

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Magister

Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie

Département de : **Génie Civil**  
Option : **Matériaux et Structures**

Par : **Ferhani Kamel**

---

### Thème : Etude de l'absorption d'eau des bétons auto-plaçants

---

Sous la direction de : **Dr. Cherait Yacine**

#### JURY

Président	<b>Benmalek M-Larbi</b>	Pr.	Université de Guelma
Examinateur	<b>Habita Faouzi</b>	Pr.	Université d'Annaba
Examinateur	<b>Benouis A-Halim</b>	MC/A	Université de Guelma
Examinateur	<b>Nafa Zahredinne</b>	MC/A	Université de Guelma

*Janvier 2010*

## Remerciements

Avant de remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au cours de ma thèse de magister et celles qui ont permis son bon déroulement, mes premiers mots iront à mon encadreur, monsieur CHERAIT Yacine, maître de conférences à l'université de Guelma. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance, tant pour ses conseils, son intérêt et sa vaste culture que pour la confiance qu'il m'a accordée pendant ce projet de recherche, merci de m'avoir ouvert les portes du monde passionnant de la recherche expérimentale, et ce malgré tous ces aléas et difficultés

La présente étude s'est déroulée au Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université 08 Mai 45 de Guelma. Je remercie le directeur, Monsieur le Professeur GEUNFOUD Mohamed, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Mes remerciements vont particulièrement à Mr. BENMALEK M/larbi président du comité scientifique du département de Génie Civil, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie vivement Mr. HABITA Faouzi Professeur à l'université d'Annaba, Mr. BENOUISS Abdelhalim, maître de conférences à l'université de Guelma et Mr. NAFAA Zahreddine maître de conférences à l'université de Guelma, d'avoir accepté de rapporter ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude au responsable scientifique de cette post-graduation, monsieur BENMARCE A/aziz, chef de département à l'université de guelma.

Moins solennellement, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille, plus particulièrement ma mère, ma femme mes enfants OUAIL Abdelaziz et ANES, pour leur présence et leur affection permanentes, qui m'ont permis d'en arriver là.

Mes chaleureux remerciements au corps enseignant ayant assuré notre magister, à savoir : Benmalek M/larbi, Guenfoud Mohamed, Benmarce A/aziz, Benhamza Hocine , Benouis A/halim, Cherait Yacine, Nafaa Zahreddine, Mansouri Rachid et Achouche Jamel.

Mes plus vifs remerciements à messieurs : Khadri Youcef et Boudjehem Hocine.

Je tiens à remercier pleinement mon ami monsieur Mekerci Yacine pour son aide dans la préparation des essais.

A mes collègues de promotion :Guergueh Cherif, Bechiri Farouk,Laouaouda Djamel, Nahal Abdallah, Hadri Samia, Harbi radia, et Djahaichia Salima à qui je souhaite finalisation de leur travaux de recherche.

**Merci enfin, à tous mes amis et plus particulièrement :**

**Chikh Rachid, Diaf Cherif , Lahiouel Ilacène, Rahim Abderrazek, Guerfia Sulim, Saadi Azzou Meradji Abderrazek, Guerairia Said, Meheddine Mohamed et Khalfa Youcef, amis sur quoi je pourrai toujours compter.**

## ملخص

الخرسانات ذاتية التوّضع (التوّزع) هي مواد في غاية السيولة تتوضع في موقعها دون هز، ولها عموماً خصائص ميكانيكية مماثلة لخصائص الخرسانات المرتجلة (العادية).

في حين الديمومة، التي تمثل عامل أساسى في تمديد عمر المنشآت، تبقى ظاهرة غير متحكم فيها جيداً وهذا راجع لندرة الأبحاث حول الخرسانات ذاتية التوّضع، وخاصة تأثيرات امتصاص الماء بالخاصية الشعرية في منطقة طبقة التغليف للخرسانات ذاتية التوّضع.

وللمساهمة في هذا الموضوع، قمنا بدراسة تجريبية لقياس امتصاص الماء في اتجاه واحد والمسامات المهيأة لنفود الماء إليها على مخبرات اسطوانية الشكل.

لقد قمنا باختبار خرسانة ذاتية التوّضع حضرت بواسطة مكونات محلية وكوسبيط تأثير تركيز الإسمنت وشروط حفظ المخبرات.

النتائج المحصل عليها قورنت مع النتائج الخاصة بالخرسانات المرتجلة (العادية) التي حضرت بنفس المكونات الأساسية.

وبالإضافة، لقد أجرينا تجارب لتحديد الخصائص للخرسانة في الحالة الطرية.

المادة:

مواد

كلمات أساسية:

خرسانة ذاتية التوّضع - تحضير - حالة طرية - امتصاص بالخاصية الشعرية - مسامية مهيأة لنفود الماء إليها.

مخبر الاستقبال:

مخبر الهندسة المدنية والري ، جامعة 8 ماي 45 ، قالمة.

## RESUME

Les Bétons Autoplaçants (BAP) sont des matériaux extrêmement fluides qui se mettent en place sans vibration, et qui présentent en général des performances mécaniques analogues à ceux des bétons vibrés. Cependant la durabilité, qui représente un facteur capital dans la longévité des ouvrages, reste encore un phénomène non encore maîtrisé parfaitement à cause de la rareté des recherches sur les BAP, et ce plus particulièrement les effets de l'absorption de l'eau par capillarité sur la zone d'enrobage des BAP. Pour y contribuer, nous avons entrepris une étude expérimentale de mesure d'absorption d'eau monodirectionnelle et de porosité accessible à l'eau sur des éprouvettes de forme cylindrique. Nos avons testés des BAP formulés à partir de constituants locaux avec comme paramètres l'influence du dosage en ciment et de la cure. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de bétons vibrés composés à partir des mêmes constituants de base. Des essais de caractérisation à l'état frais sont également présentés.

---

### DISCIPLINE :

Matériaux et structures

---

### MOTS-CLES :

Bétons Autoplaçants (BAP), Formulation, Etat frais, Absorption capillaire, Porosité accessible.

---

### LABORATOIRE D'ACCUEIL :

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique, Université 08 Mai 45, Guelma.

## ABSTRACT

Self compacting concretes (SCC) and can be placed into formwork without vibration, and that present mechanical performances similar to those of vibrated concrete. However, the durability which represents a crucial factor in the longevity of the works, still remains a phenomenon not yet perfectly mastered because of the scarcity of the researches on the SCC, and this more particularly the effects of the absorption of water by capillary on the covering zone of SC C. To contribute to it, we have undertaken an experimental study of measure of monodirectionnel water absorption and of accessible porosity on test pieces cylindrical in shape. We have tested SCC formulated from local constituents as parameters and the influence of the dosage in cement and of the cure. The obtained results have been compared to those of vibrated concrete composed of the same basic constituents. Tests of fresh state characterisation are also presented.

## **DISCIPLINE :**

Materiels and structures

---

## **KEY WORDS :**

---

Self compacting concretes (SCC), formulation, fresh state, capillary absorption, accessible porosity.

---

## **HOME LABORATORY**

Laboratory of Civil Engineering and Hydraulics, University 08 May 45, Guelma

## Liste des figures

- Fig.I.1: Durant la mise en place et l'écoulement du BAP, les granulats «nagent» à la surface sans ségrégation.
- Fig.I.2: Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.
- Fig.I.3: Coulage d'une dalle en BAP
- Fig.I.4: Exemples de mise en œuvre des BAP
- Fig.I.5: Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance
- Fig.I.6: Mise en œuvre d'un BAP renforcé de fibres pour des travaux de réhabilitation
- Fig.I.7: Domaine de classification des bétons étendus au BAP [W1]
- Fig.I.8: Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [S4]
- Fig.I.9: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [B2]
- Fig.I.10: Interaction entre l'eau et les polysaccharides d'après [I13]
- Fig.I.11: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, d'après Tangtermsirikuls [T2]
- Fig.I.12: Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré (d'après [J1])
- Fig.I.13: Détermination de l'étalement au cône
- Fig.I.14: Représentations schématique et photographique de l'essai de boîte en L (L-Box)
- Fig.I.15: Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton
- Fig.I.16: Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)
- Fig.I.17: Essai de stabilité au tamis
- Fig.I.18: Essai à la bille (à gauche) et à la colonne (à droite)
- Fig.I.19: Essai de ressauage à l'aéromètre
- Fig.I.20: Rhéomètres développés pour les bétons :  
(a) BTRHEOM [L3],  
(b) BML,  
(c) Two-point test [N2].
- Fig.I.21: Comparaison entre l'étalement et le seuil d'écoulement  
(a) résultats de Emborg [E1],  
(b) résultats de Ferraris et De Larrard [F3].
- Fig.I.22: (a) Corrélation entre la viscosité et la mesure du temps d'écoulement au Vfunnel[U2],  
(b) corrélation entre la viscosité et le temps d'étalement T50 (étalement mesuré dans ce cas en centimètres) [E1]
- Fig.I.23: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [G1]
- Fig.I.24: Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [P5]
- Fig.I.25: Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [T1]
- Fig.I.26: Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [P6]
- Fig.I.27: Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [P7]
- Fig.I.28: Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [H5]
- Fig.I.29: Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) [R1]

Fig.II.1: Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier  
Fig.II.2: Mesure de la masse absolue  
Fig.II.3: Détermination de la teneur en eau  
Fig.II.4: Mesure de la propreté des graviers  
Fig.II.5: Analyse granulométrique  
Fig.II.6: Allure de la courbe granulométrique du gravier  
Fig.II.7: Détermination de la dureté au Los Angeles  
Fig.II.8: Mesure de la masse volumique apparente du sable  
Fig.II.9: Mesure de la masse volumique absolue du sable  
Fig.II.10: Mesure de la compacité du sable  
Fig.II.11: Mesure de la teneur en eau du sable  
Fig.II.12: Courbe granulométrique du sable  
Fig.II.13: Mesure de la propreté du sable  
Fig.II.14: Moule utilisé pour la mesure de l'étalement du mortier  
Fig.II.15: Les photos représentent les étalements du mortier contenant divers % d'adjuvant  
Fig.II.16: Étalement du mortier en fonction du % du Medafluid SFR120  
Fig.II.17: Étalement en fonction du % de Plastimcnt BV40  
Fig.II.18: Courbe de référence selon Faury  
Fig.II.19: Courbe optimale pour le BV dosé à 350Kg/m<sup>3</sup>  
Fig.II.20: Mesure de l'étalement du BAP 350  
Fig.II.21: Mesure de la boite en L  
Fig.II.22: Mesure du temps d'écoulement du béton  
Fig.II.23: Mesure de la stabilité des BAP  
Fig.II.24: Mesure de la densité des BAP à l'état frais  
Fig.II.25: Moules cylindriques utilisés  
Fig.II.26: Mesure de la résistance à la compression  
Fig.II.27: Loi de comportement en compression du BAP 400  
Fig.II.28: Rupture des éprouvettes en BAP

Fig.III.1 : Variations des hauteurs d'eau dans les capillaires  
Fig.III.2 : Préparation et coulage des éprouvettes  
Fig.III.3 : Conservation des éprouvettes sous eau pour une cure de 3 et 28 jours  
Fig.III.4 : Opération de paraffinage des éprouvettes  
Fig.III.5 : Opération de paraffinage des éprouvettes  
Fig.III.6 : Absorption capillaire du BAP350 sans cure  
Fig.III.7 : Absorption capillaire du BAP400 sans cure  
Fig.III.8 : Absorption capillaire du BV400 sans cure  
Fig.III.9 : Absorption capillaire du BV350 sans cure  
Fig.III.10 : Absorption capillaire du BAP350  
Fig.III.11 : Absorption capillaire du BAP400  
Fig.III.12 : Absorption capillaire du BAP350 avec cure de 28j  
Fig.III.13 : Absorption capillaire du BAP350 avec cure de 3j  
Fig.III.14 : Absorption capillaire du BAP400 avec cure de 28j  
Fig.III.15 : Absorption capillaire du BAP400 avec cure 3j  
Fig.III.16 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF) [Z1]  
Fig.III.17 : Illustration des pores accessibles et non accessibles dans le béton  
Fig.III.18 : Mesure de la porosité accessible selon la norme ASTM C642  
Fig.III.19 : Porosité accessible à l'eau du BAP350

Fig.III.20 : Porosité accessible à l'eau du BAP400

Fig.III.21 : Porosité accessible à l'eau du BV350

Fig.III.22 : Porosité accessible à l'eau du BV400

Fig.III.23 : Porosité accessible à l'eau des bétons avec cure de 28j

Fig.III.24: Porosité accessible à l'eau des bétons avec cure de 3j

Fig.III.25 : Porosité accessible à l'eau des bétons sans cure – Air-

## Liste des tableaux

- Tableau I.1 : Processus d'élaboration du béton  
Tableau I.2 : Classification des BAP selon leur application [P1]  
Tableau I.3 : Exemples de compositions types pour BAP  
Tableau I.4 : Valeurs expérimentales du coefficient K, en mm.an<sup>1/2</sup>, pour deux expositions différentes [A5]  
Tableau I.5 : Profondeurs de carbonatation de deux BAP et d'un béton vibré à hautes performances (t0=28 jours)[R1]
- Tableau II.1 : Résultats des mesures de la masse apparente du gravier  
Tableau II.2 : Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravier  
Tableau II.3 : Teneur en eau des graviers lors des essais  
Tableau II.4 : Résultats des mesures de la propreté des graviers  
Tableau II.5 : Analyse granulométrique du gravier 5/12.5  
Tableau II.6 : Valeurs de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé  
Tableau II.7 : Valeurs du coefficient d'absorption du gravier  
Tableau II.8 : Résultats des essais sur le gravier.  
Tableau II.9 : Résultats de la mesure apparente du sable  
Tableau II.10 : Résultats de la mesure absolue du sable  
Tableau II.11 : Résultats de la compacité du sable  
Tableau II.12 : Valeurs de la porosité du sable  
Tableau II.13 : Teneur en eau du sable  
Tableau II.14 : Analyse granulométrique du sable  
Tableau II.15 : Résultat de l'équivalent de sable  
Tableau II.16 : Résultats des essais sur le sable.  
Tableau II.17 : Test d'efficacité du MEDAFLUID SFR 122  
Tableau II.18 : Test d'efficacité du PLASTIMENT BV40  
Tableau II.19 : formulation du béton témoin (béton vibré) C = 350Kg/m<sup>3</sup>  
Tableau II.20 : Formulation du béton témoin (béton vibré) C = 400Kg/m<sup>3</sup>  
Tableau II.21 : Mesures de la fluidité à la boite en L pour le BAP350  
Tableau II.22 : Densités des bétons utilisés à l'état frais  
Tableau II.23 : Résistances en compression des compositions utilisées
- Tableau III.1 : Composition et résistance des bétons utilisés  
Tableau III.2 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BAP350 sans et avec cure de 3 et 28 J  
Tableau III.3 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BAP400 sans et avec cure de 3 et 28 J  
Tableau III.4 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BV400 sans et avec cure de 3 et 28 J  
Tableau III.5 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BV350 sans et avec cure de 3 et 28 J  
Tableau III.6 : Masse absorbée au bout de 65 heures  
Tableau III.7 : Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC) [B9]  
Tableau III.8: Mesure de la porosité accessible des bétons testés

# Table des matières

## REMERCIEMENTS

مُلْكِعْصَنْ

## RESUME

## ABSTRACT

## Liste des figures

## Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I Etat des connaissances sur les BAP

I.1. INTRODUCTION .....	3
I.1.1. Historique du BAP .....	3
I.1.2. Définition .....	4
I.1.3. Rappels sur les techniques de mise en place du béton .....	6
I.1.4. Mise en œuvre .....	6
I.1.5. Domaines d'emploi .....	9
I.1.6. Formulation des BAP .....	12
I.1.6.1. Introduction .....	12
I.1.6.2. Cahier des charges minimum à l'état frais .....	14
I.1.6.3. Particularités de la composition des BAP .....	15
I.1.7. Contrôles sur béton frais .....	21
I.1.7.1-Essai d'étalement (Slump-Flow) .....	21
I.1.7.2-Essai de boite en L (L-Box) .....	22
I.1.7.3-Essai d'entonnoir (V-Funnel) .....	23
I.1.7.4-Essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	24
I.1.7.5-Stabilité .....	25
I.1.8. Mesures rhéologiques et corrélation avec les essais empiriques .....	27
I.2. PROPRIETES DU BETON DURCI .....	32
I.2.1. PROPRIETES MECANIQUES .....	32
I.2.1.1.Résistance mécanique .....	33
I.2.1.2. Retrait (état frais, état durci) .....	34

I.2.2.Retrait plastique .....	37
I.2.3 Retrait endogène .....	38
I.2.4.Retrait de dessiccation .....	40
I.3. DURABILITE DES BAP .....	41
I.4.CARBONATATION .....	42
I.4.1.Généralités .....	42
I.4.2.Etudes relatives aux BAP .....	42
I.4.3. Autres propriétés de durabilité .....	43
I.5.CONCLUSIONS DU CHAPITRE ET ORIENTATION DE LA THESE .....	45

## **CHAPITRE II**

### **Caractérisation des constituants et formulation des bétons**

II.1. CARACTERISATION DES CONSTITUANTS .....	46
II.1.1.Caractérisation du gravier .....	46
II.1.1.1-Mesure de la masse volumique apparente du gravier selon la norme NA 25550 .....	47
II.1.1.2-Mesure de la masse volumique absolue selon la norme NA 255 .....	48
II.1.1.3-Mesure de la teneur en eau des graviers (NA 255) .....	50
II.1.1.4-Mesure de la propreté .....	52
II.1.1.5-Analyse granulométrique (NA 2607) .....	54
II.1.1.6-Résistance au choc (Essai Los Angeles) (NA 458) .....	56
II.1.1.7- Absorption d'eau (NA 255) .....	58
II.1.2. Caractérisation du sable .....	60
II.1.2.1-Mesure de la masse volumique apparente du sable (NA 451) .....	60
II.1.2.2-Masse volumique absolue (NA 451) .....	61
II.1.2.3-Mesure de la compacité .....	62
II.1.2.4-Porosité .....	63
II.1.2.5-Teneur en eau (NA 451) .....	64
II.1.2.6-Analyse granulométrique (NA 2607) .....	66
II.1.2.7-Equivalent de sable (NA 455) .....	67
II.1.3. Les adjuvants .....	71
II.1.3.1-Définition et rôles des adjuvants .....	71
II.1.3.2-Classification des adjuvants .....	71

II.1.3.3-Essais sur les adjuvants .....	72
II.2 FORMULATION DES BETONS .....	76
II.2.1 Formulation des bétons vibrés .....	76
<i>Cas 1 : Pourcentage du ciment C = 350Kg/m<sup>3</sup></i> .....	77
<i>Cas 2 : Pourcentage du ciment C = 400 Kg/m<sup>3</sup></i> .....	80
II.2.2 Composition des BAP .....	82
<i>Rôle des fines</i> .....	82
<i>Adjuvant</i> .....	82
<i>Formulation de départ</i> .....	83
II.2.2.1-Formulation du BAP350 .....	83
<i>Mesure de l'étalement au cône d'Abra'm's</i> .....	83
II.2.2.2-Formulation du BAP400 .....	85
II.2.2.3-Etude de la stabilité des BAP .....	85
<i>Mesure boite en L</i> .....	85
<i>Essai d'entonnoir (V-Funnel)</i> .....	86
<i>Mesure de la stabilité au tamis</i> .....	87
II.2.2.4 Essais sur les compositions .....	88
<i>Mesure de la densité à l'état frais</i> .....	88
<i>Mesure de la résistance à la compression</i> .....	89

### **CHAPITRE III**

#### **Etude expérimentale de l'absorption capillaire d'eau**

III.1. PRESENTATION DU PHENOMENE DE L'ABSORPTION .....	92
III.2. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ABSORPTION D'EAU DES BETONS .....	96
III.2.1 Processus expérimental .....	96
III.2.1.1. Confection des éprouvettes .....	96
III.2.1.2. Cure des bétons .....	97
III.2.1.3.Essai .....	97
<i>Paraffinage des faces latérales</i> .....	97
III.2.2. Influence de la cure .....	104
III.2.2.1. Autres résultats de l'absorption relatives aux BAP ces résultats vont servir de référence avec nos résultats .....	108

III.4. MESURE DE LA POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU .....	109
III.4.1. Introduction .....	109
III.4.2. Mesure de la porosité accessible selon la norme ASTM C642 .....	110
III.4.3. Procédure et résultats .....	111
III.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	116
 REFERENCES .....	117
ANNEXES .....	123
ANNEXE A : Fiches technique des adjuvants utilisés	
ANNEXE B : Résultats des essais de caractérisation du gravier	
ANNEXE C : Résultats des essais de caractérisation du sable	
ANNEXE D : Résultats des essais de l'absorption d'eau	

# Introduction générale

Les Bétons Auto Plaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de «nouveaux bétons» car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, en témoigne la diversité des études menées afin d'appréhender le comportement des BAP.

Par ailleurs, la durabilité qui est un facteur clé dans la durée de vie des ouvrages reste encore très peu étudiée, et plus particulièrement l'absorption capillaire.

L'objectif de ce travail est d'apporter des éléments permettant de comprendre la cinétique de l'absorption capillaire ainsi que les effets du dosage en liant et de la cure sur des BAP élaborés à partir de granulats locaux.

**Le premier chapitre** du mémoire est consacré aux connaissances actuelles des propriétés des BAP. Les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons sont présentées ainsi que les propriétés mécaniques.

**Le deuxième chapitre** constitue une étape expérimentale préliminaire pour la formulation de BAP à partir de constituants locaux. Ainsi sont présentés les essais de caractérisation du sable, du gravier et de l'adjuvant. La deuxième partie a été consacrée à l'étude de la formulation de deux bétons vibrés, appelées à servir de référence, et de deux BAP élaborés à partir des mêmes constituants.

**Le troisième chapitre** est consacré à la présentation des résultats d'une campagne d'essais menée sur des éprouvettes cylindriques, de l'absorption capillaire monodirectionnelle des BAP. Le dispositif expérimental utilisé permet de mesurer la masse absorbée par capillarité. Des essais de porosité accessible à l'eau ont été également effectués.

## CHAPITRE I

# Etat des connaissances sur les BAP

## I.1. INTRODUCTION

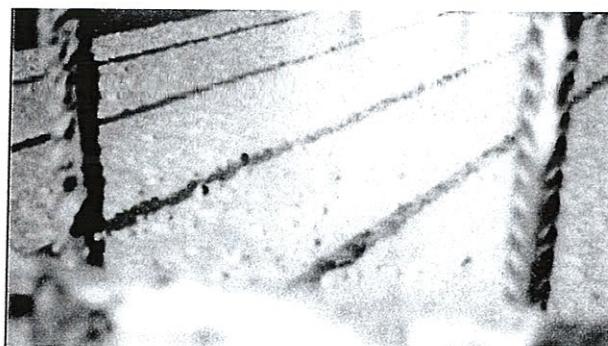
Le béton est de nos jours le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Cet emploi massif s'explique par les nombreuses qualités qu'offre ce matériau : bonne résistance à la compression et au cisaillement, bonne résistance à diverses agressions, durabilité satisfaisante, coût relativement supportable. Depuis sa découverte, le béton a toujours été un matériau de construction innovant. Plusieurs recherches se poursuivent dans le monde, en vue d'améliorer ses propriétés à l'état frais et durci, étudier ses comportements à court et à long terme. Ainsi depuis le béton traditionnel, d'autres types de bétons ont vu le jour ; béton de fibres, béton lourds, béton légers, béton autonettoyant, béton à très hautes performances, béton auto-plaçant, etc.

### I.1.1. Historique du BAP

Le premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 par le professeur OKAMURA [O1] de l'université de Kochi au Japon. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont. Cette découverte en matière technologique du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux Pays bas et en Suisse. Depuis son utilisation ne cesse de croître.

### 1.1.2. Définition

Par définition les bétons autoplaçants (dénomination anglaise Self Compacting Concrete) sont des bétons très fluides, homogènes et stables qui se mettent en place par **gravitation** et **sans vibrations**. Ils ne doivent pas subir de ségrégation et présenter des qualités rhéologiques et mécaniques comparables à celles d'un béton vibré classique (Fig.I.1).



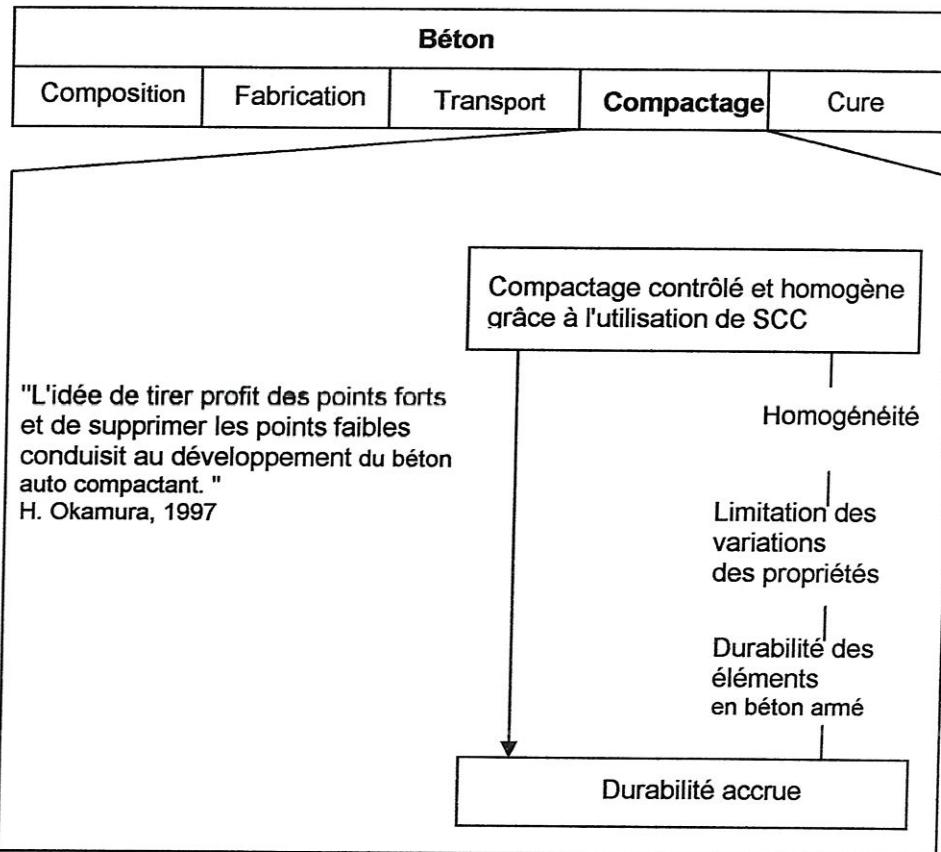
**Fig. I.1 : Durant la mise en place et l'écoulement du BAP, les granulats «nagent» à la surface sans ségrégation.**

L'innovation principale BAP réside essentiellement dans la phase du compactage, dont l'élimination présente plusieurs avantages dont notamment :

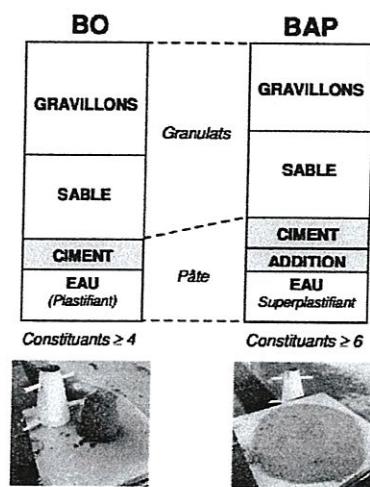
- Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnel par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des sons sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains)
- rendements améliorés et exécution plus rapide
- liberté accrue des formes de coffrage
- facilité de bétonnage d'éléments exigus
- qualité accrue des surfaces de béton
- réduction/suppression des travaux de râgréage
- facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- remplissage de parties difficilement accessibles
- diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibrateur.

Le tableau suivant présente le processus d'élaboration d'un béton [H1].

*Tableau I.1 Processus d'élaboration du béton*



En terme de constituants, la aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :



*Fig. I.2 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.*

### I.1.3. RAPPELS SUR LES TECHNIQUES DE MISE EN PLACE DU BETON

Pour effectuer le compactage du béton, on dispose de plusieurs techniques dont notamment :

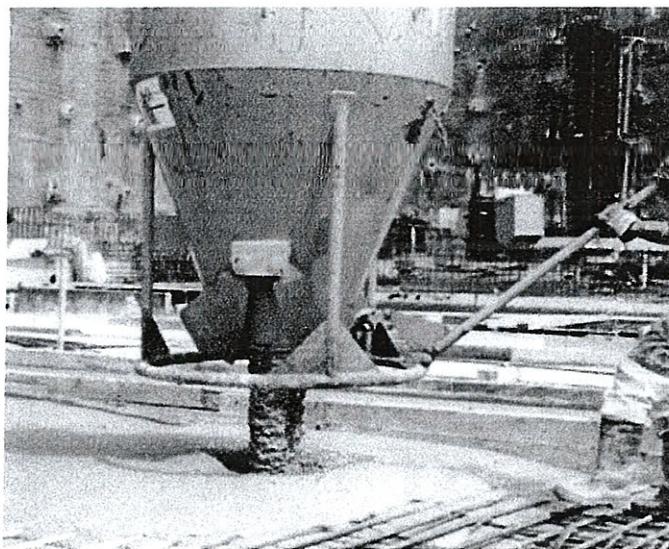
1. le piquage : c'est le moyen le plus ancien, et consiste à bourrer le béton dans le moule à l'aide de tiges métalliques. Le serrage reste médiocre, sauf pour les bétons plastiques, riches en sable et eau conviennent. C'est un procédé couramment utilisé par les artisans locaux (qui utilise souvent des chutes de ferraille pour le compactage).
2. le damage : cette technique consista à damer les surfaces horizontales du béton frais ; il en résulta un serrage efficace sur une épaisseur de trois fois la dimension du plus gros granulat. C'est un procédé fréquemment utilisé pour la mise en place des dalles par exemple.
3. les vibrations :
  - 3.1. vibrations internes : on utilise une aiguille vibrante.
  - 3.2. vibrations externes : on utilise des tables vibrantes.

C'est la technique par vibration qui est de nos jours la plus utilisée. La technique reste très efficace mais elle est assez pénible et surtout trop bruyantes.

### I.1.4. MISE EN ŒUVRE

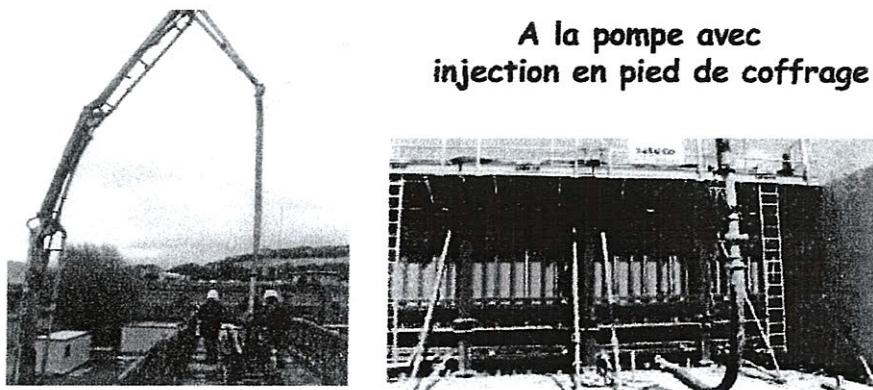
La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale. En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisés, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [A1]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux (Fig. I.3 et Fig. I.4).



*Fig.I.3 : Coulage d'une dalle en BAP*

**A la pompe avec  
injection en pied de coffrage**



*Fig. I.4 : Exemples de mise en œuvre des BAP*

D'après les recommandations de l'AFGC [A1], quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5m.

Toujours d'après les recommandations provisoires de l'AFGC [A1], les données relatives à la poussée exercée par le béton frais sur le coffrage ne sont pas suffisantes pour fixer des règles précises sur ce point. Différentes études ont été menées depuis sur le sujet. Billberg [B1], déclare que lorsque les BAP ont été développés, il était généralement admis qu'ils généreraient une pression hydrostatique. Or différentes études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage [B1, L1]. Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos [O2]. La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer [O2].

Concernant la préparation des coffrages, notamment vis à vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons traditionnels [A1]. Les recommandations de la FFB [F1] précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme 5-25°C, des dispositions particulières sont à prendre [F1, P1]. Une attention particulière doit être portée à la cure des BAP, à la protection mise en œuvre pour éviter l'évaporation, et particulièrement dans le cas d'applications horizontales. Le faible ressauage des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait plastique

[A1, T1]. D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre [A1].

D'après les recommandations de la FFB [F1], comme pour tous les bétons ayant reçu un produit de cure, le ponçage ou le grenaiillage est obligatoire avant la pose de tout revêtement solidaire au support. Cette préparation doit être réalisée le plus tard possible dans le cas des bétons autonivellants (applications horizontales), au minimum après 28 jours.

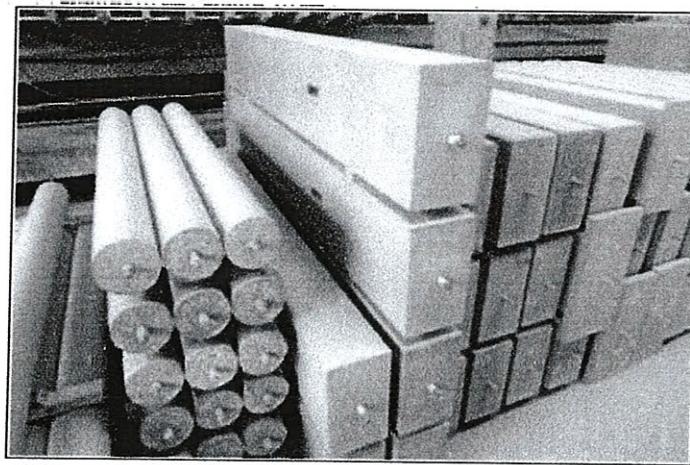
La mise en œuvre d'un BAP est plus simple que celle d'un béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Certaines précautions supplémentaires sont à prendre, lors de la préparation des coffrages par exemple (propreté, étanchéité...), mais globalement les consignes restent similaires à celles définies pour les bétons traditionnels.

### I.1.5. DOMAINES D'EMPLOI

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

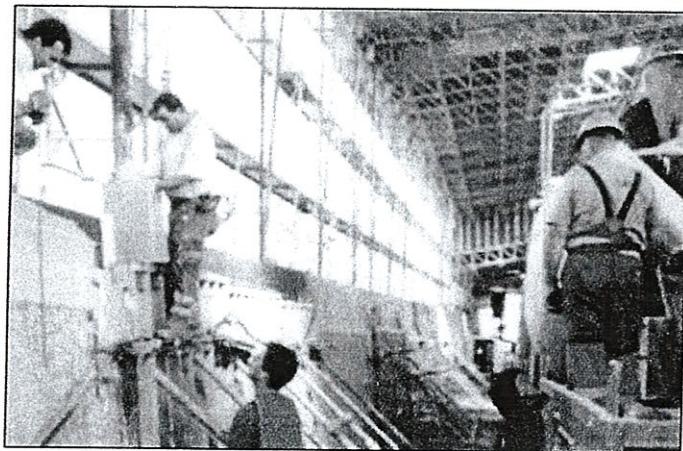
- possibilité de coulage de zones fortement ferraillées,
- possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages. (exemple Fig. I.5.)



*Fig. I.5 : Eléments préfabriqués en BAP à haute résistance*

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage. L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. (Fig. I.6.)



*Fig. I.6 : Mise en œuvre d'un BAP renforcé de fibres pour des travaux de réhabilitation*

Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc. Walraven [W1] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de

production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût.

Par ailleurs, Walraven [W1] rappelle à juste titre que la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide). L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure I.7.

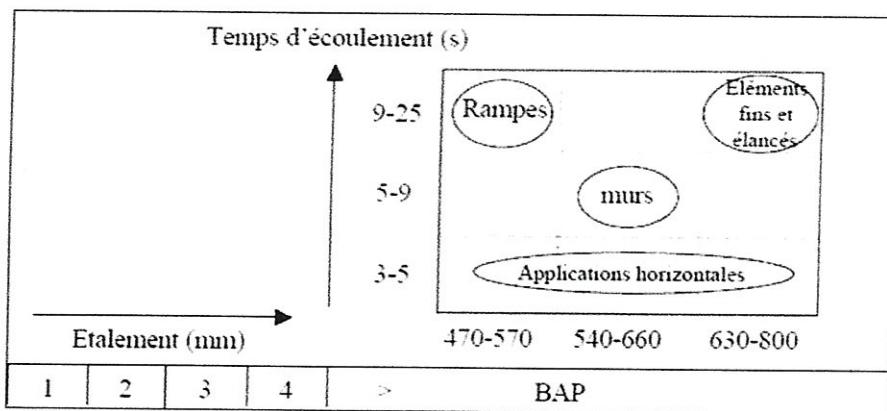


Fig. I.7: Domaine de classification des bétons étendus au BAP [W1]

Les mesures d'étalement et de temps de d'écoulement sont respectivement réalisées au cône d' Abrams et au V-funnel. Ces essais seront décrits ultérieurement.

De la même manière, en France, les BAP seront dorénavant classés selon trois catégories suivant leur domaine d'application. Le classement s'effectue selon leur intervalle

d'écoulement I (tenant compte de la géométrie du coffrage et de la disposition des armatures), le type d'application, et l'épaisseur de la structure dans le cas d'une application horizontale [P1].

**Tableau I.2 : Classification des BAP selon leur application [P1]**

Intervalle d'écoulement (mm)	Application horizontale		Application verticale
	Epaisseur $\leq 300\text{mm}$	Epaisseur $> 300\text{mm}$	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I \leq 100$	2	2	3
$I < 80$	3	3	3

Les classes 2 et 3 contiennent deux sous-classes en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP : 5m pour les classes 2a et 3a, 10 m pour les classes 2b et 3b. Les chantiers, où la solution BAP a été retenue, montrent l'intérêt de ces bétons. Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en œuvre, la réduction des délais et la qualité des parements [B3].

En termes de résistances mécaniques, des BAP « ordinaires » aussi bien que des BAP « Hautes Performances » peuvent être mis au point [C1]. Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Bien que leur formulation et leur contrôle, lors de la mise en œuvre, nécessitent une attention particulière, différents exemples ont mis en évidence les possibilités techniques qu'ils offrent. Outre le fait qu'ils couvrent la gamme des propriétés mécaniques usuelles, les qualités esthétiques des parements obtenus devraient rapidement séduire les maîtres d'ouvrage. Les caractéristiques techniques des BAP ont par ailleurs une implication directe du point de vue économique mais aussi social.

## I.1.6. FORMULATION DES BAP

### I.1.6.1. *Introduction*

La formulation de BAP est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura

et Ouchi ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. La méthode développée par O. Petersson et al. [P2] vise à trouver la teneur maximale de granulat sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et al. [B4] ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par N. Su et al. [S1], un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulat et de pâte. Sedran et de Larrard [S2] ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire. Récemment, basé sur le travail d'A.W. Saak et al [S3], L. Ferrara et al. [F2] ont établi une zone autoplaçante pour la formulation du BAP fibré.

Une nouvelle méthode de formulation de BAP a été développée en se servant des méthodes existantes. Elle a l'avantage d'être simple à utiliser. En effet, seulement deux types d'essais, à savoir essai de compactage pour le granulat et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires. La première particularité de la méthode est la prise en compte directe de l'influence de super plastifiant sur le comportement de la pâte à l'état frais. Ceci a été réalisé à l'aide d'un plan d'expérience permettant de relier la pâte de ciment (ou la pâte de filler), le super plastifiant et l'étalement de la pâte grâce à un petit nombre d'essais. La deuxième particularité est le développement d'un nouveau processus de calcul de mélange de la pâte et des granulats basé sur la théorie d'excès de pâte. La dernière particularité de cette méthode est qu'elle permet de confectionner aussi bien des bétons ordinaires que ceux à hautes performances pour une valeur de résistance préalablement fixée.

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt porté. Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- la première [H2, N1] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par

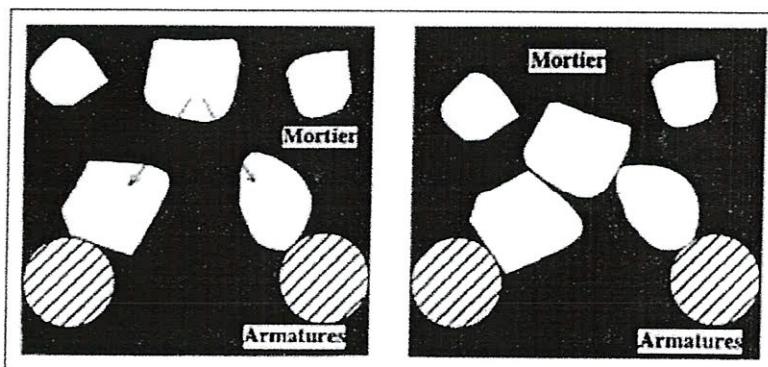
conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [P3]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

#### *1.1.6.2 Cahier des charges minimum à l'état frais*

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisaillent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure I.8). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée.



*Fig. 1.8 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [S4]*

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

#### *I.1.6.3. Particularités de la composition des BAP*

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

##### **Un volume de pâte élevé**

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écartier les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m<sup>3</sup>).

##### **Une quantité de fines ( $\text{Ø} < 80\mu\text{m}$ ) importante**

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m<sup>3</sup>) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui

déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure I.9) [B2].

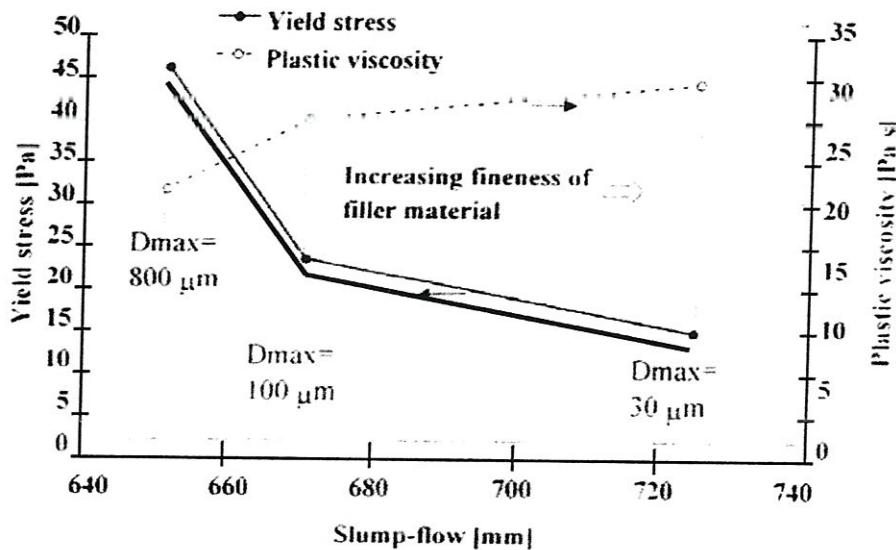


Fig. I.9 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [B2]

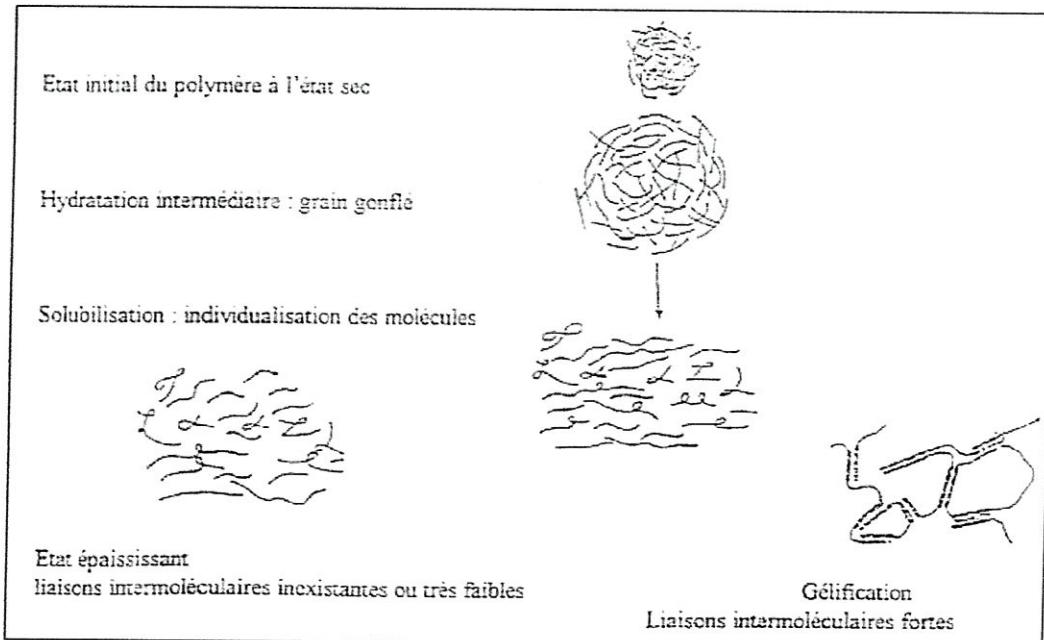
### L'emploi de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de flocculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [B5].

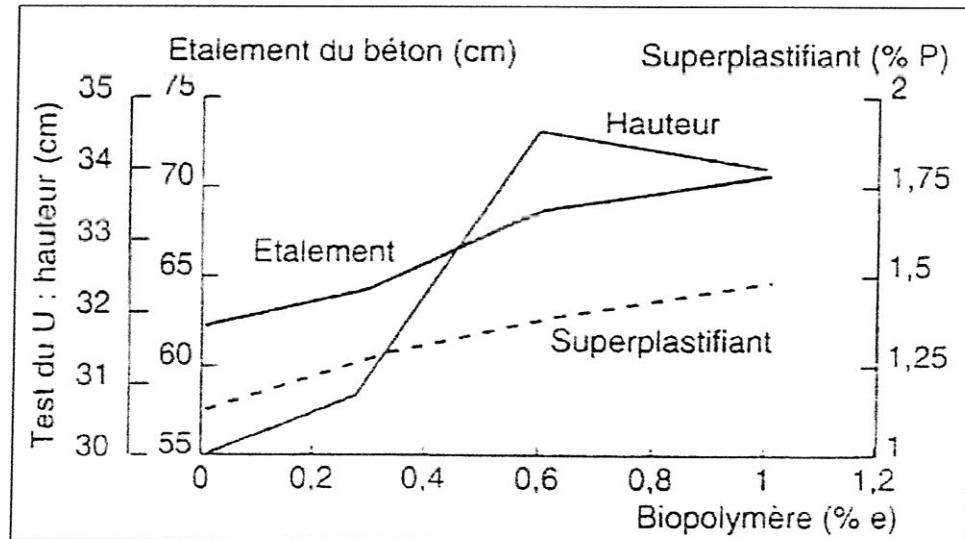
### L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure I.10). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.



*Fig. I.10 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après [H3])*

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure I.11).



*Fig. I.11: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant,  
d'après [T2].*

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran 95].

### Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à

l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons ( $D_{MAX}$ ) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec  $D_{MAX}$ , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure I.12). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

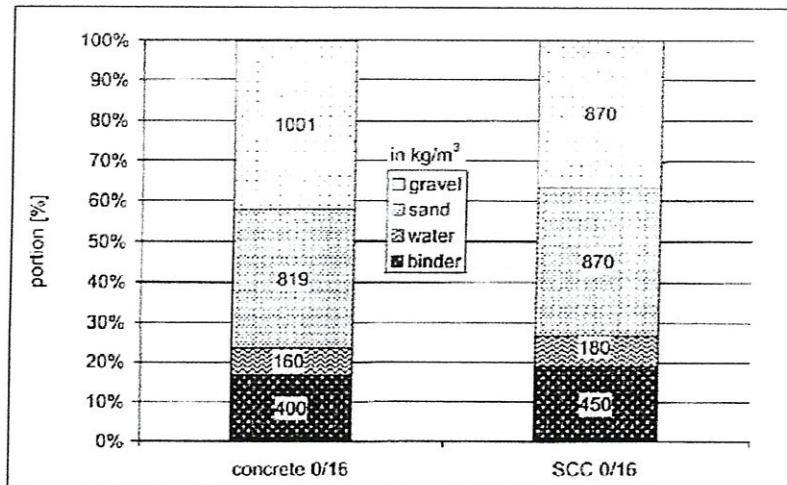


Fig. I.12 : Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré (d'après [J1])

Le tableau I.3 illustre quelques exemples de compositions types de BAP.

**Tableau I.3: Exemples de compositions types pour BAP**

Constituants de la recette pour 1 m <sup>3</sup> de béton			Béton vibré			Béton SCC			Béton SCC avec Flextrême		
	Masse volumique [kg/l]	%	Massé [kg]	Volume [l]	%	Massé [kg]	Volume [l]	%	Massé [kg]	Volume [l]	%
Ciment	Flextrême	2,93									
	Fluviô	3,06	300	98	380	124	440	153			
Additif	Cendre volante	2,24				70	31				
Adjuvants	Fluideifiant	1,10				1,6	6,08	5,53			
	Stabilisateur	1,05				0,2	0,76	0,72			
Granulats	Sable 0/4	2,68	36	687	256	50	849	317	50	864	322
	Gravier 4/8	2,70	5	95	35	20	339	127	20	346	129
	Gravier 8/16	2,70	24	458	171	30	509	190	30	518	193
	Gravier 16/32	2,70	35	668	249						
	Massé totale		1908		1697		1728				
Eau		1,00		170	170		185	185		185	
Air		2		20	2		20	2		20	
<b>Rapport E/C<sub>sc</sub></b>			0,57		0,47		0,42				
Classe de consistance			F3		SCC (F6)		SCC (F6)				
Volumé de pâte de ciment				268			346			335	

### I.1.7. CONTROLES SUR BETON FRAIS

En plus de la capacité se compacter de lui-même, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant à la mesure de l'étalement.

Pratiquement, il est possible de caractériser les propriétés rhéologiques d'un BAP au moyen du cône servant à la mesure du Slump ainsi qu'au moyen de la boite en L ou de l'entonnoir en V. Les divers procédés d'essais fréquemment utilisés sont présentés ci-après.

#### *I.1.7.1. - Essai d'étalement (Slump-Flow)*

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, surface propre et humidifiée et de dimension suffisante ( $>800$  par  $800\text{mm}$ ), puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre  $600$  et  $800\text{mm}$  (Fig. I.13). La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de  $20\text{à}40\text{mm}$ , par rapport à celle obtenue avec le cône dispose en sens contraire pour le même béton.

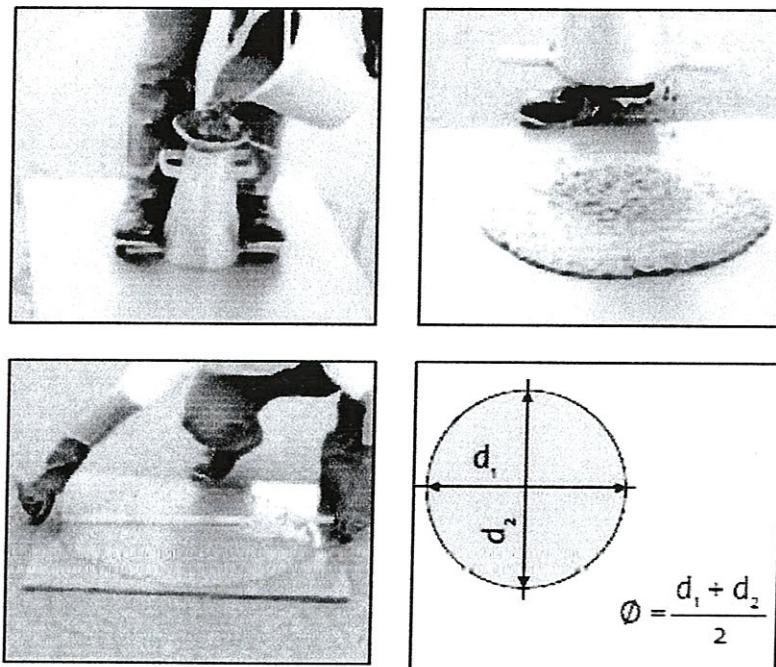


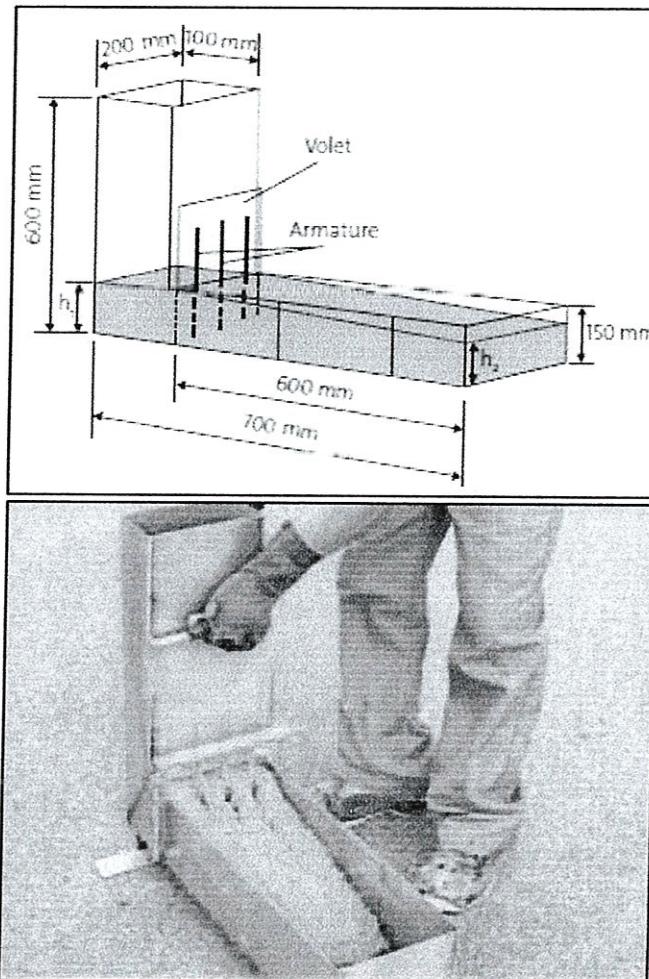
Fig. I.13 : Détermination de l'étalement au cône

Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies:

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

#### I.1.7.2- Essai de boite en L (L-Box)

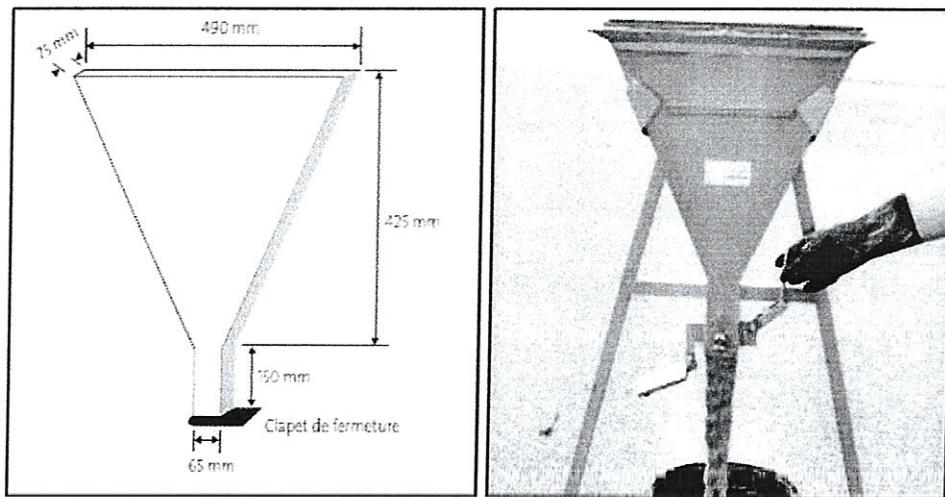
La procédure d'essai dans la boite en L est la suivante: la partie verticale de la boite est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armatures ( $\Phi 16$  mm) distantes de 50mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boite. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre **3 et 7 secondes**. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton ( $h_1$  et  $h_2$ ), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellation. Le rapport  $\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$  devrait être supérieur 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini (Fig. I.14).



*Fig. I.14 : Représentations schématique et photographique de l'essai de boîte en L (L-Box)*

#### *I.1.7.3. Essai d'entonnoir (V-Funnel)*

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure suivante est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP (Fig. I.15).



*Fig.I.15 : Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton*

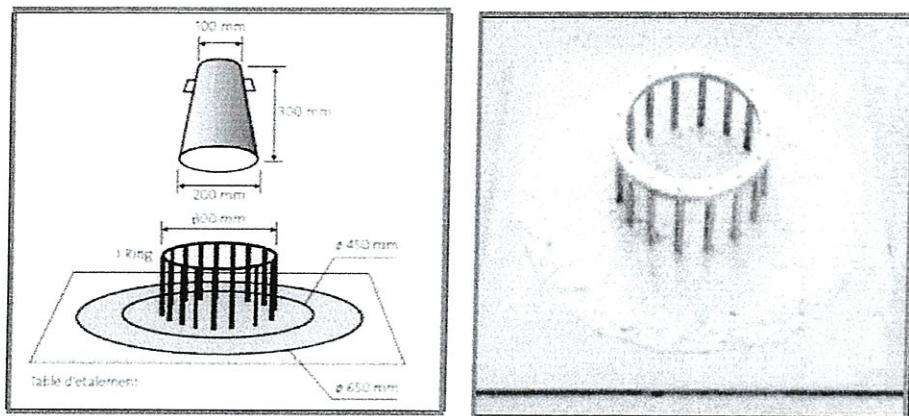
Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont groupés que selon 2 classes:

- Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10s,
- Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27s

#### *I.1.7.4. Essai d'étalement modifié (J-Ring)*

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures  $\Phi$  16 à 18mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme

au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (Fig. I.16).



**Fig.I.16 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)**

#### **I.I.7.4. Stabilité**

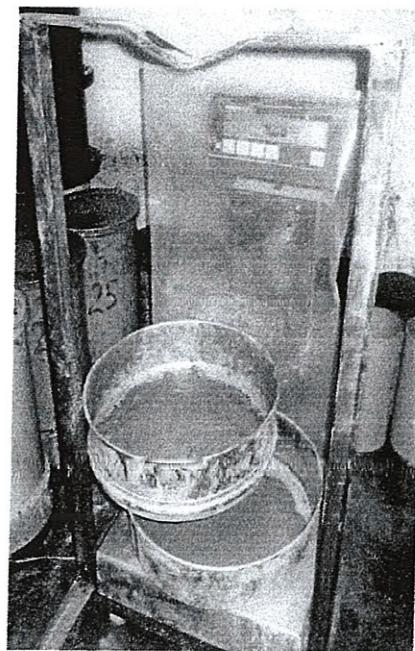
L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressusage limitée.

#### **Résistance à la ségrégation**

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

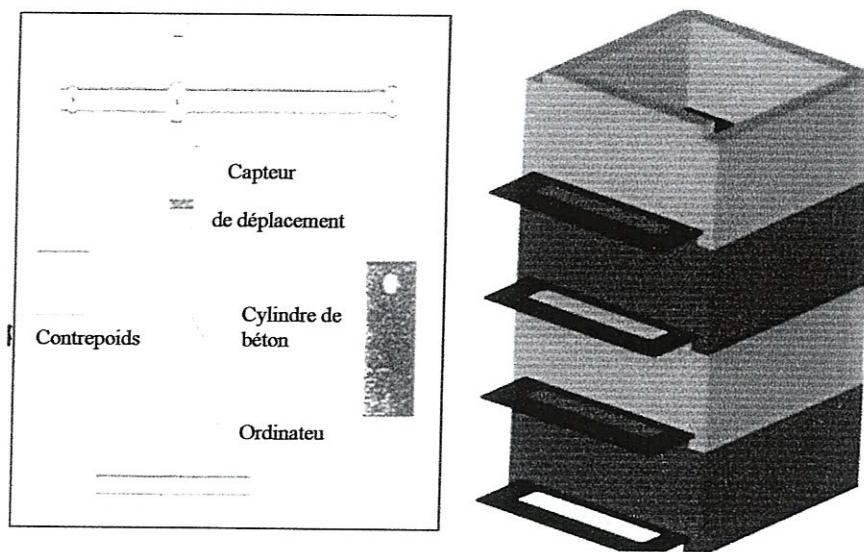
Un de ces essais est celui dit de «stabilité au tamis», développé par GTM (fig. I.17), qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté  $P_{LAITANCE}$  par la suite) d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2\text{Kg}$ ) passant à travers un tamis de 5mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{LAITANCE} < 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{LAITANCE} < 30\%$  : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{LAITANCE} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



*Fig.I.17 : Essai de stabilité au tamis*

D'autres essais comme l'essai à la bille, qui consiste à mesurer le temps d'enfoncement d'une bille pesante dans un échantillon de béton, et l'essai à la colonne LMDC, qui permet de comparer les analyses granulométriques des granulats en fonction de la hauteur d'une colonne de béton (fig. I.18), sont aussi utilisés.



*Fig. I.18: Essai à la bille (à gauche) et à la colonne (à droite)*

### Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC (figure I.19) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

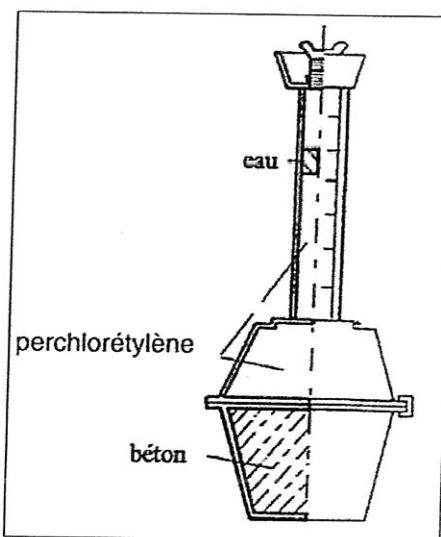


Fig. I.19 : Essai de ressuage à l'aéromètre

### I.1.8. MESURES RHEOLOGIQUES ET CORRELATION AVEC LES ESSAIS EMPIRIQUES

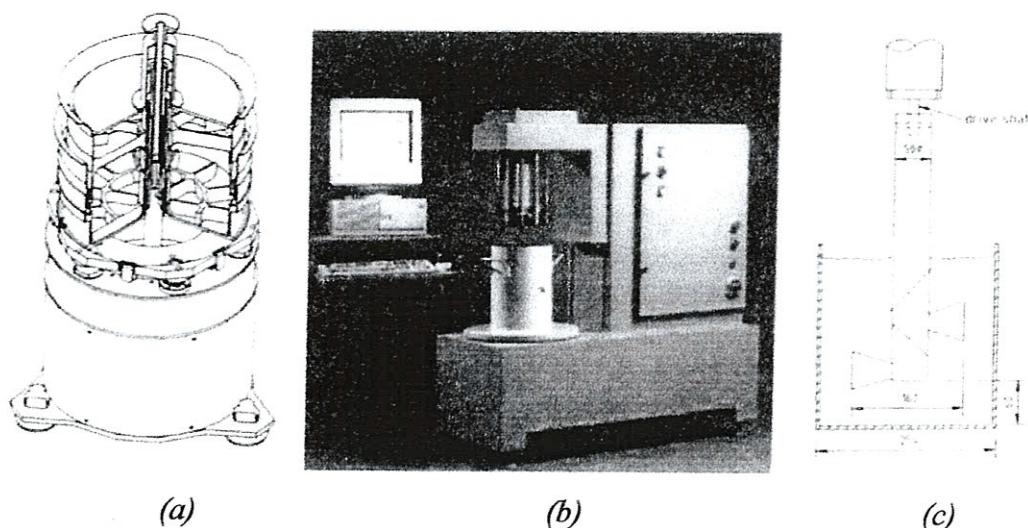
Les mesures réalisées sur bétons [F3, N2-L2] montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Le matériau ne peut s'écouler que lorsque la contrainte de cisaillement dépasse une valeur minimale. Cette contrainte minimale est appelée **seuil d'écoulement** ou **contrainte seuil**. Les fluides purement visqueux, newtoniens, sont caractérisés par une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement.

Ferraris [F4] déclare que les mesures rhéologiques sont délicates à réaliser dans le cas des bétons, du fait de l'étendue des tailles des particules qui les composent (de 1  $\mu\text{m}$  à 15 mm

voire 20). En effet, les appareils généralement utilisés par les rhéologues servent à caractériser des gels modèles, le sang ou divers fluides composés de particules nanométriques. Ils ne sont pas adaptés aux mesures sur béton du fait de la taille d'un échantillon représentatif.

Différents rhéomètres à béton ont été mis au point mais ils sont difficilement comparables entre eux car leurs modes de mesure et leurs géométries sont variables. L'utilisation d'un matériau modèle de référence permettrait de calibrer ces rhéomètres, mais à l'heure actuelle on ne dispose pas de matériau de ce type pour simuler le comportement des bétons [N2].

Par ailleurs une campagne expérimentale a été entreprise afin de comparer simultanément les différents appareils utilisés pour les bétons. Cette campagne a permis de comparer deux viscosimètres de type malaxeur (le Two-Point test, et le rhéomètre IBB), deux rhéomètres en cylindres coaxiaux (le viscosimètre BML et le CEMAGREF-IMG) ainsi qu'un rhéomètre en géométrie Plan-Plan (le BTRHEOM). La figure I.20. présente certains de ces appareils.



*Fig.I.20: Rhéomètres développés pour les bétons, (a) BTRHEOM [L3], (b) BML, (c) Two-point test [N2].*

Les caractéristiques rhéologiques peuvent être calculées directement dans le cas du BTRHEOM et du rhéomètre du CEMAGREF. Le viscosimètre BML donne des résultats qui peuvent être convertis dans les unités fondamentales selon une méthode indirecte. En revanche, les résultats du rhéomètre IBB ne peuvent être rapportés en unités fondamentales.

La campagne d'essais a montré que les rhéomètres pouvaient être classés en deux groupes selon les ordres de grandeur des résultats obtenus :

- Valeurs élevées : le BTRHEOM et le CEMAGREF-IMG. Ils présentent une très bonne corrélation entre eux.
- Valeurs faibles : le BML et le Two-Point test, pour lesquels la corrélation est correcte. En revanche, les corrélations entre les deux groupes sont moins satisfaisantes.

Il est intéressant que les résultats du BTRHEOM et du CEMAGREF-IMG soient bien corrélés puisque les modes de mesures sont différents (respectivement géométrie plan-plan et géométrie cylindres coaxiaux). Une plus forte corrélation aurait pu être attendue entre le rhéomètre du CEMAGREF et le BML viscometer puisqu'il s'agit de deux rhéomètres en cylindres coaxiaux. Mais certains artefacts peuvent affecter les mesures. La distance entre les parois doit être de l'ordre de cinq fois la taille des plus grosses particules. Seuls le BTRHEOM et le CEMAGREF-IMG, considéré de part sa taille comme étant la référence, respectent cette condition. De plus, certains problèmes de glissement aux parois peuvent perturber la mesure, c'est le cas pour les rhéomètres IBB et Two-Point test.

Ainsi les rhéomètres les plus adaptés vis à vis des exigences géométriques, mais qui fournissent également des valeurs similaires et bien corrélées, sont le BTRHEOM et le CEMAGREF-IMG.

Le nombre de bétons étudiés lors de cette campagne expérimentale a permis de couvrir une large gamme de caractéristiques rhéologiques, mais des études complémentaires sont nécessaires et notamment la réalisation d'essais sur BAP [N2].

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons, dont une revue est proposée par Ferraris [F4]. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP.

Le modèle de Bingham est fréquemment utilisé pour modéliser le comportement des bétons. En effet, seuls deux paramètres sont à ajuster, le dépouillement des essais rhéologiques est simplifié [N2-H4]. Or, les résultats de certains auteurs [F3, L2] montrent que les BAP ne suivent pas toujours le modèle linéaire de Bingham puisque le seuil d'écoulement ainsi extrapolé peut être négatif. Ce modèle est malgré tout satisfaisant pour une première approche, même si le modèle de Herschel-Bulkley est plus adapté.

Il semblerait toutefois qu'il soit difficile de caler les trois paramètres du modèle de Herschel-Bulkley dans la pratique. Lorsque le nombre de points de mesure est limité, l'incertitude sur la valeur de chaque paramètre est plus importante que dans le cas d'un modèle à deux paramètres [L3].

De Larrard, Ferraris et Sedran [L2] ont montré que les paramètres  $K$  et  $n$  du modèle de Herschel-Bulkley étaient liés, donc que ce modèle ne contenait en fait que deux paramètres indépendants. Ils proposent un modèle de Bingham « modifié », issu de l'exploitation des mesures rhéologiques selon le modèle de Herschel-Bulkley. La valeur du seuil d'écoulement obtenue avec le modèle de Herschel-Bulkley est conservée, mais la courbe d'écoulement est remplacée par une droite obtenue par régression linéaire.

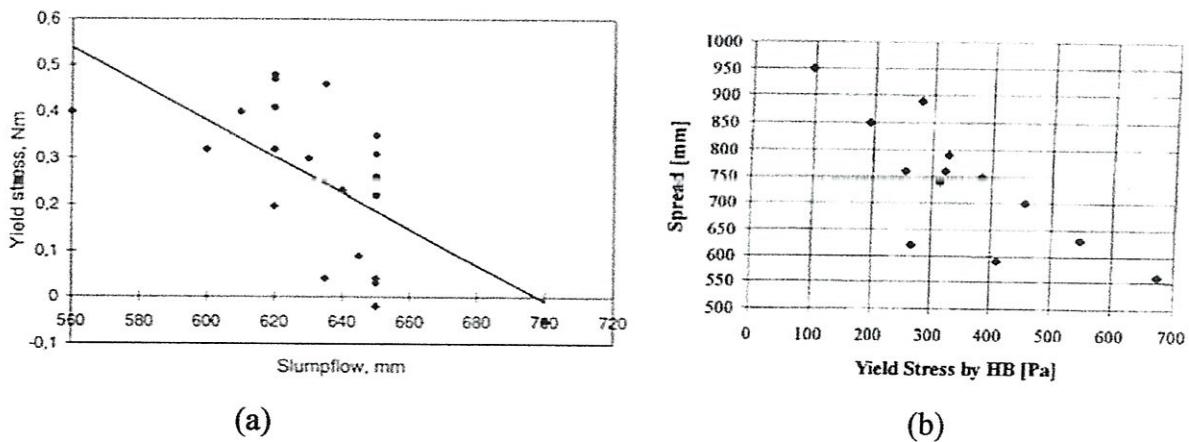
La réalisation de mesures rhéologiques sur béton est difficile et la prise en compte d'un grand nombre de paramètres est indispensable pour obtenir une interprétation du comportement du béton la plus réaliste possible. De plus, les mesures dépendent du protocole de cisaillement : taux de cisaillement, température, énergie de malaxage, etc. [F3]. Les rhéomètres doivent, par ailleurs, répondre à différents critères (notamment les dimensions du bol) et certains rhéomètres présentés ci-dessus ne semblent pas être parfaitement adaptés [N2, L4].

A l'heure actuelle, un mode opératoire adéquat pour la réalisation d'essais rhéologiques, ainsi que l'utilisation de modèles représentatifs pour le dépouillement des mesures, sont donc des points qui restent à améliorer dans le cas des BAP.

Cependant quelle que soit l'approche employée (empirique ou physique) les propriétés des BAP se différencient notablement des celles des bétons traditionnels. D'une part, l'affaissement n'est plus mesurable puisqu'il est total, on parle donc d'étalement des BAP. D'autre part, malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, et que le

choix d'un modèle adapté est encore discuté, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [W2, L4].

Les caractéristiques rhéologiques étant mobilisées lors des essais d'étalement ou d'écoulement, nous allons maintenant nous intéresser aux relations existant entre les approches empiriques et physiques (Fig. I.21).

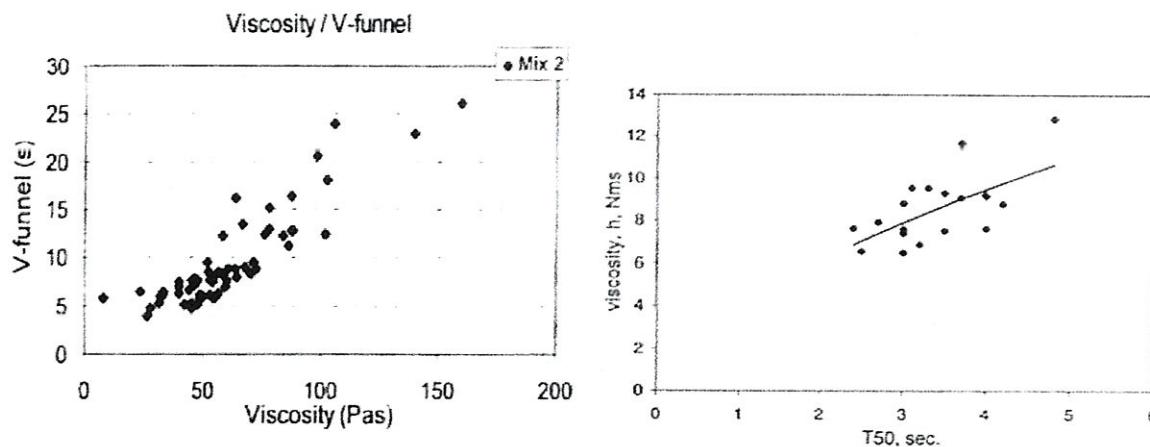


**Fig.I.21: Comparaison entre l'étalement et le seuil d'écoulement**

- (a) résultats de Emborg [E1],
- (b) résultats de Ferraris et De Larrard [F3].

Les différentes études issues de la littérature montrent qu'il existe une relation viscosité-temps d'écoulement. En revanche, la relation entre le seuil d'écoulement d'un BAP et son étalement, même si elle existe, semble difficilement quantifiable. Ceci pourrait s'expliquer par la différence entre les modes de mesures, un manque de sensibilité des appareils utilisés, ou encore par la difficulté de modéliser le comportement du matériau. Dans le cas des bétons traditionnels, la relation affaissement-seuil d'écoulement a clairement pu être mise en évidence [H4,L4], mais pour ces bétons, les valeurs de seuil sont bien plus élevées donc moins proches de la précision des appareils. L'existence d'une telle relation a également été mise en évidence dans le cas des mortiers et des pâtes de ciment [J2, L5]. Notons que pour ces matériaux, les rhéomètres et/ou les géométries utilisées pour les mesures ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour les bétons.

La majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la viscosité est bien corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-funnel [U2, L5] et éventuellement au T500 [L4, E1] comme le montre la figure I.22.



**Fig.I.22:** (a) Corrélation entre la viscosité et la mesure du temps d'écoulement au Vfunnel[U2],  
 (b) corrélation entre la viscosité et le temps d'étalement T50 (étalement mesuré dans ce cas en centimètres) [E1]

Sur les deux graphiques, la viscosité est mesurée au viscosimètre BML et semble effectivement liée à la caractéristique mesurée par l'essai empirique (V-funnel ou T50).

## I.2. PROPRIETES DU BETON DURCI

Les particularités de composition des bétons auto-plaçant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

### I.2.1. PROPRIETES MECANIQUES

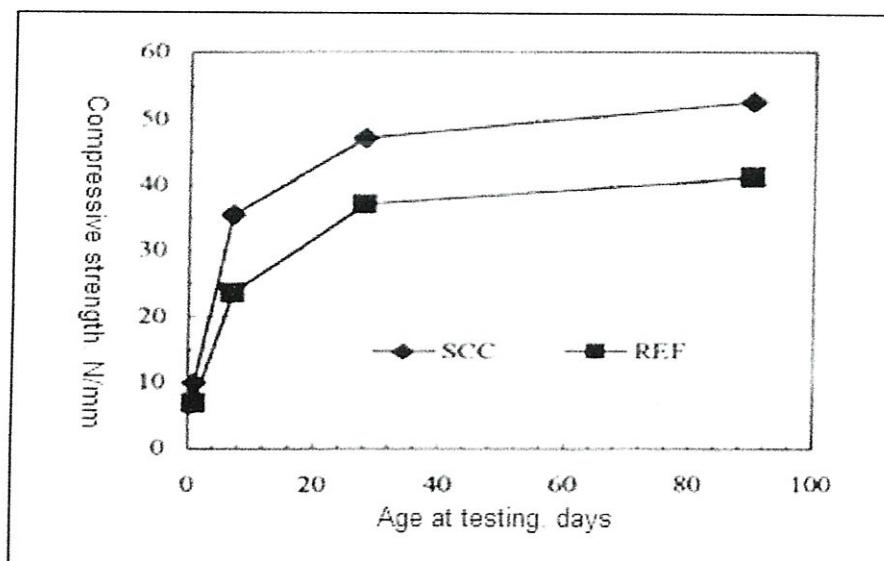
De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [D1, L6].

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

### 1.2.1.1. Résistance mécanique

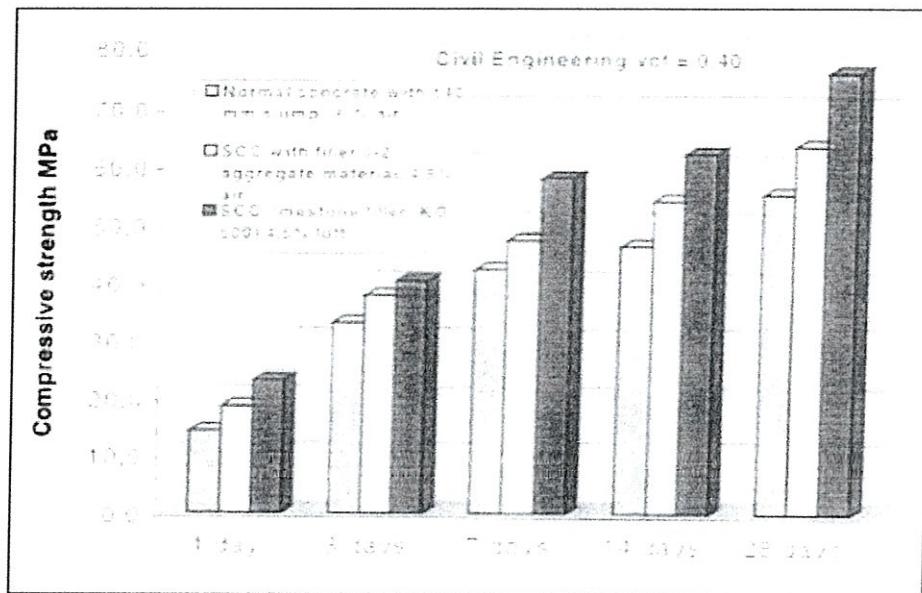
L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [D2, P4]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées [G1, S5] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure I.23).



*Fig.I.23: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [G1]*

De plus, certains auteurs [P5] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (figure I.24). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.



*Fig.I.24: Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [P5]*

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [F5].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [S6]. Etant donné la défloction du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

#### 1.2.1.2. Retrait (état frais, état durci)

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton

sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségrégation et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressauage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire.

Pendant cette période, dite dormante, la réaction d'hydratation commence et un premier dégagement de chaleur apparaît dès la mise en contact du ciment et de l'eau. Des hydrates sont produits depuis la périphérie vers le centre des grains de ciment anhydres et leur volume est inférieur aux réactifs. Cette diminution de volume peut être considérée comme un retrait chimique. Elle est couramment appelée contraction de Le Chatelier.

A partir du début de prise, le développement de la formation des hydrates constitue un squelette devenant de plus en plus dense et résistant. La contraction, due à la différence de volumes entre produits et réactifs, va donc être progressivement restreinte [B6]. Cependant, l'eau ne peut compenser entièrement cette diminution de volume et se transforme alors en vapeur à l'intérieur des pores. Ces pores jouent le rôle d'interface liquide/vapeur et les tensions capillaires engendrées par ce changement de phase provoquent une compression du squelette rigide : ceci constitue une réduction de volume supplémentaire. Il s'agit du retrait d'auto dessiccation.

D'autre part, une composante supplémentaire peut s'ajouter à ce retrait plastique. En effet, si l'eau superficielle (due au ressauage) s'évapore plus rapidement qu'elle n'est formée, le dessèchement du béton crée une dépression qui contracte le matériau. On parle alors de retrait de séchage ou de dessiccation. L'hygrométrie ambiante, la présence de vent ou l'absence de produit de cure sont des paramètres influents sur la valeur de ce retrait de séchage.

Une fois le retrait plastique (ou premier retrait) observé, une phase de gonflement peut également être constatée sur des matériaux cimentaires. Celle-ci a une durée très variable et encadre la prise.

Après la prise, les déformations du béton sont également d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'autodessiccation) ou d'origine thermique (production de chaleur due à

l'hydratation et échange thermique avec l'extérieur). Le retrait que subit alors le béton durci, ou retrait total, concerne la masse entière des éprouvettes et des ouvrages. Il se décompose en trois formes de retraits distincts : le retrait thermique, le retrait endogène et celui de dessiccation [A3].

- Le premier est provoqué par le refroidissement du béton suite à son échauffement dû aux réactions d'hydratation. Deux grandeurs sont à prendre en compte dans ce phénomène : la quantité totale de chaleur dégagée et la cinétique de production de chaleur. Cette dernière dépend de la composition du liant, du rapport E/L, tandis que la chaleur totale libérée découle, elle, de la masse de ciment et d'additions.
- Ensuite, apparaît le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume, comme évoqué ci-dessus. Le retrait endogène, ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique.
- Enfin, le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton.

D'autre part, le béton peut réagir avec le gaz carbonique contenu dans l'air (en présence d'humidité) et subir une quatrième forme de retrait appelé retrait de carbonatation [N3].

En pratique, les échantillons testés en laboratoire pour évaluer les différents retraits du béton durci sont conditionnés selon deux méthodes différentes. L'une consiste à sceller les éprouvettes pour éviter tout départ d'eau et permettre ainsi aux réactions d'hydratation de se poursuivre. Ces échantillons permettront de mesurer le retrait endogène. La deuxième laisse les éprouvettes libres de tout échange hydrique avec l'extérieur et conduit au retrait total. Conventionnellement, il est admis de soustraire le retrait endogène au retrait total pour obtenir le retrait de dessiccation, qui n'est pas une déformation concrètement mesurable.

La synthèse de documents présentée ici ne s'attache qu'aux retraits endogènes et de dessiccation. Ces deux formes de retrait hydrique sont susceptibles de différencier au mieux les BAP des bétons vibrés étant donné les compositions spécifiques avec lesquelles ils sont formulés. En effet, la quantité de pâte élevée des BAP les rend susceptibles d'être plus déformables (rétractables, dans le cas présent) que les bétons vibrés. Cependant, les données de la littérature dans ce domaine ont tendance à se contredire principalement parce que les formulations comparées sont bien différentes, que ce soit en terme de rapport eau/ciment (E/C), ou de squelette granulaire (volume de pâte), etc.

### 1.2.2. Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [G2, T1]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés.

Pour Turcry [T1] (figure I.25), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

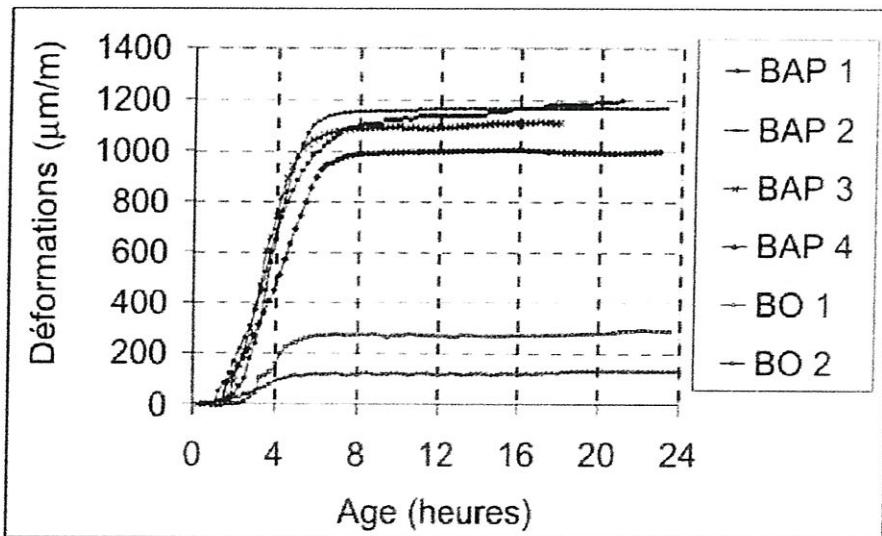


Fig.I.25: Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [T1]

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP

et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

### I.2.3 Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [Hu 98] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres [P6] (figure 1.24) contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différents équivalents pour les deux types de béton.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point.

De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [Pons 03] (figure I.26).

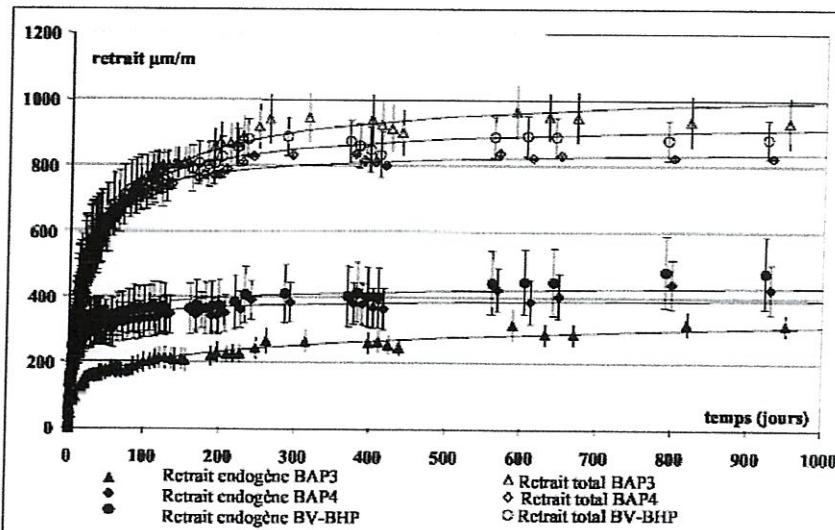


Fig. I.26 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [P6]

Persson [P7] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (voir figure I.27).

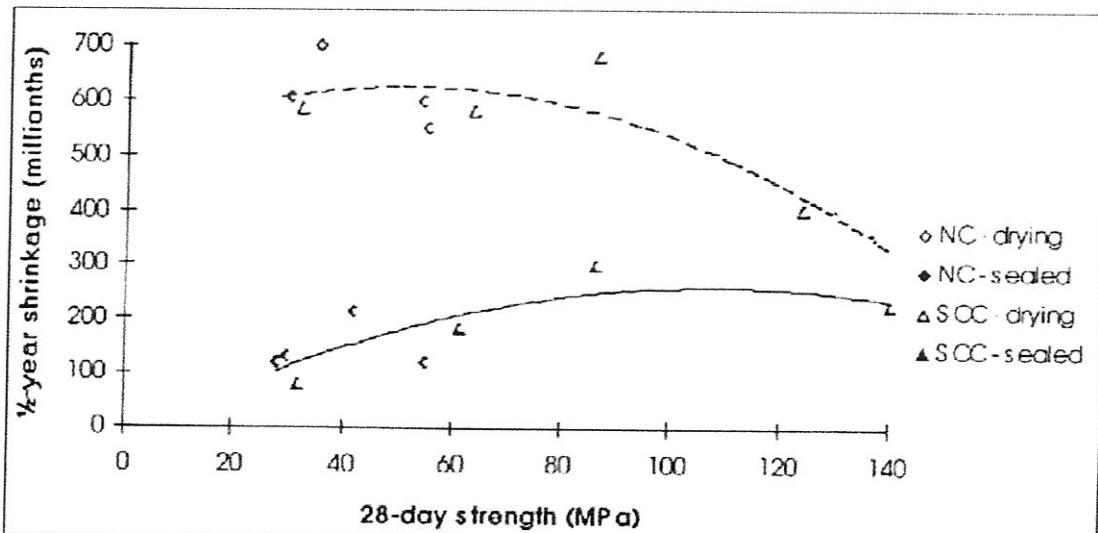


Fig. I.27 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [P7]

#### I.2.4. Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires.

Certains auteurs [H5] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir figure I.28). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

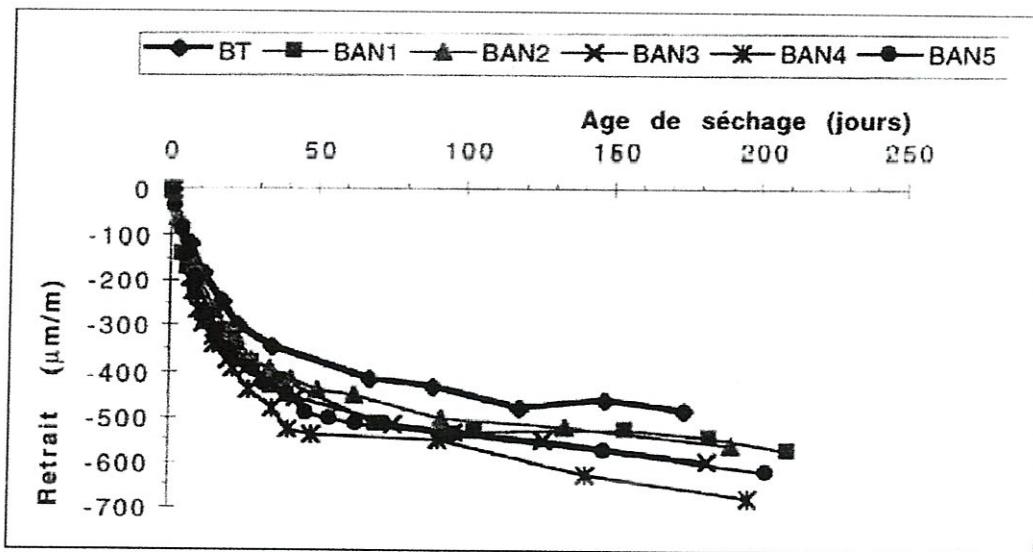


Fig.I.28 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [H5]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [P7, S7]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [S8] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [N3], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le

retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Van [V1], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [H3].

### 1.3. DURABILITÉ DES BAP

La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel - dégel.

Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

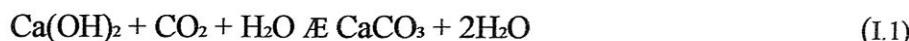
L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros [B7]).

En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

## I.4. CARBONATATION

### I.4.1. Généralités

Bien que généralement supposé inerte vis-à-vis du béton, l'air ambiant contient du dioxyde de carbone qui peut réagir avec le ciment hydraté. Lorsque le dioxyde de carbone diffuse à l'intérieur du béton, en présence d'eau, il réagit en premier lieu avec la portlandite (ou chaux hydratée,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pour former du carbonate de calcium (ou calcite,  $\text{CaCO}_3$ ) selon la réaction suivante :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation [A4, N3]. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait que, par suite de ces transformations, le pH de la solution interstitielle diminue et devient inférieur à dix. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) est dissoute et la corrosion des armatures peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents. Le dioxyde de carbone (l'acide carbonique, en fait) réagit aussi avec les autres hydrates tels que les alumates et les silicates de calcium hydratés (C-S-H). Autrement dit, les principaux constituants du ciment sont sujets à la carbonatation.

### I.4.2. Etudes relatives aux BAP

Les premiers résultats faisant état d'une comparaison entre BAP et bétons vibrés indiquent qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation [S7].

D'autres résultats [A5] conduisent à des conclusions similaires (tableau 1.2). L'augmentation de la quantité de ciment, qui implique un rapport E/C plus faible et une résistance mécanique plus élevée, conduit à une profondeur de carbonatation plus faible (SCC4, SCC5 et SCC6 contiennent respectivement 300, 400 et 450 kg/m<sup>3</sup> de ciment). L'addition de filler n'a pas une influence claire sur la profondeur de carbonatation (SCC1 et SCC7 possèdent des quantités identiques de ciment et de filler, mais ce dernier est de type différent). Enfin, toutes compositions confondues, les BAP ont un comportement identique à celui des bétons vibrés.

**Tableau I.4 : Valeurs expérimentales du coefficient K, en  $\text{mm.an}^{1/2}$ , pour deux expositions différentes [A5]**

	Treatment A	Treatment B
SCC1	21.3	5.3
SCC2	23.4	5.4
SCC3	18.4	4.1
SCC4	43.8	20.2
SCC5	16.9	11.6
SCC6	16.0	10.0
SCC7	20.6	9.5
TC1	16.1	6.2
TC2	5.0	7.1

Cependant, d'après Rougeau [R1], pour des bétons à hautes performances, la profondeur de carbonatation des BAP est légèrement supérieure à celle des bétons vibrés (tableau 1.3). Toutefois, les résultats indiquent que la porosité plus importante des BAP (12,9% et 11,4% pour les BAP3 et BAP5 contre 9,9% pour le béton vibré HPC) n'affecte pas considérablement leur résistance à la carbonatation.

**Tableau I.5: Profondeurs de carbonatation de deux BAP et d'un béton vibré à hautes performances ( $t_0=28$  jours)[R1]**

Time of exposure (days)	Carbonated depth (mm)					
	HPC		BAP 3		BAP 5	
	Moulded faces	Levelled faces	Moulded faces	Levelled faces	Moulded faces	Levelled faces
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	2.3	2.0	2.0	1.7	1.0
28	1.7	2.7	3.7	2.7	3.7	2.3
70	3.0	3.7	5.0	3.7	4.0	4.0

#### I.4.3. Autres propriétés de durabilité

Des études comparatives entre BAP et béton vibré se sont intéressées à d'autres mécanismes liés à la durabilité des bétons, comme la détérioration par le gel. Ce sont plus particulièrement les cycles de gel-dégel qui engendrent des dégradations progressives dans le béton. Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers des zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces

fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un nouveau cycle de gel.

La résistance au gel-dégel du béton dépend de différentes propriétés (résistance à la traction, fluage, déformabilité), mais elle dépend surtout des caractéristiques et du taux de saturation de son réseau poreux. Si celui-ci contient de l'air entraîné (avec une quantité et une distribution convenables), l'expulsion de l'eau excédentaire par la glace, lors du gel, pourra se faire par l'intermédiaire de ces vides et engendrera moins de désordres [Pigeon 96]. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des bétons. Pour des bétons susceptibles de subir de telles conditions extérieures, il est recommandé d'utiliser un agent entraîneur d'air.

Comme nous l'avons vu précédemment, les formulations de BAP comportent des quantités importantes de superplastifiants dont les effets secondaires peuvent être l'entraînement d'air dans le béton. D'autre part, l'utilisation complémentaire d'un agent de viscosité peut avoir comme effet de stabiliser ce réseau de bulles d'air.

Par conséquent, cette différence de propriétés entre BAP et béton vibré a incité plusieurs chercheurs à comparer la résistance au gel-dégel des deux types de béton.

Les résultats présents dans la littérature montrent nettement que les BAP, formulés sans entraîneur d'air, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [H3, R1, M1, B8] (figure I.29).

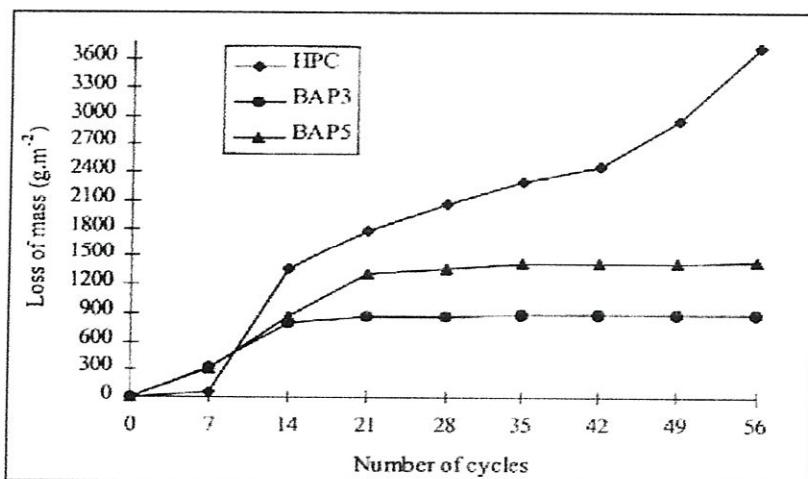


Fig. I.29: Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) [R1]

## I.5.CONCLUSIONS DU CHAPITRE ET ORIENTATION DE LA THESE

*Cette partie a été consacrée à la présentation du principe, les méthodes de formulations, les essais de caractérisation à l'état frais, et les propriétés à l'état durci des BAP. Nous avons également reproduits quelques résultats sur la durabilité de ce béton, en signalons une certaine rareté des recherches entreprises, et plus particulièrement sur l'influence de l'absorption capillaire monodirectionnelle sur la durabilité des BAP qui est un facteur clé dans la pérennité des ouvrages. Ce manque de résultats constitue la raison essentielle qui a orientée notre recherche vers l'étude expérimentale de la cinétique de l'absorption d'eau des BAP, avec comme paramètres*

*Cette étude expérimentale nécessite dans un premier temps la détermination de formules de bétons autoplaçants élaborées à partir de constituants locaux, formules qui doivent être stables et répondant aux différentes exigences préconisées pour ce matériau. Cette étude de la composition de BAP ainsi que de bétons vibrés, qui vont servir de références, fera donc l'objet de la partie suivante.*

## CHAPITRE II

# Caractérisation des constituants et formulation des bétons

Ce chapitre présente, dans la première partie, différents essais de caractérisation des constituants de base utilisés, tels que le gravier le sable et les adjuvants. La seconde partie présente les résultats d'une étude de formulation de bétons vibrés (appelés à servir de référence par la suite) obtenus par l'utilisation de la méthode graphique de Faury, ainsi que la caractérisation de deux BAP formulés à partir des mêmes constituants. Le chapitre sera clos par une présentation des résultats de mesure de la résistance des compositions formulées.

### II.1. CARACTERISATION DES CONSTITUANTS

Cette partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et mécanique de la phase inerte (Sable +Gravier) et de l'efficacité des adjuvants. Les essais ont été effectués conjointement au laboratoire pédagogique du lycée «Zentar Slimen» de la Wilaya d'Annaba, et au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 Guelma. Les protocoles pour la conduite des essais sont conformes aux normes en vigueur en Algérie (Normes NA).

#### II.1.1. Caractérisation du gravier

Pour l'élaboration des bétons, nous avons utilisé un gravier provenant de la carrière de Maouna implanté dans la région de Guelma. Il s'agit d'un gravier concassé d'étendue granulaire 5/12.5.

### *II.1.1.1 Mesure de la masse volumique apparente du gravier selon la norme NA 255*

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume en vrac, c'est-à-dire «vides» compris.

#### Principe de mesure

La mesure consiste à verser le granulat sec dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une réglette.

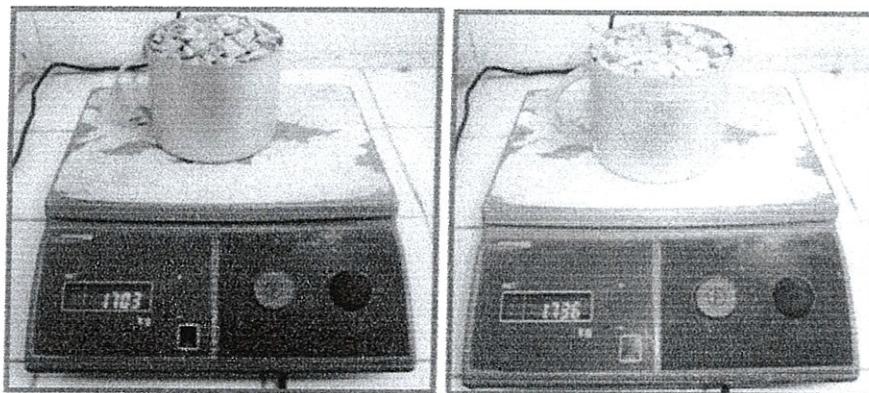
La masse volumique apparente, notée  $M_v$ , est donnée par l'expression :

$$M_v = \frac{M}{V} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$M$  : masse des granulats contenus dans le récipient ;

$V$  : volume du récipient.



*Fig. II.1 : Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier*

Tableau II.1 : Résultats des mesures de la masse apparente du gravier

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1494
	Masse volumique absolue (gr/ml) M / V	M <sub>V1</sub>	1.494
Echantillon 2	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1473
	Masse volumique absolue (gr/ml) M / V	M <sub>V2</sub>	1.473
Echantillon 3	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1461
	Masse volumique absolue (gr/ml) M / V	M <sub>V3</sub>	1.461
<i>Masse volumique apparente moyenne</i>	<b>M<sub>V</sub> = 1476 Kg/m<sup>3</sup></b>		

La masse volumique apparente moyenne obtenue est de 1476 Kg/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une valeur acceptable, en effet les granulats pour bétons doivent présenter une masse volumique absolue variant dans les limites de 1400 à 1600 Kg/m<sup>3</sup>.

#### II.1.1.2 - Mesure de la masse volumique absolue selon la norme NA 255

La masse volumique absolue ( $\rho$ ) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

##### Principe de mesure (Méthode de l'éprouvette graduée)

Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau. Peser un échantillon sec  $M$  de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume  $V_2$ .

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho = \frac{M}{V_1 - V_2} \quad (\text{II.2})$$

Les résultats des mesures, effectuées sur trois échantillons, sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravier

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	450
	Poids de l'échantillon (636gr)	M	636
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	690
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	$\rho_1$	2.650
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	500
	Poids de l'échantillon (750gr)	M	750
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	785
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	$\rho_2$	2.630
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	580
	Poids de l'échantillon (1000gr)	M	1000
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	955
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	$\rho_3$	2.660
Masse volumique absolue moyenne	$\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$		

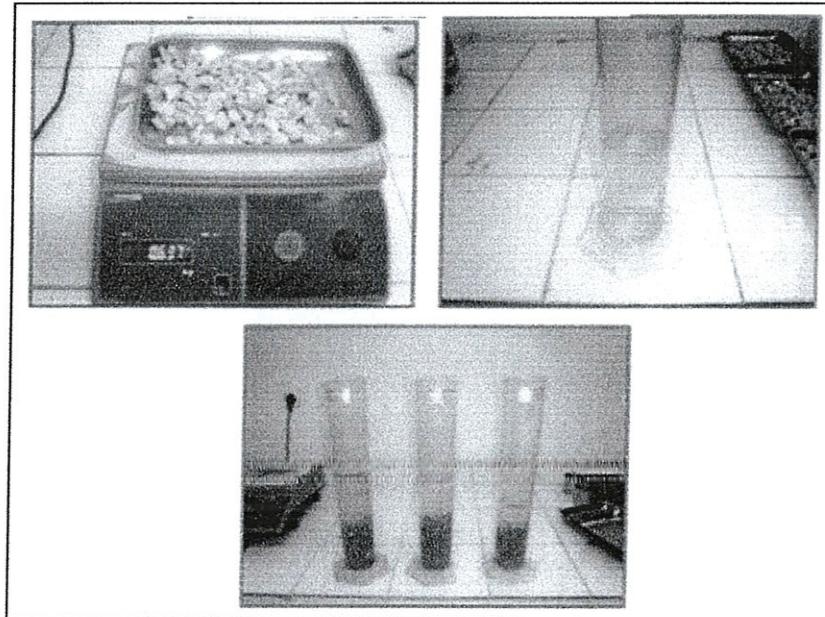


Fig. II.2 : Mesure de la masse absolue

Le gravier testé présente une masse volumique de 2650 Kg/m<sup>3</sup>, se classant ainsi (en termes de densité) comme un granulat «courant».

#### II.1.1.3 – Mesure de la teneur en eau des graviers (NA 255)

Il est important de déterminer la teneur en eau des granulats afin de faire une correction de la quantité d'eau à incorporer dans le béton. La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau.

La teneur en eau, notée  $\omega$  est donnée par :

$$\omega = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$M_h$  : poids de granulat humide (mouillé).

$M_s$  : poids de granulat sec.

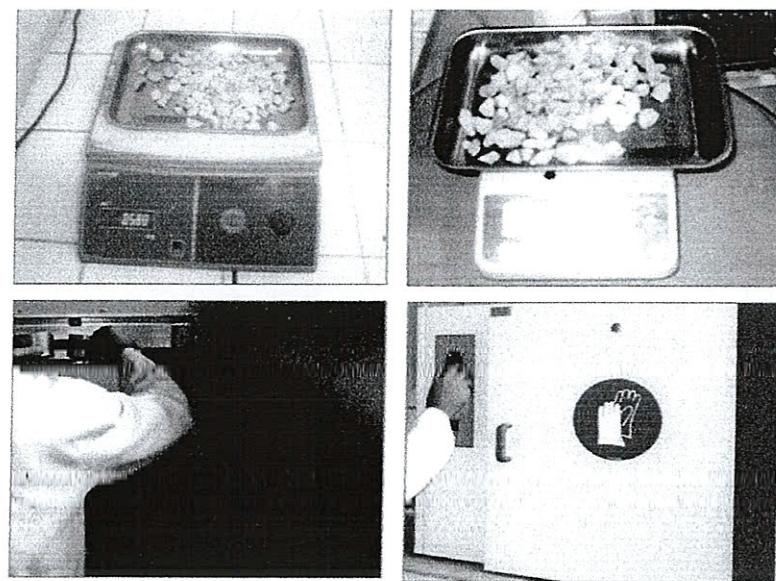


Fig. II.3 : Détermination de la teneur en eau

Tableau II.3 : Teneur en eau des graviers lors des essais

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (300gr)	$P_h$	300
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	298
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s)/ P_s] \times 100$	$W_1$	0.7
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (300gr)	$P_h$	300
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	299
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s)/ P_s] \times 100$	$W_2$	0.3
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (350gr)	$P_h$	350
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	349
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s)/ P_s] \times 100$	$W_3$	0.3
<i>Teneur en eau moyenne</i>	<b><math>W = 0.4\%</math></b>		

#### *II.1.1.4 Mesure de la propreté*

La propreté désigne, d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains (ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains), et d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

##### Principe :

Les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. La séparation des agrégats des éléments fins se fera par un simple lavage à l'eau.

##### Mode opératoire :

- *Peser une masse  $M$  (environ 1000gr) de gravier et la placer dans le tamis (maille de 0,5mm),*
- *Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis devienne claire,*
- *Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit  $M'$ ,*

La propreté se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$P(\%) = \left( \frac{M - M'}{M} \right) 100 \quad (\text{II.4})$$

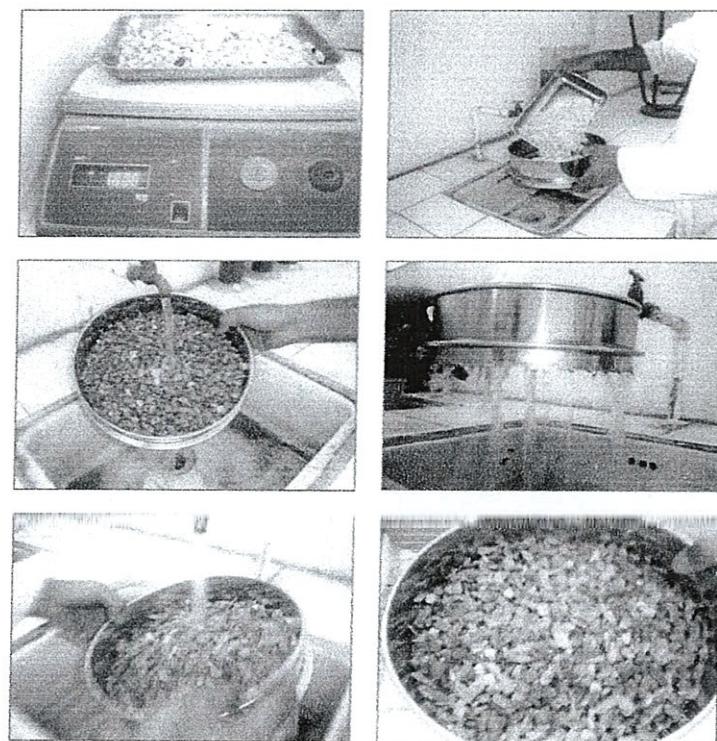


Fig.II.4 : Mesure de la propreté des graviers

Tableau II.4 : Résultats des mesures de la propreté des graviers

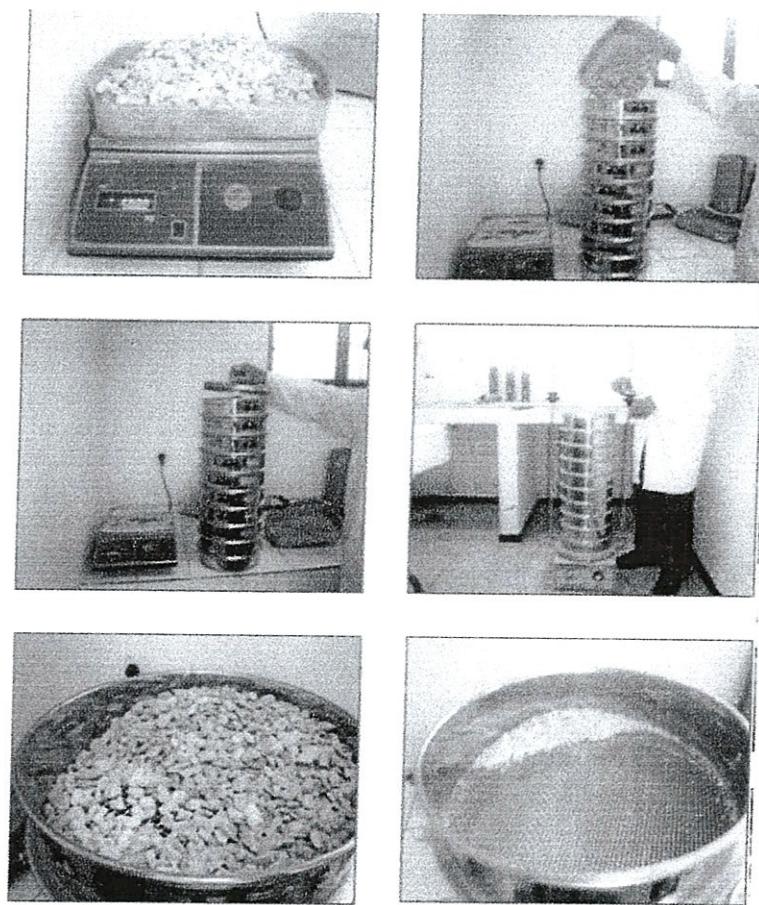
Echantillon 1	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	991
	Essai de propreté (%)	P <sub>1</sub>	0.9
	$[(M - M')/ M] \times 100$		
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	987
	Essai de propreté (%)	P <sub>2</sub>	1.3
	$[(M - M')/ M] \times 100$		
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	990
	Essai de propreté (%)	P <sub>3</sub>	1
	$[(M - M')/ M] \times 100$		
% des fines	<b>P = 1.1 %</b>		

Le pourcentage obtenu (1.1%) d'éléments fins ne dépasse pas la limite autorisée qui est souvent fixée à 2%.

#### *II.1.1.5- Analyse granulométrique (NA 2607)*

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons, en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

La procédure utilisée est schématisée à travers la série des photos suivantes :



*Fig. II.5 : Analyse granulométrique*

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du gravier 5/12.5

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
20	20	20	0,4	99,6
10	3247	3267	65,3	34,7
5	1513	4780	95,6	4,4
2.5	130	4910	98,2	1,8
0.8	43	4953	99,1	0,9
0.4	11	4964	99,3	0,7
0.2	11	4975	99,5	0,5
0.1	7	4982	99,6	0,4
0.08	10	4985	99,7	0,3
Fines	12	4997	99,9	0,1

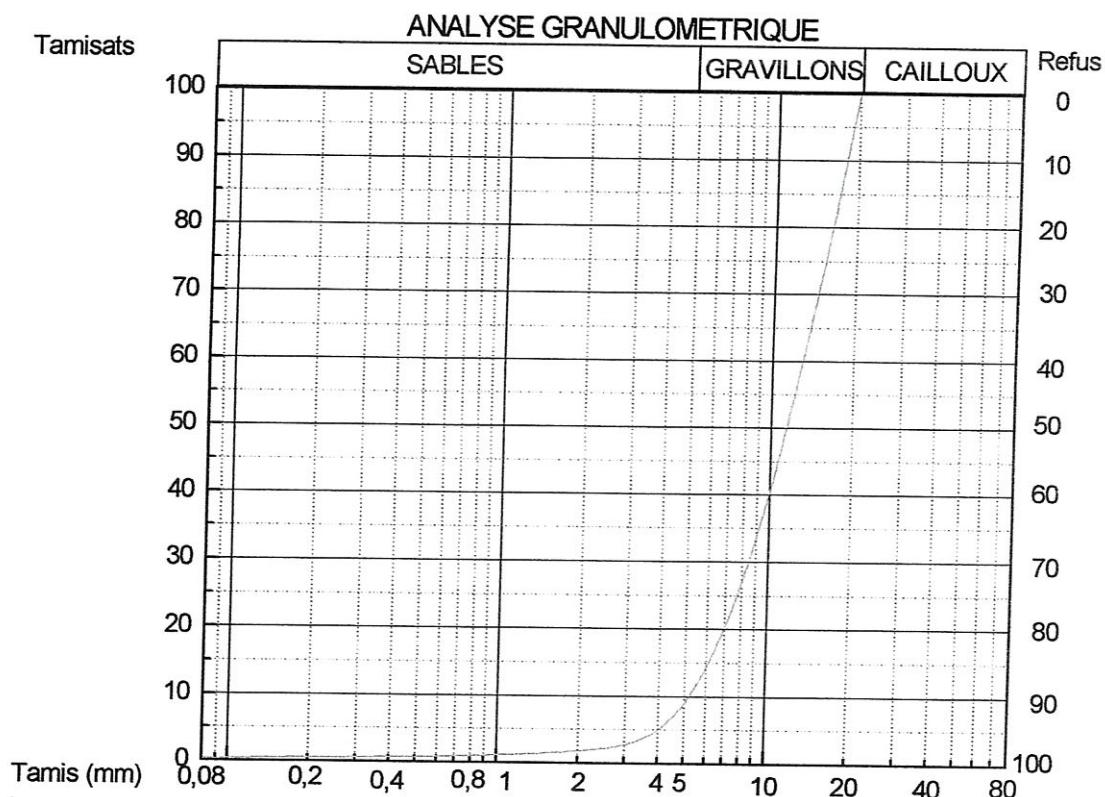


Fig. II.6 : Allure de la courbe granulométrique du gravier

#### *II.1.1.6 -Résistance au choc (Essai Los Angeles) (NA 458)*

L'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés; dans le cylindre de la machine Los Angeles pendant 500 rotations.

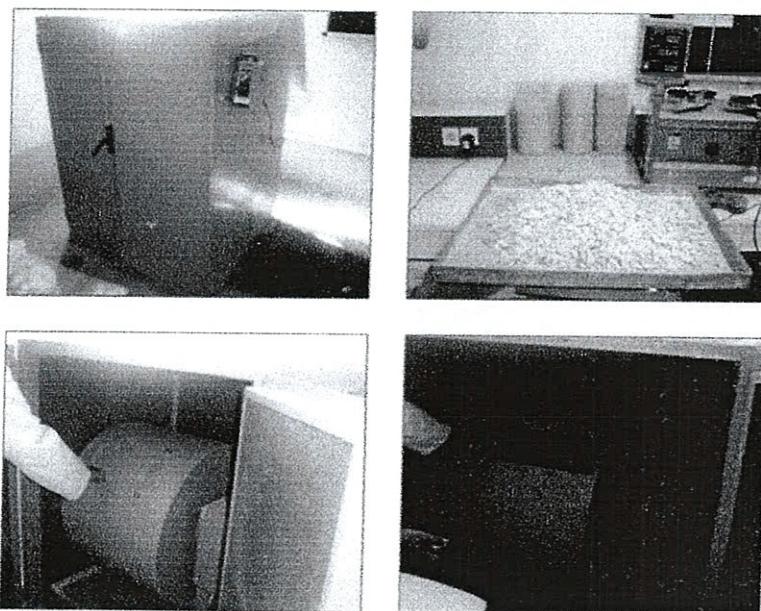
Le coefficient de Los Angeles, noté  $L_A$ , est donné par l'expression suivante :

$$L_A = \left( \frac{M_f}{M_g} \right) 100 \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$M_f$  : la masse du matériau soumis à l'essai ;

$M_g$  : la masse des éléments inférieurs à 1.6mm



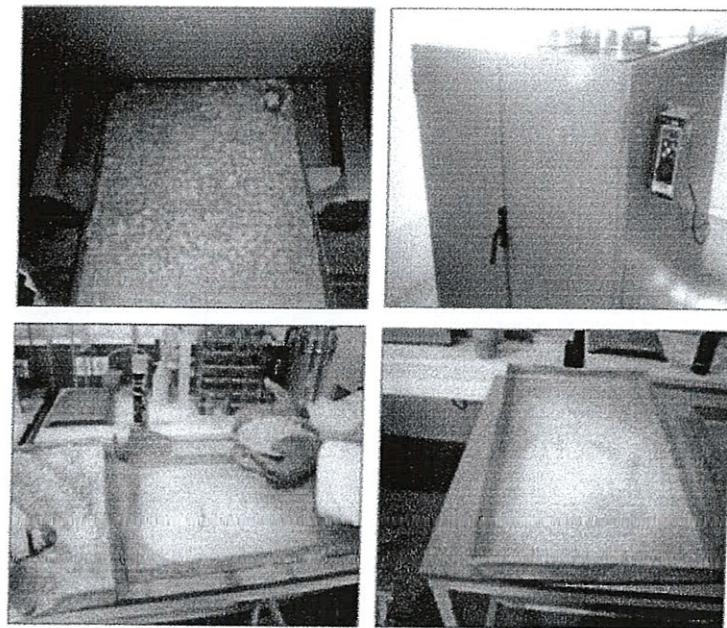


Fig. II.7 : Détermination de la dureté au Los Angeles

Tableau II.6 : Valeurs de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé

Echantillon 1	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A1}$	20.3
Echantillon 2	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A2}$	20.3
Echantillon 3	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A3}$	20.3
Dureté moyenne	$L_{Am} = 20.3\%$		

On peut voir à travers la valeur moyenne de la dureté trouvée (20.3), que notre gravier répond à la norme qui limite le LA à 40%.

#### *II.1.1.7- Absorption d'eau (NA 255)*

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'écartement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

##### Principe de la mesure :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C.

Le coefficient d'absorption ( $A_b$ ) est défini par la relation :

$$A_b = \left( \frac{M - M'}{M'} \right) 100 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$M$  : masse de l'échantillon sec.

$M'$  : masse de l'échantillon imbibé.

Tableau II.7 : Valeurs du coefficient d'absorption du gravier

Echantillon 1	masse de l'échantillon sec (gr)	M	2703
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	2764
	Absorption d'eau	Ab	2.2
	$[(M - M') / M'] \times 100$		
Echantillon 2	masse de l'échantillon sec (gr)	M	2785
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	2832
	Absorption d'eau	Ab	1.7
	$[(M - M') / M'] \times 100$		
Echantillon 3	masse de l'échantillon sec (gr)	M	1143
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	1162
	Absorption d'eau	Ab	1.6
	$[(M - M') / M'] \times 100$		
<i>Absorption d'eau moyenne</i>	<b>Ab = 1.8%</b>		

### Récapitulatif des résultats

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le gravier est résumé dans le tableau suivant :

Tableau II.8 : Résultats des essais sur le gravier.

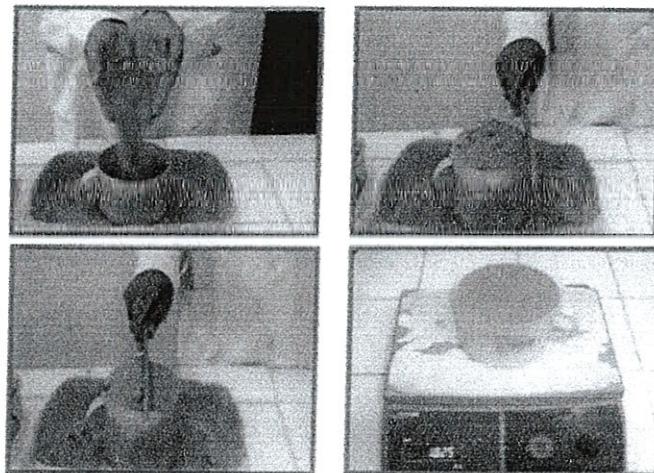
Essais	Résultats de mesures
Masse volumique absolue	$M_V = 1476 \text{ Kg/m}^3$
Masse volumique apparente	$\rho = 2650 \text{ kg /m}^3$
Propreté	$P = 1.1\%$
Teneur en eau	$W = 0.4\%$
Dureté (Los Angeles)	$L_A = 20.3$
Analyse granulométrique	figure II.6
Absorption d'eau	$Ab = 1.8\%$

### II.1.2. Caractérisation du sable

Le sable utilisé est un sable naturel issu de la région de Ben-Azzouz de la Wilaya de Skikda.

#### II.1.2.1 – Mesure de la masse volumique apparente du sable (NA 451)

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est présentée à travers la figure suivante :

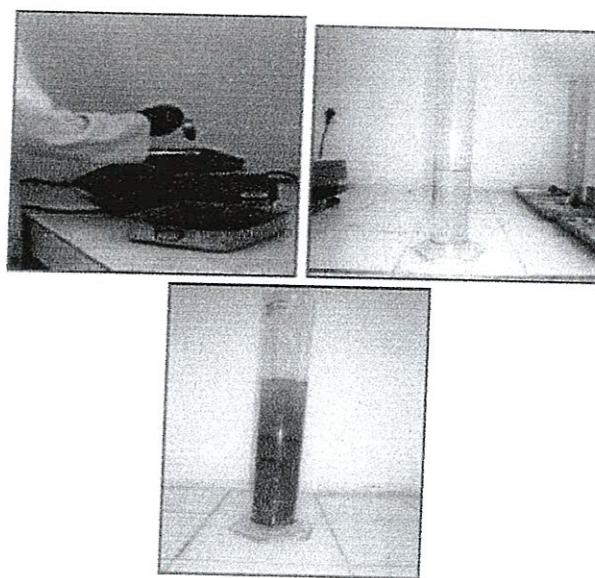


*Fig.II.8 : Mesure de la masse volumique apparente du sable*

*Tableau II.9 : résultats de la mesure apparente du sable*

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	1576
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>V1</sub></b>	<b>1.576</b>
Echantillon 2	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	1.591
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>V2</sub></b>	<b>1.591</b>
Echantillon 3	Volume d'un récipient connu	V	1000
	poids de sable contenu dans le récipient	M	1.615
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>V3</sub></b>	<b>1.615</b>
<i>Masse volumique apparente</i>	<b>M<sub>V</sub> = 1590 kg /m<sup>3</sup></b>		

La même remarque faite pour le gravier s'applique également pour le cas du sable.  
**II.1.2.2 - Masse volumique absolue (NA 451)**



**Fig.II.9 : mesure de la masse volumique absolue du sable**

**Tableau II.10 : Résultats de la mesure absolue du sable**

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	450
	Poids de l'échantillon (350gr)	M	600
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	675
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_1$	2.670
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
	Poids de l'échantillon (400gr)	M	670
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	655
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_2$	2.630
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	500
	Poids de l'échantillon (450gr)	M	975
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	870
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_3$	2.630
<i>Masse volumique absolue moyenne</i>	$\rho = 2640 \text{ kg /m}^3$		

Le sable utilisé présente une densité de 2.64, valeur courante pour les sables régionaux.

#### *II.1.2.3-Mesure de la compacité*

Pour effectuer cette mesure il suffit de déterminer le volume des vides présenté par une quantité donnée de granulats, remplissant un bocal de volume  $V$ .

- Peser une quantité de matériau sec et le verser (sans le tasser) dans une éprouvette graduée.

-Noter le niveau atteint représentant le volume apparent du matériau, soit  $V$ .

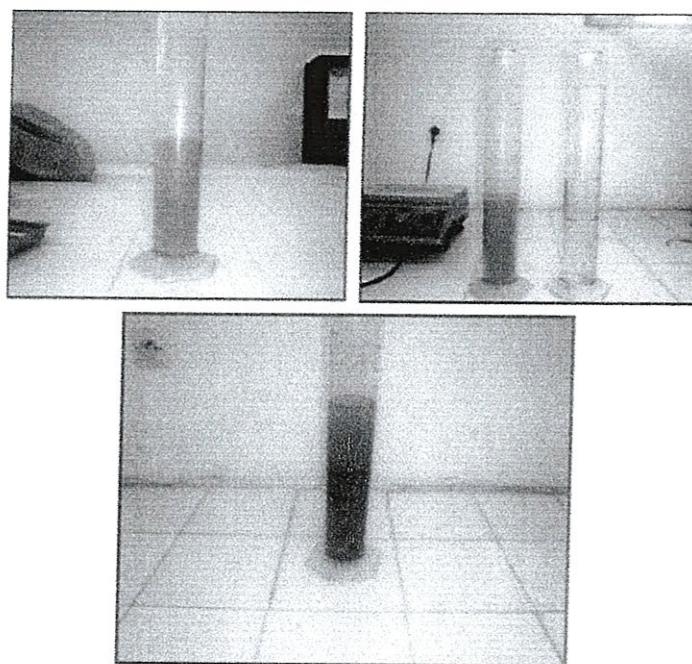
- Dans une deuxième éprouvette contenant un volume  $V'$  d'eau, verser le sable de la première éprouvette.

-Noter le volume atteint par l'eau  $V_1$ .

Le volume des vides est égal à :

$$V + V' - V_1$$

La compacité sera déduite à partir de l'expression suivante :  $C = \frac{(V_1 - V')}{V}$  (II.7)



*Fig.II.10 : Mesure de la compacité du sable*

Tableau II.11 : résultats de la compacité du sable

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (600gr)	V	400
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	500
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	740
	La compacité C : $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>1</sub>	0.60
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (650gr)	V	420
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	650
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	900
	La compacité C : $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>2</sub>	0.59
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (700gr)	V	470
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	600
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	880
	La compacité C : $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>3</sub>	0.59
Compacité moyenne	<b>C = 0.60</b>		

#### II.1.2.4- Porosité

La porosité est par définition le complément à l'unité de la compacité. Soit en désignant celle-ci par ***E*** :

$$E = 1 - C \quad (\text{II.8})$$

Tableau II.12 : Valeurs de la porosité du sable

Echantillon 1	La compacité	$C_1$	0.60
	La porosité $E = 1 - C$	$E_1$	0.40
Echantillon 2	La compacité	$C_2$	0.59
	La porosité $E = 1 - C$	$E_2$	0.41
Echantillon 3	La compacité	$C_3$	0.59
	La porosité $E = 1 - C$	$E_3$	0.41
<i>Porosité moyenne</i>	<b><math>E = 0.40</math></b>		

### III.1.2.5 - Teneur en eau (NA 451)

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau.

La teneur en eau, notée ( $W$ ) est donnée par :

$$W = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$M_h$  : poids de granulat humide (mouillé).

$M_s$  : poids de granulat sec.

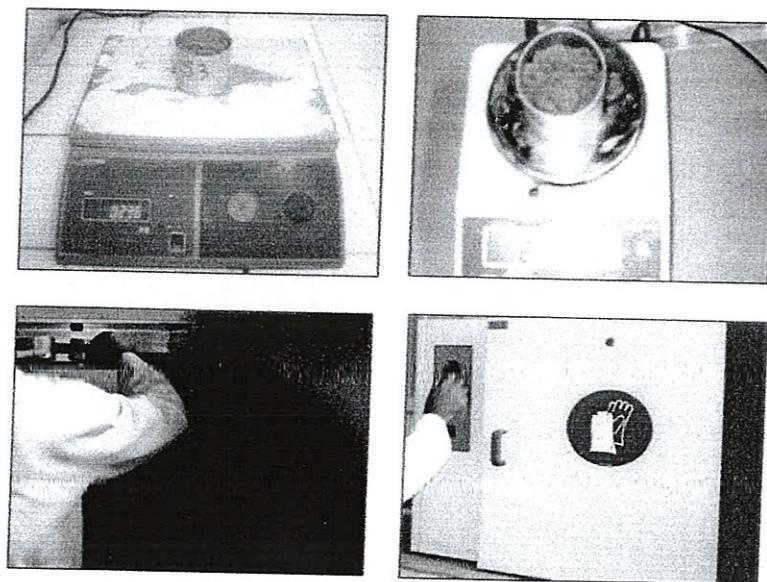


Fig.II.11 : Mesure de la teneur en eau du sable

Tableau II.13 : Teneur en eau du sable

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (150gr)	$P_h$	150
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	144
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_1$	4.2
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (200gr)	$P_h$	200
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	192
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_2$	4.2
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (200gr)	$P_h$	200
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	193
	Teneur en eau (%)		
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_3$	3.6
<i>Teneur en eau moyenne</i>	$W = 4 \%$		

## II.1.2.6 - Analyse granulométrique (NA 2607)

Tableau II.14 : Analyse granulométrique du sable

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
5	0	0	0,0	100,0
2.5	2	2	0,1	99,9
0.8	66	68	3,4	96,6
0.4	667	733	36,6	63,4
0.2	1297	1963	98,2	1,8
0.1	697	1993	99,7	0,3
0.08	1298	1995	99,7	0,3
Fines	699	1997	99,9	0,1

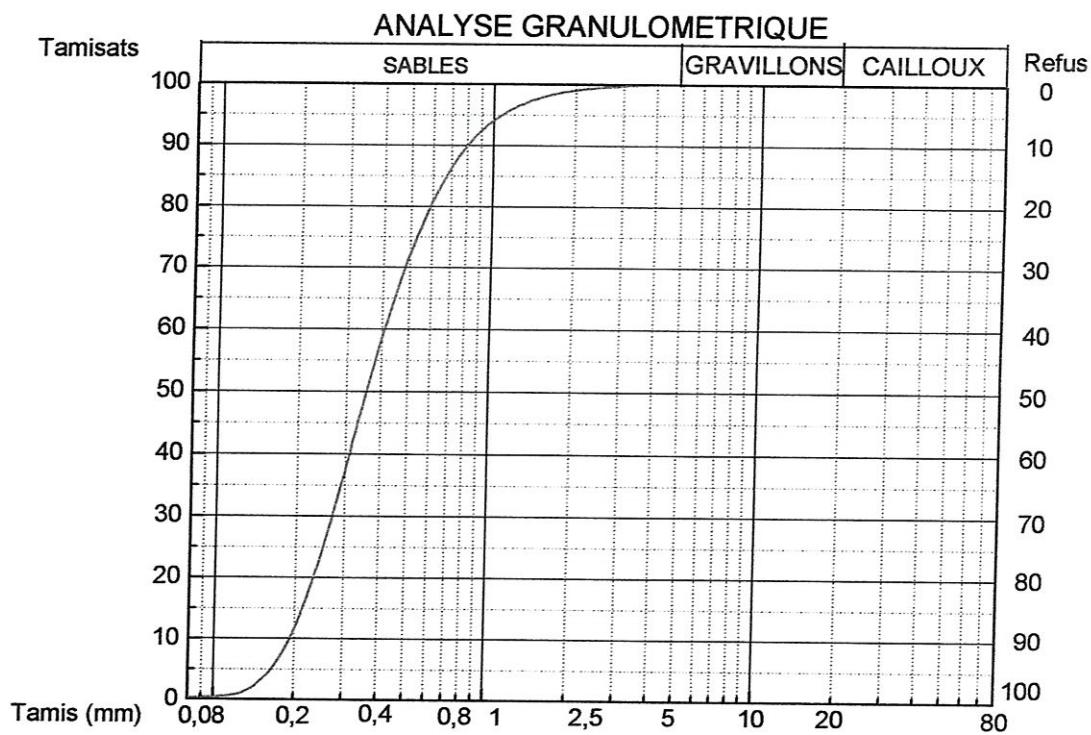


Fig.II.12 : Courbe granulométrique du sable

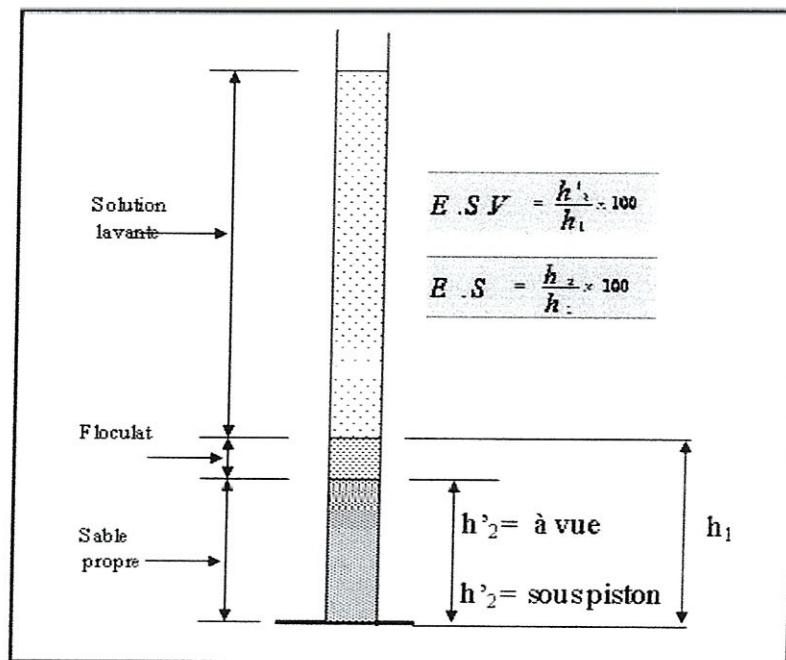
On peut remarquer à la lecture de la courbe granulométrique, que le sable utilisé est un sable fin.

#### *II.1.2.7- Equivalent de sable (NA 455)*

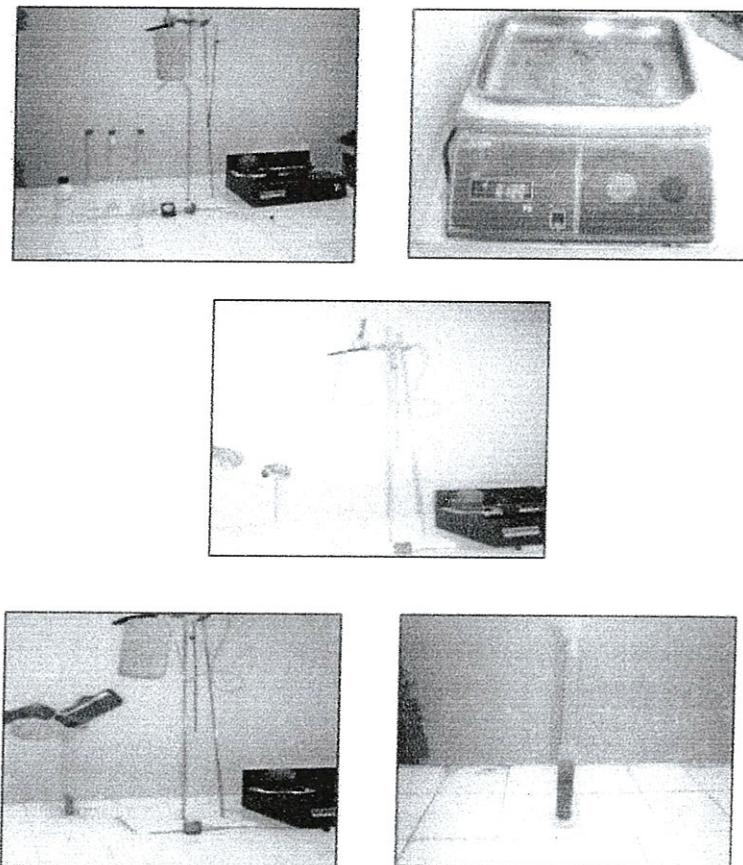
Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé. Pour cela on utilise une solution lavante, elle permet de séparer les éléments fins argileux et provoque la flocculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines flokulées, (sable propre + éléments fins =  $h_1$ ) et la hauteur de sable propre ( $h_2$  si c'est au piston ou  $h'_2$  si c'est au régllet).

##### Mode opératoire :

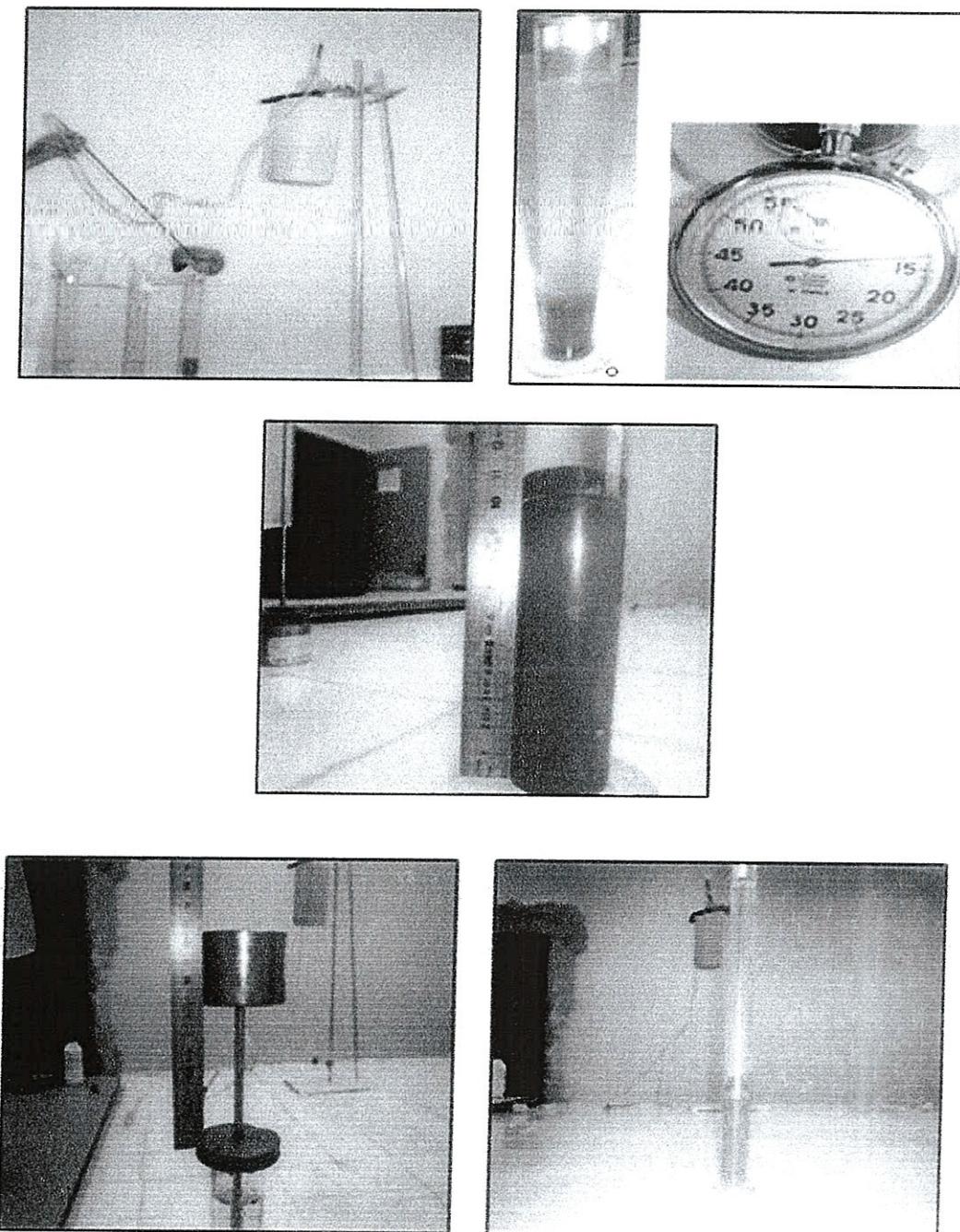
- Remplissage de la solution lavante jusqu'au premier trait.
- Masse de sable 120g (sec) est introduite dans l'éprouvette.
- Imbibition du sable pendant 10 min dans la solution lavante.
- Eprouvette secouée (60 cycles en 30 secondes), lavage du sable avec la solution lavante, et remplissage jusqu'au deuxième trait.
- Début de la décantation, durée 20 min.
- Mesure de la hauteur de sable  $h_1$  de l'ensemble sable plus flokulat.
- Mesure à vue la hauteur
- Mesure de la hauteur du sable  $h_2$  au piston.



FigII.13 (a) : Mesure de la propreté du sable



FigII.13 (b) : Mesure de la propreté du sable



*Fig. II.13(c): Mesure de la propreté du sable*

Tableau II.15 : Résultat de l'équivalent de sable

Lectures	Prise n° 1	Prise n° 2	Prise n° 3
$h_1$	10.85	10.90	10.90
$h_2$	9.3	9.8	9.7
$h_2$	9.1	8.65	8.7
Sur chaque prise :			
E.S.V	85.7	89.9	89.0
E.S	83.9	79.4	79.8
Sur l'échantillon :			
E.S.V		88.20	
E.S		81%	
Température :		20°C	

Le ES de notre sable est de 81%, ce qui montre qu'il est propre.

### Récapitulatif des résultats

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le sable est résumé dans le tableau suivant :

Tableau II.16 : Résultats des essais sur le sable.

Essais	Résultats des mesures
Masse volumique absolue	$M_V = 1590 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente	$\rho = 2640 \text{ kg/m}^3$
Compacité	$C = 0.60$
Porosité	$E = 0.40$
Teneur en eau	$W = 4 \%$
Analyse granulométrique	figure II.12
Equivalent de sable	E.S = 81%

L'ensemble des résultats, à l'exception de l'étendue granulaire, montre que le sable utilisé répond aux différentes normes utilisées.

### **II.1.3. Les adjuvants**

#### *II.1.3.1 Définition et rôles des adjuvants*

Les adjuvants sont des produits (liquides ou poudres) qui ajouté au béton en faible quantité (moins de 5 %) permettent d'améliorer certaines *propriétés* : maniabilité et imperméabilité, ou *qualités* : compacité et résistance au gel, souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci. Les adjuvants sont toujours incorporés dans la masse du béton frais.

Le mode d'action des adjuvants est :

- *Soit mécanique* : en modifiant la consistance du mélange ;
- *Soit physique* : en agissant sur la tension superficielle des composants ;
- *Soit chimique* : en modifiant la vitesse de prise et la réaction d'hydratation du ciment.

Il s'agit donc de matières possédant des propriétés chimiques ou physico-chimiques appropriées au rôle assigné. Un adjuvant a en général une action principale d'après laquelle il se trouve défini et classé.

#### *II.1.3.2 Classification des adjuvants*

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci.

On pratique on propose la classification suivante :

#### **Classification des adjuvants**

LES PLASTIFIANTS ;  
LES FLUIDIFIANTS ;  
LES ENTRAINEURS D'AIR ;  
LES ACCELERATEURS DE PRISE ;  
LES RETARDATEURS DE PRISE ;  
LES HYDROFUGES ;  
LES ANTIGELS ET ANTIGELIFS ;  
LES ADJUVANTS DIVERS.

### *II.1.3.3 Essais sur les adjuvants*

Le but visé par ces essais et de tester l'efficacité de deux adjuvants disponibles au LGCH, à savoir le Plastiment BV40 de la firme multinationale Sika et le Medafluid SFR122 de la firme nationale Granitex, et d'en déduire le dosage optimal.

Les essais étaient effectués sur mortier dont la composition (en masse) est la suivante :

- 3 parts du sable
- 1 part de ciment
- 0.58 part d'eau

#### **Description des produits utilisés:**

Le MEDAFLUID SFR122 est un super plastifiant à base de polymère combiné. En plus de sa fonction principale de super plastifiant haut réducteur d'eau, il présente comme effet secondaire un retard de prise. Il est compatible avec les ciments CPA et CPJ.

Le MEDAFLUID SFR122 est utilisé pour la réalisation de tous bétons rhé plastiques c'est-à-dire des bétons fluides s'écoulant facilement sans ségrégation avec un rapport E/C très faible. De plus il permet sur béton frais, d'augmenter la maniabilité du béton, de faciliter la mise en œuvre et de retarder le temps de prise. Sur béton durci, il permet d'augmenter, l'imperméabilité, les résistances mécaniques à long terme, la durabilité et de diminuer le retrait.

Le PLASTIMENT BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergique qui d'augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité. Par ailleurs, son emploi facilite la mise en place du béton, réduit éventuellement le dosage en ciment, retarde de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Le PLASTIMENT BV 40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10 % environ.

### Procédure expérimentale

L'essai consiste à mesurer l'étalement, en fonction du dosage en super fluidifiant, d'un mortier placé dans un moule tronconique dont on peut voir sur la figure II.14 les dimensions

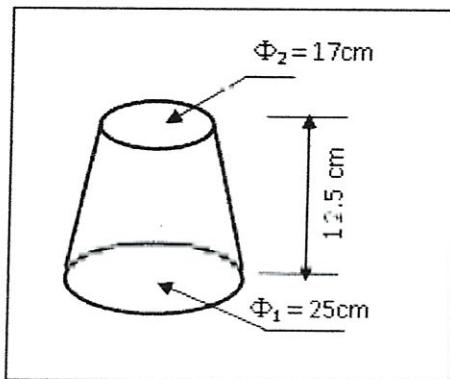


Fig.II.14 : Moule utilisé pour la mesure de l'étalement du mortier

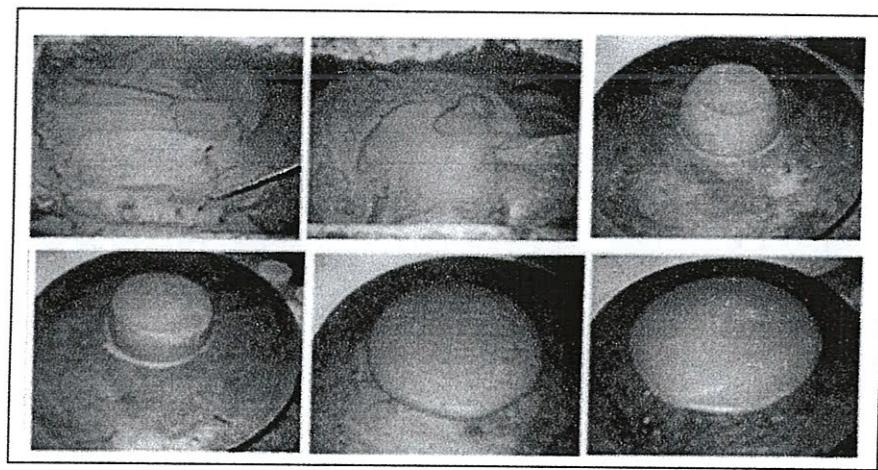


Fig. II. 15 : Les photos représentent les étalements du mortier contenant divers % d'adjuvant

### Résultats des essais

Pour ce qui est des résultats des essais ils sont illustrés à travers les tableaux II.17 et II.18, et schématisés à travers les figures II.16 et II.17.  
La figure II.15 illustre de manière très claire, l'effet spectaculaire de l'utilisation des super plastifiants sur l'ouvrabilité des mortiers.

Tableau II.17 : Test d'efficacité du MEDAFLUID SFR 122

MEDAFLUID SFR 122	
Dosage : (0.8 - 2.5%) du poids de ciment	
Dosage d'adjuvant	Mesure de l'étalement $\epsilon = [(D - 25) / 25] \times 100$
0.8%	$\epsilon = 70\%$
1%	$\epsilon = 74\%$
1.5%	$\epsilon = 96\%$
2%	$\epsilon = 102\%$
2.5%	$\epsilon = 118\%$

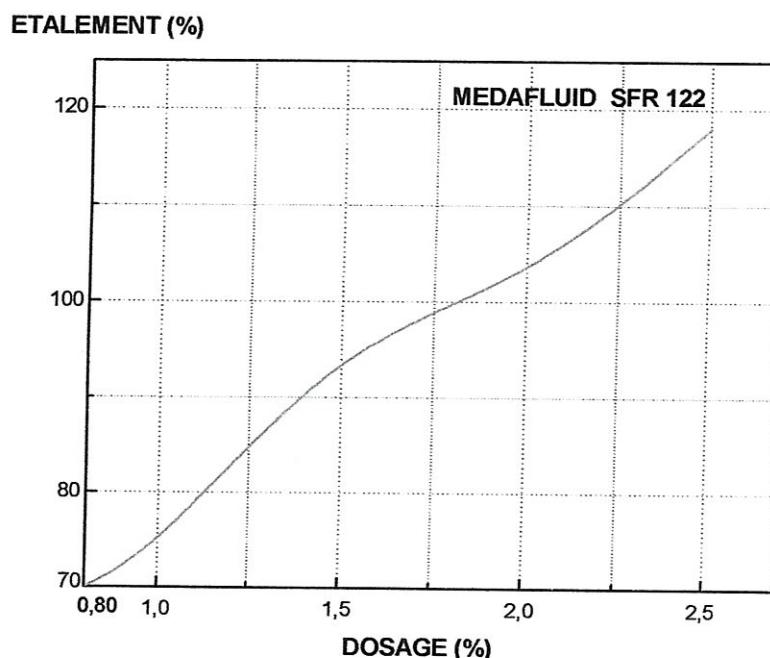


Fig. II.16 : Etalement du mortier en fonction du % du Medafluid SFR120

Tableau II.18 : Test d'efficacité du PLASTIMENT BV40

PLASTIMENT BV 40	
Dosage : (0.3 - 1%) du poids de ciment	
Dosage d'adjuvant	Mesure de l'étalement $\varepsilon = [(D - 25) / 25] \times 100$
0.3%	$\varepsilon = 50 \text{ \%}$
0.5%	$\varepsilon = 56 \text{ \%}$
0.8%	$\varepsilon = 78 \text{ \%}$
1%	$\varepsilon = 94\%$

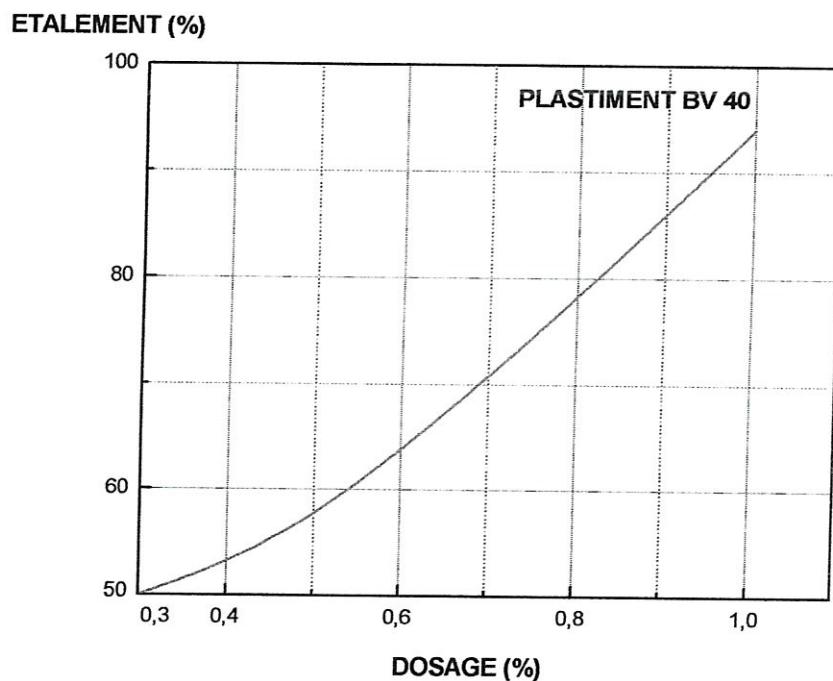


Fig. II.17 Etalement en fonction du % de Plastiment BV40

Nous avons testé les deux adjuvants sur des limites de dosages correspondant à ceux préconisés par leurs fiches techniques respectives. Le but étant rappelons de déterminer

l'adjuant le plus efficace en termes de réduction d'eau : en effet en l'absence d'agent de viscosité disponible localement, la réduction maximale de la quantité d'eau devient plus qu'impératif pour éviter les problèmes de ségrégation des BAP, problème qui se pose avec acquitté pour ce type de béton.

Les résultats comparatifs des étalements laissent apparaître une meilleure efficacité du MEDAFLUI SFR 120 par rapport au PLASTIMENT BV 40 ; en effet avec le premier produit nous avons obtenu un étalement maximal de 118% contre 94% pour le second, soit un gain de plus de 25%.

## II.2 Formulation Des Bétons

### II.2.1 Formulation des bétons vibrés

Pour la formulation des bétons témoins (bétons vibrés, notés BV), nous avons utilisé la méthode de Faury. C'est une méthode graphique, largement utilisée en pratique, qui propose, pour la composition optimale, une courbe de référence constituée de deux segments de droites, formant une ligne brisée (figure II.18).

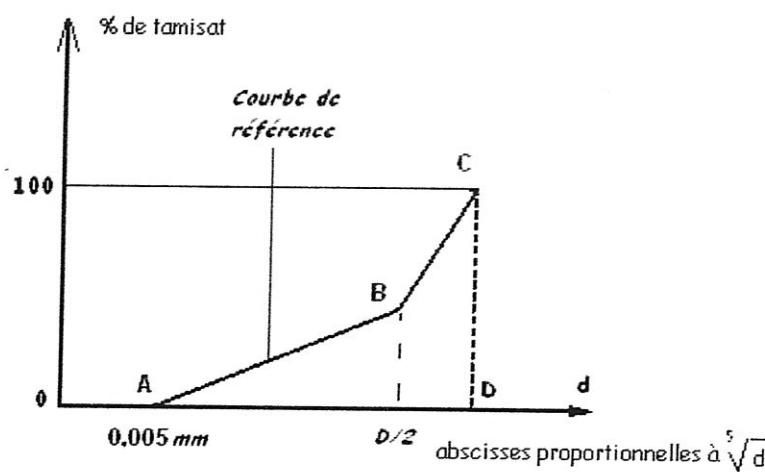


Fig. II.18 : Courbe de référence selon Faury

Deux bétons seront formulés : l'un dosé à  $350\text{Kg/m}^3$  (noté BV350) et l'autre à  $400\text{Kg/m}^3$  (noté BV400). Lors de l'étude, nous avons admis que les deux bétons cherchés sont destinés au coulage d'éléments de structures et mis en place par vibrations.

Caractéristiques de la courbe de référence:

- L'origine de coordonnées :  $(0.005; 0)$
- L'extrémité de coordonnées :  $(D; 100)$
- Point de brisure de coordonnée :  $(D/2; Y_{D/2})$

L'ordonnée  $Y_{D/2}$  est donnée par l'expression suivante :

$$Y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25 D} - 0,75} \quad (\text{II.9})$$

$D$  correspond à la maille du tamis permettant tout juste le passage de la totalité des granulats.

Soit dans notre cas :  $D = 15 \text{ mm}$

Nous avons un sable d'origine naturel (sable de mer), un gravier d'origine industrielle et un béton recherché de consistance normale, d'où:

$A = 28$ ;

$B = 1$

Détermination du rayon moyen R

Pour la détermination du rayon moyen, on admettra que le béton est destiné au coulage d'éléments à ferraillage courant, soit une valeur moyenne de 2.

$$Y_{D/2} = 28 + 17,8 \sqrt[5]{15} + \frac{1}{\frac{2}{1,25 \cdot 15} - 0,75} \approx 62$$

En appliquant la méthode graphique de Joisel, on trouve :

$$\begin{cases} \% \text{ du sable (S)} + \text{Ciment (C)} = 56 \% \\ \% \text{ Gravier} = 100 - 56 = 44 \% \end{cases}$$

La masse d'un mètre cube des éléments solides est fixée à 2200Kg.

Détermination de la composition par mètre cube :

Cas 1 : Pourcentage du ciment C = 350Kg/m<sup>3</sup>

Densité = 3.11

$$C = \left( \frac{350}{2200} \right) \times 100 = 15,9\%$$

$$\% \text{ Sable} = 56 - 15,91 = 40,1 \%$$

Donc la composition optimale selon Faury devrait contenir :

- ❖ 15,9 % de ciment
- ❖ 40,1 % de sable
- ❖ 44 % de gravier

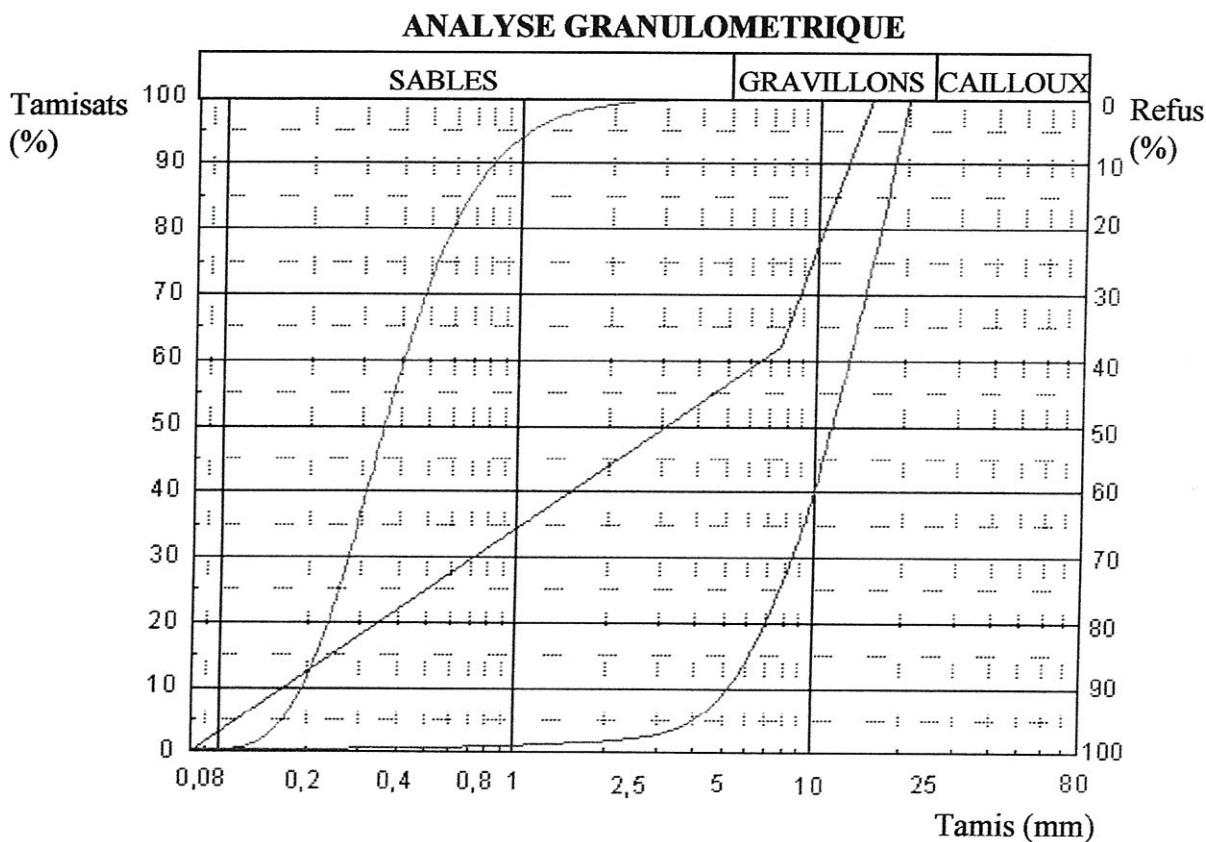


Fig. II.19 : Courbe optimale pour le BV dosé à 350Kg/m<sup>3</sup>

Détermination de la quantité d'eau :

**$D < 0,16 \text{ mm}$**

**Ciment = 350 kg**

**Sable fin ( $D < 0,16 \text{ mm}$ ) = 1,8% (2200) = 39,60 Kg**

Total à mouiller :

$$P = 350 + 39,6 = 389,6 \text{ Kg}$$

Soit une quantité d'eau de :  $Eau = (0,23 \cdot P) = (0,23 \cdot 389,6) = 89,60 \text{ Kg}$

$D \geq 0,16 \text{ mm}$

Masse à mouiller = Masse totale – Masse des éléments fins

$$2200 - 389,60 = 1810,4 \text{ Kg}$$

$$d_1 = 0,16 \text{ mm} \quad d_2 = 15 \text{ mm}; \quad K = 0,10$$

$$Eau = \frac{0,10 \cdot 1810,4}{1,17 \sqrt[3]{0,16 \cdot 15}} = 115,6 \text{ kg}$$

Soit donc une quantité d'eau totale à prévoir de :

$$89,60 + 115,6 = 205 \text{ litres}$$

Pourcentage d'eau

Il se déduit à partir de la masse des éléments secs :

$$E = \left( \frac{205}{2200} \right) \times 100 = 9,3\%$$

$$\text{Soit un rapport } \frac{E}{C} = \frac{205}{350} = 0,58$$

Composition d'un mètre cube de béton

La composition de  $(100 + E) \%$  :

$$\begin{cases} C = 15,9 \\ S = 40,1 \\ g = 44 \\ E = 9,30 \end{cases} \Rightarrow \text{un total de } 109,3 \%$$

Tableau II.19 : formulation du béton témoin (béton vibré)  $C = 350 \text{ Kg/m}^3$

Composant	Composant en poids	Masse volumique	Composant en volume	% en poids	Composition en poids
Ciment	15,9	3,1	4,94	14,5	350
Sable	40,1	2,64	15,20	36,70	871
Gravie	44	2,65	16,60	40,4	955
Eau	9,30	1,0	9,30	8,50	203
TOTAUX	109,3		46,04	100	2379

Ainsi la composition optimale selon Faury doit contenir, pour 1m<sup>3</sup> les masses suivantes (exprimées en Kg):

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Ciment} = 350 \\ \text{Sable} = 871 \\ \text{Gravier} = 955 \\ \text{eau} = 203 \end{array} \right] \text{Kg}$$

**Cas 2 : Pourcentage du ciment C = 400 Kg/m<sup>3</sup>**

Densité = 3.11

$$C = \left( \frac{400}{2200} \right) \times 100 = 18,2\%$$

$$\% \text{ Sable} = 56 - 18,2 = 37,8\%$$

Donc la composition optimale selon Faury devrait contenir :

- ❖ 18,2 % de ciment
- ❖ 37,8 % de sable
- ❖ 44 % de gravier

Détermination de la quantité d'eau :

$$D < 0,16 \text{ mm}$$

$$\text{Ciment} = 400 \text{ kg}$$

$$\text{Sable fin } (D < 0,16 \text{ mm}) = 1,8\% (2200) = 39,60 \text{ Kg}$$

$$\text{Total à mouiller : } P = 400 + 39,6 = 439,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Soit une quantité d'eau de : } Eau = (0,23 \cdot P) = (0,23 \cdot 439,6) = 101,1 \text{ Kg}$$

$$D \geq 0,16 \text{ mm}$$

Masse à mouiller = Masse totale – Masse des éléments fins

$$2200 - 439,6 = 1760,4 \text{ Kg}$$

$$d_1 = 0,16 \text{ mm} \quad d_2 = 15 \text{ mm}; \quad K = 0,10$$

$$Eau = \frac{0,10 \cdot 1760,4}{1,17 \sqrt[3]{0,16 \cdot 15}} = 112,4 \text{ kg}$$

Soit donc une quantité d'eau totale à prévoir de :

$$101,1 + 112,4 \approx 214 \text{ litres}$$

Pourcentage d'eau

Il se déduit à partir de la masse des éléments secs :

$$E = \left( \frac{214}{2200} \right) \times 100 = 9,7\%$$

$$\text{Soit un rapport } \frac{E}{C} = \frac{214}{400} = 0,54$$

Composition d'un mètre cube de béton

La composition de  $(100 + E)$  % :

$$\begin{cases} C = 18,2 \\ S = 37,8 \\ g = 44 \\ E = 9,70 \end{cases} \Rightarrow \text{un total de } 109,7 \%$$

Tableau II.20 : formulation du béton témoin (béton vibré)  $C = 400 \text{ Kg/m}^3$

Composant	Composant en poids	Masse volumique	Composant en volume	% en poids	Composition en poids
Ciment	18,2	3,1	5,87	14,5	400
Sable	37,8	2,64	14,32	36,70	813
Gravier	44	2,65	16,60	40,4	946
Eau	9,70	1,0	9,70	8,50	214
<b>TONS</b>	<b>109,70</b>		<b>46,49</b>	<b>100</b>	<b>2373</b>

Ainsi la composition optimale selon Faury doit contenir, pour  $1 \text{ m}^3$  les masses suivantes:

$$\begin{bmatrix} \text{Ciment} = 400 \\ \text{Sable} = 813 \\ \text{Gravier} = 946 \\ \text{eau} = 214 \end{bmatrix} \text{ Kg}$$

Ces bétons vibrés, notés respectivement BV350 et BV400 formulés à partir de la méthode graphique de FAURY vont nous servir de bétons témoins dans l'étude expérimentale de l'absorption capillaire qui sera présentée dans le chapitre suivant.

### **II.2.2 Composition des BAP**

Le but visé est de déterminer deux compositions de BAP élaborés à partir de la même phase inerte que les BV et ayant le même dosage en ciment. Evidemment et à cause de leur caractère spécial, ils ne peuvent être formulé que moyennant le recours à un adjuant et un surplus de fines. La démarche consistait à adapter des compositions types trouvées dans la littérature à notre cas.

#### **Rôle des fines**

Les super plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. La fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites.

Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature.

Pour notre étude nous avons utilisé des fillers calcaires produit par l'entreprise nationale des granulats (ENG) au niveau de la région d'El Kroub. Ce type de fine a fait l'objet de plusieurs recherches, citons à titre d'exemple celle faite par Zhu et Gibbs [57], qui ont étudié l'influence de différents type de filler calcaire.

#### **Adjuant**

Nous avons utilisé le MEDAFLUID SFR 120 avec un dosage fixe de 2.5%, et le BV40 avec un dosage de 1%.

### **Formulation de départ**

Pour l'étude de la composition des BAP, nous avons utilisé une formulation type trouvée dans la littérature que nous avons adaptée aux conditions locales. Les paramètres de l'étude sont :

- ❖ le dosage en ciment est fixe (soit deux cas)
- ❖ le dosage en adjuvant est maintenu fixe (2% de MEDAFLUID)
- ❖ le rapport Sable/gravier est maintenu fixe (de l'ordre de 1)
- ❖ Recours aux ultrafines, dont le dosage est fixé de manière telle que la masse de la phase fine (mélange ciment + ultrafine) soit de l'ordre de 500 Kg/m<sup>3</sup>

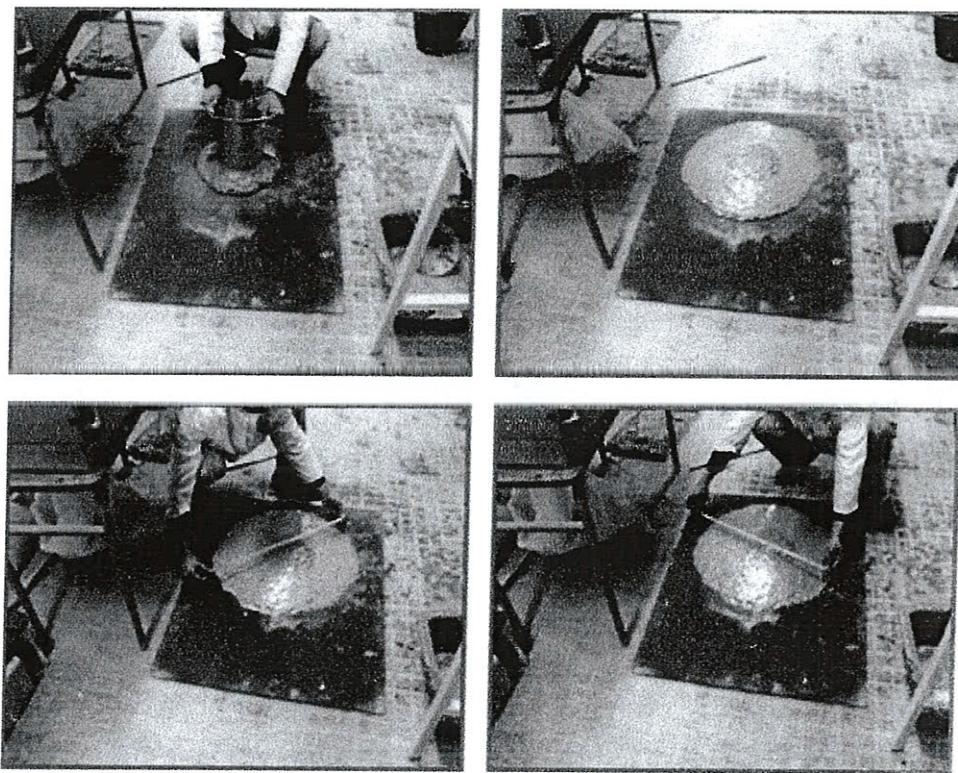
A partir de la composition type, nous avons entrepris une série d'essais préliminaires consistant en la détermination du dosage en eau conduisant à un étalement au cône de l'ordre de 60 cm.

#### ***II.2.2.1 Formulation du BAP350***

- ✓ C = 350 Kg
- ✓ Fines calcaires = 130 Kg
- ✓ Sable = 880 Kg
- ✓ Gravier = 790 Kg
- ✓ Adjuvant MEDAFLUID SFR 120 = 2.5%
- ✓ Eau = 210 Kg

### **Mesure de l'étalement au cône d'Abra'm's**

Un exemple de mesure est illustré à travers la série de photos suivantes :



**Fig.II .20 : Mesure de l'étalement du BAP 350**

Les étalements moyens mesurés au cône sont respectivement de :

- ✓ 62 cm après 1 minute
- ✓ 66 cm après 3 minutes.

Cette composition répond ainsi à la condition de l'étalement au cône. Nous avons également mesuré l'étalement de la même composition mais avec le deuxième type d'adjuvant (PLASTIMENT BV40 dosé à 1%). Les résultats conduisent à une galette de 48cm de diamètre. Cet essai a confirmé ainsi les résultats obtenus sur mortier ou le MEDAFLUID s'est avéré plus performant en termes d'augmentation de l'ouvrabilité que le PLASTIMENT BV 40.

### ***II.2.2.2 Formulation du BAP400***

Dans ce béton, le dosage en ciment est fixé à 400Kg/m<sup>3</sup>. La aussi la démarche consiste à déterminer un dosage en eau permettant un étalement de l'ordre de 60cm. Un travail expérimental préliminaire aboutit à la composition suivante :

- ✓ C = 400 Kg
- ✓ Fines calcaires = 100 Kg
- ✓ Sable = 810 Kg
- ✓ Gravier = 800 Kg
- ✓ Adjuvant MEDAFLUID SFR 120 = 2.5%
- ✓ Eau = 205 Kg

Les étalements moyens mesurés au cône, pour cette composition sont respectivement de :

- ✓ 66cm après 1 minute
- ✓ 68cm après 3 minutes.

Après avoir déterminé le dosage en eau adéquat, nous avons testé nos compositions vis-à-vis des autres conditions préconisées pour les BAP , notamment les essais à la boite en L, l'essai au Funnel et la stabilité au tamis. Les résultats de ces essais sont illustrés dans le paragraphe suivant.

### ***II.2.2.3 Etude de la stabilité des BAP***

#### **Mesure boite en L**

Les figures suivantes montrent la procédure entreprise pour la mesure des hauteurs h1 et h2 de la boite en L.

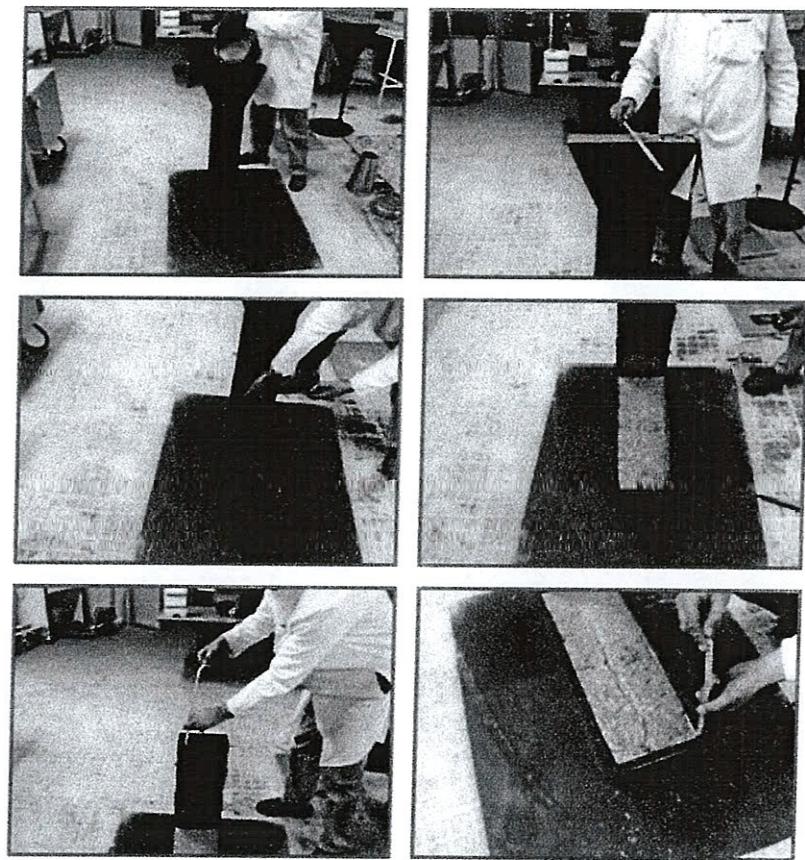


Fig.II .21 : Mesure de la boîte en L

Tableau II.21 Mesures de la fluidité à la boîte en L pour le BAP350

$h_2$	$h_1$	$\left( \frac{h_2}{h_1} \right)$
13	16	0.81
12	14	0.96

Le rapport  $\left( \frac{h_2}{h_1} \right)$  moyen est de 0.88, valeur supérieure à la limite autorisée qui est de 0,80.

#### Essai d'entonnoir (V-Funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante:

l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure II.23 est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le

critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton SCC

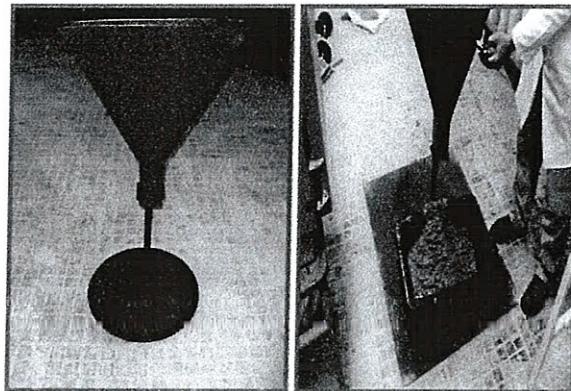


Fig.II.22 : Mesure du temps d'écoulement du béton

Pour le BAP350, nous avons obtenu un temps au V-Funnel de 11 secondes. le BAP est donc conforme aux recommandations de l'AFGC.

#### Mesure de la stabilité au tamis

Cette mesure est importante pour la stabilité vis-à-vis du problème de la ségrégation des BAP. La démarche adoptée est représentée à travers les photos suivantes :

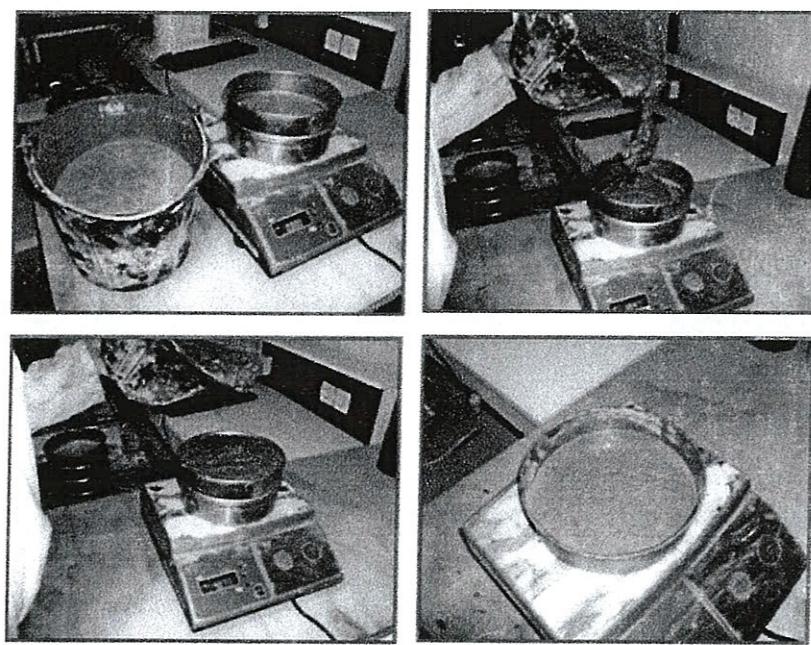


Fig.II.23 : Mesure de la stabilité des BAP

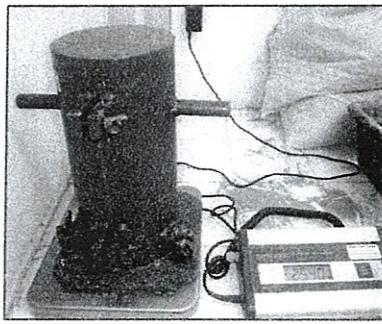
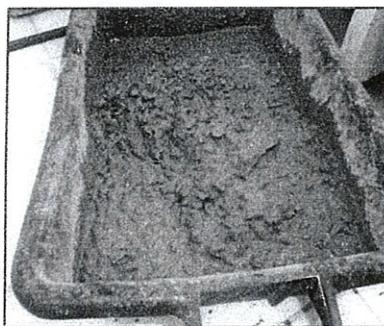
La mesure du pourcentage en masse de la laitance d'un échantillon de béton de 4,9 Kg passant à travers un tamis de 5mm, a donné un taux de 8,1%, ce qui correspond à une stabilité satisfaisante, qui elle doit être comprise entre 0 et 15%.

#### *II.2.2.1 Essais sur les compositions*

Une fois avoir caractérisé les deux BAP (BAP350 et BAP400), vis-à-vis des critères de mise en œuvre, nous avons procédé à des mesures de densités à l'état frais et à des mesures de résistance à la compression axiale.

#### **Mesure de la densité à l'état frais**

Afin de contrôler la densité du béton, nous avons procédé à des mesures sur cylindres comme le montre les photos suivantes :



*Fig.II.24: Mesure de la densité des BAP à l'état frais*

Les résultats des essais de la densité à l'état frais sont présentés dans le tableau suivant :

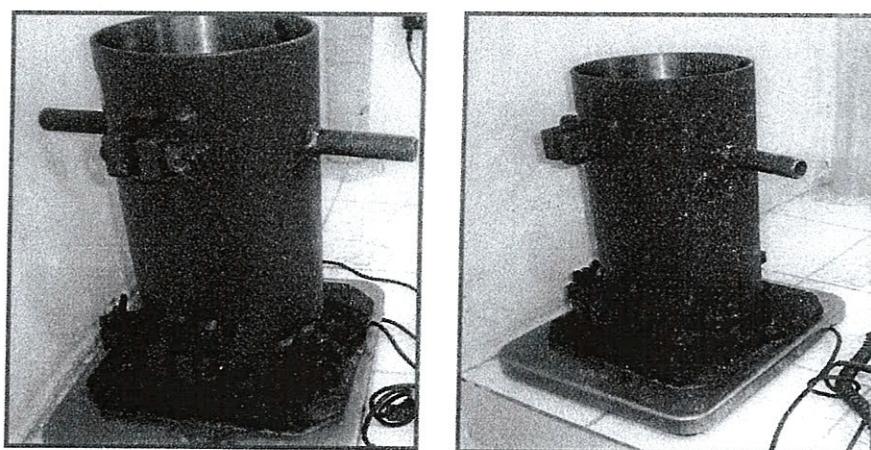
*Tableau II.22 : Densités des bétons utilisés à l'état frais*

Nature du béton	Densité expérimentale	Densité théorique
BV350	2.28	2.37
BV400	2.33	2.37
BAP350	2.27	2.38
BAP400	//	2.32

La différence entre densité théorique et expérimentales pour les bétons testés varient entre 1.7 et 4.8%, limites acceptables.

#### **Mesure de la résistance à la compression**

La résistance à la compression des bétons a été mesurée par écrasement de cylindres de 200cm<sup>2</sup> de section et de 32cm de hauteur. Les éprouvettes coulées des moules métalliques ont été conservées en laboratoire sans contrôle de la température ni du degré hygrométrique.



*Fig.II.25 Moules cylindriques utilisés*

Avant l'essai à la presse, sur la face supérieure du cylindre ont été placées deux cartons.

Les essais ont été conduits sous vitesse de chargement constante, à raison d'une augmentation de charge de  $(2 \text{ à } 5) \text{ kg/cm}^2$  par seconde. Enfin la presse utilisée est dotée

d'un pupitre à affichage numérique, qui permet le réglage d'un certain nombre de paramètres ainsi que le suivi de l'essai. Ainsi la loi de comportement peut être visionnée et enregistrée pour une interprétation ultérieure.

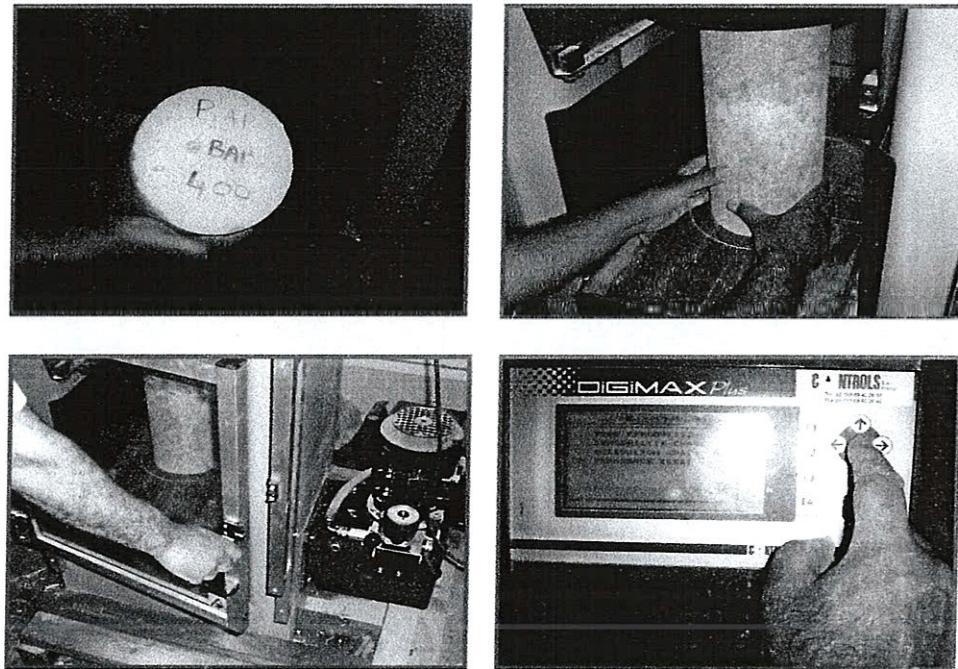


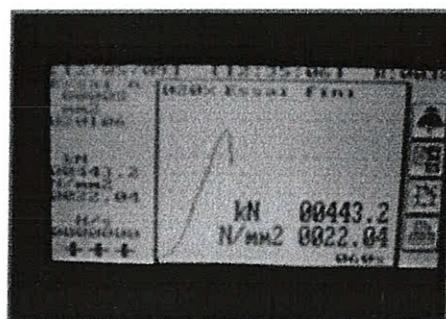
Fig.II.26 : Mesure de la résistance à la compression

Tableau II.23 : Résistances en compression des compositions utilisées

Nature du béton	Résistance moyenne à la Compression (Mpa)
BAP 350	22.0
BAP400	22.9
BV350	25.1
BV400	30.2

A la lecture du tableau, on constate que les BV présentent une meilleure résistance que les BAP. Les valeurs trouvées varient entre 22 et 30 MPa, correspondant ainsi à des bétons courants.

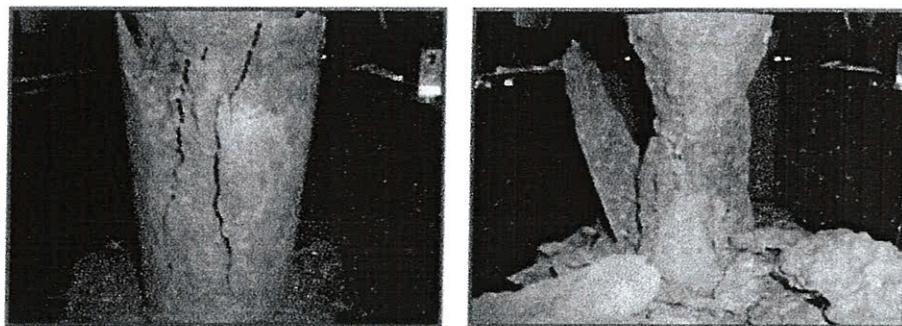
Bien que ne faisons pas partie de l'axe de recherche proposée, nous avons profité des performances de la machine utilisée pour présenter un exemple type du comportement du BAP sous compression mono axiale (figure II.28).



*Fig.II.27 : Loi de comportement en compression du BAP 400*

La loi de comportement reste similaire aux bétons traditionnels avec son pic de contraintes.

Enfin les deux photos suivantes montrent le processus de rupture de deux éprouvettes en BAP, en signalons que la rupture brusque avec éclatement des corps d'épreuve est constaté à l'instar du béton traditionnel.



*Fig.II.28 : Rupture des éprouvettes en BAP*

## CHAPITRE III

# Etude expérimentale de l'absorption capillaire d'eau

Ce chapitre est consacré à la mesure de l'absorption d'eau par capillarité et de la porosité accessible à l'eau de deux BAP et de deux bétons vibrés.

### III.1. PRESENTATION DU PHENOMENE DE L'ABSORPTION

#### Généralités

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

Le phénomène de l'absorption a fait l'objet de modèles sur mortiers, quelquefois sur bétons, mais surtout sur matériaux à structure poreuse non évolutive (terres cuites). Hall [H6] propose une modélisation du phénomène d'absorption d'eau des mortiers et des bétons sous la forme d'une relation linéaire entre la masse d'eau absorbée et la racine carrée du temps. Chaque matériau est alors caractérisé par la pente de cette droite désignée par le terme absorptivité. C'est à dire ;

$$M = S(t)^{1/2} \quad (\text{III.1})$$

Ce modèle a été repris et développé dans le cadre d'essais menés sur des bétons [K1, E2]. Pour ce matériau, Shonlin et Hilsdorf [S9] proposent de relier la quantité d'eau absorbée au temps par une expression de la forme :

$$W = W_1(t)^n \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$W$  = quantité d'eau absorbée au temps « $t$ » ;

$W_1$  = quantité d'eau absorbée au bout d'une heure ;

$n$  = coefficient fonction des caractéristiques d'absorption du béton étudié.

Dans le cas des terres cuites [G3] une relation du type :

$$v = k_1 r^{5/2} (t)^{1/2} \quad (\text{III.3})$$

peut être établie, où  $k_1$  caractérise le liquide interstitiel par sa viscosité, sa tension superficielle et son angle de raccordement. Cette relation montre que, à un instant  $t$ , le volume d'eau absorbé  $v$  est lié au rayon moyen  $r$  des capillaires à la puissance 5/2. Ainsi la quantité d'eau absorbée initialement est fortement conditionnée par la répartition porométrique dans le domaine des gros pores. Toutes choses égales par ailleurs, l'examen des courbes d'absorption d'eau permet donc de classer les matériaux en fonction de la taille moyenne des plus gros capillaires.

Toutefois, la loi proposée par Grandet et Thenoz [G3] admet une limite dans le temps. L'absorption capillaire s'arrête lorsque la pression motrice est équilibrée par le poids de la colonne d'eau. D'après la loi de Jurin, la pression motrice maximale est égale à :

$$P_{\max} = \frac{2T \cos(\theta)}{r} = \pi h \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$r$  = rayon du capillaire,  $T$  = tension superficielle,  $h$  = hauteur d'ascension maximale,

$\pi$  = poids volumique de l'eau,  $\theta$  = angle de raccordement. Ainsi :

$$h = \frac{2T \cos \theta}{r \pi_c} \quad (\text{III.5})$$

Pour un liquide donné :

$$h = \frac{K_2}{r} \quad (\text{III.6})$$

Cette relation est donnée par le CEB [C2] où :

$$h = \frac{15}{r} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.7})$$

L'ascension de l'eau dans un capillaire est donc limitée à cette hauteur.

La hauteur d'eau absorbée dans un capillaire est définie par la relation suivante :

$$h = \left( \frac{k_1}{\pi} \right) r^{1/2} t^{1/2} \quad (\text{III.8})$$

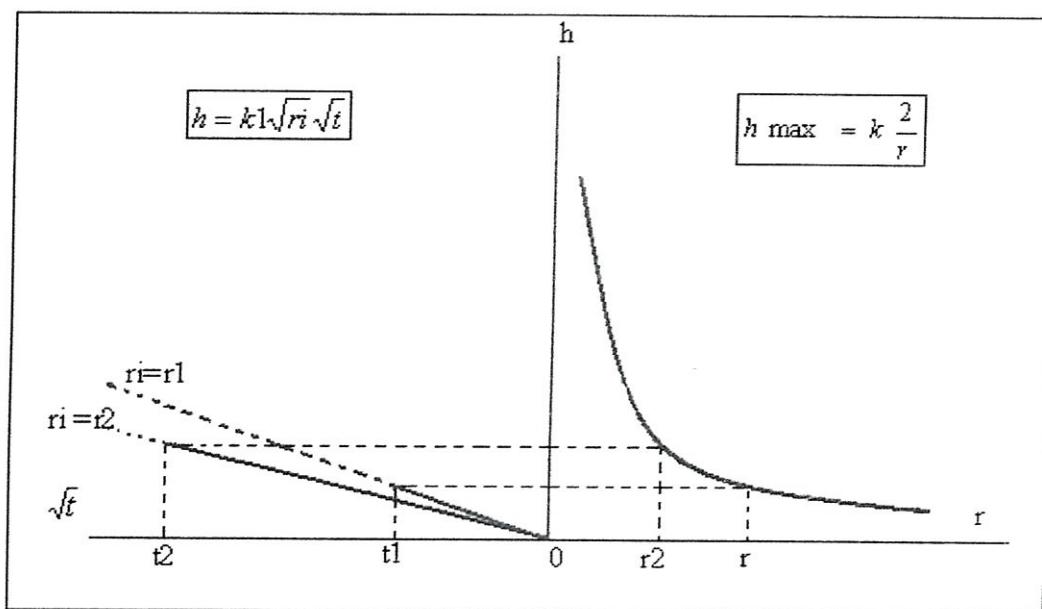
$$h = K_1 r^{1/2} t^{1/2} \quad (\text{III.9})$$

La figure III.1. montre qu'au bout d'un temps  $t_1$ , des capillaires de rayon  $r > r_1$  n'absorbent plus d'eau, la hauteur d'ascension capillaire ayant atteint la valeur maximale. Au bout d'un temps :

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (\text{III.10})$$

à leur tour, les capillaires de rayon supérieur à  $r_2$  ( $r_2 < r_1$ ) ne sont plus intéressés par le processus d'absorption d'eau.

Si l'on s'en tient à cette modélisation, on constate que le remplissage d'un capillaire est d'autant plus rapide que son diamètre est important. A cet égard, un calcul rapide montre qu'au bout d'une heure les capillaires de rayon supérieur à  $10\mu\text{m}$  ne sont plus intéressés par le processus d'absorption d'eau.



*Fig. III.1 : Variations des hauteurs d'eau dans les capillaires*

Dans un essai d'absorption d'eau, les quantités d'eau absorbées au cours des premiers instants seront donc surtout fonction du volume absorbé par les plus gros capillaires, ce qui, d'après la modélisation proposée par Grandet et Thenoz [G3], permet d'accéder à leur rayon moyen.

### **III.2- ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ABSORPTION D'EAU DES BETONS**

#### **III.2.1 .Processus expérimental**

##### ***III.2.1.1. Confection des éprouvettes***

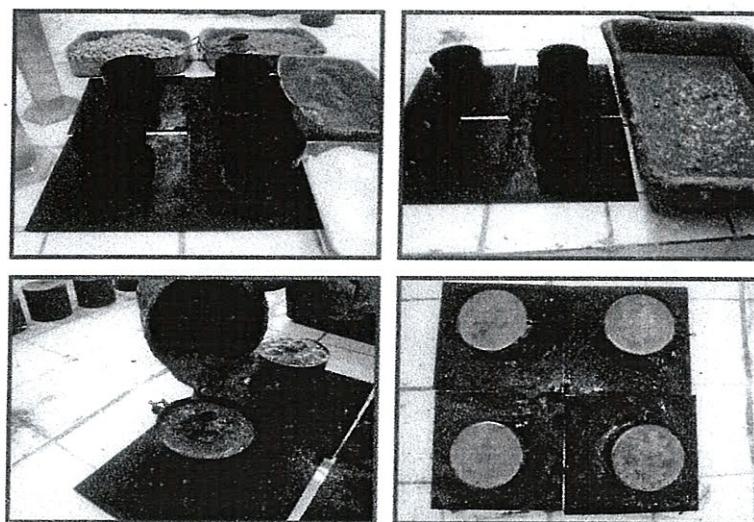
Les bétons utilisés sont deux BAP et deux bétons vibrés confectionnés à partir d'un ciment Portland composé de classe 42,5.

Les granulats calcaires concassés ont un diamètre maximal de 12,5mm pour les graviers et de 5mm pour le sable. Les dosages en ciment, les rapports,  $E/C$ , et les résistances à 28 jours ( $R_{28}$ ) sont donnés dans le tableau III.1.

*Tableau III.1 Composition et résistance des bétons utilisés*

Type de béton	Ciment Kg/m3	E /C	Adjuvant	Filler	Résistance (Mpa)
BAP350	350	0.6	8.5	130	22
BAP400	400	0.52	10	100	22.9
BV350	350	0.58	//	//	25.1
BV400	400	0.54	//	//	30.2

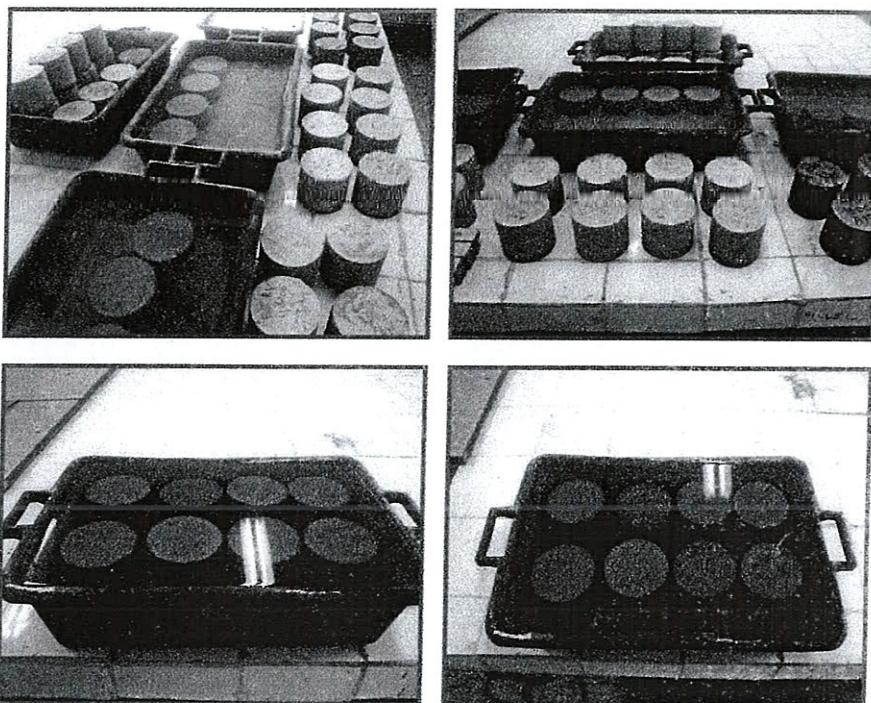
Les photos suivantes illustrent la procédure de coulage des moules cylindriques de 12cm de diamètre et de 10cm de hauteur qui ont servit pour les mesures de l'absorption.



*Fig. III.2 : Préparation et coulage des éprouvettes*

### ***III.2.1.2. Cure des bétons***

Après démoulage à 1 jour, certaines éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à 3 ou 28 jours. Les échantillons sont alors placés dans un endroit clos à l'abri des intempéries, jusqu'au moment de l'essai. Cette procédure vise l'étude des effets de la cure des BAP sur le phénomène de l'absorption d'eau.



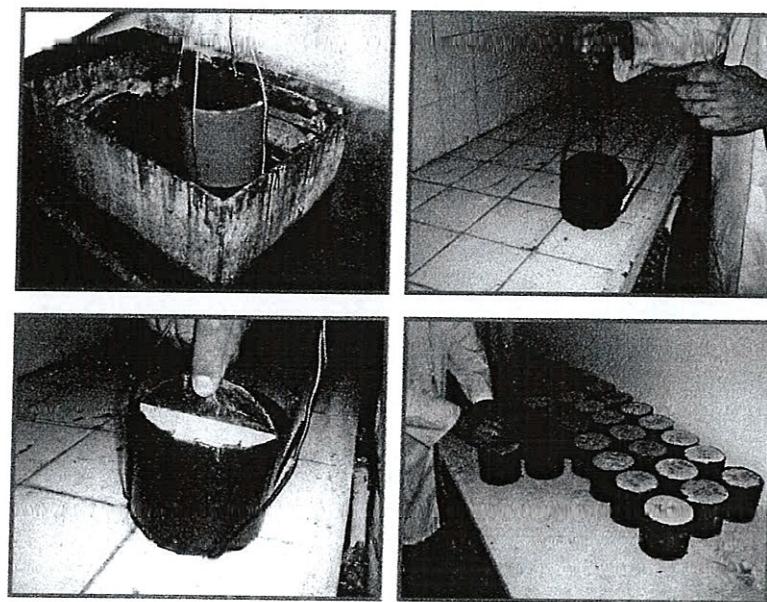
*Fig. III.3 : Conservation des éprouvettes sous eau pour une cure de 3 et 28 jours*

### ***III.2.1.3. Essai***

La méthode a été appliquée à (les échantillons de béton de forme cylindrique de 12cm de diamètre et de 10cm de hauteur) placés au contact d'une nappe d'eau libre de 1cm de hauteur maintenue à niveau constant.

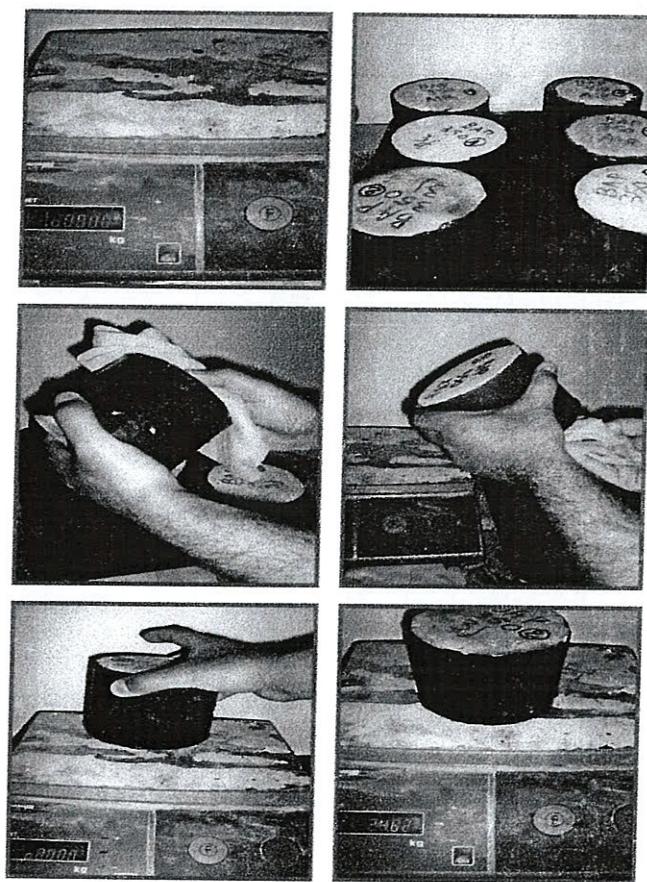
#### **Paraffinage des faces latérales**

Les faces latérales sont recouvertes d'une couche de paraffine étanche qui force l'eau à adopter un cheminement uni axial, et évite l'évaporation par ces mêmes faces. En termes de procédure, nous avons immersés les éprouvettes dans un bain de paraffine préalablement chauffées à une température de 58° C.



*Fig. III.4: Opération de paraffinage des éprouvettes*

La masse d'eau absorbée est déterminée par pesées successives des échantillons; la seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon, avant chaque pesée, à l'aide d'un papier absorbant.



*Fig. III.5: Opération de paraffinage des éprouvettes*

Les mesures ont durées plus de 65heures, avec une fréquence plus élevée pendant la demi heure, ou l'absorption est la plus importante. Les résultats des mesures de l'absorption sont illustrés dans les tableaux et graphiques suivantes :

*Tableau III.2 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BAP350 sans et avec cure de 3 et 28 jours*

Temps	Mesures (en masse gr)		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
0mn	2456	2446	2449
2mn (+2mn)	2456	2448	2455
5mn (+3mn)	2456	2449	2457
8mn (+5mn)	2456	2450	2458
18mn (+10mn)	2458	2452	2460
28mn (+10mn)	2458	2452	2460
38mn (+10mn)	2459	2452	2461
1h08mn (+30mn)	2460	2453	2462
1h53mn (+45mn)	2461	2454	2463
3h23mn (+1h30mn)	2463	2455	2465
5h23mn (+2h)	2464	2457	2466
8h23mn (+3h)	2465	2458	2468
15h23mn (+7h)	2465	2461	2472
18h23mn (+3h)	2465	2462	2472
22h23mn (+4h)	2466	2463	2473
26h23mn plus de 24h (+4h)	2466	2463	2474
30h23mn (+4h)	2466	2464	2475
42h23mn (+12h)	2466	2466	2477
53h23mn plus de 48h (+12h)	2466	2467	2479
65h (+12h)	2466	2467	2479
Masse totale absorbée	11	21	30

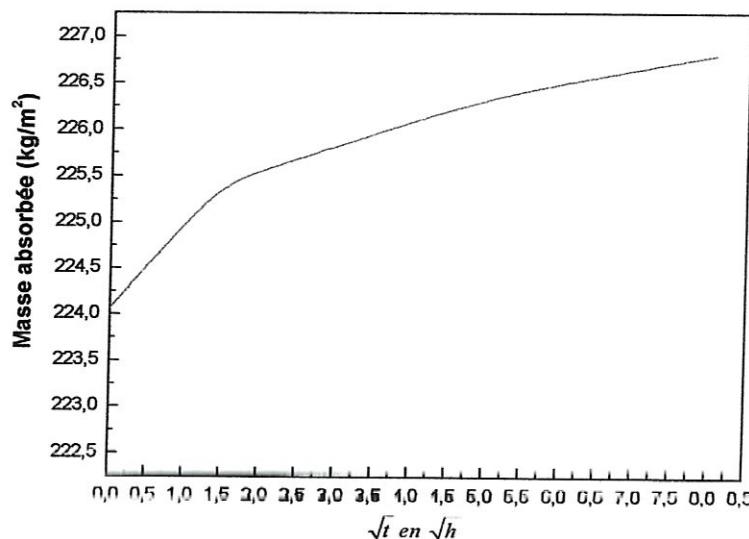


Fig.III.6 : Absorption capillaire du BAP350 sans cure

Tableau III.3 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BAP400 sans et avec cure de 3 et 28 jours

Temps	Absorption capillaire : BAP400		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
0mn	2484	2430	<b>2438</b>
2mn (+2mn)	2484	2431	<b>2440</b>
5mn (+3mn)	2484	2432	<b>2441</b>
8mn (+5mn)	2484	2432	<b>2442</b>
18mn (+10mn)	2488	2434	<b>2444</b>
28mn (+10mn)	2489	2434	<b>2444</b>
38mn (+10mn)	2490	2434	<b>2445</b>
1h08mn (+30mn)	2491	2434	<b>2445</b>
1h53mn (+45mn)	2492	2435	<b>2447</b>
3h23mn (+1h30mn)	2493	2436	<b>2448</b>
5h23mn (+2h)	2494	2437	<b>2449</b>
8h23mn (+3h)	2495	2438	<b>2451</b>
15h23mn (+7h)	2496	2440	<b>2453</b>
18h23mn (+3h)	2497	2441	<b>2454</b>
22h23mn (+4h)	2498	2442	<b>2455</b>
26h23mn plus de 24h (+4h)	2499	2442	<b>2455</b>
30h23mn (+4h)	2499	2443	<b>2456</b>
42h23mn (+12h)	2499	2445	<b>2457</b>
53h23mn plus de 48h (+12h)	2499	2446	<b>2458</b>
65h (+12h)	2499	2447	<b>2458</b>
	14	17	<b>20</b>

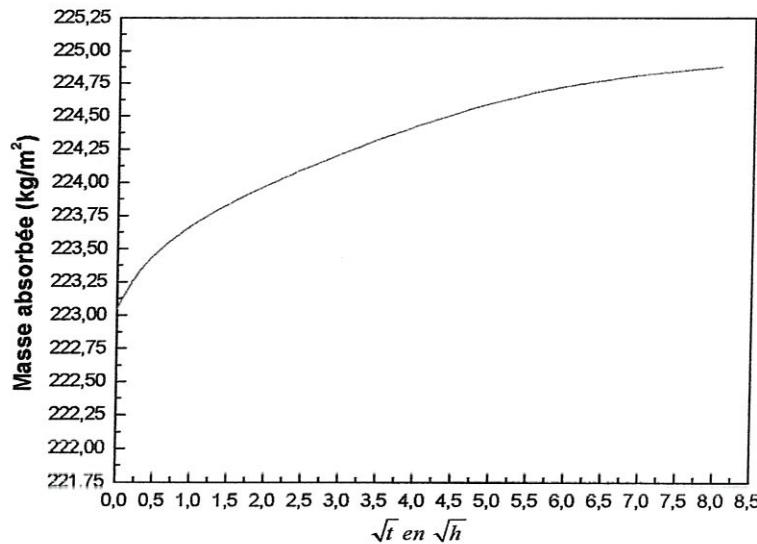


Fig. III.7 : Absorption capillaire du BAP400 sans cure

Tableau III.4 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BV400 sans et avec cure de 3 et 28 jours

Temps	Absorption capillaire : BV400		
	avec cure - 28j	avec cure - 3j	sans cure - air
0mn	2515	2490	<b>2476</b>
2mn (+2mn)	2520	2504	<b>2492</b>
5mn (+3mn)	2520	2507	<b>2496</b>
8mn (+5mn)	2521	2511	<b>2502</b>
18mn (+10mn)	2523	2517	<b>2508</b>
28mn (+10mn)	2523	2519	<b>2512</b>
38mn (+10mn)	2523	2522	<b>2516</b>
1h08mn (+30mn)	2524	2527	<b>2521</b>
1h53mn (+45mn)	2525	2532	<b>2528</b>
3h23mn (+1h30mn)	2526	2539	<b>2538</b>
5h23mn (+2h)	2528	2546	<b>2547</b>
8h23mn (+3h)	2530	2554	<b>2557</b>
15h23mn (+7h)	2532	2567	<b>2565</b>
18h23mn (+3h)	2533	2570	<b>2565</b>
22h23mn (+4h)	2534	2572	<b>2565</b>
26h23mn plus de 24h (+4h)	2535	2573	<b>2566</b>
30h23mn (+4h)	2535	2574	<b>2566</b>
42h23mn (+12h)	2537	2574	<b>2566</b>
53h23mn plus de 48h (+12h)	2539	2575	<b>2567</b>
65h (+12h)	2539	2575	<b>2567</b>
	24	85	<b>91</b>

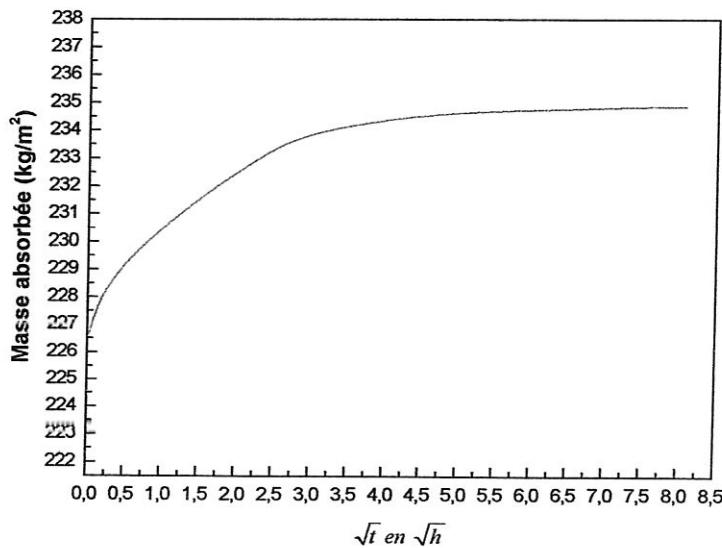


Fig.III.8: Absorption capillaire du BV400 sans cure

Tableau III.5 : Mesure de l'absorption capillaire pour le BV350 sans et avec cure de 3 et 28 jours

Absorption capillaire : BV350			
Temps	Mesures (en masse gr)		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
0mn	2529	2493	2467
2mn (+2mn)	2531	2495	2474
5mn (+3mn)	2532	2496	2478
8mn (+5mn)	2533	2497	2485
18mn (+10mn)	2533	2499	2489
28mn (+10mn)	2534	2500	2491
38mn (+10mn)	2534	2501	2494
1h08mn (+30mn)	2536	2505	2501
1h53mn (+45mn)	2539	2508	2508
3h23mn (+1h30mn)	2541	2513	2520
5h23mn (+2h)	2543	2519	2531
8h23mn (+3h)	2546	2526	2544
15h23mn (+7h)	2549	2536	2556
18h23mn (+3h)	2552	2541	2564
22h23mn (+4h)	2553	2555	2566
26h23mn plus de 24h (+4h)	2553	2555	2566
30h23mn (+4h)	2558	2568	2567
42h23mn (+12h)	2562	2580	2567
53h23mn plus de 48h (+12h)	2564	2583	2568
65h (+12h)	2564	2583	2568
	35	90	101

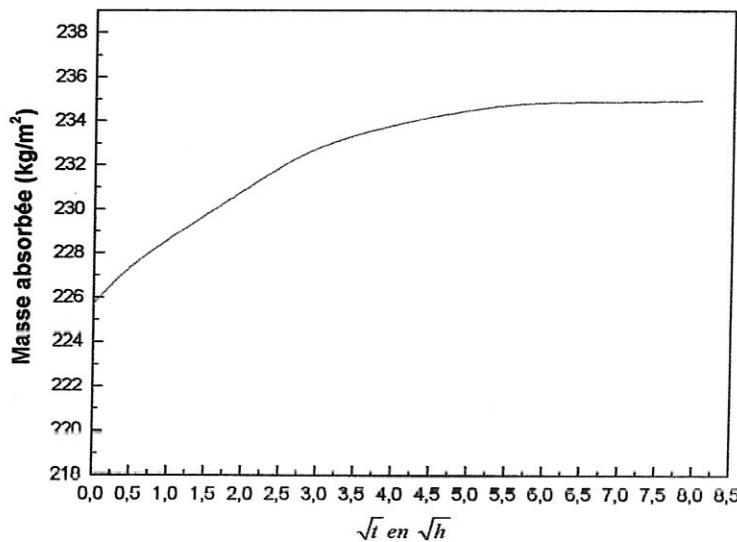


Fig.III.9: Absorption capillaire du BV350 sans cure

Les cinétiques d'absorption sont présentées par les variations de quantité d'eau absorbée par unité de surface de la racine carrée du temps. Les figures précédentes montrent des exemples de cinétique d'absorption d'eau pour les bétons témoins et pour les BAP (figures III.6 à III.9).

La pente décroissante indique qu'au fur et à mesure de l'essai ce sont des capillaires de plus en plus fins qui sont intéressés par le processus d'absorption d'eau. Deux paramètres peuvent être dégagés :

- En constate en premier lieu qu'une grande partie de l'eau absorbée se fait au bout d'une heure environs.

Pour les deux BAP, les figures III.6 et III.7 qui illustrent l'absorption capillaire sans cure montrent une première partie pratiquement linéaire correspondant à une abscisse située entre 0 et 1 heure. Elle traduit le remplissage des gros pores.

- La deuxième partie des courbes illustre le remplissage des capillaires plus fins. Ainsi la vitesse d'absorption capillaire est plus ralentie d'où ces pentes plus raides.
-

La droite entre 1 et 24 h est nommée absorptivité en référence travaux de Hall [6].

Pour la caractérisation de la durabilité, l'élément prédominant reste bien entendu l'absorption initiale représentative des plus gros capillaires.

Pour la comparaison des résultats entre les BAP et les BV, il apparaît que sur les compositions testées les BAP présentent des masses absorbées plus faibles ce qui laisse à penser un taux de pores plus faibles.

Ainsi pour le BAP350, la masse d'eau absorbée au bout de 68mn est de 2462g contre 2501g pour le BV350, de même pour le BAP400, on observe une masse d'eau absorbée de 2445g contre 2512g pour le BV400, soit une différence de l'ordre de 3%.

### **III.2.2. Influence de la cure**

L'essai d'absorption d'eau permet de mettre en évidence l'effet bénéfique de la cure. La prolongation de celle-ci diminue les quantités d'eau absorbées. La cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les capillaires existants. La prolongation de la cure de 3 à 28 jours divise pratiquement par deux l'absorption initiale comme le montre clairement les résultats du tableau III.6 et les figures III.10 et III.11.

*Tableau III.6 : Masse absorbée au bout de 65 heures*

Absorption	Bétons			
	BV350	BAO350	BV400	BAP400
sans cure	101	30	91	20
avec cure-3j-	90	21	85	17
avec cure-28j-	35	11	24	14

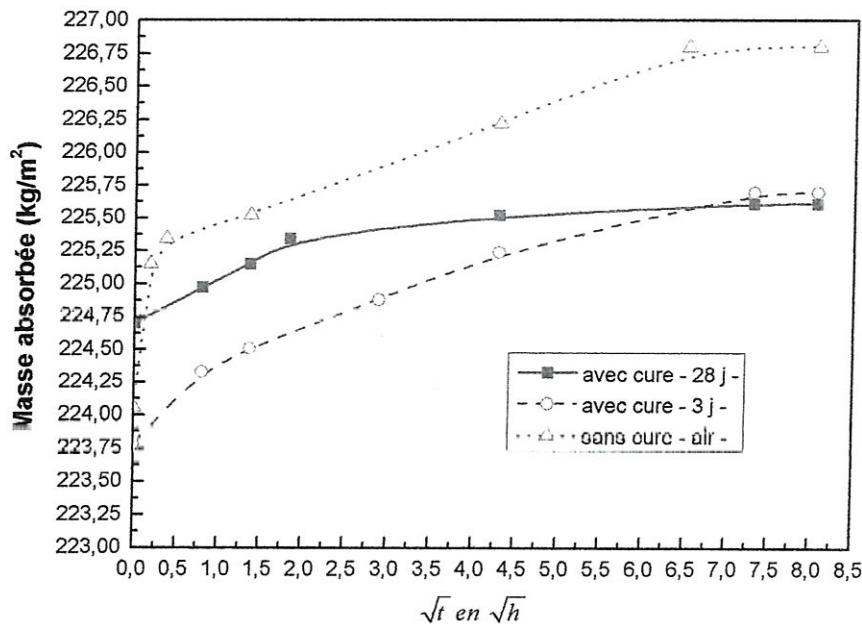


Fig.III.10 : Absorption capillaire du BAP350

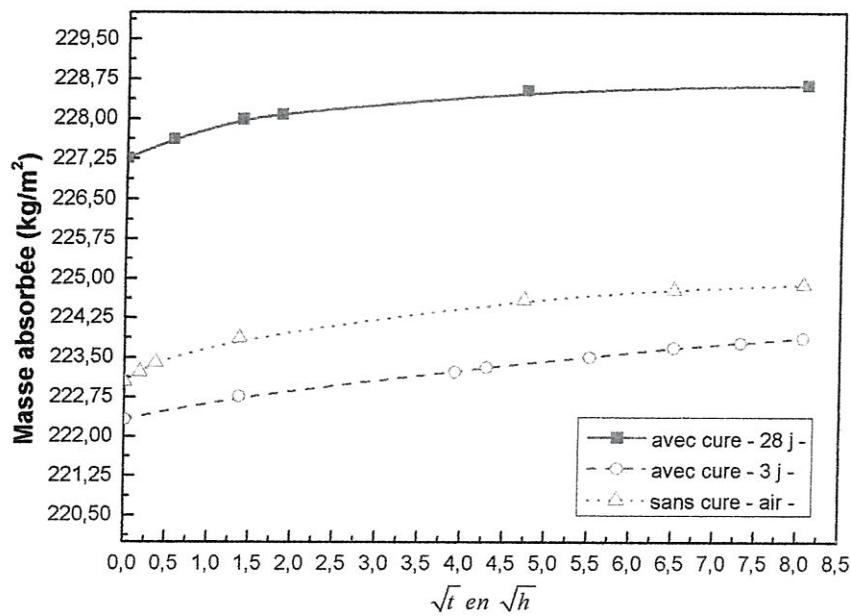
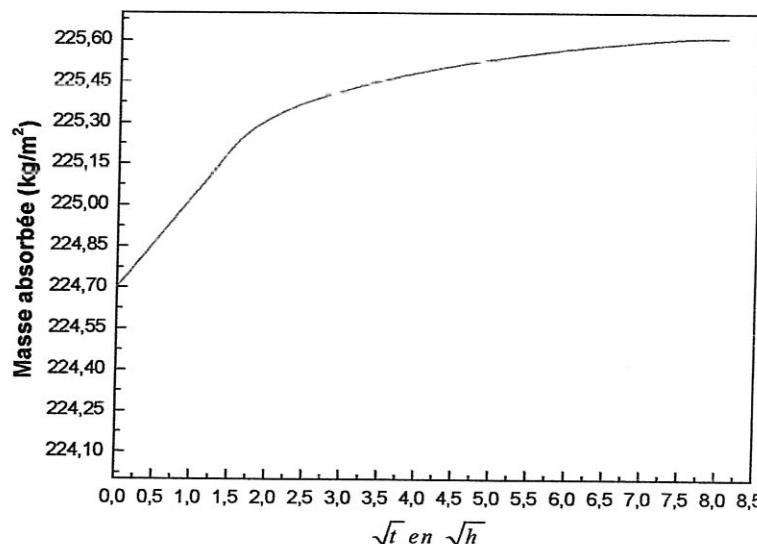
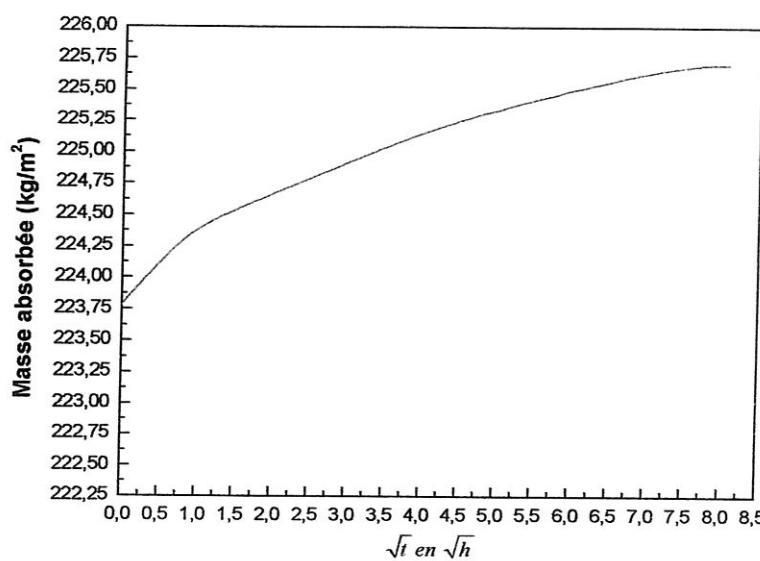


Fig.III.11 : Absorption capillaire du BAP400

Par ailleurs, nous avons également constatés que la cure du béton n'influe pas sur le processus de la cinétique de l'absorption capillaire en effet les figures III.12 à III.15 présentent des évolutions de l subit de cure préalable'absorption capillaire similaires à ceux de bétons n'ayant pas



*Fig.III.12 Absorption capillaire du BAP350 avec cure de 28j*



*Fig.III.13 Absorption capillaire du BAP350 avec cure de 3j*

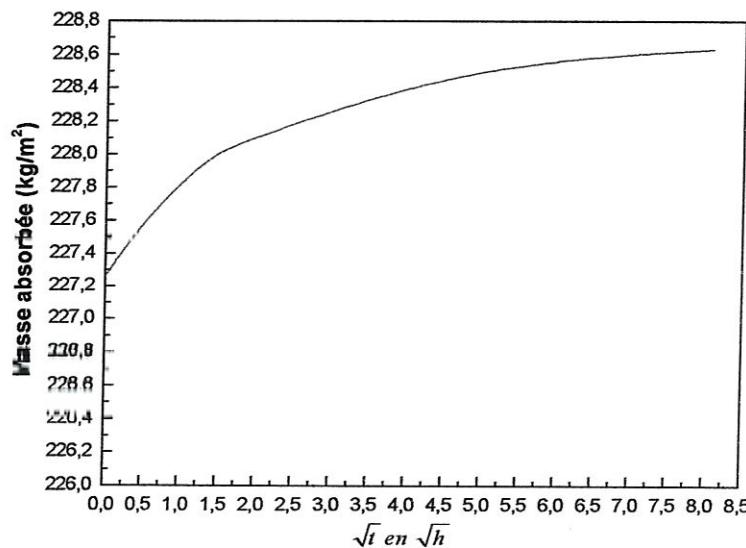


Fig.III.14 Absorption capillaire du BAP400 avec cure de 28j

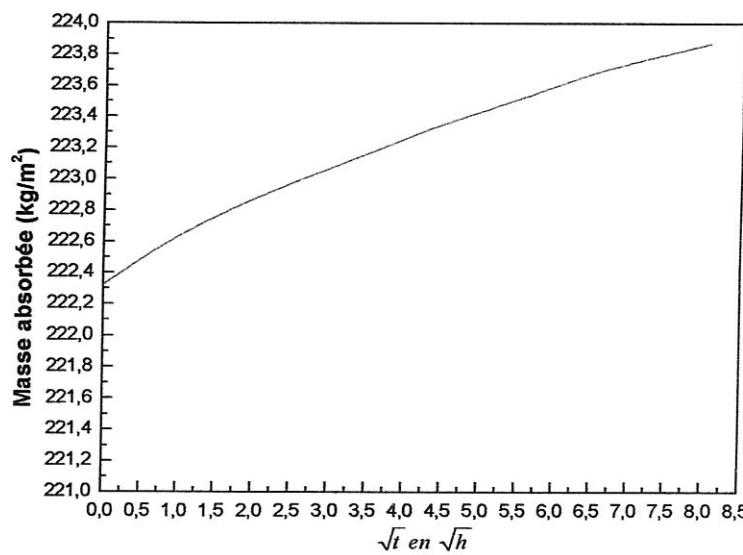


Fig.III.15 Absorption capillaire du BAP400 avec cure 3j

Une fois déterminée l'absorption capillaire pour le BAP350 et BAP400, nous avons cherchés à comparer les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature, étude que nous présentons dans le paragraphe suivant.

### **III.2.3. Autres résultats de l'absorption relatives aux BAP ces résultats vont servir de référence avec nos résultats**

Comme pour les propriétés de transfert telles que la perméabilité et la diffusion.

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

Le tableau suivant [B9] dément cette hypothèse. En effet, l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

*Tableau III.7 Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC) [B9]*

mix	Absorption by Immersion (% of dry mass)	Capillary suction after 24 hours	
		Mass increase (g)	Height (mm)
SCC1	4.8	37	25
SCC2	5.0	49	31
SCC3	4.7	23	18
SCC4	4.2	19	17
SCC5	5.1	33	23
SCC6	4.1	25	21
SCC7	6.1	26	29
TC1	4.9	43	44

Cependant, d'autres résultats [Z1] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (figure III.16) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

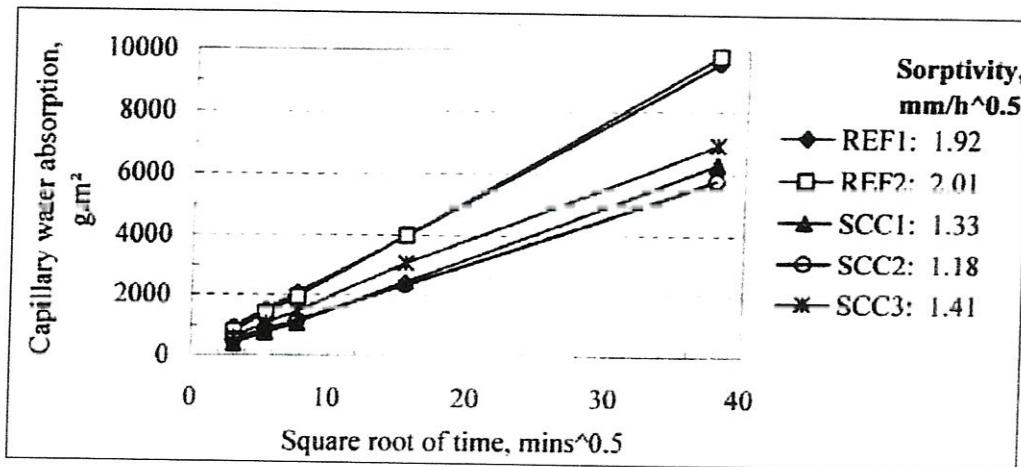


Fig. III.16 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF) [Z1]

- Nos résultats confortent ainsi les travaux de Zhu qui montrent que l'absorption capillaire des BAP est plus faibles que ceux des bétons ordinaires.
- En effet pour le BV350, la masse absorbée par capillaire est de 8935 g/m<sup>2</sup>, contre 2654 g/m<sup>2</sup> pour le BAP350.

### III.4. MESURE DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU

#### III.4.1. Introduction

Le béton présente une proportion plus ou moins grande de fissures ou de petits vides, qui renferment souvent de l'eau. Certaines cavités communiquent avec l'extérieur : c'est la porosité ouverte ; les autres composent la porosité fermée (figure III.17).

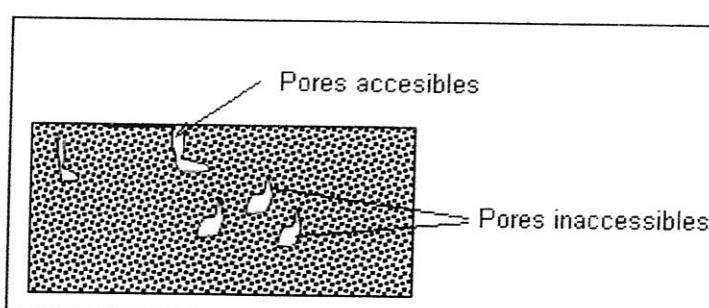


Fig. III.17 : Illustration des pores accessibles et non accessibles dans le béton

En pratique, c'est la porosité ouverte qui importe le plus, en effet l'eau en pénétrant par les pores risque de faire éclater le béton par temps de froid (gel). Pratiquement si la porosité ouverte est assez facile à mesurer, ce n'est pas le cas de la porosité fermée qui elle est difficilement quantifiable, sauf à recourir aux techniques radiographiques.

La porosité d'un matériau peut être caractérisée par :

- La densité ;
- Le pourcentage volumique des pores ;
- La taille moyenne des pores ;
- La distribution dimensionnelle des pores ;
- La surface développée des pores ;
- La continuité ou la discontinuité.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la porosité des bétons, comme par exemple la norme ASTM C642, ou le porosimètre à mercure. Les résultats obtenus dépendent dans une large mesure de la technique utilisée. Pour les bétons testés nous avons opté pour la méthode proposée par la norme ASTM C642 à cause de la simplicité de l'essai et le peu de moyen nécessaire.

### **III.4.2. Mesure de la porosité accessible selon la norme ASTM C642**

Il s'agit d'un essai assez simple et consiste à :

- ✓ *Sécher l'échantillon à l'étude à 103° C, jusqu'à masse constante (pendant au moins 24 heures), notée la masse (A);*
- ✓ *Immerger l'échantillon dans une casserole d'eau ;*
- ✓ *Chauffer jusqu'à ébullition, et ce pendant 5 heures l'échantillon immergé,*
- ✓ *Essuyé et peser l'échantillon, soit une masse (B).*

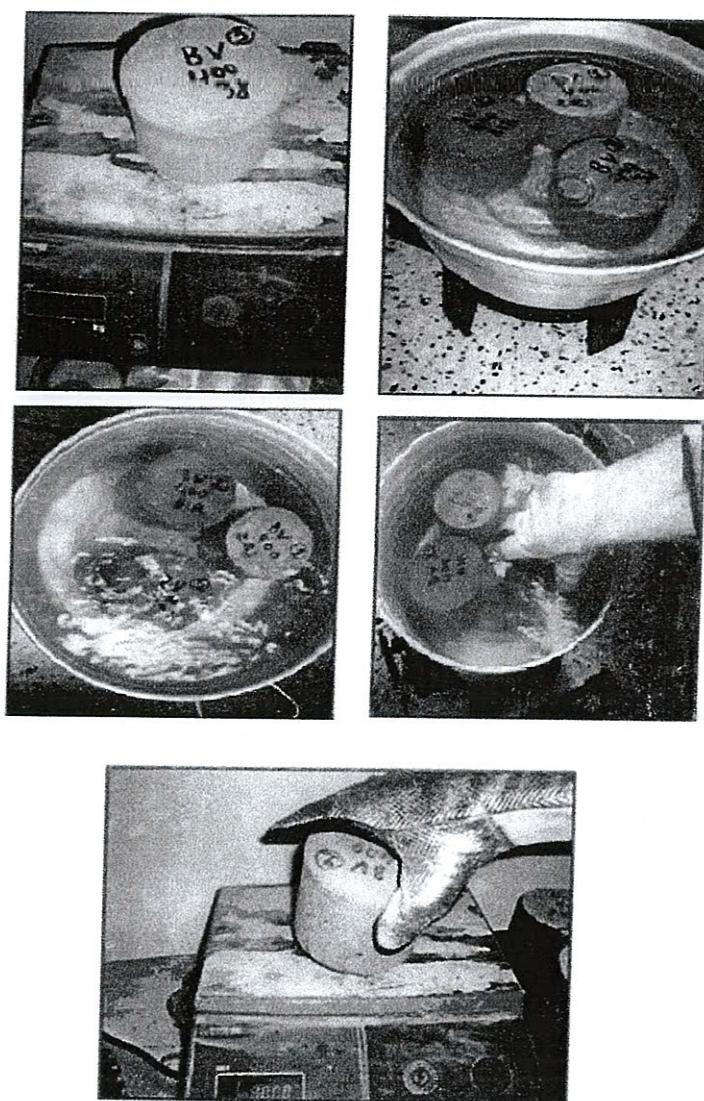
La porosité accessible à l'eau, exprimée en pourcentage, est définie alors comme :

$$P(\%) = \left( \frac{B - A}{B} \right) 100 \quad (\text{III.10})$$

Rappelons qu'un matériau est classé comme poreux lorsque les vides se répartissent régulièrement dans le volume avec un diamètre supérieur à ( $10 \text{ \AA}$ ); ainsi la pâte de ciment et le béton sont des matériaux poreux, avec des pores de capillarité de ( $100 \div 1000 \text{ \AA}$ ) de diamètre.

### **III.4.2 Procédure et résultats**

Dans notre cas, nous avons utilisés des éprouvettes cylindriques de 10cm d'épaisseur et de 12cm de diamètre. La procédure est utilisée à travers les photos suivantes :



*Fig. III.18 : Mesure de la porosité accessible selon la norme ASTM C642*

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.8: Mesure de la porosité accessible des bétons testés.

Béton		poids sec	poids après 4 heures	Porosité accessible à l'eau (%)
BAP350	avec cure 28j	2351	2494	5,7
	avec cure 3j	2253	2397	6.0
	sans cure	2281	2422	5.8
BAP400	avec cure 28j	2317	2422	4,3
	avec cure 3j	2283	2421	5,7
	sans cure	2312	2435	5.0
BV350	avec cure 28j	2414	2553	5,4
	avec cure 3j	2354	2489	5.4
	sans cure	2371	2507	5,4
BV400	avec cure 28j	2415	2540	4,9
	avec cure 3j	2395	2526	5,2
	sans cure	2406	2538	5,2

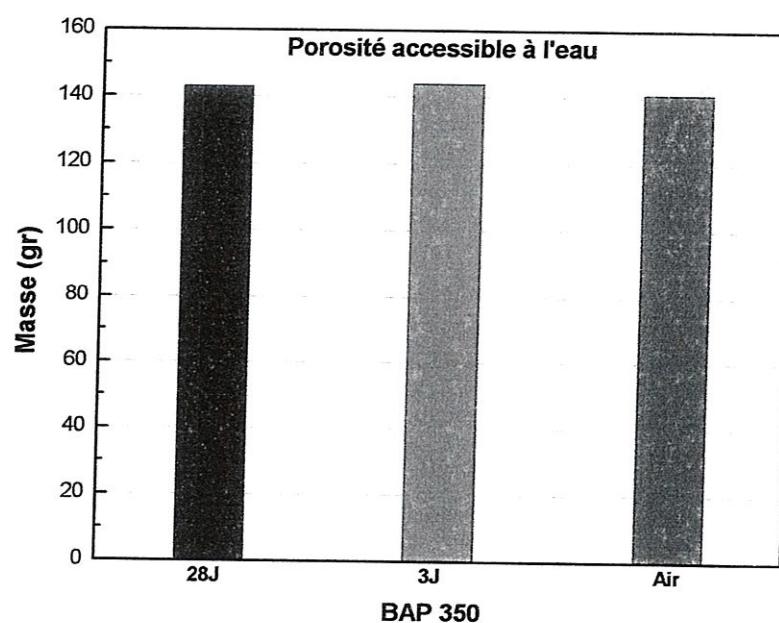
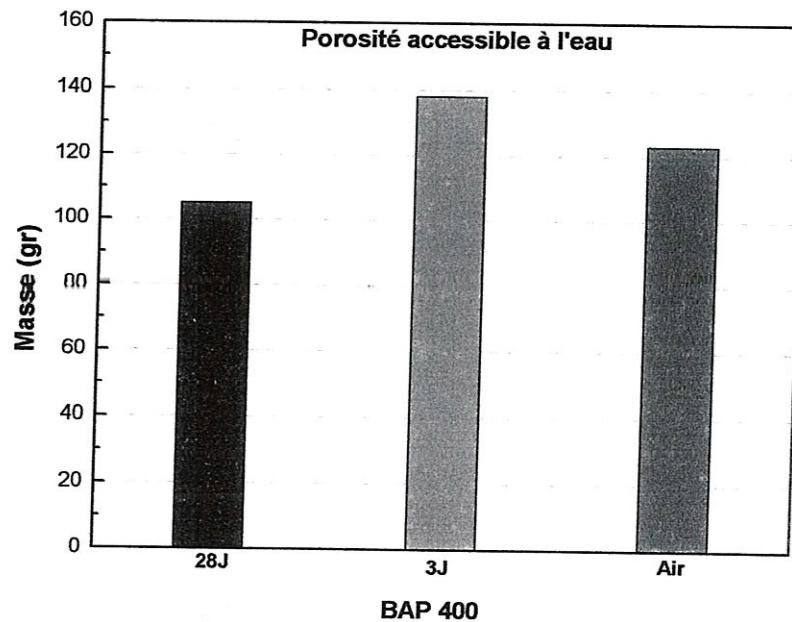
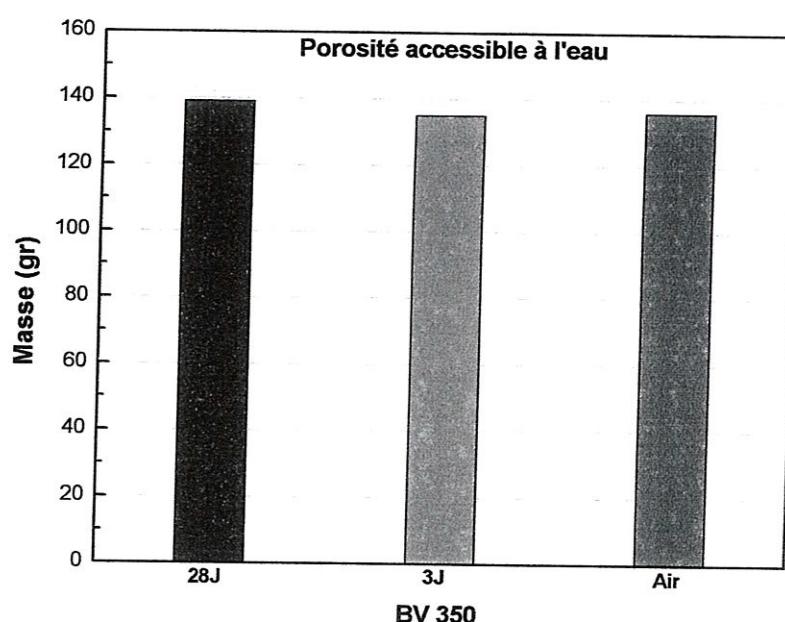


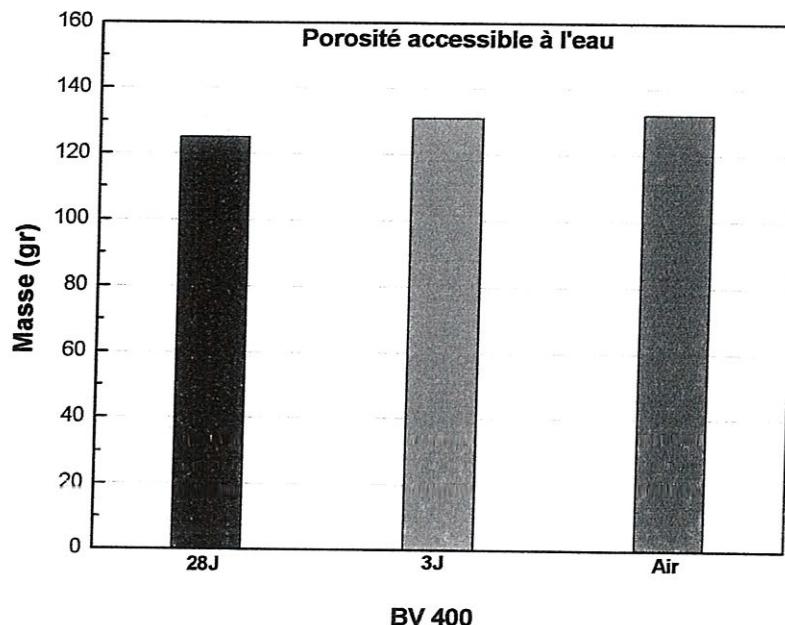
Fig. III.19 : Porosité accessible à l'eau du BAP350



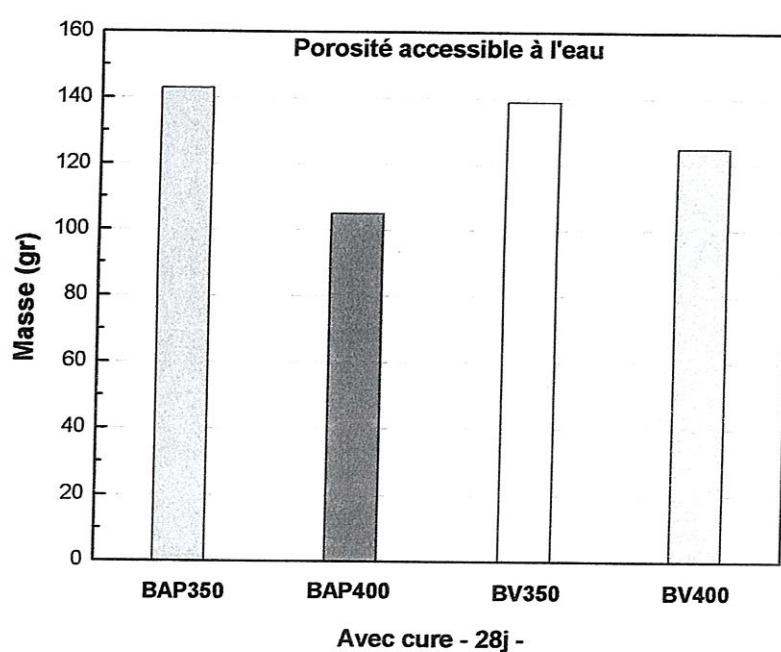
*Fig. III.20: Porosité accessible à l'eau du BAP400*



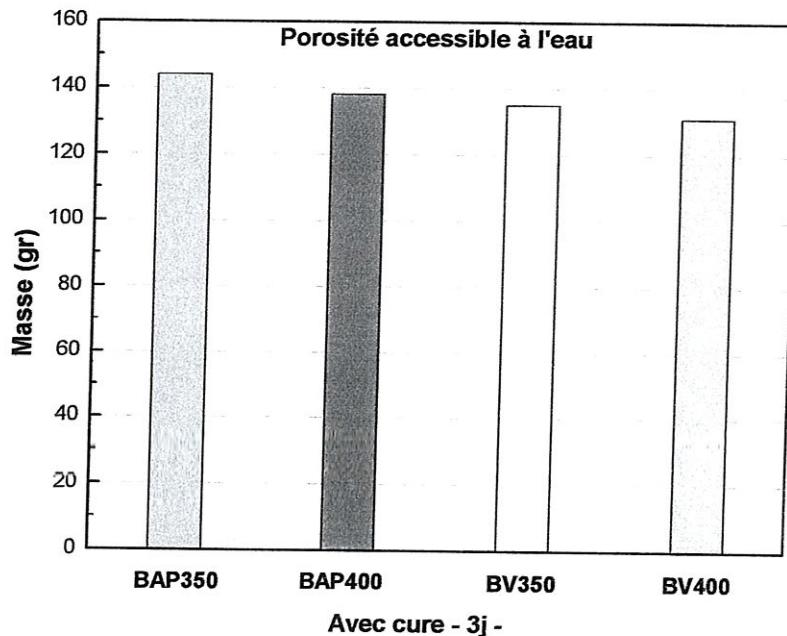
*Fig. III.21 : Porosité accessible à l'eau du BV350*



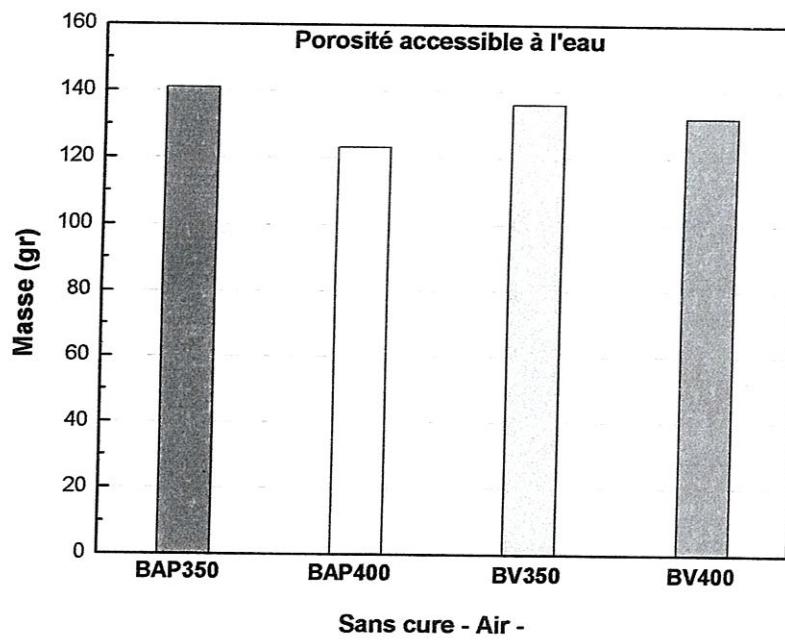
*Fig. III.22 Porosité accessible à l'eau du BV400*



*Fig. III.23: Porosité accessible à l'eau des bétons avec cure de 28j*



*Fig. III.24: Porosité accessible à l'eau des bétons avec cure de 3j*



*Fig. III.25 : Porosité accessible à l'eau des bétons sans cure – Air-*

Les mesures de la porosité accessible montre que le pourcentage (%) de pores varie entre 4.3 et 6% pour l'ensemble des compositions testées .il apparaît de même c'est le BAP350 qui présente le taux des pores le plus élevés avec 6% contre 5.7% pour le BAP400.

### **III.5.CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

*Notre travail expérimental permet de dégager les points essentiels suivants :*

- ✓ *Les granulats locaux répondent aux différentes exigences normatives locales, à l'exception de l'étendue granulaire du sable, qui correspond à un sable fin,*
- ✓ *Les BAP peuvent être formulés à partir de granulats locaux. Les essais de caractérisation à l'état frais montrent clairement une stabilité des compositions proposées.*
- ✓ *Les résistances obtenues correspondent à des bétons courants.*
- ✓ *La durabilité du béton de peau, qui enrobe et protège les armatures, conditionne la durée de vie d'un ouvrage.*
- ✓ *L'essai d'absorption d'eau, qui ne concerne que les premiers centimètres d'une éprouvette de béton, permet de caractériser ce béton de peau à partir du volume d'eau qu'il absorbe.*
- ✓ *Il permet de classer les bétons selon la taille de leurs plus gros capillaires.*
- ✓ *Il met également en évidence les effets bénéfiques de la cure sur les caractéristiques poreuses d'un béton.*
- ✓ *La fiabilité de cet essai dans la caractérisation de la durabilité a été vérifiée en mettant en évidence la proportionnalité entre le diamètre moyen des plus gros capillaires et la profondeur carbonatée.*
- ✓ *Cet essai permet de rendre compte de la qualité du béton de peau en tenant compte du passé de conservation des échantillons, ce qui est très important pour évaluer la durabilité de façon réaliste*
- ✓ *La mesure de la porosité accessible à l'eau donne des valeurs proches entre le béton vibré et les BAP.*

*Comme tout travail expérimental, notre recherche a besoin d'être valider par d'autres travaux. Et pour un approfondissement du thème, on propose les perspectives suivantes :*

- ✓ *Détermination expérimentale de la hauteur concernée par le phénomène de l'absorption*
- ✓ *Etude d'autres compositions*
- ✓ *Prolongation des essais au-delà des 60 jours ;*

## Références

- [A1]** Association Française de Génie Civil  
Bétons autoplâcants - Recommandations provisoires  
Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [A2]** J.A. Almudaiheem and W. Hansen  
Prediction of concrete drying shrinkage from short term measurements.  
ACI Materials Journal, 86 :401-408, 1989.
- [A3]** AITCIN P. C., NEVILLE A. et ACKER P  
Les différents types de retrait du béton bulletin du LCPC 215, réf. 4184, pp. 41-51, mai-juin 1998.
- [A4]** AITCIN P.C  
Autogenous shrinkage measurement  
Proceedings of 'Autogenous shrinkage of concrete [Autoshrink'98]', Hiroshima, pp.257-268, 1998.
- [A5]** AUDENAERT K., DE SCHUTTER G  
Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete  
Proceedings (SP 212) of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp.451-465, juin 2003.
- [B1]** Billberg P.  
Form Pressure generated by self-compacting concrete  
Proceedings of the Third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 271-280.
- [B2]** BILLBERG P.  
Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration  
Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- [B3]** Bétons Autoplâcants-Monographie d'ouvrages en BAP  
B.52, 2003, collection technique CimBéton, 152 pages.
- [B4]** BUI V. K. and MONTGOMERY D  
Mixture porportioning method for selfcompacting high performance concrete with minimum paste volume  
Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM Publications S.A.R.L, p. 373-384. 1999, Paris,
- [B5]** BARON J. et OLLIVIER J.P.  
Les Bétons – Bases et données pour leur formulation  
Editions Eyrolles, 1996.
- [B6]** BARCELO L., BOIVIN S., ACKER P., TOUPIN J. and CLAVAUD B  
Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms  
Concrete Science and Engineering, Vol.3, pp.85-91, juin 2001.
- [B7]** BALLIVY G  
Relationship between ITZ transport properties and durability of cementitious composites  
Report 20: "Engineering and transport properties of the Interfacial Transition Zone in cementitious composites ",  
RILEM Publications, France, 1999.
- [B8]** BRAMESHUBER W., UEBACHS S

The influence of air voids on the properties of self-compacting concrete containing fly ash",  
Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33),  
Reykjavik, Iceland, pp. 870-880, 17-20 août 2003.

[B9] BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G

Pore structure of self-compacting concrete

First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM  
center, pp. 837-843, 12-13 novembre 2002.

[C1] Collepardi et al

Laboratory-tests and field experiences of High-Performance SCCs

Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik,  
Islande, pp 271 280.

[C2] Comité Euro International du béton (CEB)

Durable Concrete Structure

2<sup>nd</sup> Edn (1989)

[D1] DE LARRARD F., SEDRAN T., IIU C., SZITKAR J.C., JOLY M., DERKX F

Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with BTRHEOM  
rheometer Rilem International Conference on Production Methods and Workability of  
Concrete, Rilem proceedings 32, Glasgow, Scotland, pp. 377-388, juin 1996.

[D2] DE LARRARD F

Concrete mixture-proportioning - A scientific approach

Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

[E1] Emborg.M

Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete  
mix for full-scale production

Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp95-105.

[E2] Emerson M

Mechanisms of water absorption by concrete

In Protection of concrete

Editor by R. Dhir and J. Green (Chapman and Hall, London, 1990).

[F1] Fédération française du béton (FFB)

Recommandations de mise en oeuvre des BAP et des BAN

SEBTP, édition 2003

[F2] FERRARA L., PARK Y.D., SHAH S. P.

A method for mix-design of fiberreinforced self-compacting concrete

Cement and concrete Research, vol.37, n° 6,2007, p. 957-971.

[F3] Ferraris, de Larrard,

Testing and modeling of fresh concrete technology,

NIST, 1998,février, NISTIR 6094, 61 pages.

[F4] Ferraris

Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete

State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and  
Technology, 1999, vol 104, n°5, pp461-478.

[F5] FELEKOGLU B., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B

A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-  
compacting concrete

Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20 août 2003.

**[G1]** GIBBS J.C. and ZHU W

Strength of hardened self-compacting concrete

Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.

**[G2]** GRAM H. - E., PIIPARINEN P

Properties of SCC- Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance

Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15 septembre 1999.

**[G3]** Grandet, J. et Thenoz, B,

Circulation de l'eau entre les pâtes de mortiers non durcies et un matériau poreux en contact  
Rev. Tech. Industr. Terre Cuite n° 59(4<sup>ème</sup> trimestre) (1973)2-31.

**[H1]** HOLCIM

Le béton autocompactant

Recommandation éditée par Holcim (Suisse) SA, 2004

**[H2]** HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K.

Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan

Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.

**[H3]** HASNI L.

Bétons Autoplaçants

Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999.

**[H4]** Hu Chong

Rhéologie des Bétons fluides

Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 1995,

**[H5]** HU C. et BARBIERI B

Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel

Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1<sup>ère</sup> Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.

**[H6]** Hall C

Water sorptivity of mortars and concretes

a review, Mag. Conc.Res.41(147)(1989)51-61

**[J1]** JACOBS F. and HUNKELER F.

Design of self-compacting concrete for durable concrete structures”

Proceedings of First International Symposium on Self-Compacting Concrete, (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 397-407, 13-15 septembre 1999.

**[J2]** Jin,

Properties of mortar for self-compacting concrete

PhD thesis de l'Université de Londres, 2002, 398 pages.

**[K1]** Kelham S

Water absorption test for concrete

Ibid. 40(143)(1988)106-110

**[L1]** Leehmann et Hoffman

Pressure of self-compacting concrete on the formwork

Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 288-295.

**[L2]** Larrard de et al.,

Fresh Concrete

A Hershel-Bulkley Material, Materials and Structures, 1998, vol 31, pp 494-498.

**[L3]** Larrard de,

Structures granulaires et formulation des bétons,

Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.

**[L4]** Larrard de,

Structures granulaires et formulation des bétons,

Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.

**[L5]** Laetitia D'aloia Schwartzentruber et al., Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC), Cement and concrete research, (à paraître).

**[L6]** LE ROY R., DE LARRARD F. et PONS G

Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances

Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, pp.63-84, mai 1996.

**[M1]** MORTSELL E., RODUM E

Mechanical and durability aspects of SCC for road structures

Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 459-468, 23-25 octobre 2001.

**[N1]** NAGATAKI S. and FUJIWARA H.

Self compacting property of highly flowable concrete

Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, 1995.

**[N2]** NIST

Comparison of concrete rheometers

International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000, 2001, Septembre, NIST 6819, 147 pages.

**[N3]** NEVILLE A. M

Propriétés des Bétons

Traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

**[O1]** OKAMURA H., OUCHI M.

Self-Compacting Concrete

Journal of Advance Concrete Technology, vol. 1, n° 1, 2003, p. 5-15.

**[O2]** Ovarlez et Roussel

A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork, RILEM Materials and Structures, 37, 239-248 (2006)

**[P1]** Projet National BAP

Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP)

Mars 2005.

- [P2]** PETERSSON P., BILLBERG P., VAN B. K.,  
A model for self-compacting concrete  
Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete,  
RILEM Publications S.A.R.L, p. 333-344. 1999, Paris
- [P3]** PETERSSON Ö., BILLBERG P. and VAN B.K.,  
A model for Self-Compacting Concrete  
International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
- [P4]** PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B  
Influence of finely ground limestone on cement hydration  
Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.
- [P5]** PETERSSON Ö  
Limestone powder as filler in self-compacting concrete- Frost resistance and compressive strength"  
Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 277-284, 23-25 octobre 2001.
- [P6]** PONS G., PROUST E. and ASSIE S  
Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete  
Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- [P7]** PERSSON B  
Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete  
Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999
- [R1]** ROUGEAU P., MAILLARD J.L. and MARY-DIPPE C  
Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction  
Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 251-261, 13-15 septembre 1999.
- [S1]** SU N., HSU K.C., CHAI H.W.  
A simple mix-design method for self compacting concrete  
Cement and concrete Research, vol. 31, n° 12, 2001, p. 1799-1807.
- [S2]** SEDRAN T., DE LARRARD F.  
Optimization of self compacting concrete thanks to packing model  
Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete  
RILEM Publications S.A.R.L, p.321-332. 1999, Paris,
- [S3]** SAAK A.W., JENNINGS H.M., SHAH S.P.  
New methodology for designing selfcompacting concrete  
ACI Materials Journal, vol. 98, n° 6, 2001, p. 429-439.
- [S4]** SEDRAN T  
Les Bétons Autonivelants  
bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [S5]** SONEBI M. and BARTOS P.J.M  
Hardened SCC and its bond with reinforcement  
Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.

- [S6]** SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M  
Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete  
First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete,  
ACBM center, pp. 349-354, 12-13 novembre 2002.
- [S7]** SAKATA K  
Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete  
CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [S8]** SONEBI M. and BARTOS P.J.M  
Hardened SCC and its bond with reinforcement  
Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7),  
Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.
- [S9]** Shonlin , K. and Hisldorf, H. K,  
The potential durability of concrete  
In Proceeding of European Ready Mixed Concrete Organisation Congress ERMCO89,  
The Norway to Concrete, Stavanger, Oslo, June 1989(Fabeko, Norway,1989).
- [T1]** Turcry P.  
Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation  
Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.
- [T2]** TANGTERMSIRIKULS S., SAKAMOTO J., SHINDOH T. and MATSUOKA Y.H,  
Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of  
viscosity agent”  
Taisei Technical Research Report, pp.369-376, 1991.
- [U2]** Utsi, Emborg, Carlsward  
Relation between workability and rheological parameters,  
Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik,  
Islande, pp 154-164.
- [V1]** VAN B. K. and MONTGOMERY D  
Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone  
Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7),  
Stockholm, Sweden, pp. 227-238, 13-15 septembre 1999.
- [W1]** Walraven J.C.  
Structural aspect of self-compacting concrete  
proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik,  
Islande, pp 15-22
- [W2]** Wallevik, Rheology-A  
scientific appraoch to develop self-compacting concrete,  
Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003,  
Reykjavik, Islande, pp 23-31.
- [Z1]** ZHU W., QUINN J., BARTOS P.J.M  
Transport properties and durability of self-compacting concrete  
Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp.  
451-458, 23-25 octobre 2001.

## **Annexes**

### **Annexe A**

#### **Fiches techniques des adjuvants utilisés**

# MEDAFLUID SFR122

Conforme à la norme EN 934-2

Super plastifiant – haut réducteur d'eau

## DESCRIPTION

Le **MEDAFLUID SFR122** est un super plastifiant à base de polymères combinés. En plus de sa fonction principale de super plastifiant haut réducteur d'eau, il présente comme effet secondaire un retard de prise. Il est compatible avec les ciments CPA, CPJ et CRS.

## CARACTERISTIQUES

• Forme .....	Liquide
• Couleur .....	Marron
• pH .....	6,6 ( $\pm 0,1$ )
• Densité .....	1,20 $\pm$ 0,02
• Teneur en chlore .....	< 1g/L
• Extrait sec .....	40%

## PROPRIETES ET EFFETS

Le **MEDAFLUID SFR122** est utilisé pour la réalisation de tous bétons rhéoplastiques c'est à dire des bétons fluides s'écoulant facilement sans ségrégation avec un rapport E/C très faible.

De plus il permet :

### Sur béton frais :

- d'augmenter la maniabilité du béton
- de faciliter la mise en œuvre
- de retarder le temps de prise

### Sur béton durci :

- d'augmenter l'imperméabilité
- d'augmenter les résistances mécaniques à long terme
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

Désignation	eau	A (cm)	Réduction d'eau (%)	Exigences (EN 934-2)
Témoin (T)	200	9		
<b>MEDAFLUID SFR122</b>	175	9	12,5	≥ 12%

Valuers d'affaissement et de réduction d'eau

## DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons pompés
- Bétons transportés
- Bétons précontraints
- Bétons de masse

## DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,8 à 2,5% du poids de ciment  
soit 0,65 à 2,01 par 100 kg de ciment

Un retard de prise du béton est observé pour les dosages supérieurs à 1% du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction de la composition du béton, des qualités de compacité et de plasticité recherchées et du retard de prise souhaité.

## MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLUID SFR 122** peut être ajouté dans la bétonnière à la confection du béton ou dans les camions malaxeurs :

- Dans la bétonnière il s'ajoute dans la deuxième partie de l'eau de gâchage et doit être suivi d'un malaxage d'environ 2 minutes.
- Dans le camion malaxeur, le **MEDAFLUID SFR 122** est introduit dans la toupie à l'arrêt et malaxé à grande vitesse pendant environ 1 minute par mètre cube de béton.

## CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLUID SFR122** est conditionné en bidons de 12 kg et en fûts 275 kg. Il se conserve 06 mois dans son emballage d'origine, à une température variant entre 5 et 35°C.

## PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.  
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)

PI d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Mai 2005.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



Notice technique  
Edition janvier 2007  
Numéro 1.10  
Version n°044.2007  
PLASTIMENT® BV 40

## PLASTIMENT® BV 40

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2



### Présentation

PLASTIMENT BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité,
- facilite la mise en place du béton,
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment,
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

### Domaines d'application

#### 1. Augmentation des résistances mécaniques.

PLASTIMENT BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du béton. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

PLASTIMENT BV 40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances,
- les bétons précontraints,
- les bétons préfabriqués étuvés.

#### 2. Réduction du dosage en ciment.

PLASTIMENT BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques.

#### 3. Amélioration de la maniabilité.

PLASTIMENT BV 40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10 % environ. Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferrées et dans le cas de bétons pompés.

#### 4. Augmentation du délai de mise en œuvre.

À dosage élevé, PLASTIMENT BV 40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %,
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h.

PLASTIMENT BV 40 est compatible avec nos entraîneurs d'air Sika AER et Sika AERS.

Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrude, béton router),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marmage.

**Caractères généraux**

PLASTIMENT® BV 40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

**Sur béton frais :**

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- de disperser le ciment dans la masse,
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures,
- de s'opposer à la ségrégation,
- d'améliorer la thixotropie,
- détailler éventuellement la prise.

**Sur béton durci :**

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité,
- d'augmenter l'imperméabilité,
- de diminuer le retrait et le flusage.

**CLASSEMENT 3R :**

SYNTHÉTISATION	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU
2	1	1

**Caractéristiques**

**Aspect** Liquide brun foncé

**Conditionnement**

- Fût de 250 kg
- Conteneur perdu de 1000 litres
- Vrac

**Stockage** Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et rehomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été destabilisé.

**Concervation** Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

**Données techniques**

**Densité** 1,185 ± 0,015

**pH** 4,5 ± 1

**Extrait caco** 38,5 ± 1,3 %

**Teneur en ion Cl<sup>-</sup>** ≤ 0,1 %

**Teneur en Na<sub>2</sub>O éq.** ≤ 2,0 %

**Temps de prise (NF EN 480-2)**

		CEM I 52,5 P/M ES CP2 HTS Le Teil		CEM I 52,5 Gargenville	
		20°C	5°C	20°C	5°C
PLASTIMENT® BV40 0,5%		11 h 00	15 h 00	10 h 00	22 h 00
PLASTIMENT® BV40 1,25%		24 h 00	26 h 00	20 h 00	33 h 00

# Construction



## Conditions d'application

### Dosage

Le dosage précis du PLASTIMENT® BV 40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.

Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment).

Comme retardateur : à partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment).

Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacté, plastifié) et des conditions climatiques.

Ne pas dépasser 1% (0,85 litre pour 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.

### Mise en œuvre

Introduire le PLASTIMENT® BV 40 dans l'eau de gâchage.

### Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Mintel 3613, code SIKASECUR ou sur Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr)

### Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel.

Nos produits bénéficient d'une assistance de responsabilité civile.

Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits Sika, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, méthodes et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou orale dont elles résultent ne peuvent assurer la garantie de qualité marchandise autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait dans aucun cas être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos recommandations. Les droits de propriété réservés par ces derniers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la Version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qu'elle sera remise sur demande.

Sika France S.A.  
64, rue Edouard Vaillant - BP 104  
93351 Le Bourget Cedex  
France

Tel : 01 49 92 00 00  
Fax : 01 49 92 00 21  
[www.sika.fr](http://www.sika.fr)

Organisme de certification  
AFNOR CERTIFICATION  
11, avenue Franklin de Roosevelt  
92271 Saint-Denis La Plaine cedex  
France

## **Annexe B**

### **Résultats des essais de caractérisation du gravier**

Tableau 1.1. Masse volumique apparente du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogique

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Masse volumique apparente du gravier

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 1400gr < M < 1500gr

Echantillon n° ... 1-2-3

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1494
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>v1</sub></b>	<b>1494</b>
Echantillon 2	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1473
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>v2</sub></b>	<b>1473</b>
Echantillon 3	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	1461
	Masse volumique absolue (gr/ml) <b>M / V</b>	<b>M<sub>v3</sub></b>	<b>1461</b>
<b>Masse volumique</b>			
<b>Apparente Moyenne</b>	<b>M<sub>v</sub> = 1476 Kg/m<sup>3</sup></b>		

Tableau 1. 2. Masse volumique absolue du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Masse volumique absolue(Gravier)

Date : 2008	Provenance: carrière de Maouana (Guelma)
Etudiant : FERHANI KAMEL	Poids utilisé : 1400gr < M < 1500gr
Encadreur : CHERIAT YACINE	Echantillon n° ... 1-2-3

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	450
	Poids de l'échantillon (636gr)	M	636
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	690
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_1$	2650
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	500
	Poids de l'échantillon (750gr)	M	750
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	785
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_2$	2630
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	580
	Poids de l'échantillon (1000gr)	M	1000
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	955
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	$\rho_3$	2660
<b>Masse volumique absolue moyenne</b>	$\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$		

Tableau 3. Teneur en eau du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Teneur en eau du gravier

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provence: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 300gr < M < 400gr

Echantillon n° ... 1-2-3

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (300gr)	$P_h$	300
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	298
	<b>Teneur en eau(%)</b> $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_1$	<b>0.7</b>
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (300gr)	$P_h$	300
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	299
	<b>Teneur en eau(%)</b> $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_2$	<b>0.3</b>
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (350gr)	$P_h$	350
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	$P_s$	349
	<b>Teneur en eau(%)</b> $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	$W_3$	<b>0.3</b>
<b>Teneur en eau moyenne</b>	$W = 0.4\%$		

Tableau 1. 4. Mesure de la propreté du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Mesure de la propreté du gravier

Date : 2008

Etudiant : FERIANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 1000gr

Echantillon n° ... 1-2-3

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	991
	Essai de propreté(%)		
	$[(M - M')/ M] \times 100$	P <sub>1</sub>	0.9
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	987
	Essai de propreté(%)		
	$[(M - M')/ M] \times 100$	P <sub>2</sub>	1.3
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	990
	Essai de propreté(%)		
	$[(M - M')/ M] \times 100$	P <sub>3</sub>	1
<b>% des fins</b>	<b>P = 1.1%</b>		

Tableau 1. Analyse granulométrique du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

**Analyse granulométrique du gravier**

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 5000gr

Echantillon n° 1

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	Poids (gr)	%	
20	11	00.2	99.8
10	3062	61.2	38.8
5	4699	94	06
2.5	4919	98.4	1.6
0.8	4968	99.4	0.6
0.4	4975	99.50	0.50
0.2	4981	99.60	0.4
0.1	4984	99.7	0.3
0.08	4986	99.8	0.2
Fines	4997	99.9	0.1

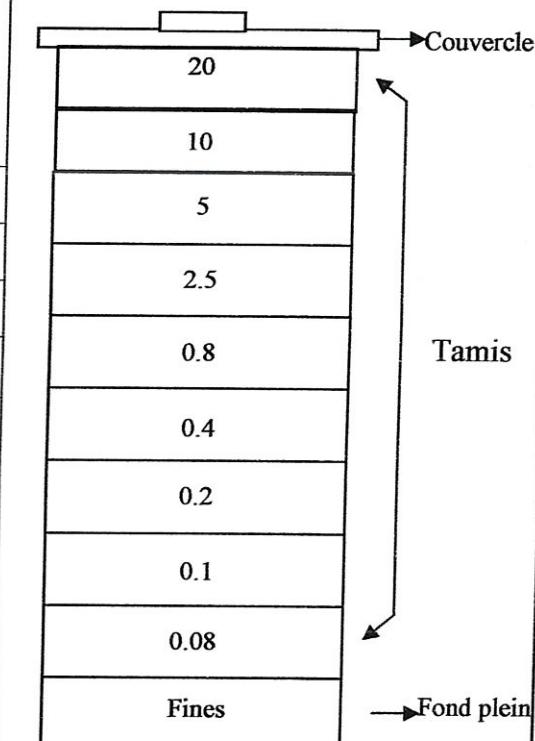


Tableau 1. Analyse granulométrique du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Analyse granulométrique du gravier

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 5000gr

Echantillon n° 1

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	Poids (gr)	%	
20	8	00.2	99.8
10	3449	69	31
5	4740	94.8	5.2
2.5	4844	96.9	3.1
0.8	4919	98.4	1.6
0.4	4941	98.9	1.1
0.2	4965	99.3	0.7
0.1	4978	99.5	0.5
0.08	4982	99.6	0.4
Fines	4998	99.8	0.2

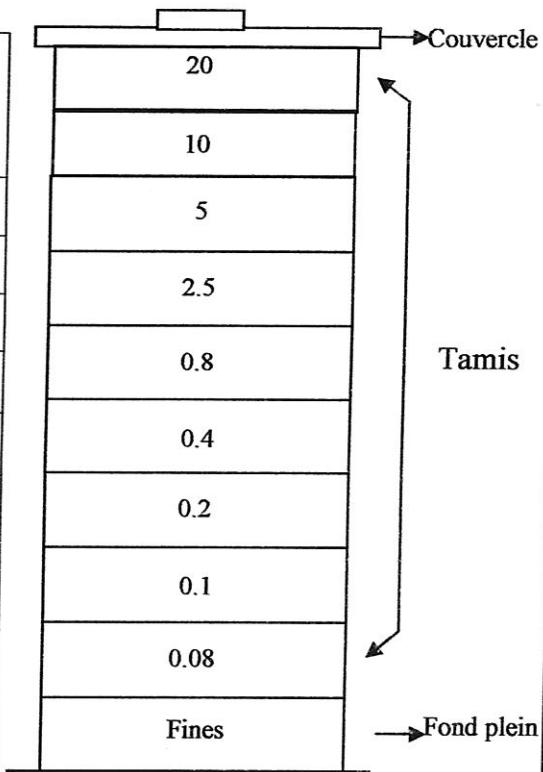


Tableau 1. Analyse granulométrique du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

**Analyse granulométrique du gravier**

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 5000gr

Echantillon n° 1

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât(%)
	Poids (gr)	%	
20	42	00.9	99.1
10	3290	65.8	34.2
5	4901	98	02
2.5	4968	99.4	00.6
0.8	4973	99.5	00.5
0.4	4975	99.5	00.5
0.2	4980	99.6	00.4
0.1	4983	99.7	00.3
0.08	4987	99.8	00.2
Fines	4996	99.9	00.1

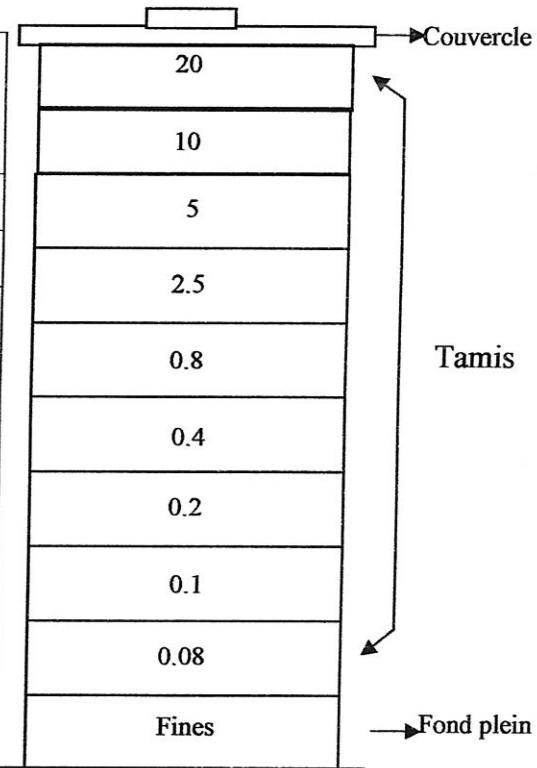


Tableau 1.8. Essai Los Angeles



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Essai Los Angeles

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: carrière de Maouana (Guelma)

Poids utilisé : 10000gr

Echantillon n°... 1 - 2 - 3...

Echantillon 1	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles  $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A1}$	20.3
Echantillon 2	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles  $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A2}$	20.3
Echantillon 3	la masse du matériau (gr)	$M_g$	10000
	la masse des éléments inférieurs à 1.6mm (gr)	$M_f$	2025
	le coefficient de Los Angeles  $(M_f / M_g) \times 100$	$L_{A3}$	20.3
<b>Dureté moyenne</b>	$L_{Am} = 20.3\%$		

Tableau 1. 9. Mesure de l'absorption d'eau du gravier



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Mesure de l'absorption d'eau du gravier

Date : 2008	Provenance: carrière de Maouana (Guelma)
Etudiant : FERHANI KAMEL	Poids utilisé : 1000gr < M < 3000gr
Encadreur : CHERIAT YACINE	Echantillon n°... 1 - 2 - 3...

Echantillon 1	masse de l'échantillon sec (gr)	M	2703
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	2764
	Absorption d'eau $[(M - M') / M'] \times 100$	Ab	2.2
Echantillon 2	masse de l'échantillon sec (gr)	M	2785
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	2832
	Absorption d'eau $[(M - M') / M'] \times 100$	Ab	1.7
Echantillon 3	masse de l'échantillon sec (gr)	M	1143
	masse de l'échantillon imbibé (gr)	M'	1162
	Absorption d'eau $[(M - M') / M'] \times 100$	Ab	1.6
<b>Absorption d'eau moyenne</b>	<b>Ab = 1.8%</b>		

## **ANNEXE C**

### **Résultats des essais de caractérisation du sable**

Tableau 2.1. Masse volumique apparente du Sable



Département de génie civil



Laboratoire pédagogique

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Masse volumique apparente du Sable

Date : 2008

Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)

Etudiant : FERHANI KAMEL

Poids utilisé : 1500gr < M < 1700gr

Encadreur : CHERAIT YACINE

Echantillon n°... 1 – 2 - 3...

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	1576
	Masse volumique absolue (gr/ml)	M <sub>V1</sub>	<b>1576</b>
Echantillon 2	<b>M / V</b>		
	Volume d'un récipient connu (ml)	V	1000
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	1.591
Echantillon 3	Masse volumique absolue (gr/ml)	M <sub>V2</sub>	<b>1591</b>
	<b>M / V</b>		
	Volume d'un récipient connu	V	1000
Masse volumique apparente	poids de sable contenu dans le récipient	M	1.615
	Masse volumique absolue (gr/ml)	M <sub>V3</sub>	<b>1615</b>
	<b>M / V</b>		
Moyenne	$M_V = 1590 \text{ kg/m}^3$		

Tableau 2.2. Masse volumique absolue du sable



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Masse volumique absolue du sable

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)

Poids utilisé : 550gr < M < 1000gr

Echantillon n°... 1 – 2 - 3 ...

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	450
	Poids de l'échantillon (350gr)	M	600
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	675
	Masse volumique absolue <b>M / (V2-V1)</b>	<b><math>\rho_1</math></b>	<b>2670</b>
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	400
	Poids de l'échantillon (400gr)	M	670
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	655
	Masse volumique absolue <b>M / (V2-V1)</b>	<b><math>\rho_2</math></b>	<b>2630</b>
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V1	500
	Poids de l'échantillon (450gr)	M	975
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	870
	Masse volumique absolue <b>M / (V2-V1)</b>	<b><math>\rho_3</math></b>	<b>2630</b>
<b>Masse volumique absolue</b>			
<b>Moyenne</b>	$\rho = 2640 \text{ kg/m}^3$		

Tableau 2.3. Compacité du sable



Département de génie civil  
Laboratoire pédagogiques



Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

**Compacité du sable**

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (600gr)	V	400
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	500
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	740
	<b>La compacité C :</b> $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>1</sub>	<b>0.60</b>
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (650gr)	V	420
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	650
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	900
	<b>La compacité C :</b> $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>2</sub>	<b>0.59</b>
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume du poids de l'échantillon (700gr)	V	470
	Lire dans la deuxième éprouvette le volume d'eau	V'	600
	Lire le nouveau volume atteint par l'eau	V <sub>1</sub>	880
	<b>La compacité C :</b> $C = (V_1 - V')/V$	C <sub>3</sub>	<b>0.59</b>
<b>Compacité moyenne</b>	$C = 0.60$		

Tableau 2.4. Porosité du sable

Département de génie civil

Laboratoire pédagogiques



Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)



**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Porosité du sable

Echantillon 1	La compacité	C <sub>1</sub>	0.60
	La porosité $E = 1 - C$	E <sub>1</sub>	<b>0.40</b>
Echantillon 2	La compacité	C <sub>2</sub>	0.59
	La porosité $E = 1 - C$	E <sub>2</sub>	<b>0.41</b>
Echantillon 3	La compacité	C <sub>3</sub>	0.59
	La porosité $E = 1 - C$	E <sub>3</sub>	<b>0.41</b>
<b>Porosité</b> <b>moyenne</b>	<b>E = 0.40</b>		

Tableau 2.5 Teneur en eau du Sable



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

Université 8 Mai 1945 Guelma

Teneur en eau du Sable

Date : 2008  
 Etudiant : FERHANI KAMEL  
 Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: sablier de Benazouz (Skikda)  
 Poids utilisé : 100gr < P < 250gr  
 Echantillon n°... 1 - 2 - 3 ...

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (150gr)	P <sub>h</sub>	150
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P <sub>s</sub>	144
	Teneur en eau(%)	W <sub>1</sub>	4.2
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$		
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (200gr)	P <sub>h</sub>	200
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P <sub>s</sub>	192
	Teneur en eau(%)	W <sub>2</sub>	4.2
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$		
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (200gr)	P <sub>h</sub>	200
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P <sub>s</sub>	193
	Teneur en eau(%)	W <sub>3</sub>	3.6
	$[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$		
<b>Teneur en eau moyenne</b>	<b>W = 4 %</b>		

Tableau 2.6. Analyse granulométrique du Sable



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Analyse granulométrique du Sable

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

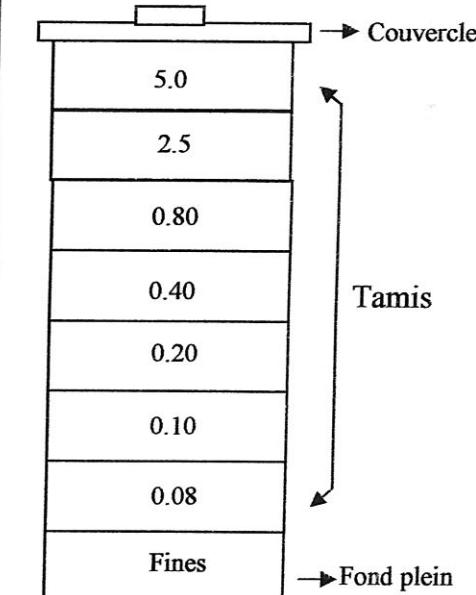
Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)

Poids utilisé : 2000gr

Echantillon n°1

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât(%)
	Poids (gr)	%	
5	0	00.00	100.00
2.5	2	00.01	99.90
0.8	87	04.35	95.65
0.4	815	40.75	59.25
0.2	1960	98.00	02.00
0.1	1992	99.6	00.40
0.08	1994	99.7	00.30
Fines	1997	99.85	00.15



**Tableau 2.7. Analyse granulométrique du Sable**



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

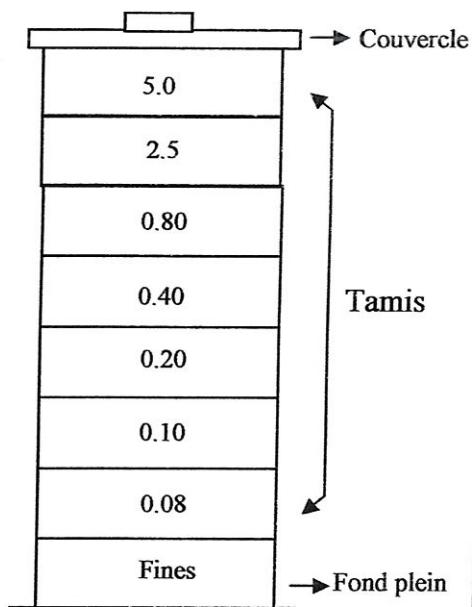
Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

**Analyse granulométrique du Sable**

Date : 2008	Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)
Etudiant : FERHANI KAMEL	Poids utilisé : 2000gr
Encadreur : CHERIAT YACINE	Echantillon n°2

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât(%)
	Poids (gr)	%	
5	0	00.00	100.00
2.5	2	00.10	99.90
0.8	28	01.40	98.60
0.4	642	32.10	67.90
0.2	1968	98.40	01.60
0.1	1994	99.70	00.30
0.08	1995	99.75	00.25
Fines	1997	99.85	00.15



**Tableau 2.8. Analyse granulométrique du Sable**



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

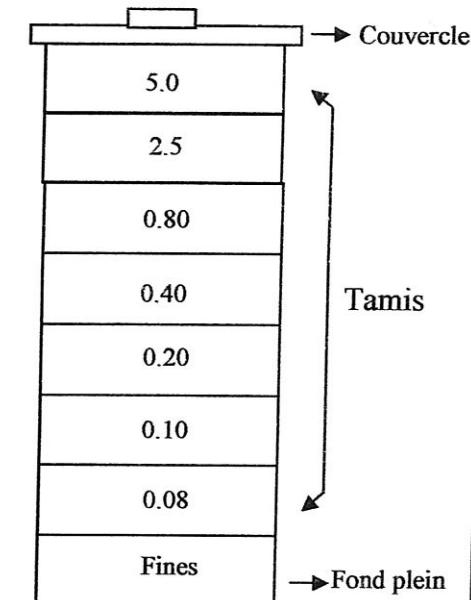
Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

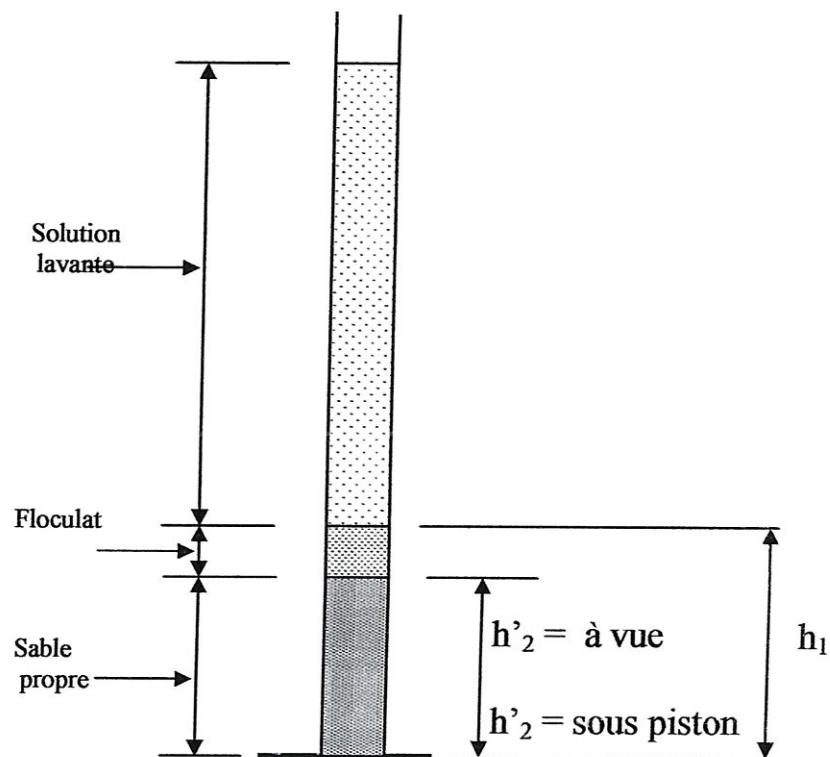
**Analyse granulométrique du Sable**

Date : 2008	Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)
Etudiant : FERHANI KAMEL	Poids utilisé : 2000gr
Encadreur : CHERIAT YACINE	Echantillon n°3

Tamis (mm)	Refus cumulés		Tamisât(%)
	Poids (gr)	%	
5	1	00.05	99.95
2.5	2	00.10	99.90
0.8	88	04.40	95.60
0.4	741	37.05	62.95
0.2	1962	98.10	01.90
0.1	1994	99.70	00.30
0.08	1995	99.75	00.25
Fines	1998	99.90	00.10



## Essai d'équivalent de sable



$$E . S . V = \frac{h'2}{h_1} \times 100 \quad (\text{II.6})$$

Calculs :

$$E . S = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (\text{II.7})$$

**Figure 1**

Tableau 2.9. Essai d'équivalent de sable



Département de génie civil



Laboratoire pédagogiques

Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH)

**Université 8 Mai 1945 Guelma**

Essai d'équivalent de sable

Date : 2008

Etudiant : FERHANI KAMEL

Encadreur : CHERIAT YACINE

Provenance: sablière de Benazouz (Skikda)

Poids utilisé : 120gr

Echantillon n°1

Lectures	Prise n° 1	Prise n° 2	Prise n° 3
$h_1$	10.85	10.90	10.90
$h'_2$	9.3	9.8	9.7
$h_2$	9.1	8.65	8.7
Sur chaque prise :			
E.S.V	<b>85.7</b>	<b>89.9</b>	<b>89.0</b>
E.S	<b>83.9</b>	<b>79.4</b>	<b>79.8</b>
Sur l'échantillon :			
E.S.V		<b>88.20</b>	
E.S		<b>81%</b>	
Température :		20°C	

## ANNEXE D

### RESULTATS DES ESSAIS DE L'ABSORPTION D'EAU

Absorption capillaire . <b>BAP350</b>			
<b>Temps <math>t^{1/2}</math> en h<sup>1/2</sup></b>	<b>Mesures (en masse gr)</b>		
	<b>avec cure - 28j-</b>	<b>avec cure - 3j-</b>	<b>sans cure - air-</b>
	<b>M absorbée (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>M absorbée (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>M absorbée (kg/m<sup>2</sup>)</b>
0,00	224,70	223,82	224,06
0,18	224,70	224,00	224,60
0,29	224,70	224,09	224,79
0,37	224,70	224,15	224,88
0,55	224,88	224,31	225,06
0,68	224,88	224,37	225,06
0,80	224,97	224,37	225,15
0,37	225,06	224,46	225,24
1,37	225,15	224,55	225,34
1,84	225,34	224,64	225,52
2,32	225,43	224,79	225,61
2,89	225,52	224,89	225,79
3,92	225,52	225,16	226,16
4,29	225,52	225,25	226,16
4,73	225,61	225,31	226,25
5,14	225,61	225,37	226,34
5,51	225,61	225,47	226,43
6,51	225,61	225,65	226,62
7,31	225,61	225,74	226,80
8,06	225,61	225,74	226,80

Absorption capillaire : **BAP400**

Temps $t^{1/2}$ en h $^{1/2}$	Mesures (en masse gr)		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )
0,00	227,26	222,32	223,05
0,18	227,26	222,41	223,23
0,29	227,26	222,50	223,32
0,37	227,26	222,50	223,41
0,55	227,62	222,68	223,60
0,68	227,71	222,68	223,60
0,80	227,81	222,68	223,69
0,37	227,90	222,68	223,69
1,37	227,99	222,77	223,87
1,84	228,08	222,87	223,96
2,32	228,17	222,96	224,06
2,89	228,26	223,05	224,24
3,92	228,36	223,23	224,42
4,29	228,45	223,32	224,51
4,73	228,54	223,41	224,60
5,14	228,63	223,41	224,60
5,51	228,63	223,51	224,70
6,51	228,63	223,69	224,79
7,31	228,63	223,78	224,88
8,06	228,63	223,87	224,88

Absorption capillaire : **BV400**

Temps $t^{1/2}$ en h $^{1/2}$	Mesures (en masse gr)		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )
0,00	230,09	227,81	226,53
0,18	230,55	229,09	227,99
0,29	230,55	229,36	228,36
0,37	230,64	229,73	228,90
0,55	230,83	230,28	229,45
0,68	230,83	230,46	229,82
0,80	230,83	230,73	230,18
0,37	230,92	231,19	230,64
1,37	231,01	231,65	231,28
1,84	231,10	232,29	232,20
2,32	231,28	232,93	233,02
2,89	231,47	233,66	233,94
3,92	231,65	234,85	234,67
4,29	231,74	235,13	234,67
4,73	231,83	235,31	234,67
5,14	231,92	235,40	234,76
5,51	231,92	235,49	234,76
6,51	232,11	235,49	234,76
7,31	232,29	235,58	234,85
8,06	232,29	235,58	234,85

**Absorption capillaire : BV350**

Temps $t^{1/2}$ en h $^{1/2}$	Mesures (en masse gr)		
	avec cure - 28j-	avec cure - 3j-	sans cure - air-
	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )	M absorbée (kg/m <sup>2</sup> )
0,00	231,37	228,08	225,70
0,18	231,56	228,26	226,34
0,29	231,65	228,36	226,71
0,37	231,74	228,45	227,35
0,55	231,74	228,63	227,71
0,68	231,83	228,72	227,90
0,80	231,83	228,81	228,17
0,37	232,01	229,18	228,81
1,37	232,29	229,45	229,45
1,84	232,47	229,91	230,55
2,32	232,66	230,46	231,56
2,89	232,93	231,10	232,75
3,92	233,20	232,01	233,84
4,29	233,48	232,47	234,58
4,73	233,57	233,75	234,76
5,14	233,57	233,75	234,76
5,51	234,03	234,94	234,85
6,51	234,39	236,04	234,85
7,31	234,58	236,31	234,94
8,06	234,58	236,31	234,94

Absorption capillaire : BV350 (avec cure - 28j -)

Temps	Mesures (en poids gr)			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2508</b>	<b>2548</b>	<b>2530</b>	<b>2529</b>
2mn (+2mn)	2514	2549	2531	<b>2531</b>
5mn (+3mn)	2515	2549	2531	<b>2532</b>
8mn (+5mn)	2517	2549	2532	<b>2533</b>
18mn (+10mn)	2518	2550	2532	<b>2533</b>
28mn (+10mn)	2519	2550	2533	<b>2534</b>
38mn (+10mn)	2520	2550	2533	<b>2534</b>
1h08mn (+30mn)	2523	2551	2535	<b>2536</b>
1h53mn (+45mn)	2526	2554	2536	<b>2539</b>
3h23mn (+1h30mn)	2529	2556	2539	<b>2541</b>
5h23mn (+2h)	2532	2558	2540	<b>2543</b>
8h23mn (+3h)	2535	2560	2543	<b>2546</b>
15h23mn (+7h)	2538	2563	2545	<b>2549</b>
18h23mn (+3h)	2543	2565	2548	<b>2552</b>
22h23mn (+4h)	2546	2563	2551	<b>2553</b>
26h23mn plus de 24h (+4h)	2546	2563	2551	<b>2553</b>
30h23mn (+4h)	2551	2568	2555	<b>2558</b>
42h23mn (+12h)	2555	2572	2559	<b>2562</b>
53h23mn plus de 48h (+12h)	2556	2575	2560	<b>2564</b>
65h (+12h)	<b>2556</b>	<b>2575</b>	<b>2560</b>	<b>2564</b>
	35			

Absorption capillaire : **BV350 (avec cure - 3j -)**

Temps	Mesures (en poids gr)			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2476</b>	<b>2523</b>	<b>2481</b>	<b>2493</b>
2mn (+2mn)	2478	2525	2482	<b>2495</b>
5mn (+3mn)	2479	2526	2483	<b>2496</b>
8mn (+5mn)	2480	2527	2484	<b>2497</b>
18mn (+10mn)	2482	2529	2485	<b>2499</b>
28mn (+10mn)	2483	2530	2486	<b>2500</b>
38mn (+10mn)	2484	2531	2487	<b>2501</b>
1h08mn (+30mn)	2489	2535	2491	<b>2505</b>
1h53mn (+45mn)	2492	2539	2494	<b>2508</b>
3h23mn (+1h30mn)	2497	2543	2498	<b>2513</b>
5h23mn (+2h)	2503	2549	2504	<b>2519</b>
8h23mn (+3h)	2511	2555	2511	<b>2526</b>
15h23mn (+7h)	2522	2565	2521	<b>2536</b>
18h23mn (+3h)	2528	2570	2526	<b>2541</b>
22h23mn (+4h)	2541	2585	2538	<b>2555</b>
26h23mn plus de 24h (+4h)	2541	2585	2538	<b>2555</b>
30h23mn (+4h)	2554	2601	2549	<b>2568</b>
42h23mn (+12h)	2566	2612	2561	<b>2580</b>
53h23mn plus de 48h (+12h)	2568	2614	2567	<b>2583</b>
65h (+12h)	<b>2568</b>	<b>2614</b>	<b>2567</b>	<b>2583</b>
	90			

Absorption capillaire : **BV350 (sans cure - air - )**

Temps	Mesures (en poids gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2457</b>	<b>2484</b>	<b>2459</b>	<b>2467</b>
2mn (+2mn)	2460	2495	2468	<b>2474</b>
5mn (+3mn)	2462	2500	2472	<b>2478</b>
8mn (+5mn)	2468	2508	2479	<b>2485</b>
18mn (+10mn)	2470	2513	2483	<b>2489</b>
28mn (+10mn)	2472	2516	2486	<b>2491</b>
38mn (+10mn)	2475	2519	2489	<b>2494</b>
1h08mn (+30mn)	2480	2527	2496	<b>2501</b>
1h53mn (+45mn)	2486	2534	2504	<b>2508</b>
3h23mn (+1h30mn)	2497	2548	2516	<b>2520</b>
5h23mn (+2h)	2508	2559	2526	<b>2531</b>
8h23mn (+3h)	2521	2572	2539	<b>2544</b>
15h23mn (+7h)	2536	2582	2551	<b>2556</b>
18h23mn (+3h)	2550	2585	2556	<b>2564</b>
22h23mn (+4h)	2554	2586	2557	<b>2566</b>
<b>26h23mn plus de 24h (+4h)</b>	2554	2586	2557	<b>2566</b>
30h23mn (+4h)	2555	2587	2558	<b>2567</b>
42h23mn (+12h)	2555	2587	2558	<b>2567</b>
<b>53h23mn plus de 48h (+12h)</b>	2556	2588	2559	<b>2568</b>
<b>65h (+12h)</b>	<b>2556</b>	<b>2588</b>	<b>2559</b>	<b>2568</b>
	101			

**Absorption capillaire : BV400 (avec cure - 28j - )**

Temps	Mesures (en poids gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2497</b>	<b>2540</b>	<b>2509</b>	<b>2515</b>
2mn (+2mn)	2500	2547	2512	<b>2520</b>
5mn (+3mn)	2500	2548	2513	<b>2520</b>
8mn (+5mn)	2501	2549	2513	<b>2521</b>
18mn (+10mn)	2503	2551	2515	<b>2523</b>
28mn (+10mn)	2503	2551	2515	<b>2523</b>
38mn (+10mn)	2503	2551	2515	<b>2523</b>
1h08mn (+30mn)	2504	2553	2516	<b>2524</b>
1h53mn (+45mn)	2505	2554	2516	<b>2525</b>
3h23mn (+1h30mn)	2506	2555	2518	<b>2526</b>
5h23mn (+2h)	2507	2557	2519	<b>2528</b>
8h23mn (+3h)	2509	2559	2521	<b>2530</b>
15h23mn (+7h)	2512	2561	2523	<b>2532</b>
18h23mn (+3h)	2513	2562	2523	<b>2533</b>
22h23mn (+4h)	2514	2563	2524	<b>2534</b>
26h23mn plus de 24h (+4h)	2515	2564	2525	<b>2535</b>
30h23mn (+4h)	2516	2565	2525	<b>2535</b>
42h23mn (+12h)	2518	2567	2527	<b>2537</b>
53h23mn plus de 48h (+12h)	2520	2568	2528	<b>2539</b>
65h (+12h)	<b>2520</b>	<b>2569</b>	<b>2528</b>	<b>2539</b>
	24			

**Absorption capillaire : BV400 (avec cure - 3j - )**

Temps	Mesures (en poids gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2485</b>	<b>2476</b>	<b>2509</b>	<b>2490</b>
2mn (+2mn)	2495	2491	2525	<b>2504</b>
5mn (+3mn)	2498	2495	2528	<b>2507</b>
8mn (+5mn)	2501	2500	2533	<b>2511</b>
18mn (+10mn)	2506	2506	2538	<b>2517</b>
28mn (+10mn)	2508	2509	2541	<b>2519</b>
38mn (+10mn)	2511	2511	2544	<b>2522</b>
1h08mn (+30mn)	2515	2516	2549	<b>2527</b>
1h53mn (+45mn)	2520	2521	2554	<b>2532</b>
3h23mn (+1h30mn)	2526	2529	2562	<b>2539</b>
5h23mn (+2h)	2533	2536	2569	<b>2546</b>
8h23mn (+3h)	2541	2544	2577	<b>2554</b>
15h23mn (+7h)	2555	2557	2590	<b>2567</b>
18h23mn (+3h)	2558	2559	2593	<b>2570</b>
22h23mn (+4h)	2562	2561	2593	<b>2572</b>
<b>26h23mn plus de 24h (+4h)</b>	2564	2562	2594	<b>2573</b>
30h23mn (+4h)	2565	2562	2594	<b>2574</b>
42h23mn (+12h)	2565	2562	2594	<b>2574</b>
<b>53h23mn plus de 48h (+12h)</b>	2566	2563	2595	<b>2575</b>
<b>65h (+12h)</b>	<b>2566</b>	<b>2563</b>	<b>2595</b>	<b>2575</b>
	85			

Absorption capillaire : **BV400 (sans cure - air - )**

Temps	Mesures (en poids gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	<b>2483</b>	<b>2471</b>	<b>2474</b>	<b>2476</b>
2mn (+2mn)	2502	2479	2495	<b>2492</b>
5mn (+3mn)	2507	2482	2500	<b>2496</b>
8mn (+5mn)	2513	2486	2506	<b>2502</b>
18mn (+10mn)	2520	2491	2514	<b>2508</b>
28mn (+10mn)	2524	2494	2518	<b>2512</b>
38mn (+10mn)	2528	2498	2522	<b>2516</b>
1h08mn (+30mn)	2534	2502	2528	<b>2521</b>
1h53mn (+45mn)	2540	2509	2536	<b>2528</b>
3h23mn (+1h30mn)	2550	2519	2545	<b>2538</b>
5h23mn (+2h)	2558	2530	2554	<b>2547</b>
8h23mn (+3h)	2566	2543	2562	<b>2557</b>
15h23mn (+7h)	2569	2561	2564	<b>2565</b>
18h23mn (+3h)	2569	2561	2564	<b>2565</b>
22h23mn (+4h)	2569	2561	2564	<b>2565</b>
<b>26h23mn plus de 24h (+4h)</b>	2570	2562	2565	<b>2566</b>
30h23mn (+4h)	2570	2562	2565	<b>2566</b>
42h23mn (+12h)	2570	2562	2565	<b>2566</b>
<b>53h23mn plus de 48h (+12h)</b>	2571	2564	2566	<b>2567</b>
<b>65h (+12h)</b>	<b>2571</b>	<b>2564</b>	<b>2566</b>	<b>2567</b>
	91			

Absorption capillaire : **BAP350 (avec cure - 3j - )**

Temps	Mesures (en masse gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	2442	2442	2455	2446
2mn (+2mn)	2443	2445	2457	2448
5mn (+3mn)	2444	2446	2458	2449
8mn (+5mn)	2444	2448	2458	2450
18mn (+10mn)	2446	2449	2460	2452
28mn (+10mn)	2447	2450	2460	2452
38mn (+10mn)	2447	2450	2460	2452
1h08mn (+30mn)	2448	2451	2461	2453
1h53mn (+45mn)	2449	2452	2462	2454
3h23mn (+1h30mn)	2450	2453	2463	2455
5h23mn (+2h)	2452	2454	2465	2457
8h23mn (+3h)	2453	2455	2466	2458
15h23mn (+7h)	2456	2458	2469	2461
18h23mn (+3h)	2457	2459	2470	2462
22h23mn (+4h)	2458	2459	2471	2463
26h23mn plus de 24h (+4h)	2458	2460	2472	2463
30h23mn (+4h)	2459	2461	2473	2464
42h23mn (+12h)	2461	2463	2475	2466
53h23mn plus de 48h (+12h)	2462	2464	2476	2467
65h (+12h)	2462	2464	2476	2467
M absorbée	20	22	21	21

Absorption capillaire : **BAP350 (sans cure - air - )**

Temps	Mesures (en masse gr )			
	échantillon 01	échantillon 02	échantillon 03	moyenne
0mn	2414	2515	2418	2449
2mn (+2mn)	2416	2524	2426	2455
5mn (+3mn)	2417	2526	2427	2457
8mn (+5mn)	2418	2528	2429	2458
18mn (+10mn)	2419	2531	2431	2460
28mn (+10mn)	2419	2531	2431	2460
38mn (+10mn)	2420	2532	2431	2461
1h08mn (+30mn)	2420	2533	2432	2462
1h53mn (+45mn)	2421	2534	2434	2463
3h23mn (+1h30mn)	2423	2536	2435	2465
5h23mn (+2h)	2425	2538	2436	2466
8h23mn (+3h)	2427	2540	2438	2468
15h23mn (+7h)	2432	2543	2440	2472
18h23mn (+3h)	2433	2543	2441	2472
22h23mn (+4h)	2434	2544	2442	2473
26h23mn plus de 24h (+4h)	2435	2545	2443	2474
30h23mn (+4h)	2437	2546	2443	2475
42h23mn (+12h)	2440	2547	2445	2477
53h23mn plus de 48h (+12h)	2443	2548	2446	2479
65h (+12h)	2444	2548	2446	2479
<b>M absorbée</b>	<b>30</b>	<b>33</b>	<b>28</b>	<b>30</b>