flexion (à 90 jours) supérieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance à la compression de 60%,
- le béton autoplaçant renforcé de fibres présente un fluage en flexion (à 90 jours) supérieur au béton autoplaçant de 18%,

Ainsi on peut dire que les BAP présentent un fluage plus important que les BV, il serait donc nécessaire d'investiguer beaucoup plus ce phénomène.

Les résultats obtenus, nous permettent finalement de conclure que les bétons autoplaçants sont une gamme de bétons qui présente des propriétés à l'état durci comparables et plus ou moins équivalentes aux propriétés des béton ordinaires.

**CONCLUSION  
GENERALE ET  
PERSPECTIVES**

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Ce travail s'est déroulé sur une période quatre ans, s'est intégré dans l'activité générale de recherche de l'équipe du laboratoire de matériaux et Durabilité de Construction de l'université Mentouri de Constantine et du laboratoire L2MGC de l'université de Cergy Pontoise.

Le premier chapitre est un état de l'art consacré aux différentes méthodes et approches de formulation des bétons autoplaçants et aux différents essais de caractérisation de ce nouveau type de béton.

Nous avons pu remarquer que dans la littérature il existe un nombre important de méthodes permettant de définir la composition d'un BAP.

Nous avons pu constater aussi que le nombre d'essais permettant la caractérisation de la fluidité, de la capacité de remplissage et la ségréabilité est très important. Presque tous les laboratoires de recherches recensés dans le monde ont leur propre technique de caractérisation.

De ce constat, nous nous sommes intéressés à rechercher une méthode qui permettrait la conception d'un béton autoplaçant dans le contexte Algérien, c'est ce qui a fait l'objet du deuxième chapitre.

Dans ce dernier, nous avons présenté un travail de formulation de bétons autoplaçants en utilisant la méthode Japonaise. Il s'est avéré que cette méthode ne permettait pas d'atteindre du premier coup les résultats espérés. La limitation de l'étalement relatif à 5 et du temps d'écoulement relatif à 1 sont contestables.

En effet, ces limitations doivent être revues, et c'est le travail que nous avons mené, sur des coulis, des mortiers et des bétons, et qui nous a permis de déterminer de nouvelles valeurs en l'occurrence ; un étalement relatif de 8 et un temps d'écoulement relatif de 2,5.

Nous avons pu aussi constater que le dosage en superplastifiant pour les bétons autoplaçants est toujours proche de celui de la saturation. Il serait donc plus judicieux de le fixer a priori et faire diminuer le nombre de paramètres.

Dans ce même chapitre, nous avons proposé une procédure pour déterminer le dosage en superplastifiant pour n'importe quelle combinaison de liant en fonction des dosages de saturation des constituants de ce liant. Une expression simple a été proposée.

Pour clore le chapitre, nous avons proposé une nouvelle démarche pour la formulation des BAP qui obéit au caractère local des constituants que nous utilisons.

Notons aussi que dans le deuxième chapitre plusieurs caractéristiques des coulis, mortiers et bétons ont été mesurées et l'influence de certains paramètres (E/C+F, F/C+F et dosage en superplastifiant) a été appréciée.

Vu la fluidité importante des BAP, le troisième chapitre a été consacré à l'étude du risque de ségrégation statique qui n'est pas des moindres. Il s'est avéré qu'il est très important de vérifier la stabilité du système de granulats dans la masse du béton. Une ségrégation de ce type n'est pas visible et ne peut être constaté dans l'ouvrage que par des techniques très poussées.

Une distribution non uniforme des granulats dans la masse se traduit directement par une résistance différentielle.

Dans ce chapitre, nous avons conçu et utilisé un dispositif et une nouvelle procédure permettant la caractérisation de la résistance à la ségrégation par le biais d'un indice calculé "ISS".

Sous la lumière des résultats des essais réalisés sur un ensemble de 23 compositions différentes il a été trouvé que :

- Pour les bétons dont l'étalement est inférieur à 70 cm, le risque de ségrégation statique est très minime, voir nul.
- Les résultats ont montré que la limitation de la stabilité au tamis à 15% est assez sévère et on peut admettre un pourcentage de 20% sans grand risque.
- L'essai proposé est un essai très simple qui permet l'appréciation directe de la ségrégation statique dans les BAP.

Il ressort que la limite de l'ISS pour obtenir un bon BAP est de l'ordre de 5. Toutefois, il va falloir procéder à d'autres essais complémentaires en adoptant d'autres paramètres pour pouvoir conclure sur la limite de l'ISS.

Au quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté une étude de quelques propriétés à l'état durci des BAP. En matière de résistances mécaniques les BAP présentent des performances comparables à celles des bétons ordinaires.

Le retrait des BAP était légèrement supérieur à celui des BO mais reste dans la limite des valeurs acceptables.

Toutefois, en tenant compte des erreurs de dispersion dans les mesures du retrait ( $\pm 20 \mu\text{m/m}$ ) on peut dire que le retrait total des BAP et des bétons ordinaires peut être considéré comme équivalent.

L'augmentation du taux de substitution du ciment par du fillers calcaire dans les compositions des BAP permet de réduire le retrait total dans les milieux ambiant et couvert, par contre le gonflement dans le milieu immergé devient plus grand.

Deux cycles de chauffages ont été adoptés (un cycle à 120°C et un autre à 200°C). L'objectif était de voir l'effet que pourrait avoir un chauffage sur quelques propriétés des bétons. Il ressort que :

- un chauffage jusqu'à 200°C a fait chuter la résistance à la compression des bétons dans des proportions allant de 2 à 26%,

- En matière de résistance à la traction par flexion, le chauffage à permis dans la majorité des cas d'obtenir un certain gain de résistance (allant de 0 à 18%)
- Le retrait en milieu ambiant et couvert, affiche un saut brusque provoqué par le chauffage et puis son évolution suit une parallèle au retrait du témoin (sans chauffage),
- Le gonflement enregistré dans les milieux immergés, subit un raccourcissement (retrait) brusque et considérable lors du chauffage (mesuré juste après le cycle) et puis reprend lentement son court en suivant une parallèle au gonflement du témoin.

### **Perspectives**

Dans le travail présenté dans cette thèse, on s'est intéressé à la formulation, la caractérisation et aux propriétés des bétons autoplaçants sans agents de viscosité. Il serait intéressant de pouvoir étudier l'applicabilité de la démarche de formulation proposée ainsi que la procédure expérimentale caractérisant la résistance à la ségrégation verticale aux BAP avec agent de viscosité.

Il serait aussi intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants...).

Afin de mieux comprendre les différentes facettes de comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci; durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, autres comportements mécaniques que la résistance à la compression et traction par flexion, résistance au gel/dégel...

Enfin, le développement des bétons autoplaçants en Algérie n'en est qu'à ses débuts. La méthode de formulation que nous avons proposé doit faire l'objet de confrontation à des expérimentations en vraie grandeur, dans lesquelles la ségrégation éventuelle serait observée.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **AÏTCIN Pierre-Claude**, Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow, Cement and concrete research, 30 (2000), pp 1349-1359.
- [2] **ASSIÉ Stéphan**, « durabilité des bétons autoplaçants », thèse de l'Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse 2004.
- [3] **BARON J. et J.-P. OLLIVIER**, Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage 1999.
- [4] **BEAUPRE D., P. LACOMBE et K.H. KHAYAT**, Laboratory investigation of rheological properties and scaling resistance of air entrained self consolidating concrete, Materials and constructions, Vol 32, April 1999, pp 235-240.
- [5] **BENKECHEKACHE G.**, **Fluage en flexion des bétons autoplaçants**, mémoire de magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2008
- [6] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, "Influence of Chemical Admixtures on the Fluidity of Cement Pastes with Different Nature of Fillers – An Experimental Study Based on the Marsh Cone Test", First International Chemical Engineering Conference, 17-19 September 2001, University of Jordan, Amman, JORDAN, 11 pages.
- [7] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, "Experimental Study of Fresh Concretes With Various Aggregates", The 6<sup>th</sup> International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, 21-24 October 2002, Amman, JORDAN, 08 pages
- [8] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, « Etude de l'influence de la Nature des Granulats sur les Caractéristiques Rhéologiques et Mécaniques des Bétons et des Mortiers », Séminaire National de Génie Civil, Mostaganem, 13 et 14 novembre 2000, Proceeding, pp48-54.
- [9] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, « Etude Expérimentale de l'Adéquation Entre les Appareils de mesure de la Consistance et la Variété des Bétons et des Mortiers », Séminaire National de Génie Civil, Sidi Belabbes, 15 et 16 mai 2001, 07 pages
- [10] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, « Etude Expérimentale des Caractéristiques des Bétons et des Mortiers à l'Etat Frais », Séminaire National de Génie Civil, Tebessa, 26 et 27 mai 2001, 06 pages.
- [11] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, « Etude Expérimentale des Caractéristiques des Bétons Frais », Séminaire National de Génie Civil, Sidi Belabbes, 15 et 16 mai 2001, 09 pages
- [12] **BENSEBTI S., H. HOUARI**, « Caractérisation de Matériaux à Base de Matrice Cimentaire de la Région de Constantine » « Formulation – Rhéologie – Résistances », Thèse de Magister en Génie Civil, Université de Constantine, Novembre 2000, 237 pages.

- [13] **BENSEBTI S., S. AGGOUN, H. HOUARI**, « Essais de caractérisation expérimentale du ségrégation verticale des bétons autoplaçants ». Revue sciences et technologie B-constantine. N° 25- Juin 2007, pp 41-49.
- [14] **BENSEBTI S., S. AGGOUN, H. HOUARI, R. DUVAL** « La ségrégation des bétons autoplaçants, mise en place d'un procédure expérimental ». Annale de bâtiment et des travaux publics, Juin 2007, N° 2-3 pp 22-28.
- [15] **BOSILJKOV Violeta Bokan**, SCC with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, Cement and Concrete Research 33 (2003), pp 1279-1286.
- [16] **BOUKNI B.**, Tenue au feu des bétons autoplaçants, Mémoire Magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2008
- [17] **BOUKNI B., S. BENSEBTI, A. CHABANE , H. HOUARI** "Comportement des bétons autoplaçants à haute température » journée d'études sur les bétons hydrauliques et hydrocarbonés » université du 20Août 1955, Skikda. Mai 2007.
- [18] **BOUKNI B., S. BENSEBTI, A. CHABANE , H. HOUARI** « Les propriétés mécaniques et résiduelles des bétons autoplaçants à haute température » Séminaire national. Université Badji Mokhtar. Annaba 2007.
- [19] **BOUZOUBAA N. and M. LACHEMI**, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash : Preliminary Results, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 413-420.
- [20] **BOUZOUBAA N. et M. LACHEMI**, Bétons Autoplaçants; Synthèse bibliographique, Rapport de recherche CEBTP, centre Saint-Remy, N°: 98-004/98-006, juillet 1999.
- [21] **BUI V.K., D. MONTGOMERY, I. HINCZAK and K. TURNER**, Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research 32 (2002), pp 1489 – 1496.
- [22] **CHABANE A.**, Influence du type de granulats sur le fluage du béton, Revue sciences et technologie B- constantine. N° 28- Juin 2008,  
Article
- [23] **CHABANE A.**, Contribution à l'étude du comportement différé des bétons sous sollicitations de flexion, mémoire de magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2000.
- [24] **COQUILLAT G. et L. HASNI**, Bétons Autoplaçants : Mise en Evidence de l'Influence des Conditions de Fabrication. Rapport de Recherche N°. 99-000, Recherche FNTP, Octobre 1999.
- [25] **CORINQLDESI V. and G. ORICONI**, Durable fiber reinforced self –compacting concrete, Cement and concrete research, 34 (2004), pp 249-254.
- [26] **DE LARRARD F.**, "Formulation et propriétés des bétons à très haute performances", Rapport de recherche LCP N°: 149, 1988.



- [27] **DE LARRARD F., A. BELLOC**, L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, N° 219, Jan-Fev 1999, pp 41-52.
- [28] **DE LARRARD F., C. F. FERRARIS, T. SEDRAN**, Fresh Concrete : A Herschell-Bulkley Material, Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol, 31, August-September 1998, pp 494-498.
- [29] **DE LARRARD F., C. HU, T. SEDRAN, J. C. SZITKAR, M. JOLY, F. CLAUX et F. DERKX**, A New Rheometer For Soft-to-Fluid Fresh Concrete, ACI Materials Journal, V, 94, No, 3, May-June 1997.
- [30] **DE LARRARD F., Chiara FERRARIS**, Rhéologie du béton frais remanié; plan expérimental et dépouillement des résultats, , Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, N° 213, Jan-Fev 1998, pp 73-89.
- [31] **DJELAL C., Y. VANHOVE and A. MAGNIN**, Tribological behaviour of self compacting concrete, Cement and Concrete Research (2003)
- [32] **DUPAIN R., R. LANCHAN, J.C. SAINT AROMAN**, « Granulats, sols, ciment et bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par mes essais de laboratoire ». Edition Casteilla 1995
- [33] **FERKOUS S., H.HOUARI, S. BENSEBTI, Z. GUEMMADI**, "Mécanique des Bétons sous Conditions Locales : Paramètres de Composition", Revue "Sciences et Technologie B, N°24, décembre 2005, pp. 75-84.
- [34] Final report of RILEM TC 188-CSC "casting of self compacting concrete", Materials and Structures (2006) 39, pp 937-954
- [35] Final report of RILEM TC 205-DSC "durability of self compacting concrete", Materials and Structures (2006) 36, pp 701-719
- [36] **GEIKER Mette R., Mari BRANDL, Lars N. THRANE, Dirch H. BAGER and Olafur WALLEVIK**, The Effect of Measuring Procedure on the Apparent Rheological Properties of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research 32 (2002), pp 1791 - 1795.
- [37] **GHEZAL A.** Modelisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation, Mémoire de maîtrise en génie civil, Université de Sherbrooke, pp 88-889, pp 155-156, 1999.
- [38] **GRÜNEWALD Steffen and Joost C. WALRAVEN**, Parameter-Study on The Influence of Steel Fibers and Coarse Aggregate Content on The Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 1793- 1798.
- [39] **HADDAD O., S. AGGOUN, L. NACHBAUR, V. WALLER et R. CABRILLAC**, Extension de la méthode du mortier de béton équivalent aux bétons autoplaçants, Annales du bâtiment et travaux publics, Octobre 2005, pp 13-17.

- [40] **HAN Lin-Hai** and **Guo-Huang YAO**, Experimental Behaviour of Thin-Walled Hollow Structural Steel (HSS) Columns Filled With Self-Consolidating Concrete (SCC), Thin-Walled Structures (2004).
- [41] **HASNI L.**, Bétons Autoplaçants, Synthèse Bibliographique Rapport de Recherche N°. 98-004 /98-006, CEBTP, Juillet 1999.
- [42] **HO D.W.S., A.M.M. SHEINN, C.C. NG** and **C.T. TAM**, The Use of Quarry Dust for SCC Applications, Cement and Concrete Research 32 (2002), pp 505-511.
- [43] **HOLSCHEMACHER Klaus** and **Yvette KLUG**, A database for the Evaluation of hardened Properties of SCC, Lacer N°: 7, 2002, pp 123-134.
- [44] **HOUARI H.**, « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon 1993, 244p.
- [45] **HU Chong**, "Rhéologie des bétons fluides", Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées OA 16, Septembre 1995.
- [46] **KAKUTA S.** and **T. KOKADO**, A New Workability Test On Consolidation-Free Flowing (CFF) Concrete, Production Methods and Workability of Concrete, Edited by P.J.M. Bartos, D.L. Marrs and Cleland. Published in 1996 by E & FN Spon, London.
- [47] **KAZUHIRA et al**, Performance of new Developed Powder Polycarboxylic Acid Superplasticizer, RILEM, Proceeding Pro7 - Stockholm, Sweden, ed. A. Skarendahi and Peterson, pp 425-436.
- [48] **KHAYAT K. H.**, Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, V. 96, No. 3, May-June 1999.
- [49] **KHAYAT K.**, Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Sous la Direction de J. BARON et J.-P. OLLIVIER, Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage 1999.
- [50] **KHAYAT K.H., A. GHEZAL** and **S. HADRICHE**, Factorial design models for proportioning self consolidating concrete, Materials and Structures, Vol. 32, November 1999, pp 679-686.
- [51]. **KHOURY G.A.**, "Mechanical behaviour at high temperature". Final report, Brite Euram III, HITECO programme BE-95-1158. 1999.
- [52] **KHOURY G.A.**, "Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment" . Magazine of Concrete Research, 1992. 44, n° 161, pp 291-309

- [53] **LACHEMI M., K. M. A. HOSSAIN, V. LAMBROS, P.-C. NKINAMUBANZI and N. BOUZOUBAA**, Self-Consolidating Concrete Incorporating New Viscosity modifying Admixtures, *Cement and Concrete Research* 34 (2004), pp 917-926.
- [54] **MENAI Khaled**, Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre, 1995.
- [55] **MENOU A.**, « Etude de comportement thermomécanique des bétons à haute température : approche multi échelle de l'endommagement thermique » thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour 2004.
- [56] **MIAO B.**. « Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [57] **MIZUGUCHI H.**, "Correlation between yield value, plastic viscosity and consistency of plain fresh mortar and concrete, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol 7, pp 33-40, 1985.
- [58] **NACHBAUR L., D. KAPLAN and G. MARCHESE**, Extension of Concrete Equivalent Mortar (CEM) method to Self Compacting Concrete, 7th CANMET/ACI, international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Berlin, Germany, 2003, Supplementary Papers, pp 333-346.
- [59] **NAGATAKI S. and H. FUJIWARA**, Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI SP 154-16, pp 301-314, June 1995.
- [60] **NEHDI M.**, "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, Vol 30 pp 1603-1669, June 2000
- [61] **NEHDI M., M. PARDHAN and S. KOSHOWSKI**, Durability of Self-Consolidating Concrete Incorporating High-Volume Replacement Composite Cements, *Cement and Concrete Research* (2004).
- [62] **NEVILL A. M.**, " Propriétés des Bétons ", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [63] **NOUMOWE A.**, "Temperature Distribution and Mechanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C" *ACI Materials Journal*, July-August 2003
- [64] **NOUMOWE, N. A., DEBICKI, G.**, "Effect of Elevated Temperature from 200 to 600 °C on the Permeability of HPC", Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. University of Leipzig. Ed.:König, G., Dehn, F., Faust, T., Leipzig. 2002,431-444.
- [65] **OKAMURA H. and OZAWA K.**, Mix design for self compacting concrete, *Concrete library of JSCE*, N°: 25, June 1995.

- [66] **OKAMURA Hajime** and **Kazumasa OZAWA**, Self-Compactable High-Performance Concrete in Japan, (Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI ) SP 159-2, pp 31-44, (June 1995).
- [67] **OKAMURA Hajime** and **Masahiro OUCHI**, Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol, 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [68] **OKAMURA Hajime**, Self-Compacting High-Performance Concrete, Concrete International, V. 19, No. 7, July 1997, pp 50-54.
- [69] **OUCHI M., HIBINO M. and OKAMURA H.**, Effect of superplasticizer on self compactibility of fresh concrete, Transportation Research Board, 76th annual meeting, Washington, D.C., 12-16, January 1997.
- [70] **PERSSON Bertil**, A Comparison Between Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and the Corresponding Properties of Normal Concrete, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 193-198.
- [71] **PERSSON Bertil**, Sulphate resistance of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) pp 1933-1938.
- [72] **POON C.S. and D.W.S. HO**, A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC, Cement and Concrete Research, (2004), 03 pages
- [73] **ROLS Sébastien, Jeau AMBROISE and Jeau PÉRA**, Effects of Different Viscosity Agents on the Properties of Self-Leveling Concrete, Cement and Concrete Research 29 (1999), pp 261 - 266.
- [74] **SAAK Aaron W., Hamlin M. NINGS and Surendra P. SHAH**, A generalized Approach For the Determination of Yield Stress by Slump and Slump Flow, Cement and Concrete Research 34 (2004) 363-371.
- [75] **SAFAWI Mohammed Ibrahim, Ichiro IWAKI and Takashi MIURA**, The Segregation Tendency in the Vibration of High Fluidity Concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004), pp 219 - 226.
- [76] **SAHMARAN Mustapha, Alperen YURTSEVEN and I. Ozgur YAMAN**, Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete, Building and environment 40 (2005), pp 1672-1677.
- [77] **SCHWARTZENTRUBER A. et C. CATHERINE**, La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvés, Matériaux et Structures, Vol. 33, Octobre 2000, pp 475-482.
- [78] **SEDRAN Thierry, François de LARRARD et Daniel ANGOT**, Prédiction de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 - nov-déc, 1994, Réf. 3862 ;

- [79] **SEDRAN Thierry, François de LARRARD** et **Daniel ANGOT**, Prévion de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. II. Validation. Cas des mélanges confinés, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 - nov-déc, 1994, Réf, 3863.
- [80] **SEDRAN Thierry**, Les Bétons Autonivelants (BAN), Synthèse Bibliographique. Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -196 - mars-avr, 1995, Réf. 3889.
- [81] **SEDRAN Thierry**, Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, mars 1999.
- [82] **SENEBI Mohammed**, Medium Strength Self-Compacting Concrete Contaning Fly-ash : modelling using factorial experimental plans, Cement and Concrete Research, (2004),
- [83] **SHINDOH Takefumi** and **Yaasunori MATSUOKA**, Development of Combination-Type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods, Journal of Avvanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, 26-36, April 2003.
- [84] Spécification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, February 2002.
- [85] **SU Nan and Buquan MIAO**, A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, Cement and Concrete Composites, 25 (2003) pp 215-222.
- [86] **SU Nan, Kung-Chung HSU** and **His-Wen CHAI**, A Simple mix Design Method for Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 1799-1807.
- [87] The European Guidelines for Self Compacting Concrete, Specification, Production and Use, May 2005.
- [88] The European Guidelines for Self Compacting Concrete, Specification, Production and Use, May 2005.
- [89] **TRUDEL Alain**, Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Avril, 1996.
- [90] **TURCRY Philippe** et **Ahmed LOUKILI**, Différentes approches pour la Formulation des Bétons Autoplaçants, Revue Française de Génie Civil, Volume 7 – n° 4/2003, pp 425-450.
- [91] **TURCRY Philippe**, Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.
- [92] **XIE Youjun, Baoju LIU, Jian YIN, Shiqiong ZHOU**, Optimum Mix Parameters of Hygh-Strength Self-Compacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash, Cement and Concrete Research 32 (2002), pp 477-480.
- [93] **YASAR Ergül, Yasin ERDOGAN** and **Alaettin KILIC**, Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength, Materials Letters, 58 (2004) pp 772-777.

- [94] **ZHU Wenzhong and Peter J.M. BARTOS**, Permeation properties of self compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2003), pp 921-926.
- [95] **ZHU Wenzhong, John C. GIBBS and Peter J. M. BARTOS**, Uniformity of In Situ Properties of Self-Compacting Concrete in Full-Scale Structural Elements, *Cement and Concrete Composites* 23 (2001), pp 57-64.

# **ANNEXE**

## ANNEXE

### CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS UTILISES

#### 1. Les différents constituants utilisés sont :

- Un ciment du type CEM II/A de Hamma bouziane,
- des fillers calcaires UF20 de la carrière ENG de Khroub,
- des granulats (sable et gravier) de la carrière Hedna de Ain Smara,
- un sable de mer (roulé (0/3), Skikda
- un superplastifiant Medaplast SP40 de Granitex,
- L'eau du robinet du laboratoire de génie civil de l'université Mentouri de Constantine et celui du laboratoire de Skikda

#### 2. Les granulats :

Les normes NFP 18-101 D NF P18-541 définit les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons. Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

Les résultats de l'analyse granulométrique, le module de finesse du sable ainsi que le coefficient d'aplatissement du gravier sont rassemblés dans le tableau 1, et les courbes granulométriques sont représentées sur la figure 1.

Module	Tamis	Granulats		
		Sable 0/3	Sable 0/4	Gravillon 8/15
20	0,08	05	10	-
23	0,16	09	15,5	-
25	0,25	11	20	-
26	0,315	55	22	-
28	0,5	74	28	-
29	0,63	85	32	-
30	0,8	91	35,5	-
32	1,25	95	45	-
35	2,5	97	75	-
37	4	100	92	-
38	5	-	100	0
39	6,3	-	-	12
40	8	-	-	37
41	10	-	-	76
42	12,5	-	-	99
43	16	-	-	100
Module de finesse		1,56	3,1	-
Coefficient d'aplatissement		-	-	19 %

**Tableau 1** : Résultats de l'analyse granulométriques des granulats et coefficient d'aplatissement du gravillon.



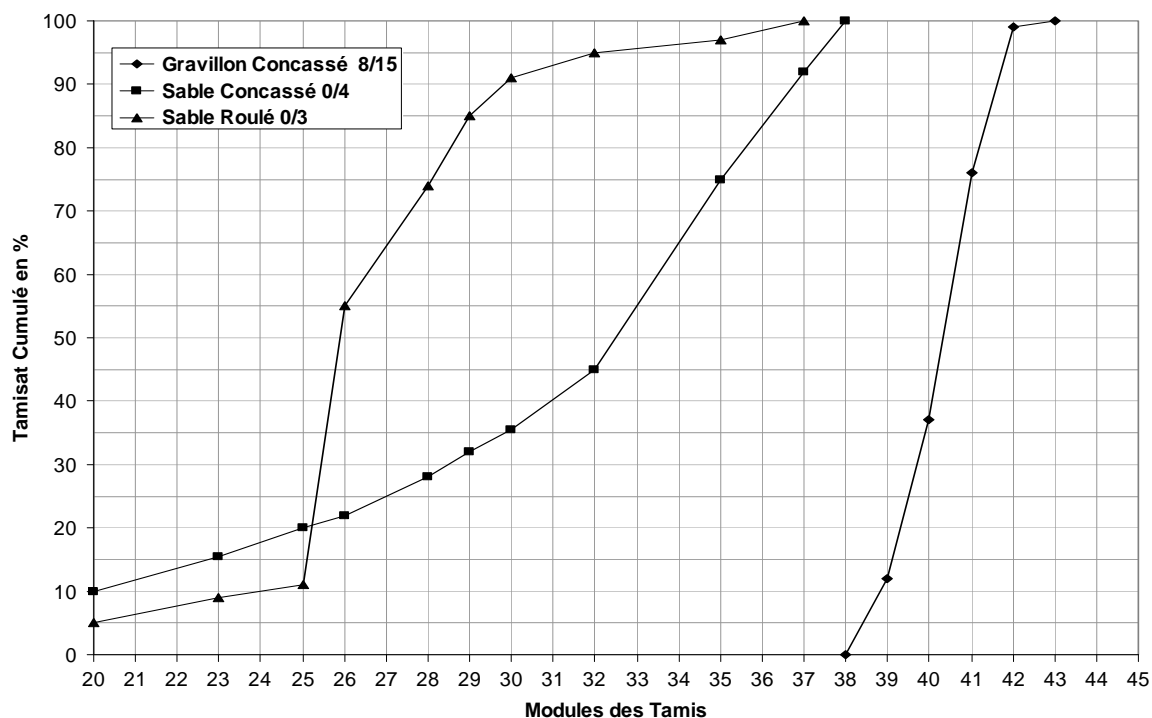


Figure 1 : Courbes granulométriques des granulats.

**Masse volumique absolue et apparente des granulats :** « NF P 18-554 » « NF P 18-555 »  
 Sur le tableau II.6, présente les masses volumiques apparente et absolues des granulats.

	Caractéristiques physiques des granulats		
	Sable 0/3	Sable 0/4	Gravillon 8/15
Masse volumique absolue	2,660	2,670	2,700
Masse volumique apparentes	1,500	1,440	1,544

Tableau 2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats.

**Propreté et absorption des granulats :**

	Sable 0/3	Sable 0/4	Gravillon 8/15
Equivalent de Sable ES (%)	86,36	79	-
Valeur au bleu de méthylène	0,21	0,39	-
Coefficient d'absorption (%)	0,9	1,1	1,35

Tableau 3 : propreté et absorption des granulats.

**Caractéristiques mécaniques des granulats :**

Lors de fabrication de béton, le malaxage est source de frottement intense entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; essai Los Angeles : cet essai est décrit en détail dans la norme NF P 18-573

- Résistance à l'usure ; essai Micro Deval : conforme à la norme NF P 18-572  
Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus. Ces résultats sont conformes aux normes.

<b>Caractéristiques mécaniques</b>	
<b>Propriétés mesurées</b>	<b>Granulats calcaires concassés</b>
	<b>8/15</b>
<b>LA (Los Angeles)</b>	23
<b>FD (Fragmentation Dynamique)</b>	18
<b>MD (Micro Deval)</b>	17

**Tableau 4:** Caractéristiques mécaniques des granulats.

#### **Composition chimique de granulat :**

Les essais chimiques effectués sur les différents granulats ont été réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics de l'est « LTP Est »

Les résultats obtenus conformes aux normes sont représentés dans le tableau 5.

<b>Caractéristiques chimiques des granulats utilisés</b>	
<b>Propriétés mesurées</b>	<b>Granulats calcaires concassés</b>
<b>Insoluble%</b>	1,9
<b>Sulfates %</b>	Traces
<b>Carbonates %</b>	89
<b>Chlorure %</b>	0,29

**Tableau 5:** Caractéristiques chimiques des granulats.

### **3. Ciment:**

Les ciments utilisés pour notre étude expérimentale sont un ciment de type CEM II/A 42,5 provenant de l'usine d'EL-Hamma région de Constantine.

Les différentes caractéristiques que se soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux 6,7,8 et 9.

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>chlorures</b>	<b>CaO libre</b>	<b>Résidus insolubles</b>	<b>P.A.F</b>
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

**Tableau 6 :** composition chimique du clinker.

<b>Eléments</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Teneur (%)</b>
<b>Silicate tri calcique</b>	C <sub>3</sub> S	56,60
<b>Silicate bi calcique</b>	C <sub>2</sub> S	22,98
<b>Aluminate tricalcique</b>	C <sub>3</sub> A	9,87
<b>Alummino-ferrite tetracalcique</b>	C <sub>4</sub> AF	8,25

**Tableau 7 :** Composition minéralogique du clinker.

Temps de prise		Expansion le chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
début	Fin	à chaud	à froid		
2h 50min	4h 06min	2,9	1,65	3891	26,91

**Tableau 8 : Propriétés physiques du ciment.**

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
<b>Compression</b>	143,2	266,4	433,1
<b>Flexion</b>	35,7	58,3	77,9

**Tableau 9 : Résistances mécaniques du ciment (bars).**

#### 4. Eau de gâchage :

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau de robinet, provenant de la source Fesguia qui alimente le laboratoire.

Nous avons soumis un échantillon de cette eau à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés au tableau 10.

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme NF P 18-303 relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous

Composant	Concentrations (mg/l)
Matière en suspension	Traces
Sels dissous	1470
Sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ )	413,56
Chlorures (Cl)	298,2
PH	7,9
Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ )	36
Magnesium ( $\text{Mg}^{+2}$ )	60
Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )	27
Carbonates	3,5
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	19

**Tableau 10 : Analyse chimique effectuée sur l'eau.**

#### 5. Adjuvant (Superplastifiant) (EN934-2) :

Dans notre étude on a utilisé le Superplastifiant **MEDAPLAST SP 40**: (Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

Il se caractérise par :

- Forme.....Liquide
- Couleur.....Marron
- PH.....8,2

- Densité..... 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore..... < 1g/L

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité
- d'augmenter la maniabilité
- de réduire l'eau de gâchage
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

## 6. Les Fillers :

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm, des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, noté UF ; dont les principales caractéristiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG.

Composant	Teneur en %	Composant	Teneur en %
SiO <sub>2</sub>	0.06	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	CaCO <sub>3</sub>	99
MgO	0.01	SO <sub>3</sub>	0.01
Perte au feu	43.8	PH	9

**Tableau 11 :** Composition chimique du fillers calcaire.

Fillers	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
UF20	2.7 Kg/l	1.23	92%	18%	0.1%

**Tableau 12 :** Caractéristiques physiques des fillers

En ce qui concerne les morphologiques du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers « diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieur » est de l'ordre 19µ. 98% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200µ, et 26% un diamètre inférieur à 10µ.

## 7. Fibres :

Les fibres utilisés, sont des fibres métalliques industrielles de 50mm de longueur et 2mm de largeur et 0,4 d'épaisseur, de forme ondulés, provenant du complexe industriel Granitex, Oued Smar, Alger.

Le choix de ce type de fibre est justifié par la forme qui donne une bonne adhérence avec la matrice.

Les caractéristiques des fibres utilisées sont données dans le tableau 13.

Type	Long (mm)	Larg (mm)	Epais (mm)	forme	Elancement Long/epais	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
Acier	50	2	0,4	ondulé	125	7200

**Tableau 13 :** Caractéristiques des fibres.