

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mentouri – Constantine

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
Département de Génie Civil  
UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE

## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du  
Diplôme de Magister en : GENIE CIVIL

Option : Matériaux  
Par Mr. HAIFI MOHAMED REDHA

## **THEME**

# **FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS**

Président	Dr HOUARI HACENE	Pr	U Mentouri Constantine
Examineurs:	Dr BEROUAL AHMED	MC	U Mentouri Constantine
	Dr ROUABEH KAMEL	MC	U Mentouri Constantine
Rapporteur	Dr GUETTECHE M NACER	MC	U Mentouri Constantine

2011

# REMERCEMENT

# REMERCEMENT

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieu Miséricordieux qui m'a donné la force, le courage et la volonté d'achever cette modeste réalisation.

Mes vifs et sincères remerciements vont à M.N.GUETTECHE professeur à l'université Mentouri qui a bien voulu diriger les étapes d'élaboration de ce mémoire. Ses précieux conseils, sa compréhension, et son aide inestimable. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude.

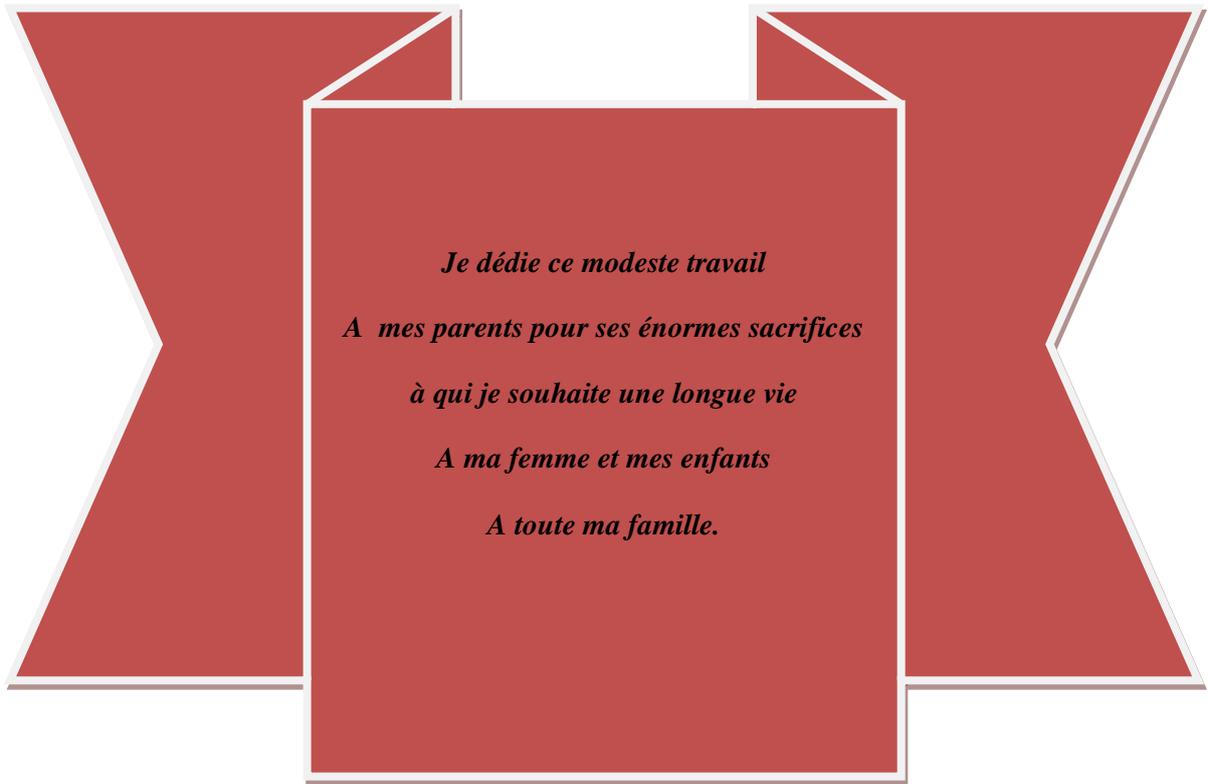
Je voudrais remercier Mr H.HOUARI professeur à l'université Mentouri, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Mes remerciements vont à Mr A.BEROUAL maître de conférence à l'université Mentouri, Mr K.ROUABEH maître de conférence à l'université Mentouri qui ont accepté de faire partie de jury, pour l'enrichissement de ce travail avec leur vive contribution.

Egalement, je tiens à remercier Mr S.BENSEBTI maître de conférence à l'université Mentouri pour sa contribution inestimable. Qu'il trouve ici tous mes respects.

J'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont soutenu, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

# *Dédicace*



*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents pour ses énormes sacrifices*

*à qui je souhaite une longue vie*

*A ma femme et mes enfants*

*A toute ma famille.*

---

# *Sommaire*

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

---

---

## **CHAPITRE 1 : GENRALITES SUR LE BETON**

---

### *PARTIE 1: GENERALITE*

---

---

<b>1.1. Généralités</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2. Constituants du béton</b> .....	<b>6</b>
1.2.1. Ciment .....	6
Caractéristiques physico-chimiques des ciments portlands .....	7
1.2.2. Granulats .....	10
<b>1.2.3. Eau</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.4. Adjuvants</b> .....	<b>10</b>
1.2.4.1. Les adjuvants qui modifient la rhéologie .....	10
1.2.4.2. Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement.....	11
1.2.5. Les ajouts minéraux .....	11

---

---

### **PARTIE 2 : LE BETON AUTOPLAÇANT**

---

---

<b>2.1. Bétons spéciaux</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.1 Bétons à haute performance BHP</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2 Bétons du futur</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2. Définition du béton autoplaçant</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3. Historique du béton autoplaçant</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4. Composition spécifique des BAP</b> .....	<b>15</b>
<b>2.5. Composants utilisés dans les BAP</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5.1. Liants et granulats</b> .....	<b>17</b>

2.5.2. Adjuvants des bétons.....	18
2.5.2.1. Superplastifiant .....	19
2.5.2.2. Agent de viscosité .....	22
2.6. Propriétés essentielles des bétons autoplaçants.....	24
2.7. Propriétés des bétons autoplaçants .....	24
2.7.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage .....	24
2.7.2. Fluidité .....	27
2.7.2.1. Essai d'étalement.....	27
2.7.2.2. Vitesse d'écoulement .....	28
2.7.2.3. Essai de la table de fluidité.....	28
2.7.2.4. Essai de la boîte en L .....	28
2.7.2.5. Essai du Box .....	29
2.7.3. La Stabilité .....	30
2.7.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V.....	30
2.7.3.2. Essai de tassement.....	31
2.7.4. Ségrégation dynamique .....	32
2.7.4.1. Essai du tube en U .....	32
2.7.4.2. Essai de capacité de remplissage (essai de caisson) .....	33
2.7.4.3. Essai de stabilité au tamis.....	34
2.7.5. Ségrégation statique .....	35
2.7.5.1. Essai à la bille.....	35
2.8. Optimisation des bétons autoplaçants .....	36
2.8.1. Optimisation de la teneur en gros granulats .....	36
2.8.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux.....	38
2.8.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques .....	40
2.9. Conclusion.....	41

---

---

## **CHAPITRE 2 :                    *METHODES DE FORMULATIONS***

---

---

<b>2. Méthodes de formulation .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) .....</b>	<b>42</b>
<b>2.2. L'approche Japonaise .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3. Exemples de formulations .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4.1 Caractéristiques de béton de base.....</b>	<b>46</b>
<b>2.4.2 Principe de la méthode .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4.2.1 Calcul Des Surfaces Développées Par Les Granulats .....</b>	<b>48</b>
<b>2.4.2.2 Calcul De La Granulométrie Du Mélange Des Gravillons Du Béton .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2.3 Définition Des Tranches Granulaires Successives Dans Ce Mélange .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2.4 Calcul De La Masse De Chaque Tranche Granulaire .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4.2.5 Calcul Du Diamètre De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche.....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.2.6 Calcul Du Volume De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.2.7 Calcul De La Surface Développée De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche... 50</b>	
<b>2.4.2.8 Calcul Du Volume Massique De La Matrice Du Gravillon Du Mélange .....</b>	<b>50</b>
<b>2.4.2.9 Calcul Du Volume Total De L'ensemble Des Particules Dans Chaque Tranche Granulaire .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.2.10 - Calcul Du Nombre De Particules Moyennes Dans Chaque Tranche Granulaire .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.2.11 Calcul De La Surface Développée Par Les Particules Moyennes Dans Chaque Tranche Granulaire .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.2.12 Calcul De La Somme De L'ensemble Des Surfaces Calculées Pour Chaque Tranche Granulaire Du Mélange De Gravillon .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.3 Calcul De La Composition Du Mortier De Béton Équivalent .....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.3.1 Méthode De Calcul.....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.4 - Bilan Des Compositions Du Mortier MBE.....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.5 Essais Réalisables Sur Mortier De Béton Équivalent .....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.6 Matériels D'essais .....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.7 Essais D'évaluation Du Comportement Rhéologique .....</b>	<b>57</b>
<b>2.4.7.1 Essais d'affaissement au mini-cône .....</b>	<b>57</b>
<b>2.4.7.2 Essais d'étalement au mini-cône.....</b>	<b>57</b>
<b>2.4.8 Mise en évidence de la corrélation.....</b>	<b>62</b>

2.4.9 Domaines d'utilisation .....	63
2.4.10 Influence de l'adjuvantation.....	63
2.4.11. Influence de la température .....	63
2.4.12 Les formules dérivées.....	63
2.4.13 Limites d'emploi.....	64
2.5. Fabrication Des BAP.....	65
2.6. Transport et mise en place des BAP .....	65
2.7. Caractéristiques Des BAP À L'état Durci.....	67
2.7.1. Propriétés Mécaniques Des BAP .....	67
2.8. Conclusion.....	68

---



---

**CHAPITRE 3 :**

**CARACTERISATION DES MATERIAUX**

---



---

3.1. Introduction .....	69
Introduction .....	69
3.2. Caractérisations Des Matériaux .....	69
3.2.1. Ciment.....	69
3.2.2. Granulat.....	70
3.2.2.1 Sable.....	70
3.2.2.2. Gravier .....	71
3.2.3. Superplastifiant.....	74
3.2.5. L'eau de gâchage.....	74
3.3. Conclusion.....	75

---

---

## CHAPITRE 4 : ESSAIS ET INTERPRETATION

---

---

<b>4. Essais Et Caractérisation Des BAP</b> .....	<b>76</b>
<b>4.1. Les Propriétés Essentielles Recherchées</b> .....	<b>76</b>
<b>4.1.2 Essai Sur Liant</b> .....	<b>77</b>
<b>1.2.1. Mesure Du Temps D'écoulement Au Cône De Marsh</b> .....	<b>75</b>
<b>1.2.2. Détermination Du Dosage De Saturation Sur Coulis</b> .....	<b>78</b>
<b>4.2. Formulation Des Bétons Autoplaçants</b> :....	<b>81</b>
<b>4.2.1. Première Catégorie De BAP (BAP 1)</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2.2. Deuxième Catégorie De BAP (BAP 2)</b> .....	<b>82</b>
<b>4.2.3. Troisième Catégorie De BAP (BAP 3)</b> .....	<b>83</b>
<b>4.2.4. Quatrième Catégorie De BAP (BAP 4)</b> .....	<b>84</b>
<b>4.2.5. Cinquième Catégorie De BAP (BAP5)</b> .....	<b>85</b>
<b>4.3. Confection Des Eprovettes De Beton</b> :....	<b>89</b>
<b>4. 4. Demoulage Et Conservation Des Eprovettes</b> .....	<b>89</b>
<b>4. 5. Surfaçage Des Eprovettes</b> : (Nf P 18-416) .....	<b>90</b>
<b>4.6. Formulations Des Mortiers Issu Des Betons Autoplaçants</b> .....	<b>93</b>
<b>4.7. Confection Des Eprovettes De Mortiers</b> :.....	<b>95</b>
<b>4. 8. Résultats Des Essais Sur Mortiers</b> :.....	<b>95</b>
<b>4.9. Conclusion</b> .....	<b>98</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>99</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>101</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant. ....	<b>20</b>
<b>Figure I-2</b> : Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant. . .....	<b>21</b>
<b>Figure I-3</b> : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992).....	<b>25</b>
<b>Figure I.4</b> : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992.[.....	<b>25</b>
<b>Figure I-5</b> : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale .....	<b>26</b>
<b>Figure 1.6</b> : Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L.....	<b>27</b>
<b>Figure 1.7</b> : Essai de la boîte en L, d'après l'Université de Sherbrooke. ....	<b>29</b>
<b>Figure I-8</b> : Essai du Box.....	<b>30</b>
<b>Figure I-9</b> : Essai de l'entonnoir en forme de V, d'après SAKATA et al, (1996). ....	<b>31</b>
<b>Figure I -10</b> : Essai du tassement (MANAI, 1995). ....	<b>32</b>
<b>Figure 1.11</b> : Essai du tube en U (MITSUKA et al). ....	<b>33</b>
<b>Figure I- 12</b> : Essai du caisson, d'après YURUGI et al (1993). ....	<b>34</b>
<b>Figure I- 13</b> : Essai à la bille. ....	<b>35</b>
<b>Figure I- 14</b> : Courbe de référence d'un béton.....	<b>36</b>
<b>Figure2- 4</b> : Exemple de matériel pour mesures d'affaissement et d'étalement au cône MBE .....	<b>56</b>

<b>Figure 2-5</b> : Exemple de corrélation étalement MBE/ affaissement béton Sur un béton de laboratoire B30 à 30°C.....	<b>62</b>
<b>Figure 2-6</b> :Exemple de domaines d'utilisation des formules dérivées (ciment, eau, adjuvant) .....	<b>64</b>
<b>Figure 2.7</b> : Mode de mise en place du BAP sur chantier. ....	<b>66</b>
<b>Figure 3.1</b> : Analyse granulométrique.....	<b>72</b>
<b>Figure 3.2</b> : Analyse granulométrique du sable normalisé.....	<b>73</b>
<b>Figure 4.1</b> : Essai au cône de Marsh.....	<b>77</b>
<b>Figure 4.2.</b> : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en super plastifiant d'un coulis de ciment pur et un coulis de fillers pur.....	<b>78</b>
<b>Figure 4-3.</b> : Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en super plastifiant pour des coulis avec des rapports F/C+F différents.....	<b>79</b>
<b>Figure 4-3</b> : Évolution de l'étalement du BAP en fonction du dosage en sp .....	<b>87</b>
<b>Figure 4-4</b> :Évolution de la résistance à la compression des BAP à 28j .....	<b>88</b>
<b>Figure 4-5</b> : Évolution de la résistance à la compression des BAP à 91j.....	<b>88</b>
<b>Figure 4-6</b> : Confection des éprouvettes.....	<b>90</b>
<b>Figure 4-7</b> : Essai d'étalement des BAP .....	<b>91</b>
<b>Figure 4-8</b> : Essai d'étalement des BAP .....	<b>91</b>
<b>Figure 4-9</b> : Essai d'écrasement des éprouvettes.....	<b>92</b>
<b>Figure 4-10</b> : Évolution de l'étalement du MBE en fonction du dosage en sp.....	<b>96</b>
<b>Figure 4-11</b> : l'étalement du MBE en fonction de l'étalement du BAP pour Les mêmes points .....	<b>96</b>

# *LISTE DES TABLEAUX*

<b>Tableau 1,1:</b> Résistances mécaniques des ciments courants.....	7
<b>Tableau 2,1:</b> Différentes formulations de BAP.....	44
<b>Tableau 2,2:</b> Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON. ....	45
<b>Tableau 2,3:</b> Exemple de formulation des BAP.....	45
<b>Tableau 2,4:</b> Caractéristiques des gravillons du béton.....	49
<b>Tableau 2,5:</b> Composition du béton et caractéristiques physiques .....	53
<b>Tableau 2,6:</b> Composition du MBE corrigé par les sables du béton .....	53
<b>Tableau 2,7:</b> Composition du MBE suivant le type de correction.....	54
<b>Tableau 3.1 :</b> Composition chimique et minéralogique du ciment .....	69
<b>Tableau 3.2 :</b> Propriétés des granulats .....	71
<b>Tableau 4-1 :</b> Dosages de saturation en superplastifiant déterminés expérimentalement et calculée pour des coulis à F/C+F différents. ....	80
<b>Tableau 4-2 :</b> Cinq bétons autoplaçants, dont Les formules ont été vérifiées expérimentalement sont retenues et rassemblées .....	81
<b>Tableau 4.3 :</b> Composition massique d'un béton autoplaçant de la 1 <sup>ère</sup> catégorie (BAP 1)	
<b>Tableau 4.4:</b> Caractéristiques à l'état frais du BAP 1 .....	81
<b>Tableau 4.5 :</b> Caractéristiques à l'état durci du BAP 1 .....	82
<b>Tableau 4.6:</b> Composition massique d'un béton autoplaçant de la 2 <sup>ème</sup> catégorie (BAP 2).....	82
<b>Tableau 4.7:</b> Caractéristiques à l'état frais du BAP 2 .....	82
<b>Tableau 4.8 :</b> Caractéristiques à l'état durci du BAP 2 .....	83
<b>Tableau 4.9 :</b> Composition massique d'un béton autoplaçant de la 3 <sup>ème</sup> catégorie (BAP 3).....	83
<b>Tableau 4.10:</b> Caractéristiques à l'état frais du BAP 3 .....	83

<b>Tableau 4.11</b> : Caractéristiques à l'état durci du BAP 3 .....	<b>84</b>
<b>Tableau 4.12</b> : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 4 <sup>ème</sup> catégorie (BAP 4).....	<b>84</b>
<b>Tableau 4.13</b> : Caractéristiques à l'état frais du BAP 4 .....	<b>84</b>
<b>Tableau 4.14</b> : Caractéristiques à l'état durci du BAP 4 .....	<b>85</b>
<b>Tableau 4.15</b> : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 5 <sup>ème</sup> catégorie (BAP 5).....	<b>85</b>
<b>Tableau 4.16</b> : Caractéristiques à l'état frais du BAP 5 .....	<b>85</b>
<b>Tableau 4.17</b> : Caractéristiques à l'état durci du BAP 5 .....	<b>86</b>
<b>Tableau 4.18</b> : Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons autoplaçants.....	<b>86</b>
<b>Tableau 4.19</b> : Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons autoplaçants.....	<b>87</b>
<b>Tableau 4-20</b> : Les différentes formules de mortier issues des différentes formules de béton.....	<b>93</b>
<b>Tableau 4-21</b> : présente le détail du calcul de la surface spécifique .....	<b>93</b>
<b>Tableau 4-22</b> : Surface spécifique imbibé.....	<b>94</b>
<b>Tableau 4.23</b> : Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons corrigées .....	<b>95</b>

## RESUME

Un béton autoplaçant (BAP) est l'un des bétons spéciaux qu'a connu l'industrie de béton ces dernières années. Il est fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation.

L'objectif de notre recherche c'est de contourner la difficulté à reproduire en laboratoire les conditions exactes du malaxage du BAP en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons retirés. Pour cette raison, la méthode a été appelée méthode du Mortier de béton équivalent ou méthode MBE.

Les résultats de cette recherche ont prouvé qu'on peut utiliser cette méthode (MBE) au BAP. Il a été aussi vérifié que chaque béton a sa propre droite de corrélation.

## ABSTRACT

A self-compacting concrete (SCC) is a special concrete experienced by the concrete industry in recent years. It is fluid, highly deformable, homogeneous and stable environment that is being set up by gravity.

The aim of our research is to circumvent the difficulty to reproduce in laboratory the exact conditions of the mixing of BAP and central for limiting the burden of studies on concrete, it was necessary to use a test method fast and able to provide results that can be correlated with those that would be obtained on the concrete. The method adopted is to work on concrete mortar phase taking into account the developed surface of the gravel removed. For this reason, the method has been called the method of mortar or concrete equivalent method MBE.

The results of this research have proved that we can use this method (MBE) in BAP. It was also verified that each has its own concrete correlation line.

اهنم يناعت يتل اقصاخ قسوملم وه (ىل عأل ا قىسنتل سلجم) يتاذل ا قسوملم طغض لكان هو قسناجتم ، رىبك دح ىل ا موش تو ، لى اوسلا نمو . قرى خأل ا تاونسلا يف قناسر خلا ةعانص ةىبذاجلا قىرطنع اواشن ا ىرچى يتل ا قرقبتمل ا ةىىبل او فورظلا ربتخمل ا يف جاتن ا قداغ ا قنبوعص ىل ع فافتل ال وه انثاحبأ نم فدهل ا ناك ىرورضل ا نم ، قددحم تاسارد ىل ع ءبع نم دحلل ةىزكرملا او BAP طالت خال ل قىىدل ا عم طبترت نأ نكمى يتل ا جئاتنل ا مىدقت ىل ع قرداقو ةع ىرس رابت خال ا بولسأ مادختسا نواه قل حرملا ىل ع لم عمل دمتم عمل بولسأل . قسوملم ىل ع اهل ع لوصحل ا نكمى يتل ا كلت ىمست قىرطن ا ف ، ببسل ا اذل . اهل ازا ىصل ا نم تعضو حطسل ا يف رظنل ا عم قسوملم اهل ا داعى ام قىرطن ىبم قسوملم و ا نواه قىرطن مت BAP يف (ىبم) بولسأل ا اذم مادختسا نم نكمتن نأ ثحبال ا اذم جئاتن تتبثأ قو سولم طابتر ا طخ امتاعانق اهل دل لك نأ اضى ا ققحتل ا

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

---

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

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

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

- **l'état frais** : Définit par l'état du matériau depuis le malaxage jusqu'au début de prise du liant, ou l'on doit avoir un bon remplissage dans les coffrages surtout là où il y a un obstacle dû à une forte concentration en armatures tout en ayant un béton uniforme et homogène.
- **jeune âge** : Le long de cette période, on doit assurer une résistance suffisante du béton à la traction, pour remédier aux effets néfastes dus au retrait plastique et le dégagement intense de chaleur lors de l'hydratation. On doit veiller à rassembler les conditions favorables de mûrissement du matériau à savoir : la température et l'humidité modérées.
- **l'état durci** : On doit viser un comportement mécanique performant, de faibles valeurs de porosité. La combinaison de ces facteurs contribue à garantir une longue durée de vie de l'ouvrage.

En conclusion des trois étapes précédentes, on confirme l'importance et la délicatesse de l'état frais du béton.

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

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

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

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

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

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

- l'absence de vibration, ceci réduit les nuisances sonores et les maladies professionnelles,

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

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

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

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

Plusieurs approches de formulation sont à recenser dans la littérature. Celle qui se base sur l'élaboration d'une composition de béton à partir d'optimisations effectuées sur un mortier semble être la plus intéressante puisqu'elle permet la réduction du nombre de paramètre et faciliter les manipulations au niveau du laboratoire.

La recherche de formulation de BAP par cette approche connue sous le nom de Méthode du Mortier du béton équivalent MBE est l'objectif de notre travail de recherche.

Le thème étudié et qu'on présente dans ce mémoire à deux objectifs principaux :

1. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci ;
2. Comparaison du comportement des bétons autoplaçants et celui de leur mortier équivalent vis-à-vis leur étalement.

Le présent manuscrit se compose de quatre chapitres présentés comme suit :  
Le chapitre I est consacré à l'analyse bibliographique.

Le second expose la méthode MBE, son champ d'application et ses limites, le mode opératoire ainsi que le matériel nécessaire

Les chapitres III et IV seront consacrés à l'étendue de l'étude expérimentale :  
Nous présentons au troisième chapitre l'ensemble des essais et la caractérisation des matériaux.

Le dernier chapitre regroupe les résultats des essais de formulations des différents bétons auto-plaçant, et l'extension de la méthode MBE au BAP, en particulier pour les aspects rhéologiques.

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

CHAPITRE I  
GENERALITES  
SUR LES BETONS  
**AUTOPLAÇANTS**

### **I-1.1 GENERALITES:**

Le béton est un matériau universel utilisé sur tous les continents. C'est à la fois un matériau d'exception qu'on utilise pour des ouvrages exceptionnels (centrales nucléaires, barrages, ponts...etc) que dans les constructions les plus modestes (habitation individuelle, supports électriques...). Ses applications sont innombrables et il accompagne toutes les activités de l'homme.

Offrant un excellent équilibre entre la résistance, l'économie et l'esthétique, il a étendu son hégémonie à la majeure partie des secteurs : habitat, transport (routes, ports, aérodromes...)

Grâce à sa souplesse, il se prête à toutes les audaces du concepteur. Au fur et à mesure de sa maîtrise, le béton (et le béton armé) s'est imposé comme le matériau de la liberté et de la création à l'égard non seulement de sa capacité d'épouser toutes les formes imaginables, mais également à ses performances techniques, voire même à son esthétique (aspect, couleur, texture...). De ce fait, son rôle dans le développement de l'architecture moderne a été le premier plan.

Aujourd'hui, grâce au maître de sa composition, on sait comment obtenir les qualités attendues d'un béton, notamment :

- résistance mécanique
- durabilité
- maniabilité lors de la mise en œuvre
- résistance aux agents agressifs (eau de mer, acides,...)
- déformabilité réduite

Par ailleurs, la complémentarité, voire la mixité, du béton avec les autres matériaux (bois, brique, métal, pierre, verre, ...) permet d'utiliser les performances et les qualités de chacun pour obtenir le meilleur résultat en termes de sécurité (stabilité), de confort (isolation acoustique et thermique, ambiance,...), d'esthétique et de coût.

C'est de loin le matériau qui a été le plus utilisé au monde au cours du XXème siècle. En Algérie, la consommation annuelle de béton dépasse actuellement de très loin les 30 millions de mètres cubes. Ce qui représente un volume de 30 mètres de haut sur un km de longueur et un km de largeur.

Enfin, on ne peut pas parler béton sans évoquer la filière de la construction avec ce matériau.

On se limitera à souligner ce qui nous semble être les deux principaux traits distinctifs de la construction en béton. C'est d'abord une activité dont le mode de production est de type ' « projet unique », c'est-à-dire que chaque ouvrage est un produit unique, un prototype. En outre, les intervenants sont nombreux, indépendants et de culture (d'entreprise) différente. L'autre particularité tient à l'utilisation de grandes quantités de matériaux avec une très faible valeur ajoutée. Mais en dépit de ces contraintes, la construction en béton est un secteur où l'innovation est active.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton et spécialement sur ses constituants actifs conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Le début de l'année 1980, a connu la fabrication et la mise en place des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression oscillait entre 100 Mpa et 140 Mpa (BTHP) dans un immeuble à Seattle aux Etats-Unis.

Une équipe de chercheurs de l'université de Sherbrooke (CANADA) chapeauté par P.CAITCIN ont réussi à mettre en œuvre un béton de 400Mpa, en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et simples.

Ce n'est qu'en 1986, que des chercheurs Japonais ont innové un béton fluide qui se met en place sous l'effet gravitaire et sans moyen de vibration développant des caractéristiques rhéologiques remarquables en résistant à la ségrégation et au ressuage, ce type de béton est nommé **béton autoplaçant** ou **béton autonivelant**.

## I-1.2. CONSTITUANTS DU BETON :

### 1.2.1. LE CIMENT :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale fine, son hydratation avec l'eau forme une pâte faisant prise et dont le durcissement est progressif. Grâce à ses caractéristiques, ce composant permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Les principaux constituants du ciment portland sont :

Le silicate bicalcique (C <sub>2</sub> S).....	2CaOSiO <sub>2</sub>
Le silicate tricalcique (C <sub>3</sub> S).....	3CaOSiO <sub>2</sub>
L'aluminate tricalcique (C <sub>3</sub> A).....	3CaOAl <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Le ferroaluminate tetracalcique (C <sub>4</sub> AF).....	4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en Mpa à 28 jours.

La norme EN 196-1 spécifie une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (Mpa)	Résistance minimale à 28 jours (Mpa)	Résistance maximale à 28 jours (Mpa)
32.5	/	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
32.5 R	$\geq 13.5$	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
42.5	$\geq 12.5$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5R	$\geq 20$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
52.5	$\geq 20$	$\geq 52.5$	/
52.5R	$\geq 30$	$\geq 52.5$	/

**Tableau 1.1 : Résistances mécaniques des ciments courants. (1)**

### Caractérisation physico-chimique des ciments portlands :

#### 1) Hydratation du ciment :

Le mélange de la poudre de ciment à l'eau développe des réactions d'hydratation, ce qui va produire une cristallisation aboutissant à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrés qui produisent la prise..

Chacune des phases a un rôle spécifique dans l'acquisition des propriétés du ciment hydraté et l'on peut scinder la réaction d'hydratation de celui-ci qui peut se développer en 4 périodes principales :

##### a) Période initiale :

Au cours de la quelle le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un mono silicate de calcium hydraté et l'ettringite.

##### b) Période dite dormante :

Au cours de la quelle la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivent moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures.

##### c) Période de prise :

Au cours de la quelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.

Le phénomène de prise est lié à de nombreux paramètres qui sont les suivantes :

- *Le type de ciment* : certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- *La finesse de mouture* : le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.
- *La température ambiante* : la prise étant stoppée à 0°C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C.
- *L'excès d'eau de gâchage* : qui agit alors comme retardateur de prise

La norme NF P 15-301 spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal

1 h : 30 mn pour les ciments des classes 32.5 et 32.5R.

1 h pour les ciments des classes 42.5 - 42.5R - 52.5 - 52.5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h : 30 mn à 3 h : 30 mn pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'étendant pour une température ambiante de 20°C.

#### **d) période de durcissement:**

La prise étant amorcée et la poursuite du processus d'hydratation, cette période se poursuit environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui s'étale pendant des années à une vitesse de plus en plus lente pour atteindre des résistances et compacités élevées.

La réaction chimique d'hydratation s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

On doit signaler que la quantité d'eau pour un gâchage correct du béton est supérieure à celle nécessaire aux seules réactions chimiques, parce qu'il faut distinguer:

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et qui est primordiale à leur structure cristalline, son pourcentage étant en général de l'ordre de 20 à 25 % du poids de ciment;
- L'eau adsorbée aux surfaces des granulats;
- L'eau libre (dans les fins réseaux capillaires) qui a tendance à s'éliminer plus ou moins par séchage et qui est indispensable pour l'obtention de la plasticité et la maniabilité du gâchage et la mise en place du béton.

## 2) Chaleur d'hydratation:

La dissolution des différents constituants est exothermique et selon leur pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est plus ou moins important, on cite à titre d'exemple les ciments riches en  $C_3A$  que l'on cherchera à utiliser par temps froids ou de préfabrication, alors qu'il est impératif de les éviter en temps chauds. Suivant les ciments, cette chaleur à 12 heures est comprise entre 65j/g pour certains CHF-CEM III/B et 300j/g pour certains CPA-CEMI.

## 3) Finesse de mouture:

La finesse de mouture, appelée aussi surface de Blaine, exprimée en  $cm^2/g$ , elle représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1g de ciment. Elle est généralement comprise entre 3000 et 3500  $cm^2/g$ .

Plus la finesse de mouture est grande, plus les résistances sont précoces et élevées.

## 4) Retrait:

C'est la diminution du volume apparent de la matière. Sa mesure est faite sur des éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16) de mortier conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50 %.

La norme NF P15 – 433 impose les valeurs limites, à 28 jours de:

- 800  $\mu m/m$  pour les ciments portlands CPA - CEM II de la classe 32.5;
- 1000  $\mu m/m$  pour des types de ciments identiques mais de classe 32.5R, 42.5 et 42.5R.

## 5) Expansion:

L'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium est la cause possible de l'expansion. Ils peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps sont à l'origine de désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité est déterminée par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante. La valeur de l'expansion doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants.

## 6) Gonflement:

Bien qu'il ne soit pas normalisé, il est essentiel de faire un rappel qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume quand il est immergé dans l'eau. Ses variations dimensionnelles sont d'environ 10% de celles constatées dans l'air.

### **I- 1.2.2. GRANULATS:**

Les granulats constituent le squelette inerte du béton, ils représentent l'ensemble des grains compris entre 0 et 40 mm (sable, gravier, cailloux) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Les granulats confèrent au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique.

On rencontre des granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières et les granulats concassés obtenus par l'exploitation des roches de carrières.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisées dans la nouvelle norme XP P 17-540. Cette norme regroupe les caractéristiques que doivent présenter les granulats destinés à la confection de bétons hydrauliques.

La courbe granulométrique représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

### **I- 1.2.3. EAU:**

Pour convenir à la confection de béton, l'eau de gâchage ne doit contenir des composés en suspension dépassant les tolérances réglementaires ci-après: [1]

- 2 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances

La proportion de sels dissous dans l'eau ne doit pas être au-delà de:

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

### **I- 1.2.4. ADJUVANTS:**

- Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques qui, incorporés dans les bétons à des doses précises du poids de ciment et selon leur plage d'utilisation indiquée par le fournisseur. Leur introduction dans le mélange engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes et ils ont pour but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci.
- Les adjuvants sont définis et classés selon leur action principale, on va citer:

#### **1.2.4.1. Les adjuvants qui modifient la rhéologie:**

◆ **Les superplastifiants:** le résultat de leur ajout est une maniabilité et ouvrabilité du béton par défloculation des grains de ciment. A un certain seuil de consistance, leur avantage est la réduction de la quantité d'eau pour le malaxage et la mise en place du béton qui aura pour conséquence l'accroissement des caractéristiques mécaniques du béton.

◆ **Les rétenteurs d'eau:** ayant pour fonction la réduction de la tendance au ressuage des bétons et ils améliorent la cohésion des bétons fluides.

#### **1.2.4.2. Adjuvants qui modifient la prise et le durcissement:**

◆ **Les retardataires de prise:** leur emploi est fréquent dans le cas du transport de béton sur de grands trajets, spécialement en temps chauds. Ils sont utilisés pour assurer la continuité lors de la reprise de bétonnage.

◆ **Les accélérateurs de prise:** ils augmentent la réaction d'hydratation en déclenchant rapidement la prise, tout en dégageant une chaleur importante. Leur usage est pour le bétonnage en temps froid, ou pour les travaux urgents.

#### **I-1.2.5. Les Ajouts minéraux:**

A l'origine, les ajouts ont été lancés pour des raisons économiques. Soit ils existaient sous forme de produits naturels qui ne devaient être que peu traités, soit ils résultaient de processus industriels sous forme de déchets ou de sous produits. Il y a eu en outre l'augmentation des coûts énergétiques, auxquels plus tard, sont venues s'ajouter des raisons écologiques. On compte parmi ces dernières les oppositions pour la mise en exploitation de nouvelles zones d'extraction de matières premières pour la fabrication du clinker, ainsi que la possibilité d'utiliser judicieusement des déchets industriels tels que: Filler calcaire, laitier des hauts fourneaux, cendres volantes ou la fumée de silice, au lieu de les déposer dans une décharge.

Indépendamment de ces avantages écologiques et économiques, les ajouts appropriés influant positivement sur certaines des propriétés du béton, à l'état frais, mais surtout à l'état durci.

Dans de nombreux pays où les matériaux appropriés sont à grande disposition, cela a entraîné une forte augmentation de l'utilisation de bétons avec ajouts; on note que sans ajouts, les bétons à faible chaleur d'hydratation ou possédant des propriétés particulières ne pourraient être fabriqués.

Le développement actuel en matière de composants du béton, nous amène à confectionner des bétons très maniables dont la mise en œuvre reste fondamentalement la même que celle d'un béton ordinaire.

## **I- 2.1. Bétons spéciaux :**

### **2.1.1. Bétons à haute performance BHP :**

Ces bétons sont définis comme présentant une résistance à la compression à 28 jours ( $f_{c28}$ ) supérieure à 50Mpa et un rapport pondéral eau / liant (E / L) inférieur à 0.40.

Les propriétés principales de ces bétons sont :

- sur béton frais : une maniabilité accrue ;
- sur béton durci :
  - caractéristiques mécaniques élevées aux jeunes âges ainsi qu'à long terme.
  - une grande imperméabilité à l'air et à l'eau due à une compacité plus élevée.
  - une grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité.

Ces propriétés sont atteintes grâce à la combinaison de plusieurs paramètres à savoir :

- les granulats doivent présenter des qualités adéquates ;
- l'emploi d'adjuvants spécifiques, particulièrement des supers fluidifiants réducteurs d'eau ainsi que des additions minérales à base de silice ;
- les liants utilisés sont des ciments de classes élevées (52.5Mpa) à des dosages compris entre 400 et 450 kg/m<sup>3</sup>.

### **2.1.2. Bétons du futur :**

En parallèle à ces bétons de très haute performance «BHTP» ou béton à haute résistance «BTR» de nouveaux bétons sont apparus dont les caractéristiques mécaniques sont nettement supérieures à celles des bétons précédents avoisinant les 200Mpa.

Actuellement deux variétés de ces bétons sont élaborées :

- le B.P.R ou béton à poudre réactive ;
- le B.S.I 150 ou béton spécial industriel.

Permettant avec certaines formulations l'obtention de résistance à la compression à 28 jours dépassant les 200 Mpa. Pour ces deux bétons, on a la compacité est très améliorée et une porosité réduite.

Leurs compositions sont différentes de celles des bétons classiques ou des BHP, elles résultent d'études spécifiques en fonction des performances recherchées faisant appel à :

- un ciment (CPA-CEM) dosé à  $900\text{kg/m}^3$ ,
- un squelette granulaire fin (sable 0/1 et gravier 0/6) à base d'alumine de l'ordre de  $1500\text{kg/m}^3$ ,
- des fumées de silice allant jusqu'à 20% du poids de ciment,
- l'eau de malaxage est ajoutée à raison de 170 à  $200\text{ l/m}^3$ ,
- la fluidification est à base d'un adjuvant haut réducteur,
- pour ces bétons, il est préconisé l'adjonction de fibres métalliques courtes d'une proportion de 1% du volume total,
- à la fin du malaxage des constituants, ces bétons présentent un aspect fluide leur permettant une mise en œuvre aisée dans les coffrages et sans vibration.
- Ces bétons ont certes des coûts élevés, mais on peut envisager des ouvrages de conception complexe et ceci grâce à l'avantage de verser des pâtes fluides.

## I- 2.2 DEFINITION DU BETON AUTOPLAÇANT

Ce béton est défini comme : béton autonivelant, béton autocompactant (self compacting concrete SCC) ou béton hyper fluide. Toute fois, l'appellation la plus connue aujourd'hui en général est: béton autoplaçant.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La spécificité principale de ces bétons réside du fait qu'ils sont mis en place sans vibration.

Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes de coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures très résistantes et durables.

Dans certains cas, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et les parois verticales.

Les principes de formulation de bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants) plus élevé, ils sont caractérisés par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants nommés : super plastifiants hauts réducteurs d'eau.

Une nouvelle vague d'adjuvants appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité entrant quelque fois dans leur formulation. Ces derniers assurent la viscosité de la pâte pour lui conférer des propriétés limitant la ségrégation

La dernière caractéristique des BAP est la faible teneur de granulats de l'ordre 20 à 25 millimètres. Pour ce béton, on se fixe de travailler le plus possible avec des granulats de 16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins

A l'état frais, les BAP se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils s'écoulent sous leur poids propre avec un débit suffisant écartant les moyens de vibration.

Le BAP s'écoule sans vibration dans les zones confinées ou très ferraiillées, tout en gardant une fluidité élevée et une bonne résistance à la ségrégation.

## I- 2.3 HISTORIQUE DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Le Japon est le pionnier du développement de ce béton ou il a été apparu en 1986.

Ces bétons hyper fluides étaient en même temps stables et connaissaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Pour satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau, en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons

destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

Ces bétons contiennent souvent des agents colloïdaux dans le but de résister à la ségrégation des gros granulats et aussi au phénomène de ressuage.

Construire avec cette nouvelle gamme de béton est entrain de prendre de l'ampleur à travers le monde, en effet, depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants est en bonne croissance notamment au Japon.

Les bétons autoplaçants offrent des possibilités d'utilisation très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions ; renforcement ainsi que la réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès) ; construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour canalisation (béton coulé sous l'eau pour des réparations, béton confiné, pieux...etc.).

Nous citons quelques exemples de réalisations Japonaises :

- le pont Kiba Park ou  $650 \text{ m}^3$  de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de  $60 \text{ Mpa}$  [2] ;
- le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de  $3910 \text{ m}$  ou  $390.000 \text{ m}^3$  de béton autoplaçant versés dans les coffrages des fondations et des piliers (OKAMURA et Coll. 1994). [3] ;
- le bâtiment Landmark Tower ou un béton autoplaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de  $40 \text{ m}$  de hauteur chacune (HAYAKAWA et Coll. 1995) [4] ;
- le stade de Fukaka ou  $10.000 \text{ m}^3$  de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995) [5]

Nous notons d'autre part que diverses structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux...etc.) ont été construites en totalité ou en partie avec des bétons autoplaçants.

#### **I- 2.4. COMPOSITION SPECIFIQUE DES BAP :**

La formulation des BAP est basée sur les critères suivants

##### **a- Une quantité de fines importante :**

La composition des bétons autoplaçants comporte une quantité de fines importante ( $500 \text{ kg/m}^3$  de diamètre inférieur à  $80 \mu\text{m}$ ) assurant la maniabilité et limitant les risques de

ségrégation et ressuage. Le liant utilisé est généralement un mélange de deux ou trois constituants pour éviter l'élévation de température du béton lors de la prise de ce dernier.

**b- Un volume de pâte élevé :**

Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air occlus) est d'écarter les granulats pour réduire les frottements provoquant la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

**c- Utilisation d'adjuvant (superplastifiant) :**

L'ajout des super plastifiants conférant aux BAP leur maniabilité, cet ajout doit être proche du dosage de saturation et jamais très élevé sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneurs en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage.

**d- Eventuelle utilisation d'un agent de viscosité :**

Ces agents sont des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales augmentant la viscosité de l'eau. Ils empêchent le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse. Ces adjuvants sont utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur emploi pour des BAP ayant un faible rapport E/L n'est jamais justifié.

Les agents de viscosité sont connus pour rendre les bétons autoplaçants moins sensibles à des variations de la teneur en eau, ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de maniabilité.

**e- Un faible volume de gravillon :**

Pour un confinement donné, les risques de blocage croissent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10mm et 20mm.

Le rapport G/S pour les BAP est proche de 1. [6]

## I- 2.5. COMPOSANTS UTILISES DANS LES BAP

### 2.5.1. LIANTS ET GRANULATS :

La plupart des ciments sont utilisés pour la confection des BAP mais compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton renferment toujours du ciment CPA – CEM I – 52.5 ou 42.5.

Le liant est composé de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales correspondant à des additions normalisées ou non ces composants sont :

- Des fillers calcaires (calcaire, dolomite)
- Des fillers siliceux, des laitiers de hauts fourneaux
- Des cendres volantes
- Des fumées de silice.

Le développement durable du béton permet la réduction de l'émission des gaz à effet de serre. La production d'une tonne de ciment libère la même quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, le remplacement d'une partie par des ajouts minéraux permettra la réduction systématique de la quantité de CO<sub>2</sub> émise.

La substitution d'une fraction de ciment par des cendres volantes ou de laitier permet le maintien d'ouvrabilité plus longtemps. Les fillers calcaires ont un effet inverse, ils constituent des sites de nucléation pour la formulation des hydrates et favorisent alors la prise du matériau. L'introduction de la fumée de silice dans les BAP (CLERGUE et MONACHON, 1998) conduit à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à haute performance en l'occurrence un accroissement de la compacité et donc des résistances mécaniques très élevées.

Dans les BAP, la proportion des graviers par rapport au sable est faible qu'avec un béton ordinaire permettant ainsi l'écoulement de matériaux dans des zones fortement armées le rapport G/S est voisin de l'unité.

Les granulats des BAP sont roulés ou concassés, néanmoins comme dans le cas des bétons traditionnels, la forme des granulats a une influence sur la rhéologie des BAP. Les coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

### 2.5.2 ADJUVANTS DES BETONS.

Le contrôle de l'usage des adjuvants doit être rigoureux, car toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés des bétons.

L'incorporation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts minéraux ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes telles que : les bétons à haute performance, les bétons autoplacants et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tels que les lignosulfonates sont utilisés dans les bétons ayant un rapport E/L de 0.40 ou plus.

L'usage des superplastifiants est recommandé quand une réduction d'eau plus élevée est exigée.

Les produits à base de polynaphtalène sulfonate et de polymélamine sulfonate sont les plus utilisés depuis des années, ils contribuent à la réduction d'eau jusqu'à 30 % [7] .

Récemment, le développement d'une génération de superplastifiant peut accomplir la même réduction d'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus inférieur en leur faisant des ajustements pour diminuer les effets secondaires de ces produits tels que l'entraînement excessif d'air ou un retard important de la prise de ciment.

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (ou modificateurs de la viscosité) utilisés simultanément avec les superplastifiants pour la production des bétons autoplacants.

Quelques uns de ces agents de viscosité sont à base de gomme de polysaccharide et d'autres à base d'hydroxyde propyle méthyle cellulose (HMPC).

Les bétons autoplacants ont besoin d'un dosage élevé en superplastifiants pour l'obtention d'une bonne fluidité ce qui nécessite l'ajout d'un agent de viscosité pour augmenter la viscosité et la stabilité des BAP.

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton résultant d'un fort dosage en superplastifiant.

La sélection et le dosage de ces adjuvants devrait être bien contrôlés et leur compatibilité bien étudiée avant d'utiliser leur synergique pour optimiser les propriétés du béton autoplacant. [7]

### 2.5.2.1 Superplastifiant :

L'utilisation d'un superplastifiant est primordiale pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées.

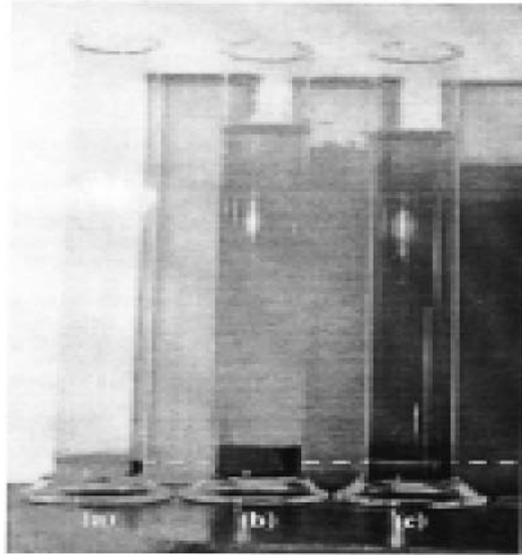
A noter que les superplastifiants employés pour les BAP sont identiques à ceux utilisés pour les autres types de bétons.

Les principaux superplastifiants sont à base de :

- Copolymère formaldéhyde naphtalène sulfonate (PNS)
- Copolymère formaldéhyde mélaminesulfonate (PMS)
- Polymère avec fonction acrylate (PA)
- Polymère avec des fonctions carboxylates (PC)
- Monomère avec les fonctions phosphonates et/ou carboxylates (MPC).

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec des additions en s'adsorbant à leur surface permettant d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. Les particules sont alors dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante.

La capacité de remplissage d'un BAP pour une composition granulaire donnée, dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croît avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au delà duquel, il y a apparition des phénomènes de ségrégation (TANGTERMSIRIKUI et Al 1998) [7]. Les grains de ciment ont tendance à flocculer lorsqu'on les met dans l'eau. CAITCIN [8] a réalisé un essai très simple, il a introduit 50 g de ciment dans un vase de 1 litre en agitant le tout et en laissant les grains de ciment se sédimenter. Avant le début de la sédimentation, les grains de ciment forment une suspension homogène, mais très vite on voit les plus gros grains de ciment se déposer au fond du vase. Après 1 heure on voit l'eau de la partie supérieure du vase devenir claire et que les grains de ciment occupent un volume nettement plus élevé que le volume occupé par 50 gr de ciment au fond du vase comme le montre la figure 1.1.



**Figure I.1 : Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant.**

- a) volume occupé par 50 gr de ciment au fond du vase gradué
- b) volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension
- c) volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension ou l'on a substitué  $10 \text{ cm}^3$  d'eau par  $10 \text{ cm}^3$  de superplastifiant.

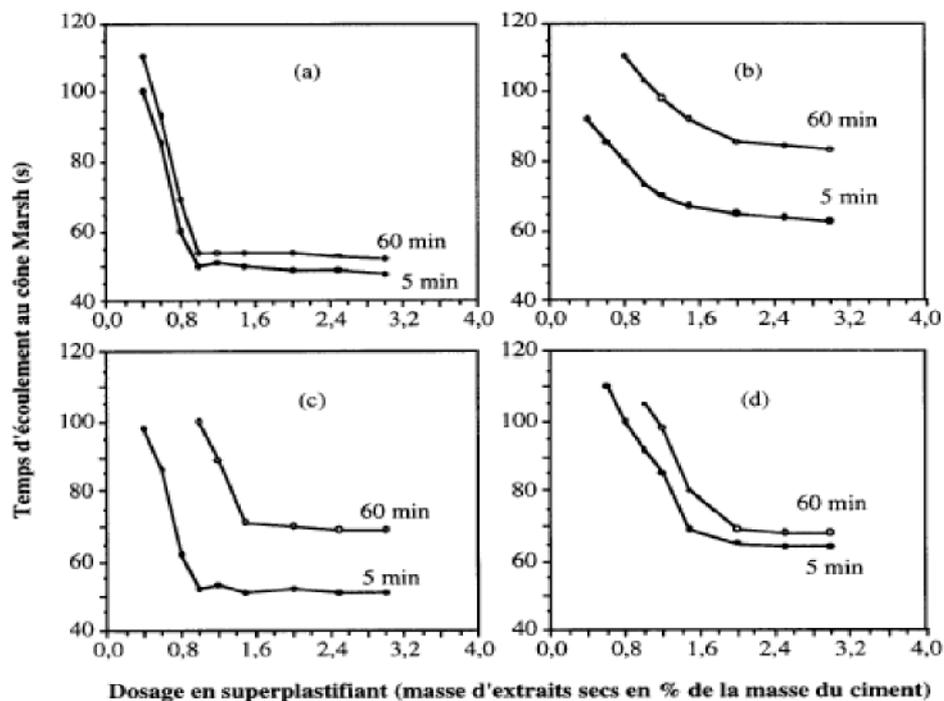
Si l'on répète la même expérience mais en substituant  $10 \text{ cm}^3$  d'eau par  $10 \text{ cm}^3$  d'un superplastifiant de type polynaphtalène sulfonate (PNS), on commence encore par voir se déposer les gros grains de ciment au fond du vase gradué, mais on ne voit plus les grains de ciment se déposer en bloc au fond du vase, on voit plutôt les particules de ciment qui continuent à se sédimenter régulièrement pour finalement, après 24 ou 48 heures, ne former au fond du vase qu'une couche de la même épaisseur que 50 gr de ciment sec.

#### • La compatibilité ciment - superplastifiant

Avec le développement de la technologie des bétons à haute performance et les bétons autoplaçants, il y a eu apparition de plus en plus des phénomènes d'incompatibilité ciment-superplastifiant. Ces phénomènes sont liés à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium présent dans le ciment. En plus de leur action dispersante, les superplastifiants agissent avec le  $\text{C}_3\text{A}$  (Aluminates tricalcique), pour bloquer la formation d'ettringite et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solution de la plupart des différentes formes de sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment.

On peut aisément illustrer de tels comportements en étudiant le comportement des coulis confectionnés à partir de certains ciments. L'étude rhéologique des coulis ayant un faible rapport E/L en mesurant le temps d'écoulement au cône de Marsh, on se retrouve systématiquement face à quatre situations.

LESSARD, GENDREAU, BAALBAKI et PIGEON ont illustré ces situations en faisant varier le dosage en superplastifiants :



**Figure :I-2 : Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant. .**

Les figures 1.2 (c) et (d) représentent des situations intermédiaires. A la figure (c), la courbe à 5 minutes ressemble à celle de la figure (a) tandis que la courbe à 60 minutes ressemble à celle de la figure (b). Dans le cas de la figure (d) c'est le contraire qui se produit ; la courbe d'écoulement à 60 minutes ressemble à celle de la figure (a). Même s'il n'a pas une bonne fluidité initiale, le coulis de la figure (d) ne voit pas sa rhéologie se détériorer dans le temps.

Le comportement rhéologique de coulis correspondant au cas des figures (b), (c) et (d) peut être amélioré en ajoutant une quantité adéquate de retardateur de prise pour se retrouver

avec des coulis dont le comportement est similaire à celui représenté à la figure (a). Malheureusement, ce n'est pas toujours aussi facile à faire qu'à dire et il n'est pas toujours possible d'en arriver à une solution aussi simple d'où le changement du ciment est primordial.

#### **2.5.2.2. Agent de viscosité :**

L'introduction d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité tout en réduisant sa viscosité. De ce fait, le matériau serait moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour remédier à cet effet néfaste, on ajoute toujours un agent de viscosité aux BAP. Si la formule ne contient pas cet agent, il est impératif d'avoir une quantité de liant importante pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- Colloïde naturel ;
- Suspension des particules siliceuses.

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte de béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet le maintien d'une distance entre les granulats, ce qui va réduire leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

Il assure la conservation d'une répartition homogène des différents constituants et son action étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant.

L'optimisation de la fluidité et de la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

Généralement, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît en parallèle avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage important en agent de viscosité va empêcher la pâte de se déformer en entraînant une perte de fluidité. On note aussi qu'une forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité assurent le maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps sur une durée d'une heure environ.

Parmi les variétés d'agent de viscosité, on distingue ceux à base de polysaccharide et plus particulièrement la gomme welan semblent se différencier par la variation de la contrainte de

cisaillement en fonction de la vitesse. Une solution de gomme welan présente un seuil de cisaillement élevé et une viscosité réduite pour des contraintes de cisaillement élevées.

De ce fait, un béton contenant de la gomme welan possède une forte déformabilité lorsqu'il s'écoule et celle-ci devient faible dès que le mouvement du matériau cesse.

Les BAP ont alors de très bonnes résistances à la ségrégation dynamique et statique. Les essais réalisés par Rols et Al (1999) [4] ont introduit comme agents de viscosité des suspensions de particules siliceuses et dans une moindre mesure l'amidon pouvant remplacer la gomme de welan.

Notons que l'adsorption d'une partie des polymères à la surface des grains de ciment varie selon la nature des polymères et les caractéristiques du ciment.

La quantité des polymères adsorbés croît avec l'élévation de la finesse du ciment. Alors que deux ciments de finesse identique peuvent retenir des quantités de polymères différentes.

Les caractéristiques minéralogiques des grains de ciment sont autant de paramètres déterminants.

Selon BURGE (1999), la quantité de polymères adsorbés par un ciment donné dépend du caractère ionique plus ou moins prononcé de l'adjuvant et de son poids moléculaire.

L'adsorption est d'autant plus importante que le polymère est fortement ionique conduisant à une meilleure fluidification des bétons autoplaçants.

Jusqu'à présent, il est difficile de produire des superplastifiants qui soient efficaces avec tout type de ciment, avec un rapport E/C quelconque, car la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfate de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Quand on fabrique un ciment portland, en considérant l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, on peut ajuster la composition du ciment portland pour qu'il puisse devenir parfaitement compatible avec tous superplastifiants existants sur le marché.

On devrait retenir et reconnaître que l'utilisation adéquate des superplastifiants pour qu'ils soient des composants primordiaux des bétons durables tout autant que le ciment.

Les propriétés dispersantes très efficaces des superplastifiants ouvrent la voie pour la mise en œuvre des bétons fluides à des rapports E/L très faibles allant jusqu'à 0.32 ou même moins.

## **I- 2.6. CARACTARISATION DES BAP :**

La rhéologie des bétons frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même.

Parmi les avantages des bétons autoplaçants est leur amélioration de la déformabilité du mélange pour qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans passer par la vibration l'étalement et leur mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité.

En général, le critère de fluidité - stabilité est assez difficile à rencontrer, mais, au moyen d'agents colloïdaux (agent de viscosité), des teneurs élevées en ajouts minéraux ou des teneurs appropriées en sable et en gros granulats, la stabilité et la déformabilité sont assurées.

On entend par stabilité, la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage du béton.

## **I- 2.7. PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS :**

### **2.7.1. NOTION DE DEFORMABILITE ET DE CAPACITE DE REMPLISSAGE :**

La déformation du béton dans les coffrages est obligatoire pour contourner les obstacles que pourra rencontrer durant son écoulement. Cette déformation doit se faire en évitant tout risque de ségrégation de ses différents constituants.

La capacité de remplissage d'un béton est un indice d'ouvrabilité qui nous rend compte sur la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation d'un béton durant son écoulement (OZAWA et Coll 1992).[9]

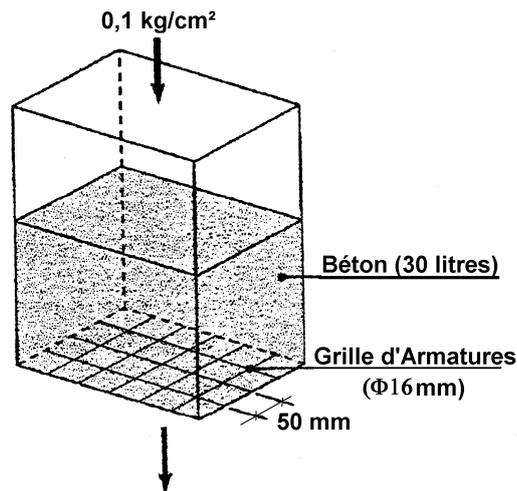
En plus de la composition du béton (teneur en fines, rapport E/L, dosage en adjuvant. .etc), la capacité de remplissage est affectée par la forme des coffrages, l'espacement des armatures et le mode de mise en place du béton.

OZAWA et Coll (1992) [9] ont procédé à une étude expérimentale afin d'évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères.

La figure 1.3 montre l'essai qui consiste à déverser 30 litres de béton autoplaçant dans un cube dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 5 mm qui est supposé simuler une zone fortement congestionnée d'un coffrage.

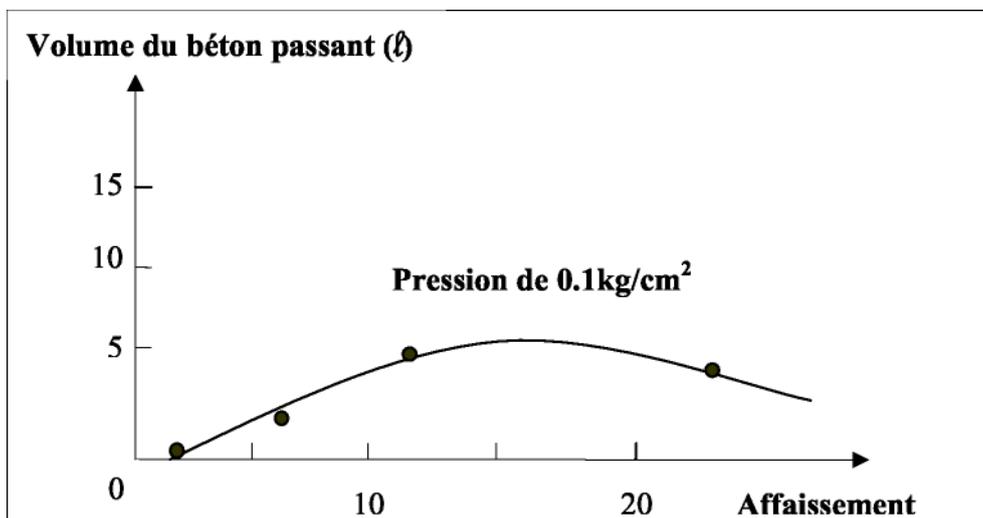
Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le moment de l'essai, en suite on applique une pression uniforme de  $0.1 \text{ kg/ cm}^2$  sur toute la surface du béton et on ouvre la trappe.

A la fin de l'écoulement, on mesure la quantité du béton ayant passé à travers le grillage.



**Figure I-3 : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992).**

La relation entre le volume du béton passant à travers le grillage et l'affaissement est présenté par le graphe de la figure 1.4 :



**Figure I.4 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992).**

La relation n'est en fait pas linéaire, mais elle présente un optimum pour les bétons à faible affaissement, ce qui nous renseigne d'une difficulté d'écoulement dû à un manque de déformabilité.

La capacité de remplissage est contrôlée principalement par la déformabilité du béton à faible affaissement et par la résistance à la ségrégation à affaissement élevé (cf. figure 1.5).

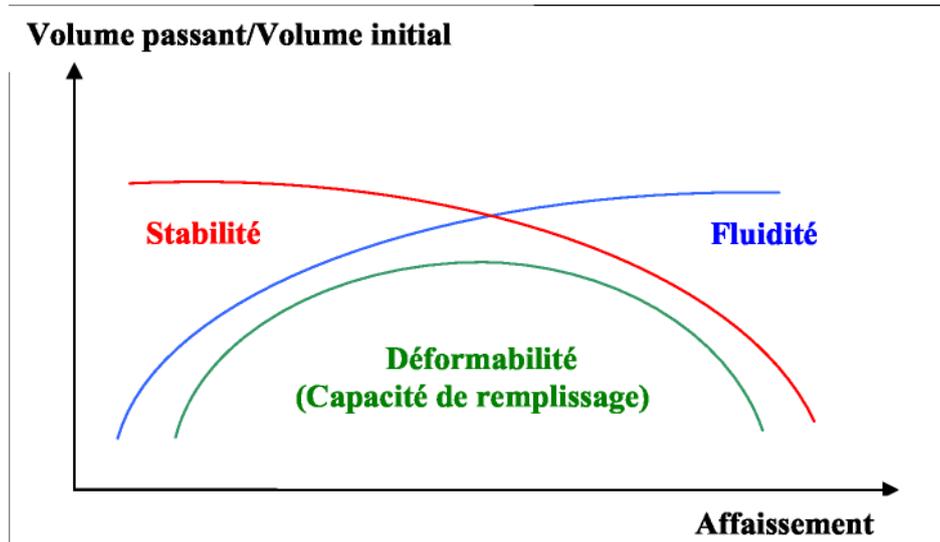


Figure I-5 : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale (OZAWA et coll. 1992).

Parmi les paramètres définissant la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation ce qu'on appelle : **eau libre**. C'est la fraction d'eau de malaxage qui n'est pas retenue physiquement ou chimiquement par les granulats et le liant. Cette eau apporte un plus pour ce qui est de l'ouvrabilité du béton et elle est calculée comme suit :

$$E_L = E - (E_G + E_P) \dots \dots \dots (1)$$

Avec:

$E_L$  : **Eau libre** ;

$E$  : Eau totale dans le mélange ;

$E_g$  : Eau retenue par les granulats ;

$E_p$  : Eau retenue par le liant.

Selon Ozawa et coll. [9], la déformabilité est seulement fonction de l'eau libre ; ils sont arrivés à cette démonstration en mesurant le volume de sable maximal que contient un mortier de rapport E/L donné pour que toute la quantité de mortier passe à travers un cylindre percé de trous ayant un diamètre égal à l'espacement entre les gros granulats dans un béton.

On se rend compte que plus le rapport E/L augmente, plus on peut ajouter du sable pour une quantité fixe de pâte (cf figure 1-6).

Cet essai révèle la présence d'un rapport E/L optimal au dessus duquel un excès de sable ajouté engendre un arrêt d'écoulement par blocage des grains de sable au droit des trous, c'est la ségrégation au niveau du mortier.

**Figure 1.6 : Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L.**

**2.7.2. Fluidité :**

Les essais développés dans cette partie paraissent beaucoup plus comme des essais technologiques du béton sans pour autant ne permettre de déterminer un seuil de cisaillement ou une viscosité plastique.

**2-7-2-1 Essai d'étalement :**

Il est très courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté en utilisant le cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à choc.

Les BAP du fait de leur fluidité s'étaient en formant une galette, dont la mesure du diamètre dépasse souvent les 500 mm.

La notion d'affaissement au cône d'Abrams n'a aucune signification avec ces types de bétons.

**2-7-2-2 Vitesse d'écoulement :**

Au cours de l'essai d'écoulement, on mesure le temps d'écoulement que met le béton en formant une galette de 50 cm de diamètre. Ceci est un indice de la viscosité qui est une propriété rhéologique importante.

La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6.25 à 2.5 cm/s de diamètre correspondant à un temps d'écoulement T50 oscillant entre 4 à 40s.

**2-7-2-3 Essai de la table de fluidité :**

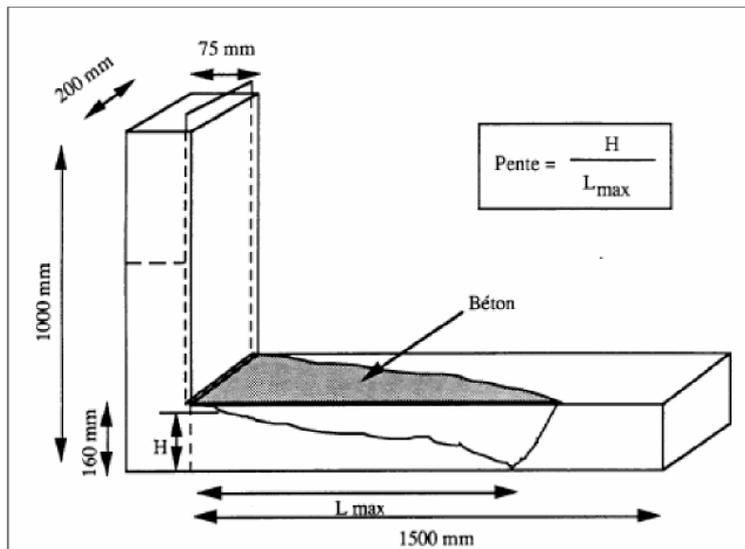
C'est un essai semblable à l'essai d'étalement (DIN 1048 Flowtable) , il est réalisé sur un plateau circulaire de 670mm de diamètre qui possède un bord de 20 mm , sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente introduits par une manivelle à une vitesse de 12.5mm/s.

Le nombre d'amplitudes correspondant à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont aussi mesurées (KASAI et COLL 1991). [2]

**2.7.2.4. Essai de la boîte en L :**

La partie verticale du L est remplie de béton (cf.figure 1.7) et la différence de hauteur dans les parties verticales et horizontales est mesurée. Dans le cas des BAP, cette dernière doit être la plus faible possible. On note que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages très ferrailés.

Dans le cas d'un ferrailage moindre, la grille de ferrailage est allégée en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. Quand on est face d'un blocage des gravillons, il convient de diminuer la teneur en granulats d'une part et d'augmenter le volume de la pâte en gardant le rapport E/L constant.



**Figure 1.7 : Essai de la boîte en L, d'après l'Université de Sherbrooke.**

#### **2.7.2.5. Essai de Box :**

On prend une boîte en plexiglas de dimensions 150 x 150 x 400 mm ou l'on met un échantillon de béton dans l'un des deux compartiments. En levant la porte de séparation des deux compartiments, la dénivellation de hauteur est alors mesurée. Cet essai qualifie la déformabilité du mélange qui sera meilleure pour une dénivellation négligeable. (KASAI et Coll. 1999).

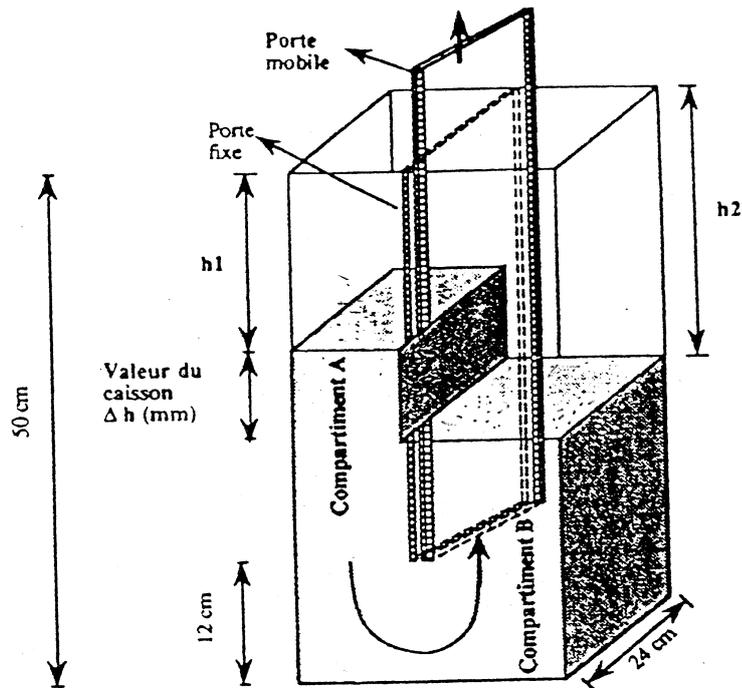


Figure I-8 : Essai du Box.

### I- 2.7.3. La stabilité :

#### 2.7.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V :

L'objet de cet essai est la mesure du temps d'écoulement du béton dans un espace restreint. On choisit une section rectangulaire sur laquelle on impose un écoulement du même type que celui qui est imposé entre deux armatures parallèles.

A travers cet essai, la stabilité du béton lors de l'écoulement peut être évaluée.

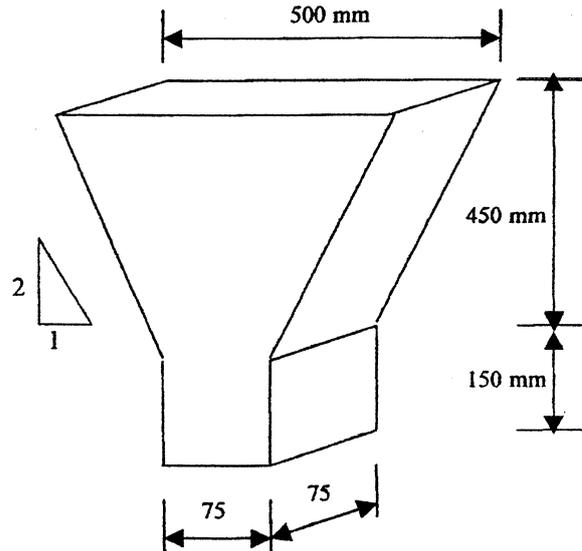


Figure I-9 : Essai de l'entonnoir en forme de V, d'après SAKATA et al, (1996).

### 2.7.3.2. Essai de tassement :

L'essai est exécuté sur des colonnes de béton de 70 cm ou de 150 cm de hauteur (MANAI, 1995). Il consiste à fixer une plaque circulaire en Plexiglas de 150 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur ancrée dans le béton à l'aide de 4 boulons de 35 mm de longueur chacun, sur la surface du béton frais. On introduit au contact de la plaque en Plexiglas l'aiguille d'un comparateur de détection de déplacement qui est caractérisé par une précision de 0.2  $\mu\text{m}$ . La variation du tassement est notée au cours du temps jusqu'à la stabilisation du mouvement (prise du béton).

Le tassement relatif  $T$  (%) serait évalué en divisant la valeur maximale du tassement ( $T_h$ ) sur la hauteur de la colonne ( $h$ ).

$$T (\%) = T_h/h \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

A partir de cet essai, on mesure également le volume d'eau de ressuage externe qui apparaît à la surface supérieure du béton.

Après durcissement, les colonnes de béton sont sciées verticalement pour évaluer la répartition des gros granulats. Ceci nous renseigne sur la résistance à la ségrégation du béton.

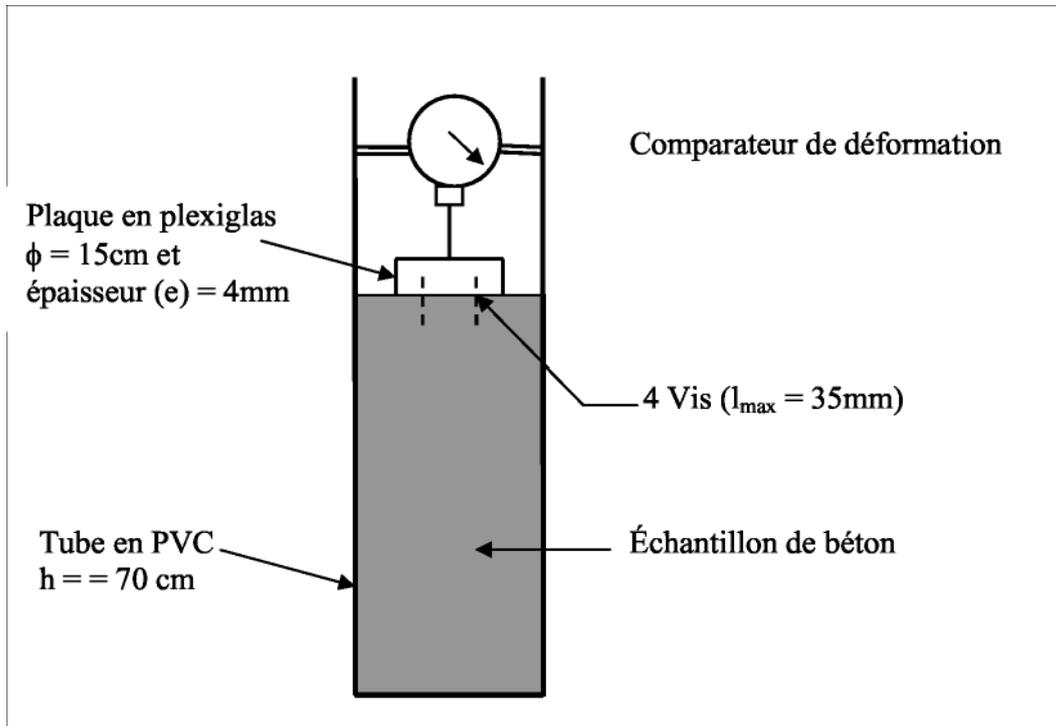


Figure I -10 : Essai du tassement (MANAI, 1995).

#### I- 2.7.4. SÉGRÉGATION DYNAMIQUE

Il n'existe pas d'essais conventionnels pour les deux formes de ségrégation statique et dynamique, plusieurs systèmes ont été développés.

Les essais caractérisant la résistance à la ségrégation dynamique permettent l'évaluation de la capacité d'écoulement de béton dans une zone confinée.

##### 2.7.4.1. Essai du tube en U :

L'essai consiste à remplir la partie R<sub>1</sub> de béton, juste après on ouvre la trappe et on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R<sub>2</sub> après écoulement du béton. Généralement, pour un BAP, cette hauteur dépasse les 30 cm.

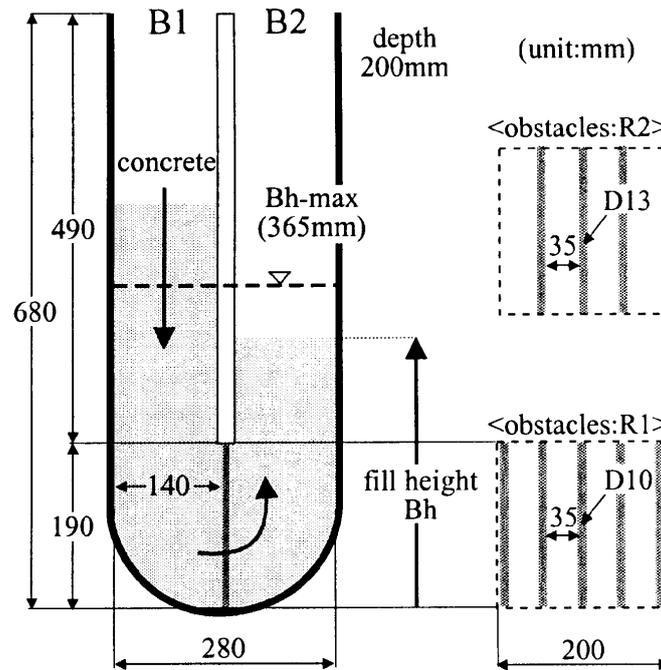


Figure 1.11 : Essai du tube en U (MITSUKA et al).

#### 2.7.4.2. Essai de la capacité de remplissage (Essai de caisson) :

Il consiste à remplir à débit constant le caisson de sorte que la partie  $\Omega$  puisse atteindre les 22 cm et on évalue alors l'aptitude de remplissage du béton par le rapport  $A/(A+B)$  (%).

**A** : rempli par le béton

**B** : non rempli par le béton

On peut estimer alors que le béton est autoplaçant lorsque le rapport  $A/(A+B)$  (%) est supérieur à 60 %.

La réalisation de l'essai nécessite un volume de 35 litres de béton autoplaçant.

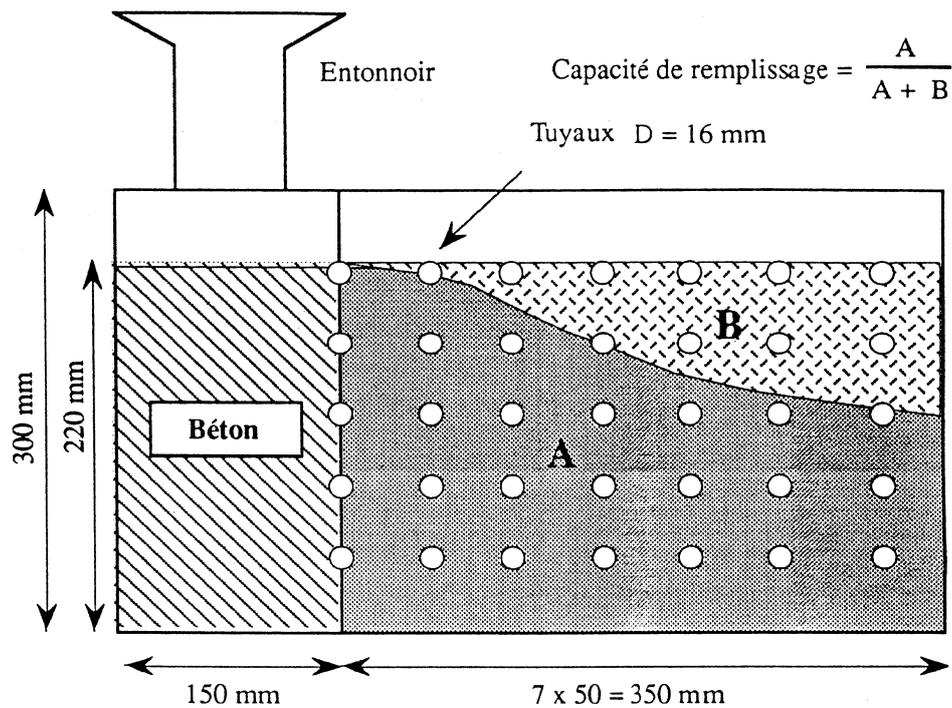


Figure I- 12 : Essai du caisson, d'après YURUGI et al (1993).

#### 2.7.4.3. Essai de stabilité au tamis :

La qualification des bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation est visé par cet essai, qui est d'une simplicité lui permettant d'être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

Il consiste à verser 10 litres de béton juste après le malaxage dans un sceau couvert pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5mm d'ouverture un poids de béton égal à 5 kg, avec une hauteur de chute du béton de 50 cm ; après 2 minutes on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de nous situer vis-à-vis des risques de ségrégation et du ressuage.

### I- 2.7.5. SÉGRÉGATION STATIQUE :

L'évaluation de la capacité du béton à rester homogène une fois mis dans les coffrages est très importante, c'est à dire la résistance à la ségrégation statique des granulats qui ont une répartition hétérogène.

Les caractéristiques du béton telles que : la résistance mécanique, le retrait et la qualité du parement peuvent être réduites d'une façon remarquable dans un béton autoplaçant possédant une bonne résistance à la ségrégation.

#### 2.6.5.1. Essai à la bille :

Une bille simulant un granulat de 20 mm de diamètre ou l'on mesure son enfoncement dans un cylindre de béton (16 x 32). Cette bille est reliée au balancier par une tige rigide et sa densité est ajustée par un contre poids.

Initialement, la bille est enfoncée de sa hauteur dans le béton puis elle est lâchée, plus le temps nécessaire à l'enfoncement de la bille dans le béton est faible, plus le matériau est sujet à la ségrégation.

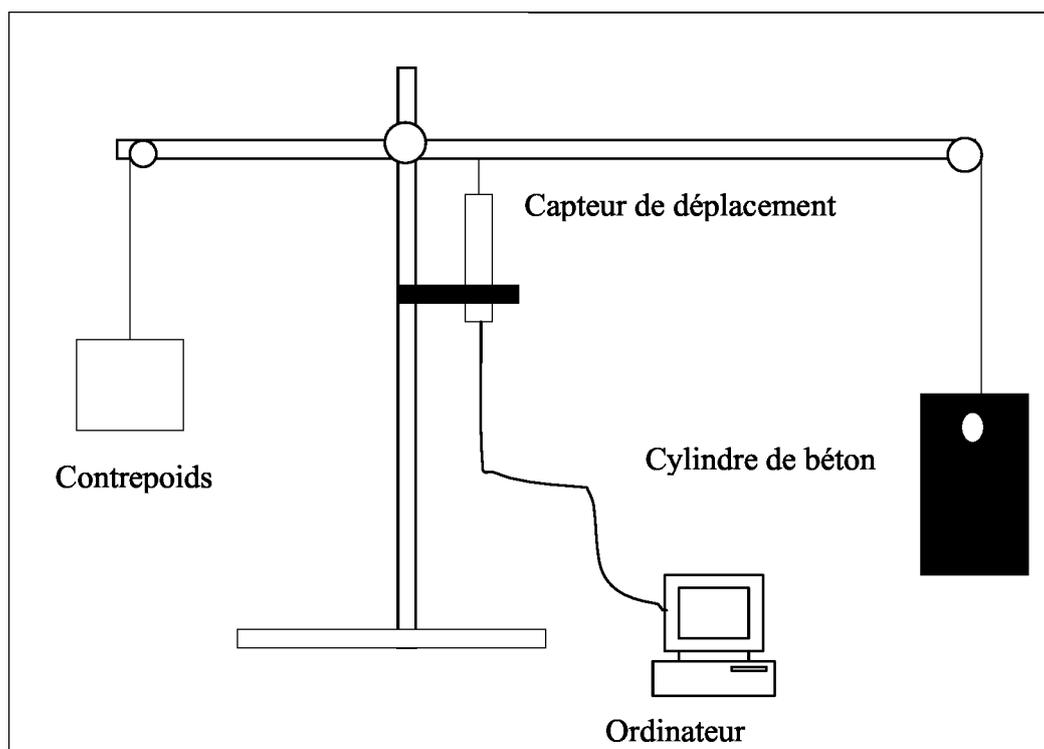


Figure I- 13 : Essai à la bille.

## **I- 2.8 OPTIMISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS :**

Les performances d'un béton sont optimisées en réduisant le dosage en eau en veillant à garder une maniabilité suffisante à l'état frais pour une mise en place facile.

Cette réduction nous amène à de bonnes caractéristiques mécaniques, un retrait et un fluage plus faible et une durabilité accrue.

La confection d'un béton autoplaçant nécessite l'emploi des adjuvants chimiques (superplastifiants hauts réducteurs d'eau, agents de viscosité...etc) et des ajouts de type minéral (fumée de silice, laitier des hauts fourneaux, cendres volantes et le filler calcaire). La diversité des matériaux cimentaires caractérise ce type de béton par rapport au béton ordinaire. La déformabilité de la matrice pour les bétons autoplaçants est facilitée en utilisant des proportions bien précises de gros granulats.

L'influence des différents adjuvants chimiques et ajouts minéraux ainsi que les dosages en gros granulats, ont fait l'objet de plusieurs recherches pour voir leur apport sur les propriétés des bétons fluides à l'état frais et durci. Dans ce qui suit nous allons mettre en relief, les résultats de quelques travaux relatifs à l'optimisation et l'amélioration de formulation des bétons autoplaçants du point de vue teneur en granulats, en ajouts chimiques et minéraux. Ces recherches avaient pour objectifs majeurs l'amélioration de la rhéologie, des performances mécaniques des bétons fluides et leur durabilité.

### **2.8.1. OPTIMISATION DE LA TENEUR EN GROS GRANULATS :**

Des études ont été lancées dans le but de déterminer la taille et les quantités optimales des gros granulats, susceptibles de conférer au béton un maximum d'ouvrabilité et l'impact de cette optimisation sur les propriétés des bétons durcis.

Pour YURUGI et Coll. (1989) [11], le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage. Plus la teneur en gros granulats augmente, plus il y a réduction de la capacité de remplissage.

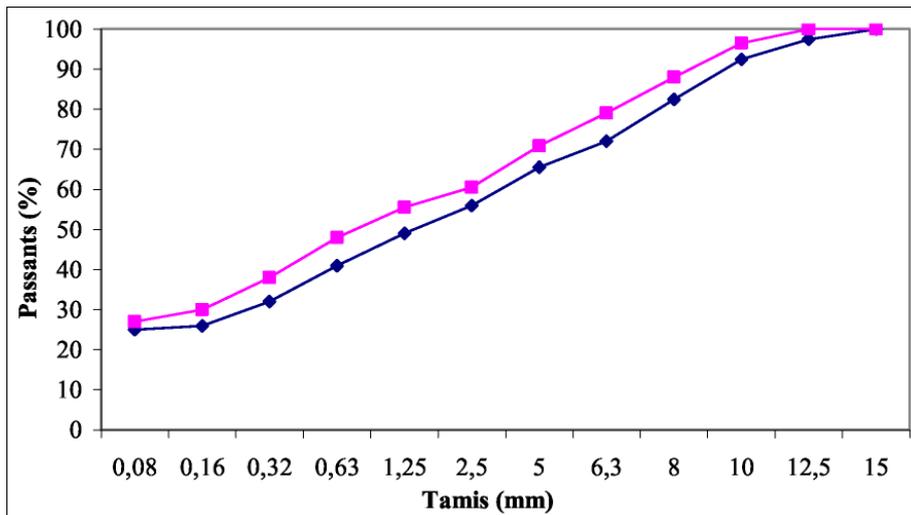
Ces chercheurs se sont basés sur le critère principal, qu'un béton autoplaçant doit avoir un diamètre d'étalement compris entre 600 et 700 mm et une capacité de remplissage dépassant 60 %. Ils ont adopté des formulations de béton autoplaçant contenant 30 à 40% du filler calcaire, un agent colloïdal à base de naphthalène, des granulats concassés ayant un diamètre maximum de 20 mm et un rapport E/L = 0.3.

Les résultats obtenus, indiquent que pour une proportion volumique de gros granulat par m<sup>3</sup> variant de 31% à 34%, on recommande un rapport volumique sable sur pâte (S/P) de 65% pour obtenir un béton fluide dont l'étalement varie entre 600 et 700 mm. Pour une proportion inférieure à 33%, il est préférable de prendre un rapport S/P voisinant 75%.

OKAMURA et Coll. (1994) [12] attirent l'attention sur le premier point dont on tient compte lors de la formulation d'un béton autoplaçant est la limitation de la teneur en gros granulats, car un faible dosage en gros granulats assure au béton frais une haute résistance à la ségrégation. Ils rapportent que les collisions et les frictions, entre les gros granulats augmentent près des obstacles et l'énergie requise pour l'écoulement est consommée par les contraintes internes ce qui engendre le blocage. Ils ont réussi à montrer que l'hypothèse de blocage est maîtrisée pour des volumes de gros granulats inférieurs à 50% du volume des solides.

KHAYAT et Coll. (1994) [2] ont optimisé les quantités en gros granulats et en sable susceptibles d'améliorer la fluidité des bétons contenant un agent colloïdal et un superplastifiant. La quantité des granulats était de l'ordre de 300l/m<sup>3</sup> répartie en une teneur de 70% de granulats de diamètre 14 mm et 30% de diamètre maximal 20 mm en donnant un rapport volumique sable/pâte de 0.6.

Christophe CHUCHE du MBT (Master Building of Technology) [13] a procédé à la formulation de bétons autoplaçants caractérisés par une fluidité de 640 mm d'étalement, le rapport E/L varie de 0.34 à 0.50, le rapport volumique G/S compris entre 0.7 à 1.05 et dont le volume de granulats de la fraction 3/8 estimé à 65% du volume des gros granulats. Ces bétons contiennent une teneur importante de liants de l'ordre 500 kg/m<sup>3</sup> et un superplastifiant à base de polymère carboxylate dont le dosage varie entre 1.1 à 2.4 % de la masse du liant.



**Figure I- 14 : Courbe de référence d'un béton autoplaçant, d'après MBT France.**

### I- 2.8.2. OPTIMISATION DES TENEURS EN AJOUTS MINÉRAUX :

L'introduction des ajouts minéraux est bénéfique sur le plan rhéologique, car d'une part, ils réagissent moins à court terme que le ciment permettant le prolongement d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes améliore la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton. Cela favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton et le grand volume de liant utilisé en substitution du ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait de béton.

NETOO et Coll. (1990) [2], rapportent que le filler calcaire pur et finement broyé réduit la quantité d'eau pour une maniabilité donnée.

KHAYAT et GUIZANI (1994) [14] montrent qu'une matière pouzzolanique telle que la cendre volante (particules sphériques et lisses) donne une amélioration à la déformabilité du béton, le laitier (particules vitreuses) améliore la maniabilité et la fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit considérablement la ségrégation et le ressuage.

MURA et Coll. (1994) [15], ont procédé à des formulations de béton autoplaçant en analysant la teneur en ajout et en eau sur la maniabilité du béton. Ces deux chercheurs ont confirmé l'importance de substitution du ciment par ces ajouts minéraux pour une bonne

ouvrabilité et déformabilité du béton, ils ont utilisé à titre d'exemple des hautes teneurs en laitier (50 %) ou des cendres volantes (30 %) pour améliorer la fluidité des bétons contenant  $140\text{l/m}^3$  de liant et  $160\text{l/m}^3$  d'eau et un rapport volumique S/P de l'ordre 51.5% en maintenant un dosage en superplastifiant à 2.1% de la masse du liant.

OZAWA et Coll. (1995) [2] ont formulé des compositions de bétons fluides dont l'étalement était de  $650 \pm 30\text{mm}$  qui présentaient des faibles pertes d'étalement au cours du temps. Ces bétons de rapport E/C =  $0.55 \pm 0.05$  contiennent du filler calcaire, un volume de pâte supérieur à  $300\text{l/m}^3$ , des granulats concassés de diamètre maximal 20 mm, en adoptant un dosage en superplastifiant de  $8\text{kg/m}^3$  et  $3\text{kg/m}^3$  d'agent de viscosité à base de polyacrylate. Les résultats ont donné une meilleure fluidité et de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage. Ces mêmes bétons ont été soumis à l'étude vis-à-vis du retrait sous conditions de laboratoire qui ont présenté une réduction très significative du retrait (inférieur à  $400\text{ }\mu\text{m/m}$ ) et moins de fissurations aux surfaces.

MITSUTAKA et Coll. (1993) [2], ont montré que certains BAP dont la fluidité est de 650 mm et dont le liant est un mélange composé essentiellement de ciment portland (200 à  $300\text{kg/m}^3$ ) du laitier (100 à  $200\text{kg/m}^3$ ) et (50 à  $100\text{kg/m}^3$ ) de cendres volantes.

La résistance est très élevée due aux rapports E/C relativement bas (0.35 et 0.40), cette résistance à la compression à jeune âge est faible pour des teneurs de remplacement en matières pouzzolaniques ( $200\text{kg/m}^3$  de laitier et  $100\text{kg/m}^3$  de cendre volante) dont la réaction est lente, alors que des mélanges présentant  $350\text{kg/m}^3$  de ciment ont atteint des résistances plus élevées.

AWAD et Coll. (1995) [16] ont mis au point des BAP d'étalement 650 mm avec un rapport E/L variant de 0.22 à 0.37 et qui ont présenté une résistance à la compression jusqu'à 25 Mpa à 24 heures et 90 Mpa à 28 jours. Ils ont opté pour des dosages comme la fumée de silice de (10 à  $45\text{kg/m}^3$ ), la cendre volante (44 à  $121\text{kg/m}^3$ ) et du laitier (48 à  $157\text{kg/m}^3$ ), l'utilisation de superplastifiant à base de naphthalène variant de 1.07 à 1.43 de la masse du liant et des granulats concassés de diamètre 10 et 20 mm

**I- 2.8.3. OPTIMISATION DES TENEURS EN AJOUTS CHIMIQUES :**

L'amélioration de la déformabilité et la stabilité des BAP est aussi assurée par l'emploi des superplastifiants et des agents colloïdaux. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau permettant aux grains de ciment d'acquies des charges identiques et la création d'un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ce qui engendre la libération d'une partie de l'eau piégée par les grains de ciment floculés et réduit les frictions inter granulaires, pour une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

Les agents colloïdaux augmentent la viscosité du mélange et diminuent la ségrégation et le ressuage, on ne peut les introduire sans superplastifiant parce qu'ils augmentent la demande en eau. Ces agents assurent l'uniformité du béton au cours de sa déformabilité en évitant l'accroissement local des contraintes du au rapprochement des gros granulats.

KASAI et Coll (1991) [17], ont montré qu'au niveau de la stabilité, les bétons renfermant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Ils ont développé des BAP d'étalement de 500 à 600 mm, de rapport E/C de 0.60 et en substituant 30 % de la masse du ciment par du laitier avec des dosages appropriés en superplastifiant et agent de viscosité. Par un moyen de mesure non décrit, ils ont enregistré un ressuage d'environ  $0.3\text{ml}/\text{cm}^2$  qui est inférieur à la spécification de la norme JASSS ( $0.5\text{ml}/\text{cm}^2$ ).

KHAYAT et GUIANI (1996) [2], ont indiqué que la stabilité du béton s'accroît en augmentant la teneur en agent colloïdal, ce qui donne une réduction du taux de ressuage externe et du tassement de béton à l'état frais.

YURUGI et Coll (1989) [11] rapportent qu'une étude faite sur un mortier avec différents dosages variant de 0 à 0.05 % du volume d'eau en agent de viscosité à base de glucose et de superplastifiant dosé entre 1.2 à 3% de la masse du liant, révèle que le ressuage était nul quand on dépasse 0.03% du dosage en agent colloïdal, on note que les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées.

**CONCLUSION :**

Dans le cas du béton autoplaçant, la vibration est supprimée après la mise en place du béton dans le coffrage. Cet avantage assure la productivité, fait croître la durabilité et améliore la situation sur le chantier en exécutant le bétonnage dans des conditions spécifiques.

Les caractéristiques singulières d'un BAP par rapport au béton ordinaire sont une grande fluidité du mélange, la résistance à la ségrégation et la capacité de remplissage de tout l'espace entre les armatures.

La déformation et la résistance à la ségrégation sont en fonction des composants de béton tandis que l'aptitude à combler totalement l'armature, dépend de la forme du coffrage, de la teneur et de la densité du ferrailage, ce qui convient de tenir compte de la disposition de la barre et le contrôle du volume ainsi que la taille maximale des granulats.

Tout cela est atteint lorsqu'on procède à une optimisation adéquate composée essentiellement d'une quantité suffisante en liant, d'une composition spécifique de granulats avec l'ajout d'un superplastifiant approprié.

En plus d'une formulation adéquate, une attention particulière doit être accordée à la mise en œuvre du béton frais et à la technique du coffrage.

L'introduction d'un superplastifiant donne une fluidité élevée qui peut occasionner une ségrégation lorsque cette fluidité est extrême.

On va remédier à ce phénomène, en ajoutant un agent de contrôle de la viscosité qui est à base de cellulose méthylique, ou par l'ajout de teneurs suffisantes de matériaux minéraux comme la fumée de silice, le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes.

L'emploi exagéré d'agents colloïdaux ou des poudres minérales risque de réduire la fluidité, ce qui nous conduit à la détermination d'un équilibre optimal entre la fluidité et la ségrégation après des essais préliminaires.

**CHAPITRE II**  
**METHODES DE**  
**FORMULATIONS**

## 2. METHODES DE FORMULATION :

Il existe plusieurs méthodes de formulation des BAP parmi ces méthodes :

- Approche du LCPC
- Approche japonaise
- L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

### 2.1. APPROCHE DU LCPC :

T.SEDRAN et F.LARRARD ont réussi à mettre au point un modèle mathématique développé d'un modèle de suspension solide, il est basé sur les interactions granulaires entre les différents composants du mélange. Ce modèle peut prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision qui est inférieure à 1% en se basant sur :

- ◆ Les proportions du mélange ;
- ◆ La compacité propre ;
- ◆ La densité apparente ;
- ◆ Les distributions granulaires.

L'effet de confinement exercé par les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton, est pris en compte par ce modèle. Le succès de l'utilisation de ce modèle peut prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons à hautes performances et des bétons compactés au rouleau en fonction de leur composition. [18]

L'intérêt particulier de ce modèle mathématique est :

- La compréhension et l'évaluation de l'influence des composants sur les propriétés des bétons ;
- Le bon choix des matériaux pour les propriétés des bétons frais telles que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou l'état durci à savoir la résistance à la compression, la traction et le retrait.
- La nature et le caractère spécifique d'un projet sont pris en compte lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone d'armatures très denses).

Cette approche adopte la procédure ci-après pour la détermination des divers constituants :

- 1) La proportion du liant est fixée à priori (70 % de liant et 30 % de filler). Les fillers seront choisis selon la disponibilité des matériaux locaux.
- 2) La détermination du dosage de saturation en superplastifiant.
- 3) Détermination du dosage en eau en présence du superplastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme du modèle.
- 4) Un logiciel spécial va effectuer les calculs en tenant compte du confinement, la viscosité est fixée arbitrairement à  $5.10^4$  Pas qui est une valeur correspondant aux bétons autoplaçants selon l'expérience du LCPC. En conséquence, la quantité d'eau est réduite et la proportion du liant reste constante, tout en optimisant les proportions granulats / pâte liante.
- 5) On ajuste le dosage en ajout chimique pour l'obtention de l'étalement ciblé, ce qui donne un béton répondant aux critères rhéologiques.

Malgré les programmes de travaux intenses réalisés au LCPC, la nécessité de l'étendue des modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique est encore exigée.

Par ailleurs, les formulations proposées devront être sujettes à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation.

### 2.3. L'APPROCHE JAPONAISE :

La formulation des bétons autoplaçants est faite selon la méthode :

- Les gravillons présentent une teneur fixée à 50 % du volume solide, ces auteurs [19] rapportent que ce pourcentage assure la prévention du risque de blocage à condition que la formulation du mortier soit correcte.
- La bonne maniabilité est assurée, lorsqu'on fixe le volume du sable à 40 % du volume total du mortier. La caractérisation de ces mortiers est faite par deux essais :
  - Un essai d'écoulement à l'entonnoir.
  - Un essai d'étalement au cône.

Les auteurs en tirent deux grandeurs :

1. L'étalement relatif : 
$$\Gamma_m = \frac{r_1 r_2 - r_0^2}{r_0^2}$$

2. La vitesse relative d'écoulement : 
$$R_m = 10/t$$

$r_1$  et  $r_2$  : les diamètres d'étalement selon deux médianes

$r_0$  : le diamètre inférieur du cône.

$t$  : temps d'écoulement à l'entonnoir en secondes

$r_m$  : représente la fluidité (plus  $r_m$  est grand, plus le mortier est grand)

$R_m$  : représente la viscosité du mortier (plus  $R_m$  est faible, plus la viscosité est élevée). [19]  
L'expérience des auteurs, révèle deux valeurs simultanées à savoir :  $R_m=1$   $r_m=5$  pour aboutir à un béton autoplaçant acceptable.

### 2.3.1. EXEMPLES DE FORMULATIONS :

Des formulations de BAP avec différents ajouts minéraux et ajouts chimiques sont présentés dans les tableaux suivants :

	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5
<b>Ciment (C)</b>	155	331	155	270	350
<b>Eau (E)</b>	160	175	159	196	170
<b>Filler calcaire (F)</b>	/	216	/	/	/
<b>Sable (S) 0/5</b>	/	710	760	/	828
<b>Gravillon (G) 5/16</b>	/	875	874	/	877
<b>Superplastifiant (L)</b>	1.7	2.6	1.2	2.7	1.1
<b>Agent de viscosité (L)</b>	1	0.5	0.012	/	/
<b>Entraîneur d'air (L)</b>	/	/	/	0.05	/
<b>Liant (L)</b>	500	547	528	690	440
<b>G/S</b>	/	1.23	1.15	1.1	
<b>E/L</b>	0.32	0.32	0.30	0.41	0.39
<b>Étalement au cône d'Abrams (mm)</b>	680	600	570	700	600
<b>Air occlus (%)</b>	4.2	4	2	5.4	/

Tableau 2-1 : Différentes formulations de BAP. [7]

Liant = C + F + LHF + CV + autres additions en poudre.

Les dosages sont exprimés en (kg/m<sup>3</sup>), à l'exception pour les adjuvants.

	BÉTON AUTOPLAÇANT				BÉTON ORDINAIRE			
	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BT1	BT2	BT3	BT4
Ciment (C)	500	400	340	260	389	360	285	250
Eau (E)	133	153	170	207	126	137	142	200
Filler calcaire (F)	50	145	165	185	106	68	33	/
Sable 0/8 mm	880	790	840	1000	694	780	860	1000
Gravillon quartzite 8/11 mm (G)	600	305	285	395	135	270	330	300
Gravillon quartzite 11/16 mm (G)	800	620	525	270	660	560	420	600
Superplastifiant avec agent de viscosité	5	2	1.2	1	/	/	/	/
Superplastifiant sans agent de viscosité	/	/	/	7	3.6	2.6	.93	/
Réducteur d'eau	/	/	/	/	1.7	0.9	1.1	/
Entraîneur d'air	/	/	0.024	/	0.05	0.045	0.027	/
Liant (L)*	600	545	505	445	495	428	318	250
G/S	0.98	1.17	0.96	0.67	1.15	1.06	0.87	0.9
E/L	0.22	0.28	0.34	0.47	0.25	0.32	0.45	0.8
Air occlus	1.3	1.4	3.5	1.9	12	12	13	1.2

**Tableau 2- 2 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON. [18]**

$$(L)^* = C + FS + F$$

CONSTITUANTS	FORMULATIONS (kg/m <sup>3</sup> )			
	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
Ciment CPA 52.5	350	452	372	430
Sable 0/5	860	544	891	750
Gravillon 5/12	790	290	306	860
Gravillon 12/20	/	554	585	
Filler calcaire	140	/	/	/
Superplastifiant	8	10	16	10
Eau totale	200	180	169	175
f <sub>c28</sub> (MPa)	37	57.3	64.8	65

**Tableau 2.3 : Exemple de formulation des BAP**

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

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

### 2.4.1 Caractéristiques du béton de base

#### Les caractéristiques du béton :

La méthode MBE débute nécessite une parfaite connaissance des caractéristiques du béton qui sont liées à sa destination et qui sont en général connues quand on part d'un béton existant. Il est donc nécessaire pour établir les grandes lignes de la formule béton, de connaître les points suivants :

- béton,
- catégorie du béton,
- classe de consistance...
  - ses constituants
- ciment,
- adjuvants,
- sable, gravillons,
- eau de gâchage,
- additions...
  - sa mise en œuvre :
    - températures du béton frais et extérieur,
    - conditions de coulage et de serrage,
    - durée et conditions de transport.

Une fois ce béton défini (cahier des charges établi), on calcule le mortier équivalent correspondant "MBE" selon la méthode d'essai

### 2.4.2 PRINCIPE DE LA METHODE

Pour contourner la difficulté à reproduire en laboratoire les conditions exactes du malaxage du béton en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons retirés. Pour cette raison, la méthode a été appelée méthode du Mortier de béton équivalent ou méthode MBE.

Pour utiliser cette méthode, il convient de connaître au préalable les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivants :

- la granulométrie de chaque classe de granulats,
- leurs masses volumiques,
- leurs taux d'absorption d'eau,
- leurs teneurs en eau totales,
- la nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent),
- les caractéristiques des adjuvants
- la composition granulaire du mélange,
- le ou les rapports Eau efficace - Liant (ciment ou liant équivalent) fixés par le chantier (norme XPP 18-305).

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variations de températures, conditions de coulage,...).

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux qui le seront sur le béton correspondant. Ainsi aux essais d'affaissement au cône d'Abrams et d'étalement du béton correspondront les essais d'affaissement et d'étalement au mini-cône du mortier MBE. Les corrélations établies sont généralement bonnes dans les domaines d'emplois respectifs de chaque essai.

### 2.4.2.1 CALCUL DES SURFACES DÉVELOPPÉES PAR LES GRANULATS

La première partie de la transformation consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour ce faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes :

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

Au niveau des granulats il convient de considérer les différents cas pouvant se présenter :

- **Cas 1** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à 0,05 kg/dm<sup>3</sup>)
- **Cas 2** - Les différents gravillons présentent des masses volumiques différentes (écart supérieur à 0,05 kg/dm<sup>3</sup>).
- **Cas 3** - Le cas des sables.

#### A) CAS DES GRAVILLONS DE MASSES VOLUMIQUES VOISINES

Dans ce cas, il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Dans ce contexte, le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

- 1/ Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton.
- 2/ Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange.
- 3/ Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- 4/ Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 5/ Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 6/ Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 7/ Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange.
- 8/ Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.
- 9/ Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 10/ Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 11/ Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons.

### 2.4.2.2 Calcul De La Granulométrie Du Mélange Des Gravillons Du Béton

Si on considère par exemple deux gravillons G3 et G4, qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 2-4 - Caractéristiques des gravillons du béton			
gravillon	dosage dans le béton	masse volumique	refus au tamis ti
G <sub>3</sub>	g <sub>3</sub>	μ <sub>3</sub>	Ri <sub>3</sub>
G <sub>4</sub>	g <sub>4</sub>	μ <sub>4</sub>	Ri <sub>4</sub>

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

$$r_i = (g_3 \cdot r_{i3} + g_4 \cdot r_{i4}) / (g_3 + g_4) \quad [1]$$

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

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \quad [2]$$

### 2.4.2.3 Définition Des Tranches Granulaires Successives Dans Ce Mélange

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [TM<sub>i</sub>] et par un tamis inférieur [Tm<sub>i</sub>]. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement RM<sub>i</sub> et Rm<sub>i</sub> (*exprimé en %, par exemple 15 %*).

Les tamis à considérer sont les suivants :

20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

### 2.4.2.4 Calcul De La Masse De Chaque Tranche Granulaire

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

$$M_i = (R_{m_i} - R_{M_i}) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad [3]$$

#### 2.4.2.5 Calcul Du Diamètre De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche

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

$$d_i = ( TM_i + Tm_i ) / 2 \quad [4]$$

Les valeurs des diamètres des particules moyennes sont données en abaque pour chaque tranche granulaire.

#### 2.4.2.6 Calcul Du Volume De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche

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

$$v_i = ( \pi \cdot d_i^3 ) / 6 \quad [5]$$

Les valeurs des volumes pour chaque type de particules moyennes sont également données en abaque pour chaque tranche granulaire.

#### 2.4.2.7 Calcul De La Surface Développée De La Particule Moyenne Dans Chaque Tranche

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

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad [6]$$

Les valeurs des surfaces développées pour chaque type de particules moyennes sont également données pour chaque tranche granulaire

#### 2.4.2.8 Calcul Du Volume Massique De La Matrice Du Gravillon Du Mélange

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

$$\omega = 1 / \mu_g \quad [7]$$

### 2.4.2.9 Calcul Du Volume Total De L'ensemble Des Particules Dans Chaque Tranche Granulaire

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon ; ces paramètres ont été définis aux paragraphes précédents.

### 2.4.2.10 - Calcul Du Nombre De Particules Moyennes Dans Chaque Tranche Granulaire

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne ; ces paramètres  $v_i$  et  $V_i$  ont été définis

$$N_i = V_i / v_i \quad [9]$$

### 2.4.2.11 Calcul De La Surface Développée Par Les Particules Moyennes Dans Chaque Tranche Granulaire

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

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad [10]$$

### 2.4.2.12 Calcul De La Somme De L'ensemble Des Surfaces Calculées Pour Chaque Tranche Granulaire Du Mélange De Gravillon

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

$$SD = \sum_i S_i \quad [11]$$

## B) CAS DES GRAVILLONS DE MASSES VOLUMIQUES DIFFÉRENTES

Dans ce cas, le calcul doit être effectué séparément pour chaque gravillon et dans ce contexte le calcul de la surface développée par chaque classe de gravillons du béton est organisé chronologiquement comme suit :

- 1/ Définition des tranches granulaires successives du gravillon considéré.
- 2/ Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- 3/ Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 4/ Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 5/ Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.
- 6/ Calcul du volume massique de la matrice du gravillon.
- 7/ Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.
- 8/ Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 9/ Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- 10/ Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du gravillon.

Ces calculs sont effectués sur les mêmes bases que celles décrites au paragraphe 1. Des modèles de calcul sont décrits en pièce. La somme des surfaces développées par toutes les classes de gravillons donne le résultat attendu.

## C) CAS DES SABLES DU BÉTON

Il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton et qui sera utilisé dans le mortier MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

### 2.4.3 CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER DE BÉTON ÉQUIVALENT

#### 2.4.3.1 MÉTHODE DE CALCUL

La correction granulaire du mortier MBE est généralement réalisée à partir des sables du béton. il convient donc d'adopter la démarche suivante :

- 1/ calculer les surfaces développées ( $S_{ds_i}$ ) par chaque sable ( $S_i$ ) du béton comme indiqué précédemment ;
- 2/ déterminer les taux de correction par chaque sable selon la méthode décrite ci-dessous.

Si la composition du béton de départ est caractérisée par les éléments suivants :

Tableau 2 -5 - Composition du béton et caractéristiques physiques				
Constituants	Composition kg/m <sup>3</sup>	Masse volumique kg/dm <sup>3</sup>	Absorption d'eau %	Extrait sec %
Ciment C	C	μc		
Sable S1	s1	μ1	Abs1	
Sable S2	s2	μ2	Abs2	
Gravillon G3	g3	μ3	Abg3	
Gravillon G4	g4	μ4	Abg4	
Eau efficace	Eff	1		
Adjuvant A1	a1	μa1		xta1
Adjuvant A2	a2	μa2		xta2

La composition du mortier de béton équivalent sera définie comme suit

Tableau2-6- Composition du MBE corrigé par les sables du béton				
Constituants	Composition kg/m <sup>3</sup>	Masse volumique kg/dm <sup>3</sup>	Absorption d'eau %	Extrait sec %
Ciment C	C	μc		
Sable S1	s'1	μ1	Abs1	
Sable S2	s'2	μ2	Abs2	
Adjuvant A1	a1	μa1		xta1
Adjuvant A2	a2	μa2		xta2

Où les quantités s'1 et s'2 sont calculées de façon à assurer le postulat d'équivalence entre les surfaces développées respectivement par les sables S1 et S2 du MBE d'une part et par tous les granulats du béton (S1, S2, G3,G4) d'autre part. Ce postulat peut encore s'écrire plus simplement au niveau des surfaces développées (SD) :

$$SD (s'1 - s1 + s'2 - s2) = SD (g3 + g4)$$

Les quantités s'1 et s'2 peuvent être alors déduites comme suit :

$$SDs'1 + SDs'2 = SDs1 + SDs2 + SDg3 + SDg4$$

en outre 
$$\frac{s'1}{s'2} = \frac{s1}{s2}$$

soit 
$$\frac{SDs'1}{SDs'2} = \frac{SDs1}{SDs2}$$

$$\text{donc } SDs'1 = \frac{SDs1}{SDs2} \times (SDs1 + SDs2 + SDg3 + SDg4 - SDs'1)$$

ou encore

$$SDs'1 \times \left(1 + \frac{SDs1}{SDs2}\right) = \frac{SDs1}{SDs2} \times (SDs1 + SDs2 + SDg3 + SDg4)$$

$$SDs'1 = \frac{SDs1}{SDs2} \times \frac{(SDs1 + SDs2 + SDg3 + SDg4)}{1 + \frac{SDs1}{SDs2}}$$

$$\text{et } s'1 = \frac{SDs'1 \times s1}{SDs1}$$

s'2 pouvant être calculé de la même façon.

#### 2.4.4 - BILAN DES COMPOSITIONS DU MORTIER MBE

Tableau 2-7 - Composition du MBE suivant le type de correction					
Constituants possibles mortier	du mortier	Composition de la phase mortier du béton	Composition du MBE		
			corrigé par sable standard	corrigé par les sables du béton	non corrigé
Ciment C		C	c	C	c
Sable S1		s1	s1	s'1	s1
Sable S2		s2	s2	s'2	s2
Sable correcteur Sc			sc		

#### 2.4.5 ESSAIS RÉALISABLES SUR MORTIER DE BÉTON ÉQUIVALENT

Les essais rhéologiques réalisables sur mortier MBE sont :

- affaissement au mini-cône,
- étalement au mini-cône .

## 2.4.6 MATÉRIELS D'ESSAIS

Outre les matériels servant à la confection des mortiers, le matériel d'essai permettant d'effectuer les mesures d'affaissement et d'étalement des mortiers aux échéances retenues est le suivant :

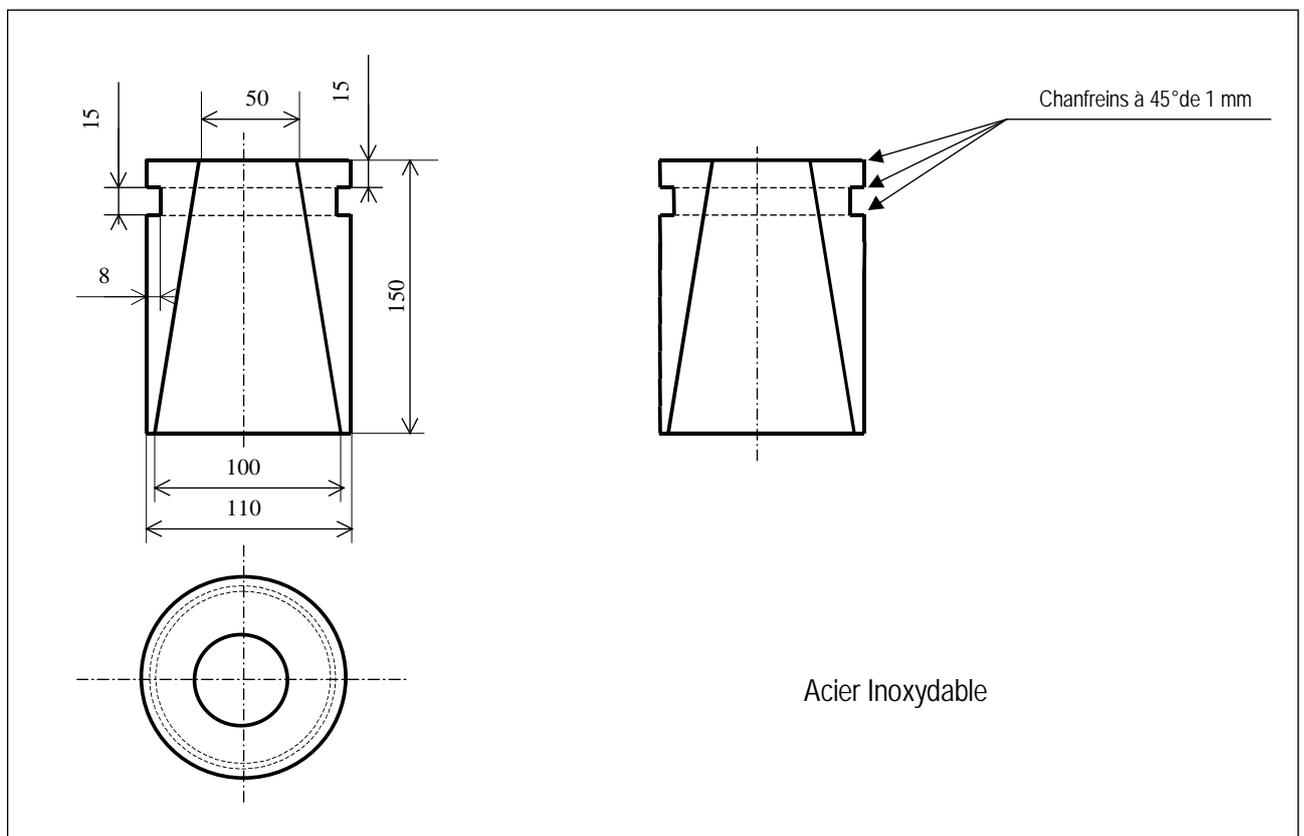
-un moule tronconique indéformable en acier inoxydable. Ce moule doit être suffisamment lourd pour ne pas se soulever lorsqu'il est rempli d'un mortier fluide. Les dimensions de ce moule sont les suivantes :

- diamètre du cercle de l'ouverture supérieure :  $50 \pm 0,5$  mm
- diamètre du cercle de l'ouverture inférieure :  $100 \pm 0,5$  mm
- hauteur :  $150 \pm 1$  mm

- une plaque de travail non absorbante, non réactive aux liants, lisse et sans aspérité de 450 mm de côté. Cette plaque est munie d'une nivelle hémisphérique pour le réglage de l'horizontalité. Elle peut comporter une potence munie d'un réglelet permettant de mesurer l'affaissement du mortier.

- L'étalement du mortier peut être mesuré à l'aide d'un réglelet de 500 mm gradué en mm ou d'un pied à coulisse de 500 mm de course.

- Le mortier est mis en place dans le cône à l'aide d'une tige de piquage si nécessaire; Cette tige de piquage est définie dans la norme NF P 18-452 de mai 1988 relative à la mesure du temps d'écoulement des bétons et mortiers aux maniabilimètres. L'excès de mortier est retiré à l'aide d'une règle à araser.



**Figure2- 4. Exemple de matériel pour mesures d'affaissement et d'étalement au cône MBE**

Notons que pour notre cas un moule similaire à été fabriqué en acier.

---

## 2.4.7 ESSAIS D'ÉVALUATION DU COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE

### 2.4.7.1 Essais d'affaissement au mini-cône

Utiliser un mini-cône dont la paroi intérieure est propre et légèrement humidifié. La surface d'étalement sur la plaque de base doit également être propre et légèrement humidifié (sans qu'il ne subsiste de l'eau résiduelle sur la plaque).

Pendant le remplissage, le moule est appuyé fermement sur la plaque de base. Au moyen d'une pelle creuse, introduire le mortier dans le moule en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Pour chacune des couches, piquer 15 fois le mortier (sauf dans le cas de mortier auto-plaçant ou fluide) à l'aide de la tige de piquage métallique, en répartissant les enfoncements sur la surface du mortier et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton. Puis soulever le cône le plus verticalement possible en 2 secondes, avec précaution, lentement et sans secousses.

Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement au centre de la partie supérieure du mortier à l'aide d'un réglet métallique gradué en mm. La valeur mesurée sera arrondie au demi-centimètre près.

### 2.4.7.2 Essais d'étalement au mini-cône

La mesure de l'étalement est effectuée juste après celle de l'affaissement, sur le même échantillon affaissé précédemment. Elle s'effectue à l'aide du matériel défini précédemment selon 3 diamètres pour les mortiers fermes à très plastiques et selon 2 diamètres orthogonaux pour les mortiers fluides à auto-plaçants. La valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs arrondie au centimètre près.

Ces procédures sont valables à toutes les échéances retenues. Pour les suivis rhéologiques dans le temps, remettre après essai un maximum de mortier dans le bol du malaxeur et le couvrir d'un linge humide ou d'un film plastique en attendant l'échéance suivante. Il est important de bien remalaxer 15 secondes à petite vitesse avant chaque nouvel essai.

## MODÈLES DE CALCUL DE SURFACE DEVELOPPÉE PAR UN GRANULAT

## 1.- Modèle de feuille de calcul d'un sable

Opérations	Symboles	Valeurs									
tranches granulaires	<b>Tmin</b>	0	0,08	0,16	0,31	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5
	<b>Tmax</b>	0,08	0,16	0,31	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3
masse de la tranche par kg de sable	<b>Mui</b> (kg)										
volume de la particule moyenne	<b>vi</b> (10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> )	0,00 0034	0,00 0905	0,00 701	0,05 52	0,43 5	3,45	11,8	23,9	47,7	94,4
surface développée de la particule moyenne	<b>si</b> (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> )	0,00 5027	0,04 524	0,17 7	0,70 14	2,77 6	11,0 4	25,0 7	40,1 5	63,6 2	100, 3
volume massique de la matrice du granulat	<b>μi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg)										
volume total des particules moyennes	<b>Vi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )										
nombre de particules moyennes	<b>Ni</b>										
surface développée par les particules moyennes	<b>Si</b> (m <sup>2</sup> )										
surface développée par 1 kg du sable	<b>SD</b> (m <sup>2</sup> )										

## 2.- Exemple de calcul pour un sable

Opérations	Symboles	Valeurs									
tranches granulaires	<b>Tmin</b>	0	0,08	0,16	0,31	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5
	<b>Tmax</b>	0,08	0,16	0,31	0,63	1,25	2,5	3,15	4	5	6,3
masse de la tranche par kg de sable	<b>Mui</b> (kg)	0	0	0	0,68	0,32	0	0	0	0	0
volume de la particule moyenne	<b>vi</b> (10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> )	0,00 0034	0,00 0905	0,00 701	0,05 52	0,43 5	3,45	11,8	23,9	47,7	94,4
surface développée de la particule moyenne	<b>si</b> (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> )	0,00 5027	0,04 524	0,17 7	0,70 14	2,77 6	11,0 4	25,0 7	40,1 5	63,6 2	100, 3
volume massique de la matrice du granulat	<b>μi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg)	0,377									
volume total des particules moyennes	<b>Vi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	-	-	-	0,25 6	0,12 1	-	-	-	-	-
nombre de particules moyennes	<b>Ni</b>	-	-	-	4,64 x 10 <sup>6</sup>	0,27 8 x 10 <sup>6</sup>					
surface développée par les particules moyennes	<b>Si</b> (m <sup>2</sup> )				3,25	0,77					
surface développée par 1 kg du sable	<b>SD</b> (m <sup>2</sup> )	<b>4,02</b>									

## 3.- Modèle de feuille de calcul d'un gravillon propre

Opérations	Symbol es	Valeurs									
tranches granulaires	<b>Tmin</b> <b>Tmax</b>	3,15 4	4 5	5 6,3	6,3 8	8 10	10 12,5	12,5 16	16 20		
masse de la tranche par kg de gravillon	<b>Mui</b> (kg)										
volume de la particule moyenne	<b>vi</b> (10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> )	23,9	47,7	94,4	191, 4	381, 7	745, 5	151 5	305 4		
surface développée de la particule moyenne	<b>si</b> (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> )	40,1 5	63,6 2	100, 3	160, 6	254, 5	398	638	101 8		
volume massique de la matrice du granulat	<b>µi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg)										
volume total des particules moyennes	<b>Vi</b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )										
nombre de particules moyennes	<b>Ni</b>										
surface développée par les particules moyennes	<b>Si</b> (m <sup>2</sup> )										
surface développée par 1 kg du gravillon	<b>SD</b> (m <sup>2</sup> )										

## 4. Modèle de feuille de calcul d'un gravillon "sale"

Opérations	Symbol es	Valeurs											
		0	0,08	0,16	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20
tranches granulaires	Tmin Tmax	0 0,08	0,08 0,16	0,16 0,31 5	3,15 4	4 5	5 6,3	6,3 8	8 10	10 12,5	12,5 16	16 20	
masse de la tranche par kg de gravillon	<b>M<sub>ui</sub></b> (kg)												
volume de la particule moyenne	<b>v<sub>i</sub></b> (10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> )	0,00 003 4	0,00 090 5	0,00 701	23,9	47,7	94,4	191, 4	381, 7	745, 5	151 5	305 4	
surface développée de la particule moyenne	<b>s<sub>i</sub></b> (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> )	0,00 5027	0,04 524	0,17 7	40,1 5	63,6 2	100, 3	160, 6	254, 5	398	638	1018	
volume massique de la matrice du granulat	<b>μ<sub>i</sub></b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg)												
volume total des particules moyennes	<b>V<sub>i</sub></b> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )												
nombre de particules moyennes	<b>N<sub>i</sub></b>												
surface développée par les particules moyennes	<b>S<sub>i</sub></b> (m <sup>2</sup> )												
surface développée par 1 kg du gravillon	<b>SD</b> (m <sup>2</sup> )												

## 5.- Exemple de calcul pour un gravillon propre

Opérations	Symboles	Valeurs										
tranches granulaires	<b>Tmin</b>	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16			
	<b>Tmax</b>	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20			
masse de la tranche par kg de gravillon	<b>Mui</b> (kg)	0	0	20 $\times 10^{-3}$	10 $\times 10^{-3}$	20 $\times 10^{-3}$	30 $\times 10^{-3}$	370 $\times 10^{-3}$	550 $\times 10^{-3}$			
volume de la particule moyenne	<b>vi</b> ( $10^{-9} \text{ m}^3$ )	23,9	47,7	94,4	191,4	381,7	745,5	1515	3054			
surface développée de la particule moyenne	<b>si</b> ( $10^{-6} \text{ m}^2$ )	40,15	63,62	100,3	160,6	254,5	398	638	1018			
volume massique de la matrice du granulat	<b>μi</b> ( $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	0,377										
volume total des particules moyennes	<b>Vi</b> ( $10^{-3} \text{ m}^3$ )			7,55	3,77	7,55	11,3	140	208			
nombre de particules moyennes	<b>Ni</b>			7,99 $\times 10^4$	1,97 $\times 10^4$	1,98 $\times 10^4$	1,52 $\times 10^4$	9,22 $\times 10^4$	6,80 $\times 10^4$			
surface développée par les particules moyennes	<b>Si</b> ( $\text{m}^2$ )			8,01 $\times 10^{-3}$	3,17 $\times 10^{-3}$	5,03 $\times 10^{-3}$	6,04 $\times 10^{-3}$	58,8 $\times 10^{-3}$	69,2 $\times 10^{-3}$			
surface développée par kg du gravillon	<b>SD</b> ( $\text{m}^2$ )	150,2 $\times 10^{-3}$										

## 6. Exemple de calcul pour un gravillon "sale"

Opérations	Symboles	Valeurs										
tranches granulaires	<b>Tmin</b>	0	0,08	0,16	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16
	<b>Tmax</b>	0,08	0,16	0,315	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20
masse de la tranche par kg de gravillon	<b>Mui</b> (kg)	8 $\times 10^{-3}$	4 $\times 10^{-3}$	8 $\times 10^{-3}$	0	0	0	10 $\times 10^{-3}$	20 $\times 10^{-3}$	30 $\times 10^{-3}$	370 $\times 10^{-3}$	550 $\times 10^{-3}$
volume de la particule moyenne	<b>vi</b> ( $10^{-9} \text{ m}^3$ )	0,000034	0,000905	0,000701	23,9	47,7	94,4	191,4	381,7	745,5	1515	3054
surface développée de la particule moyenne	<b>si</b> ( $10^{-6} \text{ m}^2$ )	0,005027	0,04524	0,177	40,15	63,62	100,3	160,6	254,5	398	638	1018
volume massique de la matrice du granulat	<b>μi</b> ( $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	0,377										
volume total des particules moyennes	<b>Vi</b> ( $10^{-3} \text{ m}^3$ )	3,02	1,51	3,02				3,77	7,55	11,3	140	208
nombre de particules moyennes	<b>Ni</b>	9,01 $\times 10^{10}$	1,67 $\times 10^9$	4,30 $\times 10^8$				1,97 $\times 10^4$	1,98 $\times 10^4$	1,52 $\times 10^4$	9,22 $\times 10^4$	6,80 $\times 10^4$
surface développée par les particules moyennes	<b>Si</b> ( $\text{m}^2$ )	452,8 $\times 10^{-3}$	75,5 $\times 10^{-3}$	76,3 $\times 10^{-3}$				3,17 $\times 10^{-3}$	5,03 $\times 10^{-3}$	6,04 $\times 10^{-3}$	58,8 $\times 10^{-3}$	69,2 $\times 10^{-3}$
surface développée par kg du gravillon	<b>SD</b> ( $\text{m}^2$ )	746,8 $\times 10^{-3}$										

### 2.4.8 Mise en évidence de la corrélation

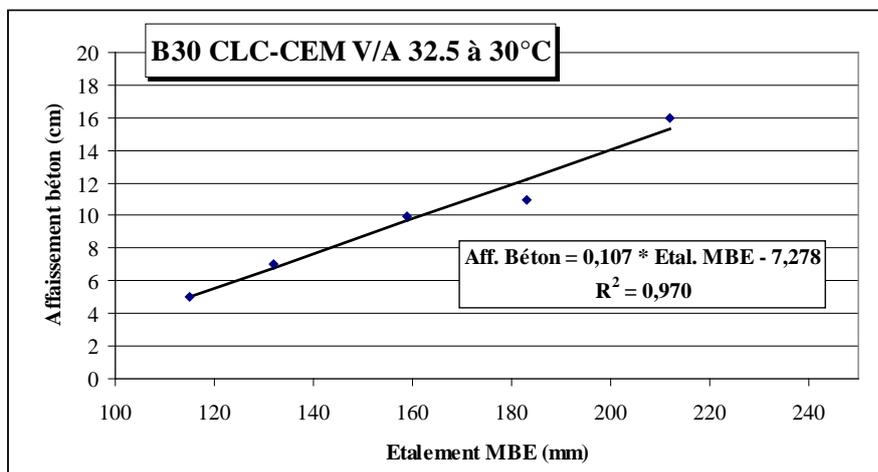
Nous avons étudiés environ 3 bétons industriels choisis dans le champ des bétons à consistance plastique et fluide, dont au moins un fluide ouvrage d'art et un fluide bâtiment [2] – [7]. Les essais ont porté sur des bétons confectionnés en :

- laboratoire à 10°C, 20°C et 30°C
- centrales.

Pour chaque béton, le MBE correspondant a été composé en utilisant le sable du béton comme correcteur granulaire. Environ trente formulations de B25 à B40 ont été testées en utilisant une vingtaine d'adjuvants (plastifiants, superplastifiants, hauts réducteurs d'eau) et différents types de ciment.

Ces essais ont montré qu'une corrélation linéaire pouvait être établie pour toute formule de béton entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône avec une valeur moyenne du coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,912 pour un écart type de 0,078.

La relation entre l'étalement MBE et l'affaissement est représentée dans la plage courante de consistance par une droite. Les essais ont montré que l'équation de cette droite variait d'une composition à l'autre, c'est-à-dire qu'une droite n'est valable que pour un béton et son MBE correspondant.



**Figure 2-5.** Exemple de corrélation étalement MBE/ affaissement béton  
 Sur un béton de laboratoire B30 à 30°C

#### **2.4.9 Domaines d'utilisation**

Une fois l'existence d'une droite de corrélation établie, la dernière phase a consisté à déterminer quelle est la sensibilité de cette droite vis-à-vis de certains paramètres de la formulation.

#### **2.4.10 Influence de l'adjuvantation**

Une corrélation établie à partir d'une formule de référence permet d'évaluer l'efficacité de différents adjuvants d'une même famille (plastifiant réducteur d'eau, superplastifiant ou haut réducteur d'eau) et de déceler une éventuelle incompatibilité (raidissement brutal par exemple). Il est donc possible d'étudier sur MBE l'influence du dosage d'un adjuvant ou de comparer l'efficacité de ces différents adjuvants [9] – [12]. Il est également possible de simuler sur MBE l'incidence du mode d'introduction de l'adjuvant en centrale [12].

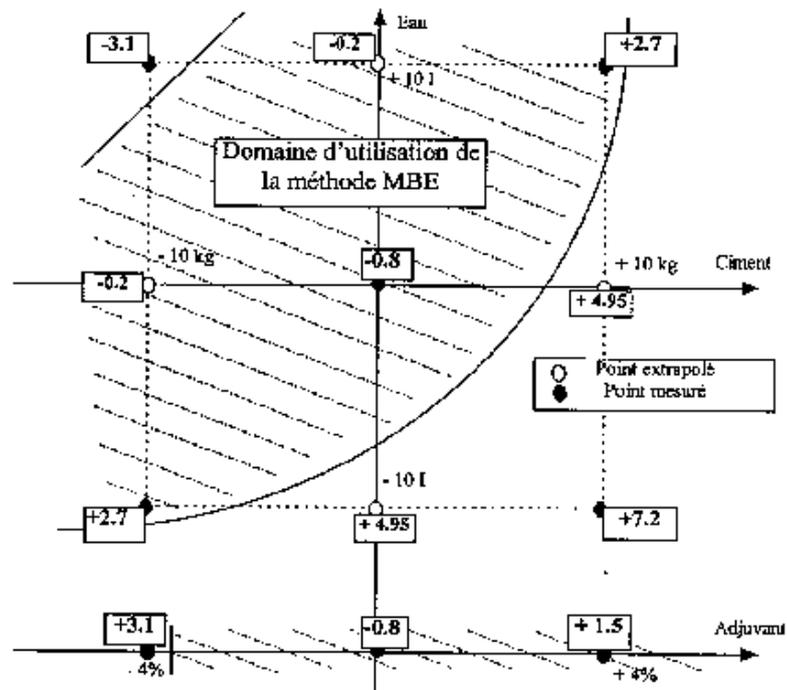
#### **2.4.11. Influence de la température**

Il est possible, à partir d'une droite de corrélation établie en laboratoire à 20°C (béton et MBE à 20°C), d'anticiper le comportement rhéologique de ce béton produit à une température comprise entre 10°C et 30°C par des mesures sur MBE avec un risque d'erreur limité à  $\pm 3$  cm sur l'affaissement béton par exemple [2]-[7].

#### **2.4.12 Les formules dérivées**

Une corrélation établie à partir d'une formule de référence permet d'estimer l'affaissement des bétons des formules dérivées (variation des quantités de ciment, d'eau, de granulats ou d'adjuvants par rapport à la formule de référence) et ainsi évaluer la sensibilité d'une formulation en termes de fabrication [9-10].

Par exemple, sur un béton type ouvrage d'art à 400 kg de ciment par m<sup>3</sup> et un E/C donné, la corrélation reste dans ce cas valable pour des plages de variation de  $\pm 5$  kg de



ciment et  $\pm 5$  l d'eau [10].

Figure 2-6.Exemple de domaines d'utilisation des formules dérivées (ciment, eau, adjuvant)

#### 2.4.13 Limites d'emploi

Bien que la méthode ait été validée dans différents domaines décrits ci avant, il reste des limites pour lesquelles la méthode n'est pas valable ou pour lesquelles des études sont encore à faire :

Dans le cas d'une reformulation d'une composition de béton, il faut établir de nouveau un MBE correspondant, comme par exemple s'il y a changement :

- De nature du ciment, de sable, de gravillon, de famille d'adjuvant ou de tout autre paramètre non encore étudié.
- Pour les bétons dont les affaissements au slump  $\leq 5$  cm et  $\geq 25$  cm. La méthode est toutefois considérée comme optimale entre 10 et 22 cm.
- Dans des températures basses ( $< 10$  °C) et hautes ( $> 30$  °C)
- Dans le cas des bétons spéciaux (avec air entraîné, retardé...)
- Nature minéralogique des granulats et teneurs en fines de gravillons.

Lorsque la nature minéralogique du sable et des gravillons est différente et que ces derniers contiennent une quantité importante d'éléments inférieurs à 5 mm et tout particulièrement des fines, le principe de formulation du MBE n'est plus applicable. En effet, dans le MBE, on remplace les éléments fins des gravillons par une quantité de sable présentant la même surface granulaire. Or, des éléments fins calcaires n'ont pas du tout la même réactivité chimique qu'un sable siliceux. Dans ce cas, le MBE n'est plus représentatif du mortier du béton. Pour cela, lorsque les gravillons contiennent une quantité de fines importantes, il convient de tamiser les gravillons au tamis de 5 mm et d'inclure ces éléments dans le MBE. La correction en sable permettant d'obtenir la même surface granulaire sera dans ce cas calculée uniquement sur les éléments des gravillons supérieurs à 5 mm.

## **2.5. FABRICATION DES BAP:**

Les formulations des BAP sont plus rigoureuses que celles des bétons ordinaires. En effet, les précautions particulières mises en place nous obligent à maîtriser les constituants, contrôler la teneur en eau du béton, l'ordre d'introduction des composants ainsi que le contrôle sur béton frais.

Le malaxage d'un béton autoplaçant est fait avec un matériel simple, il s'agit d'un malaxeur étanche dont le temps de malaxage est en général plus long que celui d'un béton ordinaire, car on doit garantir un squelette granulaire homogène d'une part et la bonne dispersion du liant et adjuvants dont les quantités sont faibles d'autre part.

Le temps de malaxage et la chronologie d'introduction des ajouts chimiques sont importants, car un agent de viscosité à base de polymère anionique doit être ajouté après le superplastifiant pour éviter son adsorption sur les particules de ciment et dont l'interaction avec l'eau serait moindre.

## **2.6. Transport et mise en place des BAP :**

Le transport des BAP est assuré par les moyens conventionnels pour qu'on puisse garantir leur étanchéité. A partir du malaxeur, les BAP peuvent être transportés jusqu'aux moules par pompage. La mise en place des BAP dans les moules est faite par différentes méthodes :

### **♣ 1<sup>ère</sup> Méthode :**

Traditionnelle et similaire aux bétons ordinaires, la mise en place du béton est faite par une goulotte. Cette méthode dont le seul inconvénient est le fait qu'elle favorise les phénomènes de ségrégation.

Le groupe Français AFGC (Association Française de Génie Civil) a recommandé une hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m [7]

♣ **2<sup>ème</sup> Méthode :**

Dans ce cas la chute du béton est évitée, elle exige l'emploi d'un tube plongeur dans la partie basse du coffrage est immergé dans le béton frais.

♣ **3<sup>ème</sup> Méthode :**

Les BAP sont mis en place dans les moules par pompage. Elle minimise les risques de bullages et favorise l'obtention de parements lisses. Les précautions qui nous permettent d'assurer une bonne étanchéité des BAP sont les mêmes que celles des bétons fluides ordinaires, à noter que la pâte des BAP est cohésive ce qui limite les pertes de laitance.

**Figure 2.7 : Mode de mise en place du BAP sur chantier.**

## **2.7. CARACTÉRISTIQUES DES BAP À L'ÉTAT DURCI :**

### **2.7.1. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES BAP :**

Les résistances mécaniques des BAP comme pour les autres bétons sont automatiquement liées à la qualité des granulats, le rapport eau sur liant et de la composition de ce dernier. L'optimisation de ces différents paramètres nous conduit à une large gamme de résistances atteignant 80 à 100 MPA au 28<sup>ème</sup> jour. Ces bétons sont qualifiés de bétons autoplacants à hautes performances (BAP HP).

L'évolution des résistances en compression des BAP est proche de celles des bétons ordinaires à cause de l'utilisation fréquente des fillers calcaires qui accélèrent l'hydratation des silicates de calcium.

Les résistances des BAP aux jeunes âges peuvent être affectées quand ces bétons renferment des quantités importantes de superplastifiants, pouvant conduire à un retard de prise considérable.

L'optimisation du choix et le dosage en adjuvant nous fait atteindre des résistances élevées au démoulage. Ces résistances des BAP continuent à évoluer au delà de 28 jours selon les propriétés pouzzolaniques des additions.

## 2 .8 CONCLUSION

Une méthode simple et pratique qui permet à partir d'essais sur mortier d'anticiper le comportement rhéologique des bétons sur le chantier.

- Elle permet une prévision de la formulation du béton à travers son MBE.
- Cette méthode ouvre de nouvelles possibilités de recherche dans la compréhension des incidents rhéologiques.
  
- Cette méthode ne remplace pas les études traditionnelles de composition du béton, mais elle améliore par sa rapidité et sa simplicité la formulation des bétons.
  
- Elle constitue une méthode fiable notamment pour la mise au point des bétons adjuvantes, et permet de détecter les éventuelles anomalies rhéologiques pouvant apparaître lors de la mise en œuvre du béton.

**CHAPITRE III**  
**CARACTERISATION**  
**DES MATERIAUX**

### III- 1.1. INTRODUCTION :

L'objectif de ce programme expérimental est de développer des formulations de béton autoplaçant tout en s'appuyant sur les résultats préliminaires obtenus par les essais d'optimisations de la pâte liante (ciment, eau, superplastifiant et ajout minéral) d'une part et l'adoption d'un squelette granulaire spécifié d'autre part.

Cette optimisation conjointe nous amène à la confection d'un béton autoplaçant doté de meilleures caractéristiques.

Dans toute cette compagne de recherche, nous avons utilisé des matériaux locaux, qui sont disponibles au niveau du laboratoire de l'institut de génie civil, à savoir les fractions de granulats et le sable et dans le marché Algérien tels que : le ciment, la fumée de silice et les adjuvants (superplastifiant et agent de viscosité).

### 1.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX :

#### 2.1. Ciment :

Nous avons utilisé un ciment CPJ - CEM II/A 42.5 fabriqué et livré par la société des ciments de SETIF SEAK.

Le ciment utilisé a une résistance réelle de 49 MPa. Ces caractéristiques physico-chimiques sont présentées comme suit :

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PAF	RI
61.37	22.28	4.56	3.88	1.40	1.72	0.06	0.33	3.71	3.29
Composition minéralogique (%)									
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF			
59.2		14.1		6.1		11.4			

**Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment**

#### *Finesse du ciment :*

La masse spécifique ..... $\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$

Surface spécifique de Blaine.....  $SSB = 3775 \text{ cm}^2/\text{g}$  (valeur donnée par le fabricant).

Les temps de prise :

Début de prise .....DP = 171 mn

Fin de prise .....FP = 232 mn

## 2.2. GRANULATS :

Dans les travaux de bâtiments et de génie civil, on utilise impérativement des granulats de qualité. Il est toujours utile d'établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

Certaines propriétés de ces granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches d'origine telles que : la résistance à la fragmentation, ces propriétés sont complétées par des caractéristiques liées à la propreté des matériaux en passant par l'évaluation du pourcentage en fines argileuses.

En sachant que ces classes granulaires sont des matériaux mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas, alors que le haut est enrichi en éléments de faibles dimensions.

Les prélèvements de granulats qui ont du servir comme matériau destiné à tout genre d'essais de caractérisation dans ce cas, ont été effectués de telle sorte de prendre des parties du bas, du haut, du milieu et de veiller à leur bon mélange.

### 2.2.1. Sable :

Le sable utilisé est naturel, provenant de la carrière ENG d'EL KHROUB ainsi que le sable normalisé fourni pour la confection des variétés de mortiers.

Les caractéristiques principales requises pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité déterminée par le module de finesse qui est déterminé par l'analyse granulométrique.

Pour les deux paramètres, les valeurs optimales sont respectivement :

Equivalent de sable  $> 70$  (NF P 18-598)

Un module de finesse :  $1.8 < M_F < 3.2$  (NF P 18-541)

### 2.2.2. Gravier :

Nous avons utilisé des granulats (0/4) , (5/10) et (10/20) provenant d'un gisement de calcaire de la carrière géante ENG EL KROUB .

Un essai Los Angeles a été effectué sur le gravier de la fraction 10/20, on a trouvé LA = 28%, ce qui nous permet de qualifier ces granulats de moyen.

Le tableau ci-après présente les propriétés physico-chimiques des granulats utilisés pour la confection du béton autoplaçant et du béton ordinaire

	<b>Sable 0/4</b>	<b>Gravillon 5/10</b>	<b>Gravier 10/20</b>
<b>Equivalent de sable (%)</b>	78.0	/	/
<b>Module de finesse</b>	2.0		
<b>Densité absolue</b>	2.60	2.70	2.70
<b>Densité apparente</b>	/	1.47	1.45
<b>Densité en vrac</b>	1.47	1.67	0.98
<b>Taux d'absorption (%)</b>	/	1.8	1.5

**Tableau 3.2 : Propriétés des granulats**

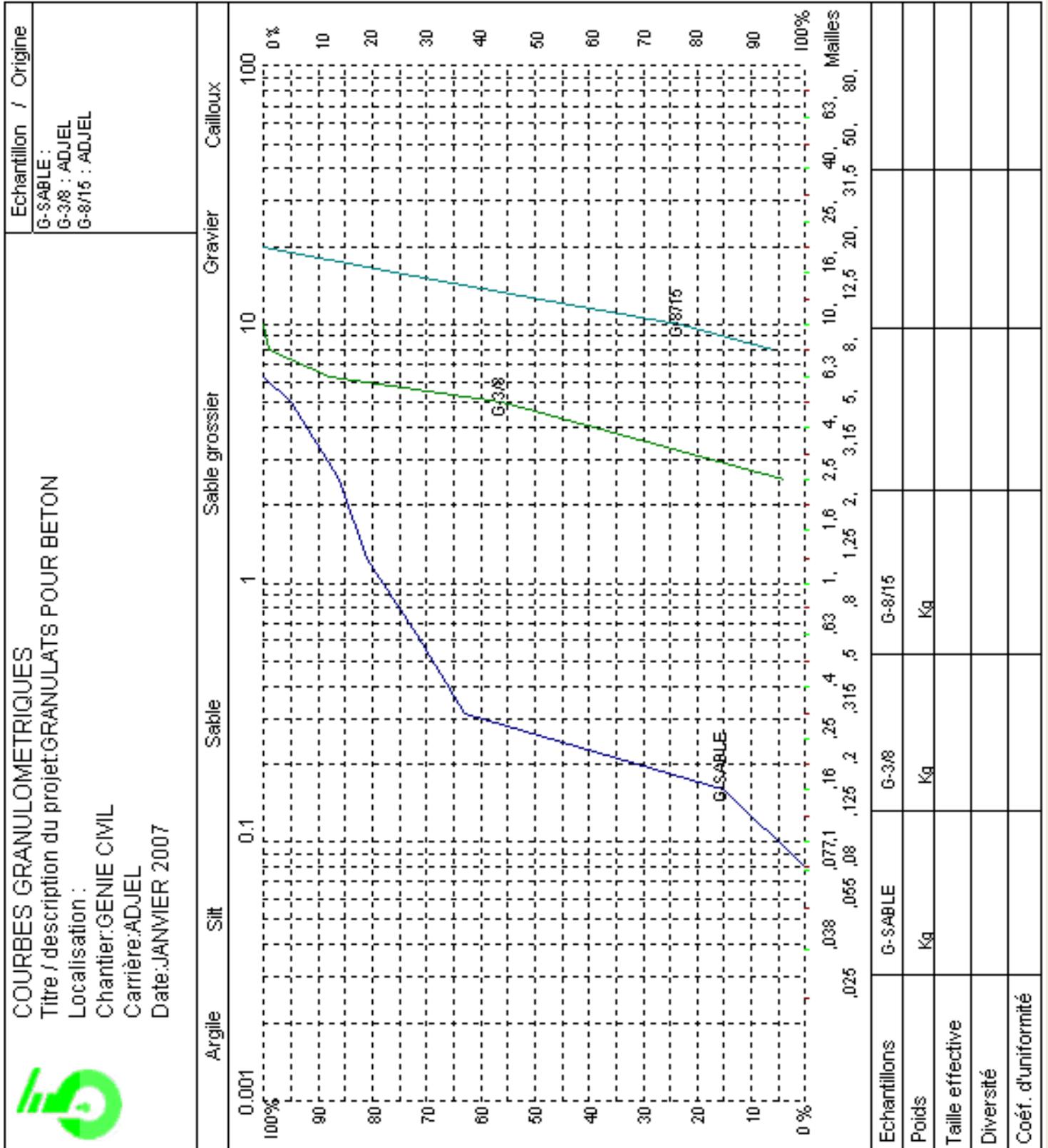


Figure 3.1. Analyse granulométrique

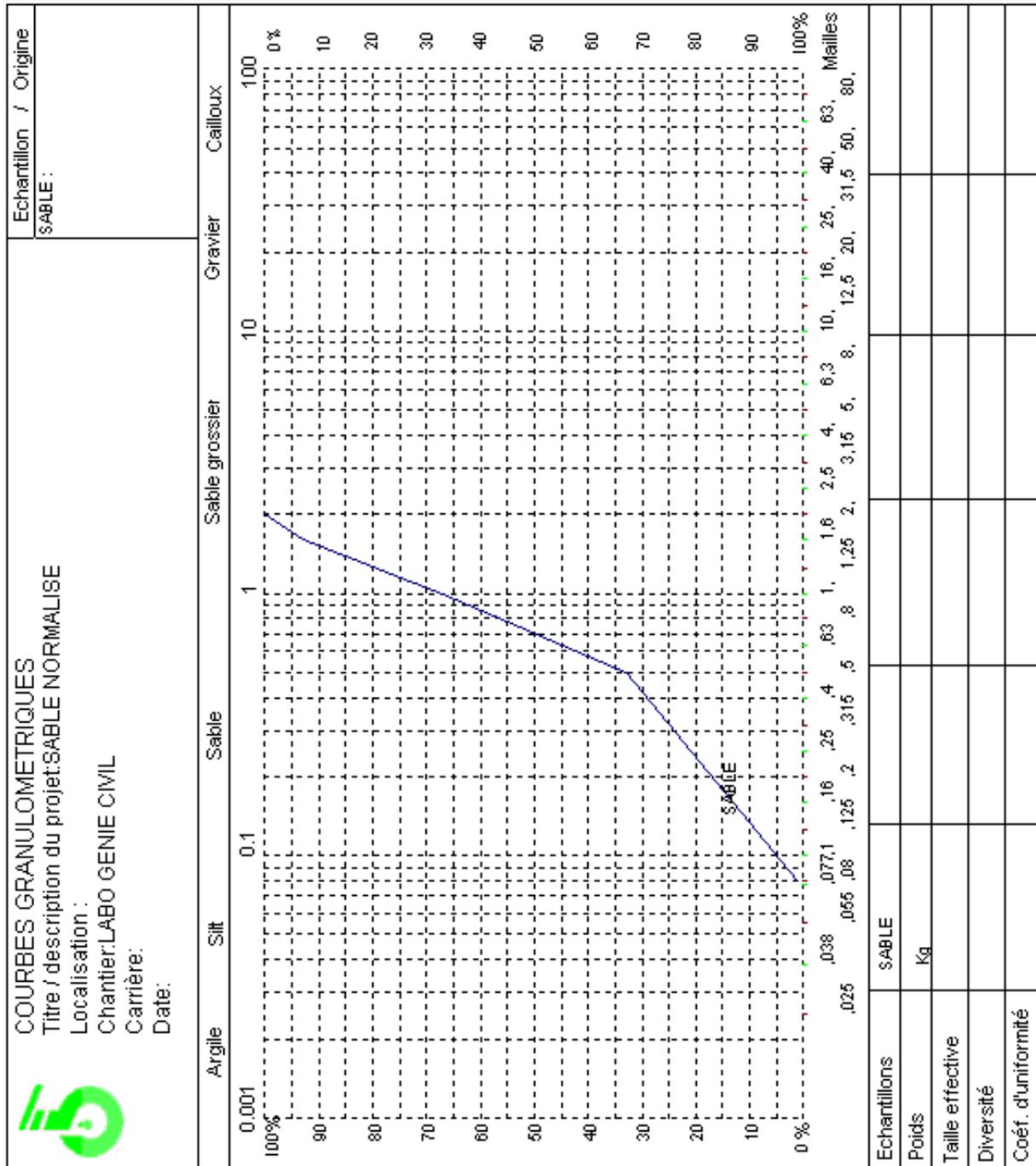


Figure 3.2. Analyse granulométrique du sable normalisé.

### 2.3. Superplastifiant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom de « MEDAPLAST SP 40 », il est conçu à base de polycarboxylates, sa plage de dosage recommandée est fixée par la fiche technique de 0.6% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment [24].

Ses Caractéristiques sont :

- Forme ..... liquide
- Couleur ..... jaunâtre
- Extrait sec ..... 40%
- Densité ..... 1.07
- PH ..... 6.5
- Teneur en chlore ..... <1

### 2.4 L'eau de gâchage :

Pour le gâchage, nous avons utilisé l'eau de robinet du laboratoire de génie civil en passant par l'analyse physico- chimique de cette eau.

- Conductivité .....936  $\mu\text{s}/\text{cm}^2$
- PH .....8.1
- $\text{HCO}_3^-$  ..... 20,5°F
- $\text{Ca}^{2+}$  .....24,2°F
- Mg ..... 9,8°F
- $\text{SO}_4^{2-}$  .....288mg/l
- $\text{Cl}^-$  .....170,5mg/l.

**Conclusion :**

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

Le choix des constituants à utiliser se fait sous la lumière de quelques essais :

- a. Un ensemble de fractions granulaires permettant la composition d'un squelette granulaire adéquat de granularité continue ;
- b. Un couple Ciment/Super plastifiant compatible ;
- c. Des additions minérales fines fillers calcaires qui sont nécessaires pour diminuer la teneur en ciment, puisque les BAP nécessitent un volume élevé de fines

Les différentes essais sur les matériaux choisies montre qu'on peut les utilisés dans notre travail expérimentales et l'appliquer à notre méthode utiliser MBE.

**CHAPITRE IV**  
**ESSAIS ET**  
**INTERPRETATION**

## 4. Essais et caractérisation des BAP :

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

### 4. 1. Les Propriétés Essentielles Recherchées

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui même, un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre d'étalement du béton, afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages.

Par stabilité on entend ; la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage. Aussi, lors de sa mise en place les BAP ne doivent pas présenter des phénomènes de blocage.

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

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

A partir des analyses précédentes, nous avons sélectionné cinq formulations que nous avons noté : BAP 1, BAP 2, BAP 3, BAP 4 et BAP5 avec la même combinaison granulaire un sable 0/4mm, un gravillon 5/10, un gravillon 5/20 , addition en filler calcaire et un super-plastifiant le MEDAPLAST SP 40 avec un dosage en ciment de l'ordre de 350 kg/m<sup>3</sup>.

Dans cette campagne d'essais nous allons déterminer les propriétés principales de ces BAP à l'état frais et à l'état durci à savoir :

- ◆ Les masses volumiques apparentes;
- ◆ Le diamètre d'étalement;
- ◆ La résistance à la compression;

#### 4. 1.2 ESSAI SUR LIANT :

##### 1.2.1. Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh :

La confection des coulis consiste à utiliser un malaxeur de capacité de 5 litres à axe vertical et à trois vitesses, le principe de la confection de ces coulis consiste à :

- 1- Mettre dans le bol la quantité d'eau, le ciment et le 1/3 de l'adjuvant en démarrant le malaxage pendant deux minutes à vitesse lente;
- 2- Déverser graduellement la quantité de l'addition minérale et le tout est malaxé pendant quatre (04) minutes à grande vitesse;
- 3- Introduire le deuxième tiers du superplastifiant et le coulis est malaxé à vitesse lente pendant 2 minutes ;
- 4- Introduire la dose restante du superplastifiant en continuant à malaxer à grande vitesse durant deux (02) minutes

On note que le temps de malaxage des pâtes pures est de six (06) minutes, alors que celui avec additions minérales, il est de dix (10) minutes.

La quantité d'eau contenue dans l'adjuvant est prise en compte dans le calcul des proportions d'eau nécessaires pour la confection des coulis.

Une fois le malaxage terminé, on déverse la totalité du coulis dans le cône de Marsh tout en fermant son ouverture inférieure, par la suite on lance l'écoulement du coulis dans une éprouvette graduée et on met le chronomètre en marche. Quand on atteint le volume de 200.ml de coulis dans l'éprouvette on note le temps correspondant.

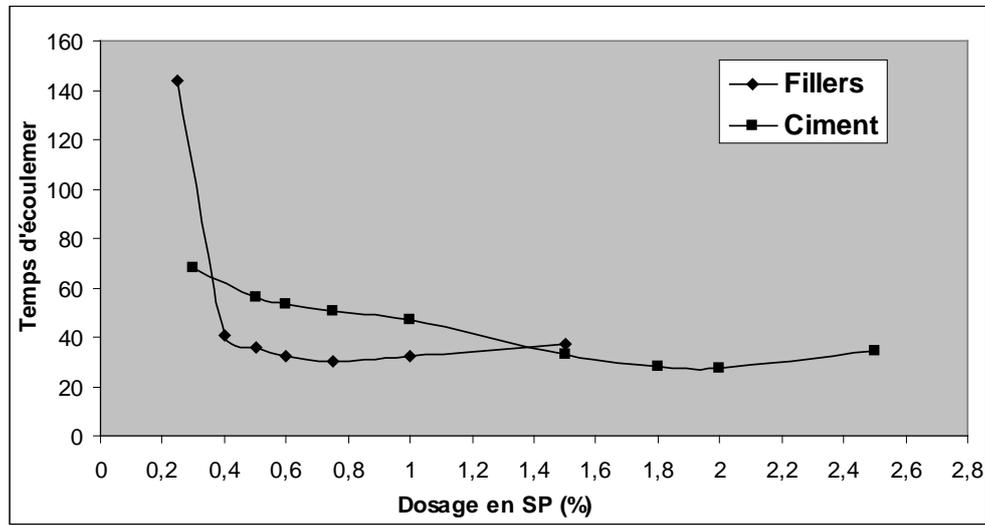


**Figure 4.1 : Essai au cône de Marsh.**

### 1.2.2. Détermination du dosage de saturation sur coulis :

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

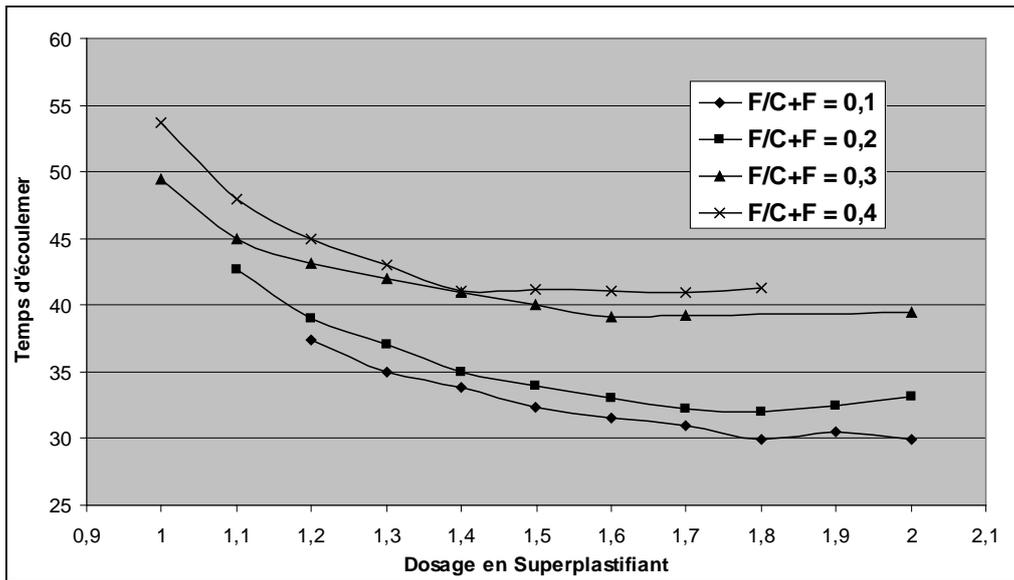
Le dosage de saturation est initialement déterminé sur des coulis de ciment pur et sur des coulis de fillers pur. Les résultats obtenus sont représentés ci-après.



**Figure 4.2. :** Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en super plastifiant d'un coulis de ciment pur et un coulis de fillers pur.

Sur la figure 4.2, on peut déterminer le dosage de saturation du ciment et du fillers. On remarque que ce dernier est de l'ordre 1,8 à 2% pour le ciment, et de l'ordre de 0,8% pour le fillers.

Pour des coulis confectionnés par le mélange (ciment, fillers) nous avons mesuré le dosage en saturation pour différents rapports  $F/C+F$ , les résultats sont représentés ci-après :



**Figure 4-3. :** Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en super plastifiant pour des coulis avec des rapports F/C+F différents.

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

$$SP = F \times SP_F + C \times SP_C \dots\dots\dots(A)$$

Avec :

SP le dosage de saturation du mélange F+C,

SP<sub>F</sub> et SP<sub>C</sub> respectivement les dosage de saturation du coulis de filler et de ciment,

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

On peut déduire de la figure 4.3, les valeurs suivantes :

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

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

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

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

L'application de l'expression (A), permet d'obtenir les résultats suivants :

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

**Tableau (4-1) :** Dosages de saturation en superplastifiant déterminés expérimentalement et calculée pour des coulis à F/C+F différents.

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

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

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

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

**4. 2. FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS :**

Cinq bétons autoplaçants, dont Les formules ont été vérifiées expérimentalement (étalement, stabilité ....) sont retenues et rassemblées dans le tableau 4-2

	<b>BAP1</b>	<b>BAP2</b>	<b>BAP3</b>	<b>BAP4</b>	<b>BAP5</b>
<b>Ciment</b>	356	376	356	312	303
<b>Filler</b>	180	194	178	227	232
<b>Eau (totale)</b>	197	209	198	225	227
<b>Sable 0/4</b>	741	952	741	698	943
<b>Gravillons 5 /10</b>	-	-	-	788	557
<b>Gravillons 10/20</b>	825	563	825	-	-

**4. 2.1. Première catégorie de BAP (BAP 1) :**

Nous avons procédé à la confection d'un béton auto-plaçant avec d'ajout minéral, mais adjuvanté d'un super-plastifiant de type MEDAPLAST SP 40 dosé à 1.4% du poids de ciment et de l'ajout.

	<b>Sable 0/4</b>	<b>Gravillon5/10</b>	<b>Gravier 10/20</b>	<b>Ciment</b>	<b>Eau</b>	<b>Adjuvant</b>	<b>Filler</b>
<b>Masse (kg/m<sup>3</sup>)</b>	741	-	825	356	197	1,4%	180

**Tableau 4.3 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 1<sup>ère</sup> catégorie (BAP 1)**

• *l'état frais :*

<b>Caractéristiques rhéologiques</b>	<b>Résultats</b>
<b>Masse volumique apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	2.355
<b>Etalement (mm)</b>	710
<b>L-BOX (%)</b>	80
<b>Stabilité au tamis (%)</b>	<b>18,3</b>

**Tableau 4.4: Caractéristiques à l'état frais du BAP 1**

• *L'état durci:*

Age (jours)	Masse volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.343	29.32	2.88
7	2.351	33.82	3.35
28	2.362	45.11	4.13
90	2.378	50.39	4.45

**Tableau 4.5 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 1**

**4. 2.2. Deuxième catégorie de BAP (BAP 2) :**

Nous avons procédé à la confection d'un béton auto-plaçant avec d'ajout minéral, mais adjuvanté d'un super-plastifiant de type MEDAPLAST SP 40 dosé à 1.5% du poids de ciment de l'ajout.

	Sable 0/4	Gravillon 5/10	Gravier 10/20	Ciment	Eau	Adjuvant	Filler
Masse (kg/m <sup>3</sup> )	952	-	563	376	209	1,5%	194

**Tableau 4.6: Composition massique d'un béton autoplaçant de la 2<sup>ème</sup> catégorie (BAP 2)**

• *L'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.355
Etallement (mm)	715
L-BOX (%)	85
Stabilité au tamis (%)	17,5

**Tableau 4.7: Caractéristiques à l'état frais du BAP 2**

• *L'état durci:*

Age (jours)	Masse volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.353	30.37	2.97
7	2.356	35.82	3.51
28	2.365	48.23	4.73
90	2.375	52.40	5.13

**Tableau 4.8 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 2**

**4. 2.3. Troisième catégorie de BAP (BAP 3) :**

Nous avons procédé à la confection d'un béton auto-plaçant avec d'ajout minéral, mais adjuvanté d'un super-plastifiant de type MEDAPLAST SP 40 dosé à 2% du poids de ciment et d'ajout.

	Sable 0/4	Gravillon 5/10	Gravier 10/20	Ciment	Eau	Adjuvant	Filler
Masse (kg/m <sup>3</sup> )	741	-	825	356	198	2%	178

**Tableau 4.9 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 3<sup>ème</sup> catégorie (BAP 3)**

• *L'état frais:*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.355
Étalement (mm)	720
L-BOX (%)	83
Stabilité au tamis (%)	23

**Tableau 4.10: Caractéristiques à l'état frais du BAP 3**

• *l'état durci:*

Age (jours)	Masse volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.343	29.87	2.87
7	2.351	35.65	3.48
28	2.362	46.13	4.53
90	2.378	51.60	5.04

**Tableau 4.11 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 3**

**4. 2.4. Quatrième catégorie de BAP (BAP 4) :**

Nous avons procédé à la confection d'un béton auto-plaçant avec d'ajout minéral, mais adjuvanté d'un super-plastifiant de type MEDAPLAST SP 40 dosé à 1% du poids de ciment et d'ajout.

	Sable 0/4	Gravillon 5/10	Gravier 10/20	Ciment	Eau	Adjuvant	Filler
Masse (kg/m <sup>3</sup> )	698	788	-	312	225	1%	227

**Tableau 4.12 : Composition massique d'un béton autoplaçant de la 4<sup>ème</sup> catégorie (BAP 4)**

• *l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.341
Etallement (mm)	730
L-BOX (%)	89
Stabilité au tamis (%)	19

**Tableau 4.13 : Caractéristiques à l'état frais du BAP 4**

• *l'état durci:*

Age (jours)	Masse volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.234	20.92	2.11
7	2.236	24.48	2.75
28	2.246	36.11	3.53
90	2.271	43.39	4.34

**Tableau 4.14 : Caractéristiques à l'état durci du BAP 4**

**4. 2.5. Cinquième catégorie de BAP (BAP 5) :**

Nous avons procédé à la confection d'un béton auto-plaçant avec d'ajout minéral, mais adjuvanté d'un super-plastifiant de type MEDAPLAST SP 40 dosé à 2% du poids de ciment et d'ajout.

	Sable 0/4	Gravillon 5/10	Gravier 10/20	Ciment	Eau	Adjuvant	Filler
Masse (kg/m <sup>3</sup> )	943	557	-	303	227	2%	232

**Tableau 4.15: Composition massique d'un béton autoplaçant de la 5<sup>ème</sup> catégorie (BAP 5)**

• *l'état frais :*

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.355
Étalement (mm)	750
L-BOX (%)	90
Stabilité au tamis (%)	20

**Tableau 4.16: Caractéristiques à l'état frais du BAP 5**

• *l'état durci:*

Age (jours)	Masse volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
3	2.373	19.12	1.98
7	2.381	23.35	2.75
28	2.385	34.41	3.83
90	2.397	38.23	4.12

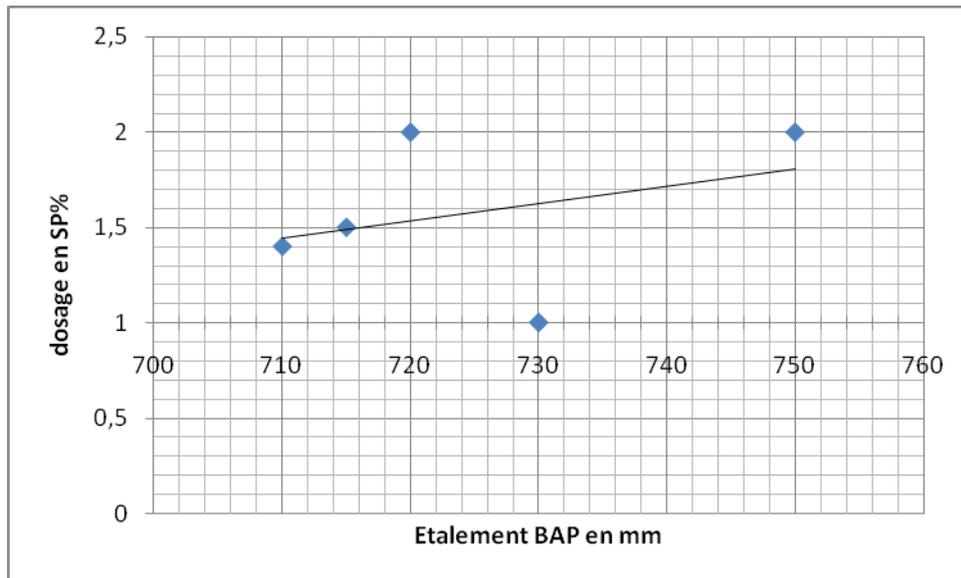
**Tableau 4.17: Caractéristiques à l'état durci du BAP 5**

Désignation	F/C+F	E/C+F	E/C	SP %	Étalement (cm)	Stabilité au Tamis (%)	Boîte en L	Entonnoir en V (s)
<b>BAP01</b>	0,33	0,37	0,51	1,40	71,0	18,3	0,8	8
<b>BAP02</b>	0,33	0,37	0,51	1,50	71,5	17,5	0,85	9
<b>BAP03</b>	0,33	0,37	0,55	2,00	72	23	0,83	9
<b>BAP04</b>	0,42	0,41	0,72	1,00	73	19	0,89	8,3
<b>BAP05</b>	0,43	0,42	0,75	2,00	75	20	0,90	9

**Tableau (4.18) :** Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons autoplaçants.

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

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

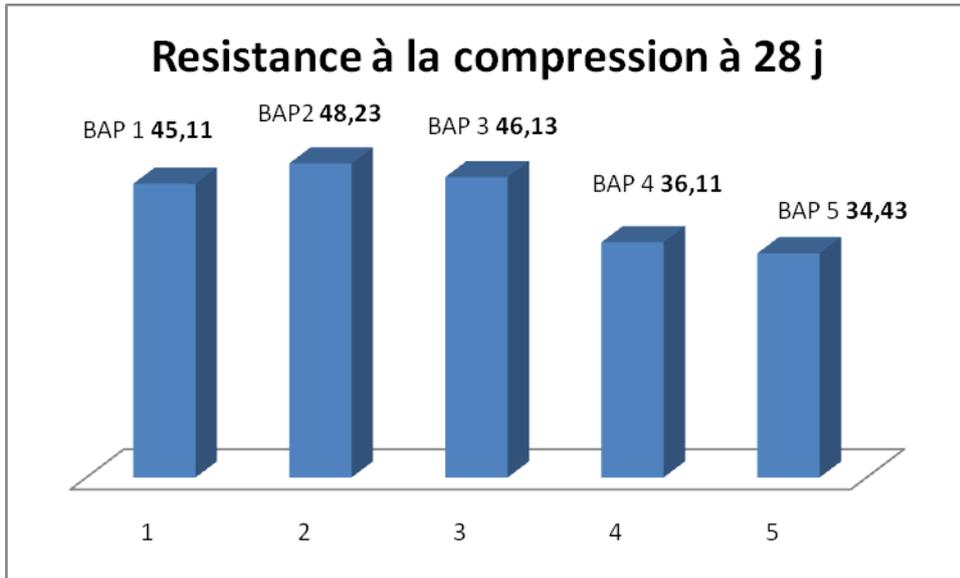


**Figure (4-3)** Évolution de l'étalement du BAP en fonction du dosage en sp

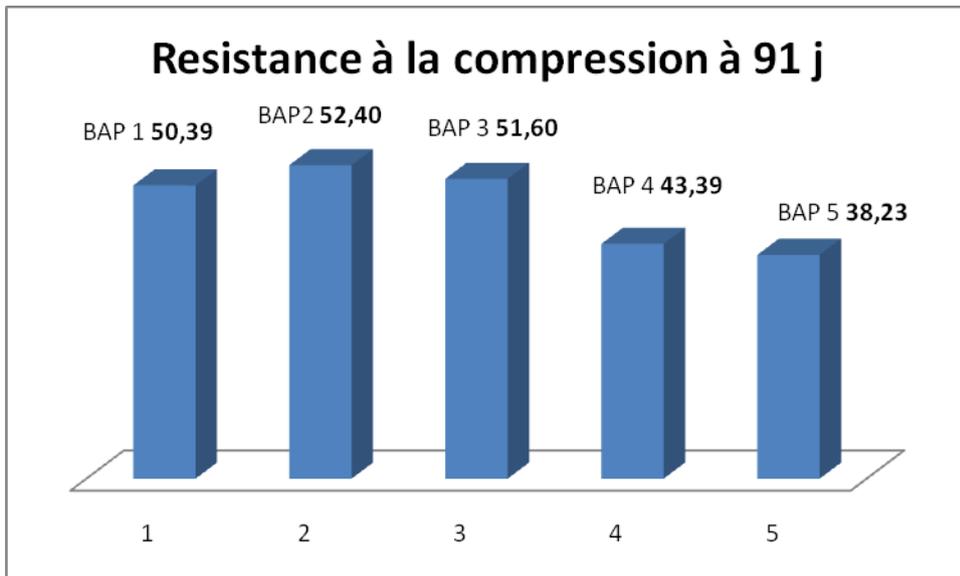
On peut remarquer à ce stade de l'étude, que l'augmentation du dosage en superplastifiant permet de faire augmenter sensiblement l'étalement des bétons.

Désignation	F/C+F	E/C+F	E/C	SP %	Etalement (cm)	Resistance Mpa 28j	Resistance Mpa 90j
<b>BAP01</b>	0,33	0,37	0,51	1,40	71,0	45,11	50,39
<b>BAP02</b>	0,33	0,37	0,51	1,50	71,5	48,23	52,40
<b>BAP03</b>	0,33	0,37	0,55	2,00	72	46,13	51,60
<b>BAP04</b>	0,42	0,41	0,72	1,00	73	36,11	43,39
<b>BAP05</b>	0,43	0,42	0,75	2,00	75	34,43	38,23

**Tableau (4.19)** : Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons autoplaçants.



**Figure (4-4)** Évolution de la résistance à la compression des BAP à 28j



**Figure (4-5)** Évolution de la résistance à la compression des BAP à 90j

### 4.3 CONFECTION DES EPROUVETTES DE BETON:

Les bétons ont été confectionnés dans un malaxeur d'une capacité de 0.64 m<sup>3</sup>

Le cycle de fabrication que nous avons suivi pour le béton témoin est défini comme suit :

- Introduction simultanée du gravier et sable et malaxage à sec pendant 1 minute,
- Introduction du ciment en mélangeant l'ensemble à sec pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange,
- Verser la quantité d'eau en poursuivant le malaxage durant 30 secondes.

Le cycle de fabrication du béton autoplaçant est différent, il s'agit de :

- Introduire simultanément les fractions du sable et de graviers en procédant à leur malaxage à sec pendant 1 minute,
- Déverser le ciment (éventuellement l'addition minérale) en poursuivant le malaxage à sec durant 1 minute,
- On introduit ensuite la première moitié de l'eau de gâchage, suivie de la moitié de la quantité du superplastifiant en continuant à malaxer pendant une minute,
- Verse la deuxième moitié d'eau accompagnée du reste de la quantité de superplastifiant et on malaxe une dernière fois pendant deux minutes.

Juste après l'arrêt du malaxage, on met le béton dans les moules lubrifiés par l'huile de coffrage correspondant aux différentes éprouvettes, sans oublier de passer par la vibration verticale dans le cas du béton ordinaire. Par la suite, on mesure l'affaissement du béton ordinaire ou le diamètre d'étalement du béton autoplaçant ainsi que sa masse volumique et sa résistance à la ségrégation par l'essai au tamis.

### 4.4 DEMOULAGE ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

Les éprouvettes de bétons et de mortiers sont stockées dans une salle en attendant leur démoulage après 24 heures.

Le bon mûrissement du béton est assuré, en maintenant une humidité satisfaisante et une température favorable le long de la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage. Les deux types d'éprouvettes sont immergés dans un bac d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à l'échéance de l'essai.

#### 4.5 SURFAÇAGE DES EPROUVETTES : (NF P 18-416)

Le surfaçage consiste à rendre les surfaces libres d'une éprouvette cylindrique planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette, il permet aussi de diminuer l'effet de frettage qui provoque une réduction des contraintes tangentielles intervenant au contact éprouvette-plateaux de la presse, et réduire l'excentricité accidentelle lors de l'essai d'écrasement en compression.



Figure4-6 : Confection des éprouvettes



**Figure 4-7 : Essai d'étalement des BAP**



**Figure 4-8: Essai d'étalement des BAP**



**Figure 4-9 : Essai  
d'écrasement des  
échantillons**

**4. 6. FORMULATIONS DES MORTIERS ISSU DES BETONS AUTOPLAÇANTS :**

Les différentes formules de mortier que nous avons étudiées sont celles issues des différentes formules de béton précédemment définies et récapitulées dans le Tableau 4-20

	<b>M.BAP1</b>	<b>M.BAP2</b>	<b>M.BAP3</b>	<b>M.BAP4</b>	<b>M.BAP5</b>
<b>Ciment</b>	356	376	356	312	303
<b>Filler</b>	180	194	178	227	232
<b>Eau (totale)</b>	197	209	198	225	227
<b>Sable 0/4</b>	761.71	966.13	761.71	724.56	961.77
<b>Gravillons 5 /10</b>	-	-	-	-	-
<b>Gravillons 10/20</b>	-	-	-	-	-

La masse de sable imbibée de 0/4 de la composition MBE est obtenue comme suit :

$$761.71 = 741 + \frac{(825 \times 0.178)}{7.091}$$

0,436 ; 0,239 ; 0,178 et 7,091 sont respectivement les surfaces spécifiques des gravillons 5/10 ,10/20 et du sable 0/4 le tableau 4-21 présente le détail du calcul de la surface spécifique

Nature du sable : sable 0/4 Masse volumique imbibée : 2.62					
Tamis (mm)	Refus cumulés (%)	Diamètre moyen	Proportion volumique (%)	Surface de 1 kg de part (m2 /kg)	Surface pondérée
0	100.00	0.040	2.80	57.2519	1.6031
0.08	97.20	0.120	7.70	19.0840	1.4695
0.16	89.50	0.238	22.30	9.6424	2.1503
0.315	67.20	0.473	22.50	4.8467	1.0905
0.63	44.70	0.940	22.70	2.4363	0.5530
1.25	22.00	1.875	12.70	1.2214	0.1551
2.5	9.30	2.825	6.10	0.8106	0.0494
3.15	3.20	3.575	3.20	0.6406	0.0205
4	0.00	4.600	0.00	0.5089	0.0000
5	0.00	5.650	0.00	0.4053	0.0000
6.3	0.00	7.150	0.00	0.3203	0.0000
8	0.00	9.000	0.00	0.2545	0.0000
10	0.00	11.250	0.00	0.2036	0.0000
12.5	0.00	13.250	0.00	0.1728	0.0000
14	0.00	15.000	0.00	0.1527	0.0000

16	0.00	18.000	0.00	0.1272	0.0000
20	0.00	22.500	0.00	0.1018	0.0000
25	0.00	28.250	0.00	0.0811	0.0000
31.5	0.00	35.750	0.00	0.0641	0.0000
40	0.00	45.000	0.00	0.0509	0.0000
50	0.00	56.500	0.00	0.0405	0.0000
63	0.00	71.500	0.00	0.0320	0.0000
80	0.00	80.000	0.00	0.0286	0.0000
Surface spécifique imbibée (kg /m <sup>2</sup> )					7.091

Tamis (mm)	Sable 0/4	Gravillon 5/10	Gravillon 10/20
0.08	2.80	0.00	0.00
0.16	10.50	0.00	0.00
0.315	32.80	0.00	0.00
0.63	55.30	0.00	0.00
1.25	78.00	0.00	0.00
2.5	90.70	0.00	0.00
3.15	96.80	0.20	0.00
4	100.00	0.30	0.00
5	100.00	0.40	0.40
6.3	100.00	1.10	0.50
8	100.00	10.60	0.80
10	100.00	53.30	2.70
12.5	100.00	95.00	34.60
14	100.00	99.80	70.00
16	100.00	100.00	91.80
20	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00
31.5	100.00	100.00	100.00
40	100.00	100.00	100.00
50	100.00	100.00	100.00
63	100.00	100.00	100.00
80	100.00	100.00	100.00
Masse volumique imbibée (kg /L)	2.62	2.61	2.62
Surface spécifique imbibée(m <sup>2</sup> /kg)	<b>7.091</b>	<b>0.239</b>	<b>0.178</b>

**Tableau 4-22-** Surface spécifique imbibé

#### 4. 7. CONFECTION DES EPROUVETTES DE MORTIERS:

Le mode opératoire a été réalisé au moyen d'un malaxeur automatique, à axe vertical, à trois vitesses et de capacité cinq (5) litres.

La confection du mortier ordinaire ciment ,fillers calcaires, sable et adjuvantés par le superplastifiant est comme suit:

##### a) Mortier ordinaire:

- Mettre le malaxeur en marche sur la première vitesse;
- Verser la quantité d'eau totale;
- Verser le liant (ciment + filler calcaire);
- Malaxer une minute et verser le sable dans les 30 dernières secondes;
- Arrêter le malaxage et racler les côtés;
- Mettre le malaxeur en 2<sup>ème</sup> vitesse et malaxer pendant 2 minutes;
- Arrêter le malaxage et racler les côtés;
- Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 2 minutes;
- Arrêter et terminer le malaxage.

#### 4. 8 Résultats des essais sur mortiers :

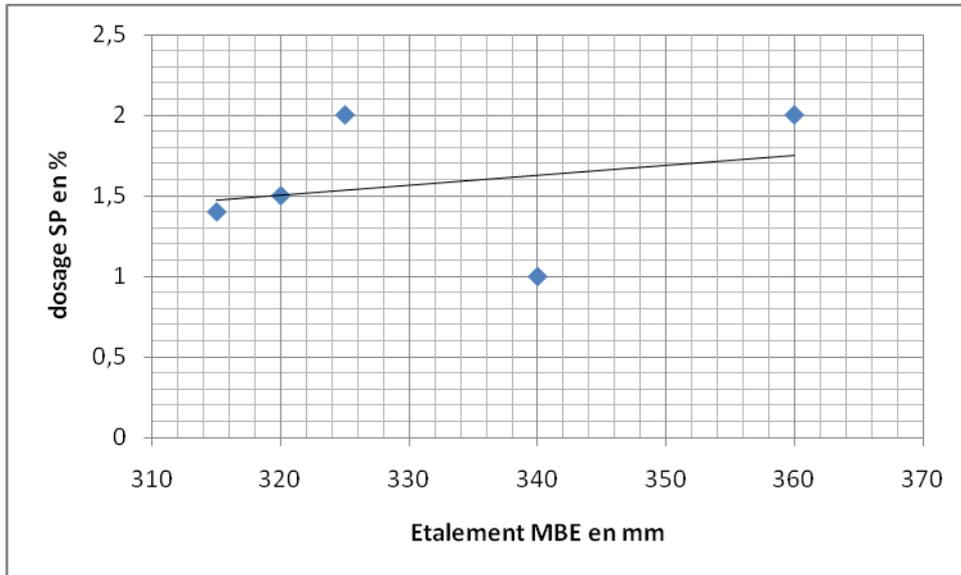
Dans les tableaux 4.23 nous présenterons les résultats des essais effectués sur les mortiers présentés dans le tableau 4.20 qui sont au nombre de 5 mortiers.

Désignation	F/C+F	E/C+F	E/C	SP %	Etallement (mm)
M.BAP01	0,33	0,37	0,51	1,40	315
M.BAP02	0,33	0,37	0,53	1,50	320
M.BAP03	0,33	0,37	0,52	2,00	325
M.BAP04	0,42	0,41	0,66	1,00	340
M.BAP05	0,43	0,42	0,70	2,00	360

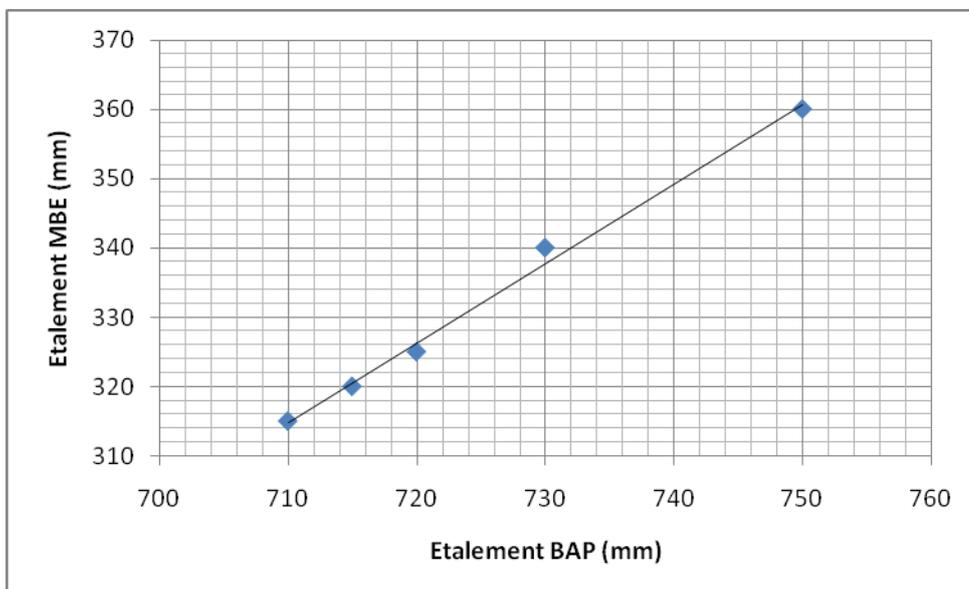
**Tableau (4.23) :** Paramètres de Composition et caractéristiques des bétons corrigées et

On remarque que les mortiers des bétons représentent des caractéristiques très rapprochées. Ce qui confirme encore l'hypothèse qui stipule que la fluidité d'un béton, tout autre paramètre fixe, dépend de la fluidité du mortier qui le compose.

Ainsi, on peut confirmer que pour obtenir des béton autoplaçants qui représenterait des étalements proches de 70 cm et qui respectent en même temps les conditions de bonne résistance à la ségrégation, de bonne capacité de remplissage et une bonne stabilité, il faudrait concevoir des mortiers qui présentent un étalement proche de 30 cm.



**Figure (4-10)** Évolution de l'étalement du MBE en fonction du dosage en sp



**Figure (4-11)** l'étalement du MBE en fonction de l'étalement du BAP pour

Les mêmes points

De la même façon, en superposant les résultats de corrélation MBE BAP pour le super-plastifiant Sp sur ceux trouvés avec le SP, on obtient une nouvelle estimation de la courbe globale de corrélation correspondant à ce béton particulier (figure4-11)

Le même travail à été reproduit avec les quatre autres formules de béton et avec les mêmes super-plastifiants. Les courbes de corrélation de chacune des formules béton du tableau 4.1 et sur la figure 4.11

En effet ce même comportement a été constaté sur les deux produits. Les bétons ayant subi une perte d'ouvrabilité dans le temps présentent des mortiers qui ont également perdu de l'ouvrabilité dans le temps, et pour ceux qui ont un fort maintien de rhéologie dans le temps, leurs mortiers ont présente le même comportement .

#### 4.9 Conclusion :

Les résultats obtenus montrent que le comportement rhéologique des BAP ainsi que celui de leurs mortiers correspondants est semblablement corrélable. La composition spécifique des BAP, forte teneur en fines et fort dosage en super-plastifiant, ne change pas par rapport aux bétons ordinaires les règles de corrélation existant entre le béton et son MBE.

De ce fait la méthode MBE peut donc être étendue aux bétons autoplacants, sans modification dans les principes de formulation de ces MBE. La méthode garde donc son usage qui est d'établir des courbes de régression reliant la rhéologie du BAP à celle de leurs mortiers correspondants. La méthode peut être également utilisée comme outil de prédiction du maintien de la rhéologie dans le temps des essais simples sur MBE sans passer par les essais à grande échelle, sur BAP.

La Méthode donne de bons résultats de corrélation entre BAP et MBE. En effet ce même comportement a été constaté sur les deux produits. Les bétons ayant subi une perte d'ouvrabilité dans le temps présentent des mortiers qui ont également perdu de l'ouvrabilité dans le temps, et pour ceux qui ont un fort maintien de rhéologie dans le temps, leurs mortiers ont présente le même comportement.

En définitive la méthode peut être utilisée comme un outil de prédiction de rhéologie d'une formule béton pour laquelle la droite de corrélation est définie pour un adjuvant donné pour prédire le comportement de ce même béton pour n'importe quel adjuvant à partir de simples essais sur MBE.

la méthode conserve son intérêt de classification des adjuvants car une fois la droite de corrélation connue, il suffit de faire de simples essais sur MBE, soit en faisant varier les dosages ou bien en faisant des suivis de rhéologie dans le temps.

# CONCLUSION

Les analyses expérimentales prouvent qu'il est tout à fait évident la confection d'un béton auto plaçant , qui présente des caractéristique rhéologique et mécaniques très améliorées en réduisant le rapport eau sur liant (E/L), par l'utilisation conjointe d'un super plastifiant et un ajout minéral.

Plusieurs approches de formulation sont à recenser dans la littérature . celle qui se base sur l'élaboration d'une composition du béton à partir d'optimisation effectuées sur un mortier semble être la plus intéressante et facilite les manipulation au niveau du laboratoire.

Les résultats permettent de mettre en évidence les bonnes performances développées avec les bétons autoplaçants.

- L'étude a montrés que la méthode MBE est un outil très utile à la formulation de bétons adjuvantes , elle permet , par des suivis rhéologiques de comparer les performances de différentes couples Ciment /adjuvant
- Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'étendre la méthode de mortier de béton équivalent au béton autoplaçant, et que la composition particuliere des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.
- Il a été aussi vérifier que chaque béton a sa propre droite de corrélation, cette droite est la même pour les évolutions d'ouvrabilité dues à un changement d'adjuvant, à un changement de dosage en adjuvant ou à une évolution de l'ouvrabilité en fonction du temps .
- Le un béton très professionnel dont la formulation est très délicate, il existe un contrôle rigoureux aux étapes de production et de la mise en œuvre.
- La fluidité de ce béton et à travers l'essai au caune d'Abrams, lui confère un étalement en formant une galette de béton dont la mesure de son diamètre dépasse les 600 mm, sans ce cas on ne peut parler d'affaissement comme pour le béton traditionnel.
- L'obtention d'un béton autoplaçant à hautes performances , nécessite l'utilisation d'un super plastifiant haut réducteur d'eau , qui lui permettre de diminuer le rapport E/L au dessous de 0.33.
- La composition d'un béton autoplaçant nécessite un poids de particules fines d'environ  $700 \text{ kg/m}^3$  , un rapport G/S variant entre 0.5 et 1.05 des granulats dont le diamètre maximal est 16mm.
- Le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/16.

- Les masses volumiques apparentes à l'état frais et durci du BAP sont supérieures à celles de toutes les catégories de bétons à différents âges, ceci est le résultat d'un rapport E/L bas ( de 0.5 à 0.32)
- Le BAP a développé des caractéristiques mécaniques très améliorées par rapport à celles du béton ordinaire et les autres BAP confectionnés.
- Les optimisations des teneurs en adjuvants et additions minérales rendent l'utilisation d'un super plastifiant haut réducteur d'eau indispensable pour atteindre des rapports E/C ou E/L très bas , donnant l'amélioration des caractéristiques rhéologiques du béton telles que l'ouvrabilité et la stabilité , et un comportement mécanique à l'état durci à savoir la résistance à la compression.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] George Dreux, « NOUVEAU GUIDE DU BETON » 8<sup>ème</sup> édition ;
- [2] K.H.KHAYAT, « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1<sup>er</sup> Novembre 1996 ;
- [3] OKAMURA. H. , OZAWA , K. (1994), “Self compactable high performance concrete in Japan” ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand, d’après ;
- [4] HAYAKAWA , M., MATSUOKA, Y., YOKOTA, K. (1995).”Application of super workable concrete in the construction of 70\_story building in Japan” ACI SP 154, Las Vegas ;
- [5] IZUMI, I., YONEZAWA, T ., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) “Placing 10 000 m<sup>3</sup> super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary” Papers, 2<sup>nd</sup> CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas,;
- [6] GILLES Escadrilles, Responsable pédagogique, CARMEUSE France, « Formation continue actualisante » – 17 et 18 Octobre 2001 ;
- [7] Projet national de recherche CERIB, « béton autoplaçant BAP », France, Octobre 2001 ;
- [8] Pierre Claude AITCIN, « La compatibilité ciment/superplastifiant » ATILH., Paris, 8 Mars 1996 ;
- [9] OZAWA, K, MAEKAWA, K., OKAMURA, H. (1992, “Development of high performance concrete” Journal of the Faculty of Engineering, Vol XLI, N°3, University of Tokyo,

- [10] MANAI, K (1995), «étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants » Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke ;
- [11] YURUGI, M., SAKATA, M., IWAI, M., SAKAI, G. (1989) “Mix proportion for highly workable concrete” ;
- [12] OKAMURA, H ., OZAWA, K. (1994) “Self compactable high performance concrete in Japan” ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand;
- [13] Dossier technique « Les bétons autoplaçants », Christophe CHUCHE, MBT France ;
- [14] KHAYAT, K. H. , GUIZANI, Z. (1994) “Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete ” soumis à l’ACI Materials Journal;
- [15] MIURA, N., TAKEDA, N., CHIKAMATSU, R., SOGO, S (1994) “Application of super workable concrete to reinforced concrete structure with difficult construction conditions ” ACI SP 140 ;
- [16] AWAD, K., AL YAFI, A. R. (1995) “Self compacting and self leveling properties of high performance concrete with triple blended binder in UAE ” Supplementary Papers, 2<sup>nd</sup> CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas ;
- [17] OZAWA, K., MAEKAWA, K ., OKAMURA, H. (1990) “The high performance concrete with high filling capacity” RILEM Symposium on Admixtures for Concrete;
- [18] FUKUTE, T., MORIWAKE, A., SANO, K., HAMASAKI, K. (1995) “Development of super workable concrete for multi -functional port structures” ACI SP 154, Las Vegas;
- [19] CEBTP, « Bétons autoplaçants, rapport 98 004/98 006 » 1995, EYROLLES ;

- [20] O. HADDAD, S. AGGOUN, L. NACHBAUR, V. WALLER et R. CABRILLAC, Extension de la méthode du mortier de béton équivalent aux bétons autoplaçants, Annales du bâtiment et travaux publics, Octobre 2005, pp 13-17
- [21] F.De Larrar, « la nouvelle méthode des coulis pour la formulation des bétons à hautes performances » Bulletin de liaison pont-chaussées N° 202, 1996 .
- [22] Bensebti .S. « Caractérisation de matériaux à base de matrice cimentaire de la région de Constantine » mémoire de Magister soutenu à l'université Mentouri ;
- [23] S.BENSEBTI, H.HOUARI, « Caractérisation de Matériaux à Base de Matrice Cimentaire de la Région de Constantine » « Formulation – Rhéologie – Résistances », Thèse de Magister en Génie Civil, Université de Constantine, Novembre 2000, 237 pages.
- [24] S. BENSEBTI, H. HOUARI, « Etude de l'influence de la Nature des Granulats sur les Caractéristiques Rhéologiques et Mécaniques des Bétons et des Mortiers », Séminaire National de Génie Civil, Mostaganem, 13 et 14 novembre 2000, Proceeding, pp48-54.
- [25] S. BENSEBTI, H. HOUARI, « Etude Expérimentale de l'Adéquation Entre les Appareils de mesure de la Consistance et la Variété des Bétons et des Mortiers », Séminaire National de Génie Civil, Sidi Belabbes, 15 et 16 mai 2001, 07 pages
- [26] S. BENSEBTI, H. HOUARI, « Etude Expérimentale des Caractéristiques des Bétons Frais », Séminaire National de Génie Civil, Sidi Belabbes, 15 et 16 mai 2001, 09 pages
- [27] S. BENSEBTI, H. HOUARI, « Etude Expérimentale des Caractéristiques des Bétons et des Mortiers à l'Etat Frais », Séminaire National de Génie Civil, Tebessa, 26 et 27 mai 2001, 06 pages.
- [28] S. BENSEBTI, H. HOUARI, "Influence of Chemical Admixtures on the Fluidity of Cement Pastes with Different Nature of Fillers – An Experimental Study Based on the Marsh Cone Test", First International Chemical Engineering Conference, 17-19 September 2001, University of Jordan, Amman, JORDAN, 11 pages.
- [29] S. BENSEBTI, H. HOUARI, "Experimental Study of Fresh Concretes With Various Aggregates", The 6<sup>th</sup> International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, 21-24 October 2002, Amman, JORDAN, 08 pages

- [30] Loucif. A « l'influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons » thèse de Magister Université de Tébessa ;
- [31] Kamel H. KHAYAT, « Optimisation des bétons autonivelants pour coffrages fortement armés » Centre interuniversitaire sur le béton, Université de SHERBROOKE (Québec) Novembre 1996 :
- [32] seddik A “ formulation des bétons autoplacants “ Thèse de Magister en Génie Civil, Université de SETIF