

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département de Génie civil**

**Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur**

Thème

*Étude de l'influence de différents types de fillers calcaires sur  
les performances du béton autoplaçant BAP*

Proposé par :

**M<sup>me</sup> A. CHIKH**

Encadré par :

**M A. MADANI**

Réalisé par :

**M<sup>elle</sup> Nawel DOUNANE**

*Promotion 2009/2010*

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à:*

*☞ Monsieur A.MADANI, ingénieur du laboratoire ACT qui m'a aidé beaucoup pour réaliser ce projet de fin d'étude et pour ses conseils.*

*☞ Madame A.CHIKH pour leur aide, conseils, et remarques.*

*☞ Professeur A. BALI pour leur aide, conseils et sa gentillesse.*

*☞ Tout le personnel de la société ACT en particulier les gens du labo*

*☞ Tous les responsables et les personnels du Laboratoire Central des Travaux Publiques (LCTP- Hussein Dey)*

*☞ Les enseignants du département de génie civil de l'Ecole Nationale Polytechnique d'El Harrach pour nous avoir fait bénéficier de leur savoir le long de notre formation*

*☞ Ainsi qu'à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin pour réaliser ce projet de fin d'étude surtout, Mm. Debiche, mes amies : Fatma, Kafia , Hania.*

## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à :*

☞ *Ma très chère maman pour tous ses sacrifices, que Dieu la protège ;*

☞ *Mon père pour ses encouragements et ses compréhensions, que Dieu le récompense et le protège ;*

☞ *À mes chers sœurs et frères ;*

☞ *À mes neveux : Mostafa, Farouk, Iliessa et le petit Yazid ;*

☞ *À mes nièces : Faisa et Mimi ;*

☞ *À mes beaux frères ;*

☞ *À toutes ma grande famille ;*

☞ *À tous mes meilleures amies : Hadjer et Amina.*

☞ *À toutes ma promotion 2010 : Hakima, Malik, Mouh, Rafik et Fulgence.*

☞ *À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

**NAWEL**

## ملخص

هناك دراسات عديدة و متجددة غرضها هو إيجاد صياغة للخرسانة المثيرة ذاتيا . هذه الأخيرة هي خرسانة خاصة جد سائلة ، و خاصيتها هي أن تأخذ الموضع تحت تأثير وزنها الذاتي دون إضافة أي رج داخلي أو خارجي. هذه الخرسانة تكسب تماسك كافي لماء كل أنواع الفراغات دون ترسب.

الغرض من هذه الدراسة هو تحليل تأثير الإضافات المعدنية من نوع الغبار الكلسي على امتيازات هذه الخرسانة و لتحسين بعض الخصائص الميكانيكية. لدراسة سلوك هذه الخرسانة ، إستعملنا معايير مختلفة وأنواع الغبار الكلسية. النتائج المحصل عليها ساعدتنا على التأكد من أن الغبار الكلسي يلعب دورا هاما في تحسين الخرسانة المثيرة ذاتيا.

## كلمات دليلة

الخصائص ، رقة ، تأثير ، إضافة ، إضافة ، الخرسانة المثيرة ذاتيا ، رج

## Résumé

Nombreuses sont les études actuelles qui ont pour objectif de trouver la bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP). Ces derniers sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécificité est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Ils possèdent une cohésion suffisante pour pouvoir combler presque tous les types d'espaces sans ségrégation ni ressuage. Les BAP sont particulièrement bien adaptés pour le bétonnage des coffrages complexes ou comportant une forte densité d'armatures

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des additions minérales de type fillers calcaires sur les performances du BAP. Afin d'améliorer quelques propriétés mécaniques et d'étudier le comportement rhéologique de ces bétons nous avons utilisés différents dosages et types de fillers calcaires avec l'introduction d'un superplastifiant.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que la finesse des filler calcaires joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances du BAP. Ainsi, l'intérêt est porté sur la substitution partielle du ciment par des fillers calcaires.

**Mots clés :** Bétons autoplaçants, vibration, substitution, influence, finesse, performances

## Summary

Many studies aim to reach the right mixture proportioning of the self compacting concretes (SCC). These are very fluid concretes, defined as flowing concretes which can be cast into place without the use of internal or external vibration. They possess a sufficient cohesiveness to be able to almost fill all the types of spaces without segregation nor bleeding. The SCC are particularly well adapted for filling complex frameworks with dense steel reinforcement.

The objective of this study is to analyze the influence of the mineral additions of fine particle size (limestone) on the performances of the SCC. In order to improve some mechanical properties and to study the rheological behaviour of these concretes we used various proportioning and types of limestone fine particle size.

The results obtained enabled us to note that the fineness of the limestone fine particles plays an important role t in the improvement of the performances of the SCC. Thus, the partial substitution of cement by limestone fines is very interesting.

**Key words:** Self compacting concrete, vibration, substitution, influence, fineness, performances

# *Table des Matières*

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Partie théorique</b>	
<b>Chapitre 1 : Définition et propriétés des BAP</b>	<b>3</b>
1.1. Définition des bétons Autoplaçants	3
1.2. Domaines d'emploi	3
1.3. Impacts socio-économiques	4
1.4. Spécificité de la composition des bétons autoplaçants	5
1.4.1 Volume de pâte important	5
1.4.2 Faible volume en gravillons	5
1.4.3 Grande proportion en fines	5
1.4.4 Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité)	6
1.5. Matières premières utilisées dans les BAP	6
1.5 .1. Les liants	6
1.5 .1 .1 Le ciment	6
1.5 .1 .2 Les ajouts minéraux	7
1.5 .2. Les granulats	12
1.5 .3. Adjuvants	13
1.5 .3.1 Classification des Adjuvants	13
1.5 .3.2 Superplastifiant	16
1.5 .3.3 Agents de viscosité	17
1.5 .4. L'eau de gâchage	18
1.6 Propriétés des bétons autoplaçants	18
1.7 Cahier des charges d'un BAP	19
1.8 Diverses appellations des BAP	20
<b>Chapitre 2 : Caractérisation d'un béton autoplaçant</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction	21
2.2 Fluidité	21
2.2.1 Essai au cône d'Abrams	21
2.2.2 Essai au V-Funnel	21
2.2.3 Essais de l'Orimet-test	22

2.3 Homogénéité	23
2.3.1 Ségrégation dynamique	23
2.3.1.1 Essai de la boîte en L	23
2.3.1.2 Essai d'étalement modifié (J-Ring)	24
2.3.1.3 Essai du caisson (mesure de la capacité de remplissage)	24
2.3.2 Ségrégation statique	25
2.3.2.1 Essai au cylindre	25
2.3.2.2 Essai au tamis	26
2.3.2.3 Essai à la colonne	27
2.4 Caractéristiques des BAP à l'état durci	27
2.4.1 Propriétés mécaniques des BAP (performances mécaniques)	27
2.4.2 Propriétés physico-chimiques des BAP	28
<b>Chapitre 3 : Formulation d'un béton autoplaçant</b>	<b>29</b>
3.2 Pratique actuelle de la formulation des BAP	29
3.1 Introduction	29
3.3 Différentes techniques de formulation des BAP	30
3.3.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	30
3.3.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	30
3.3.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	31
3.3.4 Méthodes basées sur un plan d'expérience	31
3.4 Principe et application des approches	32
3.4.1 Approche Japonaise	32
3.4.2 Approche Suédoise	33
3.4.3 L'approche de la JSCE	33
3.4.4 Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC	34
3.5 Exemple de formulation	35
<b>Chapitre 4 : Fabrication, transport et mise en place des BAP</b>	<b>36</b>
4.1 Fabrication	36
4.2 Transport	36
4.3 Mise en œuvre	37
4.4. Contrôle	38
<b>Partie expérimentale</b>	
<b>Chapitre 5 : Procédures expérimentales</b>	<b>40</b>

5.1 Méthodologie et objectif de l'expérimentale	40
5.2. Identification des matériaux	42
5.2.1 Essais sur ciment	42
5.2.2 Essais sur granulats	44
5.3 Essais sur BAP frais	46
5.3.1 Essai d'étalement (Slump flow)	46
5.3.2 Essai d'étalement modifié (J. Ring)	46
5.3.3 Essai de stabilité au tamis	47
5.3.4 Masse volumique	47
5.4 Essais sur BAP durci	48
5.4.1 Essai de compression	48
5.5 Caractéristiques des matériaux utilisés	49
5.5.1 Ciment	49
5.5.2 Granulats	50
5.5.3 Eau de gâchage	53
5.5.4 Adjuvant	53
5.5.5 Les fillers	54
5.6 Formulation des BAP	54
5.7 Préparation de la gâchée	57
<b>Chapitre 6 : Résultats et interprétations</b>	
6.1. Caractéristiques rhéologique	59
6.1.1. Béton sans filler (béton témoin)	59
6.1.2. BAP avec filler de type UF5	61
6.1.2.1 Interprétations et discussion	66
6.1.3. BAP avec filler de type F50	67
6.1.3.1 Interprétations et discussion	71
6.2. Caractéristiques physiques	72
6.2.1. Béton sans filler (béton témoin)	72
6.2.2. Interprétations et discussions	72
6.2.3. BAP avec filler de type UF5	72
6.2.3.1 Interprétations et discussions	74
6.2.4. BAP avec filler de type F50	75
6.2.4.1. Interprétations et discussions	77
6.3 Aspect macroscopique des BAP testés	77

6.4 Conclusions et comparaisons	79
<b>Conclusion générale</b>	<b>80</b>
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	



# *Table des figures*

<b>Figure 1.1</b> : Les constituants du Ciment portland	06
<b>Figure 1.2</b> : Ajouts cimentaires	07
<b>Figure 1.3</b> : Adjuvants liquides	13
<b>Figure 1.4</b> : Action des superplastifiants	16
<b>Figure 1.5</b> : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale	19
<b>Figure 2.1</b> : Essai d'étalement au cône d'Abrams	22
<b>Figure 2.2</b> : Essai au V-Funnel	22
<b>Figure 2.3</b> : Essai de la boîte en L.	23
<b>Figure 2.4</b> : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)	24
<b>Figure 2.5</b> : Essai du caisson	25
<b>Figure 2.6</b> : Essai de stabilité au cylindre	26
<b>Figure 2.7</b> : Essai de stabilité au tamis	26
<b>Figure 2.8</b> : Essai de stabilité à la colonne	27
<b>Figure 2.9</b> : Résistance mécanique en compression de BAP.	28
<b>Figure 4.1</b> : Mise en œuvre d'ouvrages horizontaux	37
<b>Figure 5.1</b> : Essai de traction	43
<b>Figure 5.2</b> : Essai de compression	43
<b>Figure 5.3</b> : Essai de consistance	43
<b>Figure 5.4</b> : Essai de Prise	43
<b>Figure 5.5</b> : Appareil de Los Angeles	44
<b>Figure 5.6</b> : Essai d'équivalent de sable	44
<b>Figure 5.7</b> : l'essai de la masse volumique apparente	45
<b>Figure 5.8</b> : l'essai de la masse volumique absolu	46
<b>Figure 5.9</b> : Essai d'étalement	46
<b>Figure 5.10</b> : Essai d'étalement modifié	47
<b>Figure 5.11</b> : Essai stabilité au tamis	47
<b>Figure 5.12</b> : Mesure de la masse volumique	48
<b>Figure 5.13</b> : Essai de compression	48
<b>Figure 6.1</b> : les résultats d'essais sur BAP1	59
<b>Figure 6.2</b> : les résultats d'essais sur BAP2	62

<b>Figure 6.3</b> : les résultats d'essais sur BAP3	63
<b>Figure 6.4</b> : les résultats d'essais sur BAP4	64
<b>Figure 6.5</b> : les résultats d'essai sur BAP5	65
<b>Figure 6.6</b> : Courbe de l'influence du dosage en fillers UF5 sur le rapport E/L	66
<b>Figure 6.7</b> : les résultats d'essais sur BAP6	67
<b>Figure 6.8</b> : les résultats d'essais sur BAP7	68
<b>Figure 6.9</b> : les résultats d'essais sur BAP8	69
<b>Figure 6.10</b> : les résultats d'essais sur BAP9	70
<b>Figure 6.11</b> : Courbe de l'influence du dosage en fillers F50 sur le rapport E/L	71
<b>Figure 6.12</b> : Évolution de la masse volumique en fonction de la composition de béton	73
<b>Figure 6.13</b> : Évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton	73
<b>Figure 6.14</b> : Évolution de la résistance mécanique à 3 jours en fonction de la composition de béton	74
<b>Figure 6.15</b> : Évolution de la masse volumique en fonction de la composition de béton	75
<b>Figure 6.16</b> : Évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton	76
<b>Figure 6.17</b> : Évolution de la résistance mécanique à 3 jours en fonction de la composition de béton.	76
<b>Figures 6.18</b> : Illustration macroscopique du BAP dosé fillers UF5	77
<b>Figures 6.19</b> : Illustration macroscopique du BAP dosé 5% de fillers UF5	77
<b>Figures 6.20</b> : Illustration macroscopique du BAP dosé 10,15et 20% de fillers F50	78

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1.1</b> : Résistances mécaniques des ciments courants	7
<b>Tableau 3.1</b> : Exemples de formulations japonaises	35
<b>Tableau 5.1</b> : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ d'ACC	49
<b>Tableau 5.2</b> : Caractéristiques physiques du ciment CPJ d'ACC	49
<b>Tableau 5.3</b> : Composition chimique du ciment	49
<b>Tableau 5.4</b> : Résultats analytiques intermédiaires	50
<b>Tableau 5.5</b> : Composition minéralogique	50
<b>Tableau 5.6</b> : Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1500 g)	50
<b>Tableau 5.7</b> : Caractéristiques physiques	51
<b>Tableau 5.8</b> : Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 3000 g)	51
<b>Tableau 5.9</b> : Caractéristiques physiques	51
<b>Tableau 5.10</b> : Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1000 g)	52
<b>Tableau 5.11</b> : Caractéristiques physiques	52
<b>Tableau 5.12</b> : Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1000 g)	52
<b>Tableau 5.13</b> : Caractéristiques physiques	53
<b>Tableau 5.14</b> : Caractéristiques du superplastifiant Glenium 26	53
<b>Tableau 4.15</b> : Composition du BAP sans fillers (BAP1)	54
<b>Tableau 5.15</b> : Composition du BAP avec 5% du fillers UF5 (BAP2)	55
<b>Tableau 5.16</b> : Composition du BAP avec 10% du fillers UF5 (BAP3)	55
<b>Tableau 5.17</b> : Composition du BAP avec 15% du fillers UF5 (BAP4)	55
<b>Tableau 5.18</b> : composition du BAP avec 20% du fillers UF5 (BAP5)	56
<b>Tableau 5.19</b> : composition du BAP avec 5% du fillers UF50 (BAP6)	56
<b>Tableau 5.20</b> : composition du BAP avec 10% du fillers UF50 (BAP7)	56
<b>Tableau 5.22</b> : composition du BAP avec 20% du fillers UF50 (BAP9)	57
<b>Tableau 6.1</b> : Résultats des essais rhéologiques sur le BAP1 frais	59
<b>Tableau 6.2</b> : Résultats des essais rhéologiques sur le BAP2 frais	61
<b>Tableau 6.3</b> : Résultats des essais rhéologiques sur le BAP3 frais	62
<b>Tableau 6.4</b> : Résultats des essais rhéologiques sur le BAP4 frais	63
<b>Tableau 6.5</b> : Résultats des essais rhéologiques sur le BAP5 frais	64

<b>Tableau 6.6 :</b> Résultats des essais rhéologiques sur le BAP6 frais	67
<b>Tableau 6.7:</b> Résultats des essais rhéologiques sur le BAP7 frais	68
<b>Tableau 6.8:</b> Résultats des essais rhéologiques sur le BAP8 frais	96
<b>Tableau 6.9:</b> Résultats des essais rhéologiques sur le BAP9 frais	70
<b>Tableau 6.10:</b> Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP1	72

**L**e béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, que ce soit pour la réalisation d'immeubles de bureaux ou d'habitation, de ponts, de centrales nucléaires, .....

Après la recherche d'une amélioration de la résistance et de la durabilité, une étape supplémentaire est franchie avec les bétons autoplacants (BAP). Ces dernières possèdent une plage d'utilisation très large : des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, mais également d'utilisations diverses.

Les bétons autoplacants sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécificité est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Ils possèdent une cohésion suffisante pour pouvoir combler presque tous les types d'espaces sans ségrégation ni ressuage. Les BAP sont particulièrement bien adaptés pour le bétonnage des coffrages complexes ou comportant une forte densité d'armatures.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 1980 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure. Depuis, leur utilisation ne cesse de s'étendre en Europe et sur le continent nord américain en raison de l'intérêt économique, et des possibilités techniques.

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité. Parallèlement à cela, les BAP présentent les particularités de compositions suivantes comparativement aux bétons vibrés : volume de pâte élevé, dosage élevé de fines, rapport G/S proche de 1 et un diamètre de granulats  $D_{max}$  réduit.

En revanche, l'utilisation de quantité importante en ciment induit un coût de revient plus important d'où l'idée de la substitution d'une partie du ciment par des fines à caractère pouzzolanique ou inerte telles que les : cendres volantes, fumées de silice, fillers calcaires etc...

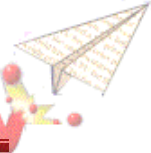
Les BAP à l'état frais possèdent des caractéristiques particulières. Des essais spécifiques ont donc été développés pour pouvoir caractériser l'écoulement, la viscosité, le blocage et la stabilité du mélange. Leur production est plus complexe que celle d'un béton conventionnel et il est difficile de maintenir les propriétés rhéologiques des BAP sur une longue période.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des additions minérales de type fillers calcaires sur les performances du BAP. Afin d'améliorer quelques propriétés mécaniques et d'étudier le comportement rhéologique de ces bétons nous avons utilisés différents dosages et types de fillers calcaires avec l'introduction d'un superplastifiant.

Notre mémoire est organisé comme suit :

***La partie théorique*** du mémoire (qui contient quatre chapitres) est consacrée aux connaissances actuelles des propriétés des BAP. Les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ces bétons sont présentées, le rôle des composants permettant d'obtenir des matériaux extrêmement fluides et stables (on s'est intéressés plus particulièrement aux fillers calcaires), ainsi que les différentes méthodes de formulation de ce béton.

***La partie pratique*** (contient deux chapitres) constitue une démarche expérimentale dont l'objectif est l'estimation de la variation des performances des BAP en fonction du type de filler. Elle consiste après la caractérisation de tous les matériaux utilisés dans notre étude (ciment, agrégats, fillers calcaires et adjuvant), et la formulation de BAP avec et sans fillers calcaires en utilisant la méthode Japonaise, la comparaison des différents résultats des essais effectués. L'interprétation et la représentation des résultats obtenus permettent de proposer quelques recommandations.



# 1. Définition et propriétés des BAP

## 1.1. Définition des bétons Autoplaçants

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

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier, notamment en zone urbaine [1]. Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation, et sa stabilité, ce béton garantit des structures résistantes et durables.

La composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + additions + eau + air) plus élevé que pour les bétons ordinaires, l'utilisation de superplastifiants et un volume de granulats faible.

En effet, les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. La quantité de granulats est donc limitée (en général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de l'ordre de 1 dans un BAP). De plus, le diamètre maximal  $D_{max}$  des granulats est compris entre 10 et 20mm. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente, en effet, lorsque le  $D_{max}$  augmente. La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation « c'est à dire un risque de séparation entre la phase suspendante et les gros granulats » et de ressuage.

Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (E/C rarement supérieur à 0.55 voire 0.50). Pour obtenir une viscosité de la pâte de ce béton qui lui conférera un certain nombre de propriétés et surtout pour limiter la ségrégation, on peut ajouter une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents viscosifiants à la formulation.

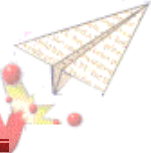
## 1.2. Domaines d'emploi

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité [1] :

✧ *Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées*

✧ *Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles*

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de formes complexes.



#### ✧ *Obtention de très bonnes qualités de parement*

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

Les BAP constituent une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, préfabrication, ouvrages d'art, tunnels, etc. Ils sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes [2].

On peut citer quelques ouvrages réalisés en BAP [3] :

- Les voiles de 16 m de hauteur sur 30 cm d'épaisseur de la salle principale du cinéma MK2 Bibliothèque, à Paris
- Les massifs d'éoliennes à Plougras, comportant une densité d'armature importante
- Le barrage Belbezet, nécessitant une consolidation des parois rocheuses et l'obstruction de cavités.

### **1.3. Impacts socio-économiques**

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique : [1]

#### ✧ *Une diminution du bruit sur site*

Le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues.

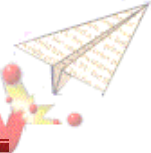
Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation.

Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain.

#### ✧ *Une diminution de la pénibilité des tâches*

Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles. Avec l'apparition des BAP, les





opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales.

Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative.

#### ✧ *Une réduction des risques d'accident*

Le fait de vibrer le béton peut avoir de graves répercussions sur la santé et peut notamment provoquer des troubles de la circulation sanguine (maladie des « mains blanches »).

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main-d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc. Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans ses ensembles, frais directs et indirects. [4]

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

### **1.4. Spécificité de la composition des bétons autoplaçants**

Pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [5,6] :

#### **1.4.1 Volume de pâte important**

Un volume de pâte important (ciment + eau + air occlus + additions) permet d'écarter les granulats les uns des autres, de diminuer les forces de frottements qui ont tendance à limiter l'étalement du béton, bloquer son passage dans les zones confinées et donc diminuer la capacité de remplissage des coffrages.

#### **1.4.2 Faible volume en gravillons**

Pour éviter le risque de blocage pendant le coulage du BAP, on utilise des granulats roulés ou concassés avec un diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm. Le rapport massique gravier /sable est proche de 1. [7]

#### **1.4.3 Grande proportion en fines**

Pour assurer la maniabilité et éviter les risques de ségrégations et de ressuage dans ce béton, il faut augmenter la quantité de fines (qui peut atteindre environ  $500\text{kg}/\text{m}^3$  de diamètre inférieur à  $80\ \mu\text{m}$ ) comme : les fillers calcaires, les fumées de silice, les cendres volantes,...

#### 1.4.4 Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité)

Pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées ; il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant, ce dernier augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser l'effet négatif de cet ajout, on ajoute généralement un agent de viscosité (appelé aussi agent colloïdal ou rétenteur d'eau). Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faible. [8]

### 1.5. Matières premières utilisées dans les BAP

Pour obtenir un béton de bonne qualité, il faut choisir judicieusement ses constituants (choix portant sur la « quantité » et la « qualité » de ces constituants). Pour cela une connaissance approfondie des matériaux intervenant dans la composition du béton s'avère primordiale

Les BAP sont des bétons à six composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Ils se distinguent des bétons traditionnels par la présence, d'une part, de fortes teneurs en additions minérales et, d'autre part, d'agents colloïdaux. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire.

#### 1.5.1. Les liants

##### 1.5.1.1 Le ciment

Selon la norme ENV197 [ou selon la norme NBN B 12-0015(1993)] : « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau » [9].

Les principaux constituants du ciment portland sont :

- Le silicate tricalcique ( $C_3S$ ) ..... $3CaOSiO_2$
- L'aluminate tricalcique ( $C_3A$ )... $3CaOAl_2O_3$
- Le silicate bicalcique ( $C_2S$ )..... $2CaOSiO_2$
- Le ferroaluminate tetracalcique ( $C_4AF$ ) .....  
 $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$

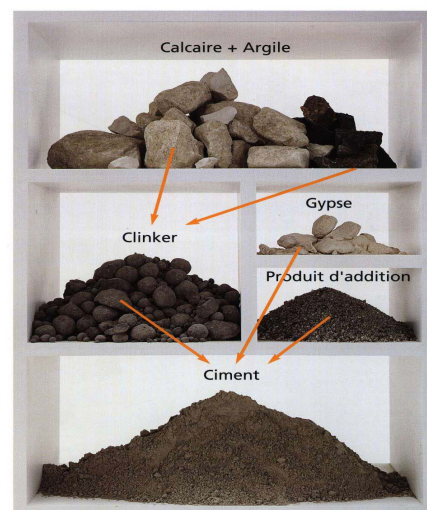


Figure 1.1 : Les constituants du Ciment portland

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 :

Classes	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )			Temps de début de prise (mn)
	R à 2j	R min à 28j	R max à 28j	
32,5	/	>32,5	<52,5	>90
32,5R	≥13,5			
42,5	≥12,5	>42,5	<62,5	>60
42,5R	≥20			
52,5	≥20	>52,5	/	
52,5 R	≥30			

**Tableau 1.1** : Résistances mécaniques des ciments courants [9].

Les classes «R», rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...etc.

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments, mais compte tenu des exigences de démoulage au jeune âge, le ciment le plus employé est le ciment portland ou de haut fourneau (CPA-CEMI 52.5 ou 42.5).

### 1.5.1.2 Les ajouts minéraux

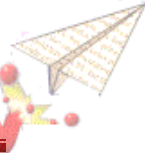
Les ajouts minéraux sont définis par la norme européenne provisoire ENV 206 « Béton. Performance, production, mise en œuvre et critère de conformité » comme suit : « Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulière » [10].

Il existe deux types d'additions :

- ▶ Les additions quasiment internes (de type I) : comme les fillers (ou fines) par exemple le calcaire [prEN12620].
- ▶ Les additions à caractères pouzzolanique ou hydraulique latent (de type II) : comme, les cendres volantes (conformes à la norme EN 450) et les fumée de silice (conformes à la norme prENXXXX<sup>1</sup>) [9].



**Figure 1.2** : Ajouts cimentaires (de gauche à droite) : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné.



L'utilisation des ajouts minéraux possède des bénéfices fonctionnels, économiques et écologiques [6].

#### ✧ *Bénéfices fonctionnels*

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Elle diminue la demande en eau (à l'exception des particules très fines qui augmentent la demande en eau vu leur grande surface spécifique).
- La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

#### ✧ *Bénéfices économiques*

- La majorité des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries (exploitation des déchets).
- Le remplacement du ciment (qui est un grand consommateur d'énergie lors de son processus de fabrication) par des ajouts minéraux permet de réduire le coût de fabrication du béton.

#### ✧ *Bénéfices écologiques*

- L'utilisation des sous-produits permet de les éliminer de la nature, tout en diminuant la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire.
- L'ajout minéral peut être sous forme de particules minérales fines qui correspondent à des additions normalisées ou non, ou des particules ultrafines telles que les fumées de silice.

### 1.5.1.2.a Les fillers

#### ✧ *Définitions*

« Les fillers sont des matières minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui, après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques » [9].

Les fillers sont des matériaux minéraux provenant de roches massives ou de gisements alluvionnaires [10].

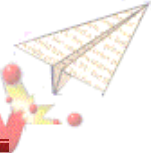
Un filler est dit : - Siliceux s'il contient au moins 90% de silice  
- Calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium

Il est désigné par sa roche d'origine dans les autres cas.

► **Les fillers calcaires** : ce sont des produits secs, finement divisés, issus de la taille, du sciage ou du travail de la roche naturelle calcaire.

Ce sont principalement des sous-produits générés :

- dans l'industrie de la chaux,
- lors de l'extraction de granulats calcaires,



- dans l'industrie de la pierre ornementale [11].

Les fillers calcaires peuvent être introduits à plus de 5% de la composition d'un ciment pour autant que leur teneur en calcaire soit supérieure à 75% en masse et qu'il ait une teneur en argile et en matières organiques compatible avec les exigences de la norme NBN B 12-001 [9]. L'incorporation des fillers peut se faire en cimenterie (fabrication du ciment) ou dans la bétonnière.

#### ✧ *Caractéristiques physiques des fillers calcaires*

La caractérisation physique des fillers calcaires porte sur les 3 aspects suivants :

- a) *Distribution de taille des particules* : la mesure de la granulométrie des fillers se fait soit par diffraction laser, soit par tamisage en voie humide
- b) *Mesure de la surface spécifique* : elle se fait soit par adsorption d'azote « méthode BET », soit par perméabilité et calculée à partir de la distribution des tailles des particules résultant de l'analyse par diffraction laser
- c) *Estimation de la forme des grains* : La forme des particules est estimée via une série de paramètres calculés par analyse d'images [11].

#### ✧ *Caractéristiques chimiques des fillers calcaires*

Les fillers calcaires se présentent sous la forme de poudres non abrasives, (non corrodantes), principalement constituées de :

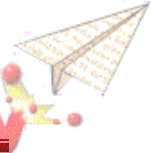
- ▶ Cristaux rhomboédriques de : calcite  $\text{CaCO}_3$ , dolomie  $(\text{Ca Mg})_2\text{CO}_3$  et quartz ( $\text{SiO}_2$ ).
- ▶ Quelques carbonates, associés aux gisements (composants mineurs) tels que : la sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ), l'ankérite  $(\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$ ) et la magnésite ( $\text{Mg}_2\text{CO}_3$ )
- ▶ Quelques silicates, des oxydes et des hydroxydes, et plus généralement des argiles [11].

#### ✧ *Action des fillers calcaires*

Diverses études suggèrent que l'addition de filler au BAP a des effets sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci, et ces effets sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux.

Différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais (Nehdi et al, 2000 et Ghezal et al 2002). D'autre part, on signale que le retrait et le module d'élasticité dépendent non seulement des effets de fillers mais également du volume de la pâte (Bui et al 1999; Gram et al 1999 et Persson, 2001) [12].

Zhu et al, 2004 ont étudié l'influence de différents types de fillers calcaires. Leur étude sur bétons montre que la finesse des fillers calcaires a peu d'effet sur la demande en superplastifiant et mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton vibré avec les mêmes rapports eau/liant. [1, 12].



### a) Effet granulaire

L'effet granulaire concerne toutes les modifications induites par la présence de particules fines ou ultrafines au sein du squelette solide [11].

L'effet filler dépend de la granulométrie du filler ; Si les particules remplissent les vides du squelette granulaire (granulats, sable et ciment) et en chassent l'eau, l'effet sur l'ouvrabilité sera favorable et la quantité d'eau nécessaire pour une même ouvrabilité sera réduite.

L'introduction de fines va alors augmenter la maniabilité et la fluidité des mélanges à l'état frais (à dosage en eau constant) pour l'état durci, les fillers provoqueront une modification de la porosité et de la compacité d'où amélioration des performances mécaniques et de la résistance à la pénétration aux agents agressifs.

Si la quantité d'eau nécessaire pour disperser les particules est plus importante lors de l'introduction d'un filler (granulométrie trop grosse ou plus fine que celle du ciment), la porosité va augmenter et les performances de durabilité vont baisser [13].

### b) Effet physico-chimique

Les fillers calcaires ne se comportent pas de manière inerte vis-à-vis des constituants des mortiers ou des bétons auxquels ils sont ajoutés ; ils vont donner lieu à différentes réactions physico-chimiques [13].

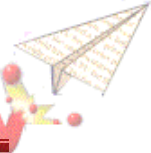
De nombreux travaux ont montré que l'hydratation du silicate de calcium  $C_3S$  est accélérée en présence de filler calcaire (Chloup-Bondant et O.Evrard, 1996) (Pera & al, 1999) (Kakali & al, 2000). La germination du gel de tobermorite (C-S-H) est activée préférentiellement au contact des grains calcaires (processus lié à l'effet de nucléation hétérogène puisque le calcaire ne participe à aucune réaction chimique). Mélangés au ciment, les fillers calcaires sont connus pour favoriser la formation des C-S-H et de la portlandite] (Pera & al, 1999). Cet effet semble d'autant plus prononcé que le filler employé est fin [Bosiljkov, 2003. Bosiljkov, 2003].

L'accélération de la vitesse d'hydratation induit une augmentation des résistances dans les premiers jours [Escadeillas, 2004]. Le surplus d'hydrates, par rapport au témoin sans addition, semble diminuer au fur et à mesure de l'hydratation pour devenir négligeable à 28 jours [Voglis, 2004].

La réaction entre le carbonate de calcium et l'aluminate de calcium hydraté donne lieu à la formation de carboaluminate de calcium hydraté  $C_3A.CaO_3.11H_2O$  (MCA). Cette réaction, mise en évidence par [Ferrand en 1956] a le plus souvent été étudiée sur des mélanges (filler calcaire,  $C_3A$ , eau) ce qui a permis de caractériser le MCA. [Bonavetti, 2001 ; Grandet & Ollivier, 1980].

Le mécanisme proposé pour la formation du carboaluminate est la combinaison entre les  $CO_3^{2-}$  issus de la dissolution lente du  $CaCO_3$  et le monosulfate ou le trisulfate de calcium hydraté. Lecomte observe au microscope électronique que le MCA cristallise préférentiellement au niveau de l'auréole de transition, en lieu et place de la portlandite. Le MCA, de plus petite taille, augmenterait la résistance et diminuerait la perméabilité.

Le développement de la résistance (phénomène physique) dépend aussi de la façon dont les hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons. Ceci



explique l'activité des additions, même si, par ailleurs, elles peuvent être considérées comme chimiquement inertes dans leurs conditions d'utilisation. [Baron & Ollivier, 1996] [11].

#### 1.5.1.2.b Les cendres volantes

Cendre volante = poudre fine constituée principalement de particules vitreuses, de forme sphérique, dérivée de charbon, ayant des propriétés pouzzolaniques et composée essentiellement de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ; la proportion de  $\text{SiO}_2$  réactif constitue au moins 25% de la masse. (Définition donnée par l'Euronorme EN 450 « cendres volantes pour béton »). [9]

Les cendres volantes sont caractérisées par un diamètre de 10 à 1000 $\mu$ , elles peuvent être tamisées ou broyées. La finesse de broyage agit sur l'effet des cendres, sur la rhéologie du béton et aussi sur la vitesse de réaction avec les partenaires du mélange réactif.

Les cendres volantes ont influent sur le béton frais ; du fait de leur forme granulométrique la plus arrondie, elles introduisent une lubrification du mélange frais et en augmentent l'ouvrabilité.

#### 1.5 .1 .2.c Fumées de silice

L'idée de l'utilisation des fumées de silice dans le béton est née dans le but de minimiser la pollution de l'environnement.

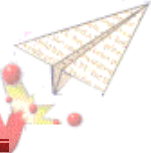
Afin de limiter les déchets polluants de l'industrie du silicium et de ses alliages, les pays scandinaves ont utilisé les fumées de silice comme un ajout dans le béton. Cependant, le développement de la technologie des adjuvants et surtout les superplastifiants hauts réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice, et a contribué à l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci [6].

##### *i. Définition*

Selon la norme NF P 18-502 « fumées de silice » : il s'agit de : « poudre amorphe divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage » [14].

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferro-alliages contenant du silicium comme le (FeSi, CaSi). Ils proviennent de la condensation de vapeurs de SiO qui sont produites dans un four à arc électrique à une température de 2000°C où le quartz est réduit à l'état de silicium. Dès que ces vapeurs de SiO entrent en contact avec l'air dans les parties les plus froides du four, elles s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice.

Selon la norme NF P 18-502, on distingue deux classes A et B : les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et les plus fines. En effet, à cause de leur très grande finesse (100 fois plus fines que les grains de ciment) ; et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, la proportion des fumées de silices est limitée à 10% du poids de ciment. Leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant [14].



## ii. Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton

La finesse et la forme vitreuse des fumées de silice font d'elles un produit très réactif, elles peuvent agir dans le béton selon trois mécanismes :

- ✧ **Effet pouzzolanique** : La finesse de ses particules lui permet de réagir rapidement avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H. On note alors une augmentation de la résistance au jeune âge (dès 7 jours).
- ✧ **Effet physico chimique** : La réaction chaux – fumées de silice permet aussi de diminuer la porosité du béton, et de le rendre plus compact et imperméable.
- ✧ **Effet physique** : Les vides présents entre les grains du matériau sont comblés par les particules ultrafines des fumées de silice, augmentant ainsi la compacité du mélange. [15]

## iii. Effets des fumées silice

### ✧ Effet sur l'ouvrabilité du béton frais

La présence des fumées de silice requiert 1 kg d'eau par kg de cendre ; sans cet apport, l'ouvrabilité est diminuée. Vu leur finesse, les fumées de silice diminuent le risque de ressuage et de ségrégation et assurent une meilleure stabilité.

### ✧ Effet sur le béton durci

L'emploi des fumées de silice permet de diminuer la porosité du béton et d'augmenter son imperméabilité et sa résistance en compression, de plus, il réduit la quantité de chaleur développée dans le béton ce qui permet de minimiser le risque de fissuration. [9]

## 1.5 .1 .2.d Laitier de haut fourneau

Selon la norme NF P 18-506 «Additions pour béton hydraulique. Laitier vitrifié moulu de haut fourneau» ; « le laitier vitrifié moulu est une addition du type II. Il provient du laitier vitrifié (granulé ou bouleté), coproduit de la fabrication de la fonte, obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion ». [14]

La composition chimique du laitier est relativement constante, car pour permettre le refroidissement de la fonte, la composition chimique des matières premières doit être bien ajustée. Tandis que sa composition minéralogique dépend de son mode de refroidissement, un laitier est d'autant plus vitreux que le refroidissement est rapide.

En effet, les ajouts minéraux influents différemment les uns des autres sur les propriétés du béton, les cendres volantes et les laitiers permettent un maintien d'ouvrabilité plus long, contrairement aux fillers calcaires qui favorisent la prise du matériau. La fumée de silice, vu son important module de finesse, permet d'augmenter la compacité et donc la résistance mécanique.



## 1.5 .2 Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives.

Les granulats sont définis par la norme P18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées [14]. On distingue :

- a) **Les granulats naturels** : issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection).
- b) **Les granulats artificiels** : qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Dans les BAP, la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées. Le rapport massique G/S est de l'ordre de 1. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés et concassés. Néanmoins, comme dans le cas des bétons traditionnels, la forme des granulats a une influence sur la rhéologie des BAP.

## 1.5 .3 Adjuvants

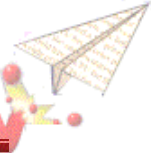
Selon la norme [Pr EN206 :1997], un adjuvant est défini comme suit : « produit ajouté au béton durant le processus de mélange, en petite quantité par rapport à la masse du ciment, pour modifier les propriétés du béton frais ou durci » [9] .

On utilise les adjuvants surtout pour :

- ▶ Diminuer le coût des constructions en béton.
- ▶ Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
- ▶ Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.
- ▶ Obvier à certaines urgences durant le bétonnage.



**Figure 1.3** : Adjuvants liquides (de gauche à droite) : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur



### 1.5 .3.1 Classification des Adjuvants

Les adjuvants sont des produits à l'état liquide ou solide qui sont ajoutés à une formulation normale, et à une dose inférieure à 5% en poids du composant ciment.

Les adjuvants sont généralement classés selon leur période d'actions principales, et favorables. Ils sont destinés à agir sur le composite : à l'état frais ; durant de la prise ; durant le durcissement et après durcissement. [9 ; 14 ; 16]

#### 1.5 .3.1.a Adjuvants agissant sur les propriétés du béton à l'état frais

L'exigence principale concerne la facilité de mise en œuvre (l'ouvrabilité), sans affecter le rapport eau/ciment. Sont classés dans cette catégorie : les agents réducteurs d'eau ; les agents hautement réducteurs d'eau (superplastifiants).

*Remarque :* Les dosages d'adjuvants sont exprimés en pourcents en poids par rapport au poids du ciment.

##### ➤ *Réducteurs d'eau (plastifiants –réducteurs d'eau)*

Le réducteur d'eau est en dosage inférieur à 0.5% ; de nature chimique : lignosulphonates, acides hydrocarboxyliques.

L'emploi de ce produit est très simple, il est ajouté à l'eau de gâchage à un certain dosage recommandé par le fabricant. En dose exagérée ce type d'adjuvant peut retarder la prise et /ou entraîner de l'air ce qui diminue la résistance du béton. A consistance égale, il permet de réduire le dosage en eau et ainsi d'augmenter la résistance mécanique du béton, et à dosage en eau constant, il permet d'augmenter l'affaissement au cône d'Abrams

##### ➤ *Superplastifiants hautement réducteurs d'eau*

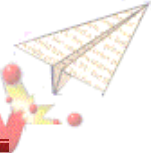
Le superplastifiant hautement réducteurs d'eau est en dosage 0.5 à 3% ; de nature chimique : lignosulphonate modifié, copolymère acrylique.

Sa définition est identique à celle du plastifiant - réducteur d'eau mais la réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement sont plus marquées. L'augmentation de la résistance à la compression à 1 jour est supérieure à celle à 28 jours, et elle s'explique par un effet thermique accélérant les réactions d'hydratation du ciment.

#### 1.5 .3.1.b Adjuvants agissant sur les processus de prise

##### ➤ *Accélérateur de prise :*

Ce sont des produits chimiques solubles dans l'eau. On distingue des accélérateurs sans chlorure (nitrite et nitrate de calcium, treithonolamine), et des accélérateurs à base de chlorure (chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ ). Le dosage est inférieur 0.5%. Ils agissent sur le processus d'hydratation du ciment en augmentant sa vitesse, ce qui entraîne un déclenchement rapide du phénomène de prise accompagné d'un dégagement de chaleur plus important.



Les accélérateurs de prise servent à maintenir un temps de prise raisonnable par temps froid, mais réduisent aussi le temps de prise aux températures plus élevées, ce qui devient un inconvénient lorsque le temps est insuffisant pour permettre le transport et la mise en place du béton. C'est pour cela que la norme exige à la fois une diminution minimale du temps de prise à 5°C, et un temps de prise suffisamment long à 20°C.

Une accélération puissante peut avoir pour conséquence une diminution de résistance à la compression. Il ya lieu attentif à l'effet des chlorures sur la résistance à la corrosion des armatures.

➤ **Retardateurs de prise :**

Ce sont des produits chimiques de nature : gluconate de soude ; lignosulphonate ; boroheptonate de sodium. Le dosage est inférieur 0.5%. Ils retardent l'hydratation et la prise du ciment dans le but de prolonger l'état plastique du béton. Dans ce cas c'est le retard du début de prise qui est recherché, mais il a pour conséquence de retarder le temps de fin de prise. Ce phénomène a pour inconvénient d'augmenter les délais d'exécution du chantier. Contrairement aux accélérateurs les retardateurs diminuent la résistance initiale mais augmentent la résistance finale du béton.

Ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi utilisés pour éviter toute discontinuité lors de reprise de bétonnage.

### 1.5 .3.1.c Adjuvants agissant sur les processus de durcissement

Ils sont intéressants surtout pour le raccourcissement du délai de décoffrage ou de mise en service.

➤ **Accélérateurs de durcissement**

Ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques au jeune âge afin de décoffrer rapidement et d'augmenter par conséquent la cadence de travail, en particulier par temps froid.

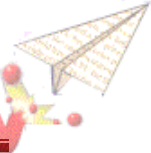
### 1.5 .3.1.d Adjuvants agissant sur les propriétés après durcissement

Il s'agit généralement de donner des performances concernant la durabilité du béton et en particulier sa résistance aux effets des cycles gel-dégel.

➤ **Les entraîneurs d'air**

Ce sont des composés d'addition généralement résineux ou à base d'huile végétale ou minérale, ils se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter lors du malaxage. Leur dosage varie entre 0.02 à 0.1%.

Ces adjuvants agissent en créant dans le béton un très grand nombre de petites bulles d'air dont 80% sont inférieures à 100 microns. Ces bulles d'air agissent comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement et participent à l'amélioration de la plasticité et de l'ouvrabilité.



**1.5.3.1.e Autres adjuvants :** il existe d'autres adjuvants qui confèrent des propriétés particulières au béton comme :

- **Les hydrofuges de masse :** ils permettent d'étanchéifier le béton, en colmatant les pores capillaires. Ils trouvent leur utilisation dans la réalisation des réservoirs d'eau, piscines, bâche à eau.
- **Les colorants :** ils agissent sur les caractéristiques d'aspect.

### 1.5 .3.2 Superplastifiant

#### a) Définition

Selon la norme NA774, un superplastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

Ce sont des produits d'addition pulvérulents extrêmement fins qui permettent de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et / ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues.

L'eau initialement piégée entre les blocs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place. [1 ; 6 ; 8 ; 14 ; 17]

#### b) Action d'un superplastifiant

Lorsqu'il est introduit dans un mélange, l'action d'un superplastifiant se décompose selon 3 mécanismes :

- ▶ Une partie est absorbée.
- ▶ Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates.
- ▶ Une partie, en excès, reste en solution.

Les molécules des superplastifiants viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Elles peuvent agir soit :

- ❖ Par formation d'une couche lubrifiante isolant ces grains de ciment les uns des autres (ex : les mélamines sulfonées).
- ❖ En créant des forces de répulsions suffisantes pour empêcher le contact entre les grains (ex : les polynaphtalènes sulfonés).
- ❖ En réduisant la tension superficielle de l'eau par rapport au ciment (ex : les lignosulfonates de Ca ou Na modifiés).
- ❖ Par le nouveau mécanisme d'action successif : la première agit immédiatement et la seconde au fur et à mesure que la basicité du mélange augmente. Ce qui explique le prolongement de l'ouvrabilité sans effet retardateur (ex : le polycarboxylique d'éther).

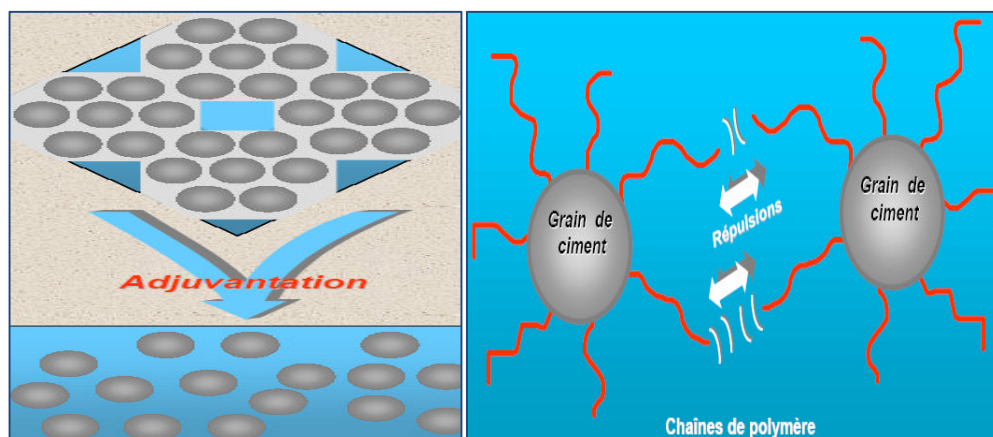


Figure 1. 4 : Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment.

### c) Effets des superplastifiants

L'ajout d'un des superplastifiants permet d'obtenir :

- ✓ De longs maintiens d'ouvrabilité,
- ✓ Des bétons à faible rapport E/C,
- ✓ De très hautes performances mécaniques à court et long termes,
- ✓ Des bétons à très haute durabilité, Des parements de meilleure qualité.

### d) Les différentes classes superplastifiants

Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes:

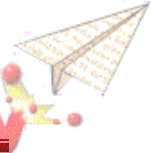
- ✓ copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonâtes (**PNS**).
- ✓ copolymère formaldéhyde mélamine sulfonâtes (**PMS**).
- ✓ polymère avec fonction acrylate (**PA**).
- ✓ polymère avec des fonctions carboxylate (**PC**).
- ✓ monomère avec les fonctions phosphorâtes et/ou carboxylate (**MPC**).

### e) Compatibilité ciment/superplastifiant

La réaction du superplastifiant avec le ciment peut entraîner certains désagréments. D'après Aïtcin et al, certaines combinaisons ciment-superplastifiant sont dites compatibles c'est à dire qu'on peut fabriquer un béton ayant un grand affaissement initial qui se conserve dans le temps (de la fabrication jusqu'à la mise en place du béton sur chantier) alors que d'autres combinaisons sont incompatibles, c'est à dire que l'affaissement initial élevé obtenu à l'aide du superplastifiant est rapidement perdu. Il est donc nécessaire de vérifier rapidement la compatibilité entre un superplastifiant et un ciment donné. [17]

### 1.5 .3.3 Agents de viscosité

Les agents de viscosité sont des polymères qui ont été développés pour éviter le délavement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau. Il s'agit généralement de dérivés cellulosiques (à base de méthyle cellulose et d'hydrox-éthyle), de polysaccharides (qui sont obtenus par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane), ou



de suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Ils sont de différentes natures et peuvent être classés en 3 catégories en fonction de leurs mécanismes d'action :

- **Adsorption** : la longue chaîne de polymère adhère à la périphérie des molécules d'eau. Cela a pour effet d'adsorber et de fixer une partie de l'eau d'ajout, il y a augmentation de la viscosité d'eau d'ajout et donc de la pâte de ciment.
- **Association** : les molécules au contact de la chaîne de polymère développent des forces d'attraction. Le mouvement de l'eau est ainsi bloqué par la création d'un gel et sa viscosité est augmentée.
- **Entrelacement** : pour un faible taux de cisaillement et particulièrement pour une forte concentration, la chaîne des polymères peut s'entrelacer et s'enchevêtrer ce qui augmente la viscosité apparente. L'enchevêtrement peut se délier lorsque la vitesse de cisaillement augmente. La chaîne de polymère s'oriente alors dans le sens de l'écoulement ce qui diminue la viscosité apparente.

La propriété de la plupart des adjuvants chimiques de réduire l'eau est recherchée pour deux raisons. En abaissant la quantité d'eau de gâchage nécessaire, ils augmentent la résistance à la compression pour une teneur en ciment et un affaissement donnés. Ceci permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton. Il ne faut toutefois pas pousser trop loin l'économie de ciment; cela pourrait nuire à la qualité du béton, par exemple, quant à l'absorption, la perméabilité, la durabilité.

Les adjuvants de béton sont des produits chimiques qui modifient principalement : les solubilités ; les vitesses de dissolution et l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique. Ces avantages sont subordonnés à la bonne utilisation, à la connaissance des effets secondaires et d'autres risques. Un adjuvant ne peut pas compenser un matériau de mauvaise qualité, ou un travail mal exécuté [18].

#### 1.5 .4 L'eau de gâchage

L'eau est l'un des ingrédients des bétons, on pourrait même dire qu'il est le plus important avec le ciment. En effet, l'eau que l'on introduit dans le béton lors du gâchage accomplit deux fonctions: une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologique d'un liquide, et une fonction chimique puisqu'elle contribue au développement de réactions dite d'hydratation. Elle agit d'une façon antinomique sur deux propriétés essentielles qui sont: la consistance et la résistance.

Donc, pour le gâchage du mélange de béton, on utilise une eau non polluée avec une quantité limitée de sel dissous. Le dosage en eau influe de manière considérable sur la viscosité et la capacité d'auto compaction, il est donc indispensable de bien jauger l'eau de gâchage. Il est également très important de prendre en compte l'humidité des granulats et plus spécialement celle du sable. On tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

## 1.6 Propriétés des bétons autoplaçants

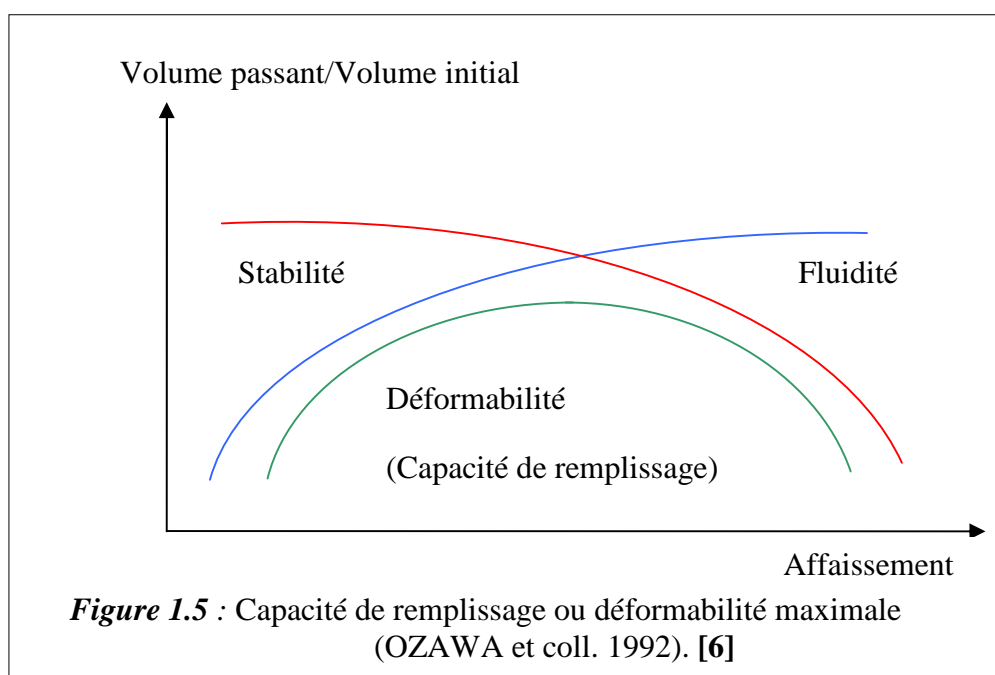
Le BAP doit se déformer dans les coffrages pour contourner les obstacles qu'il peut rencontrer durant son écoulement. Cette déformation doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation de ses différents constituants.

La capacité de remplissage d'un béton est un indice d'ouvrabilité qui nous renseigne sur la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation d'un béton durant son écoulement (OZAWA et coll. 1992) [6 ; 19].

En plus de la qualité du béton (composition et teneur en liant, rapport E/L, teneur en ajout chimique,...etc.), la capacité de remplissage est affectée par la forme des coffrages, l'espacement des armatures et la méthode de mise en place du béton.

Une étude expérimentale a été réalisée par OZAWA et coll. (l'essai de la boîte, capacité de remplissage ; 1992) [6] pour évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères. Avec cette étude, OZAWA et coll (Figure I.2) ont montré que lorsque l'affaissement est faible, les frictions entre les particules augmentent, l'écoulement est ainsi arrêté. Par contre lorsque l'affaissement est élevé les granulats cisailent le mortier et se rapprochent les uns des autres ceci n'étant rien d'autre que la ségrégation.

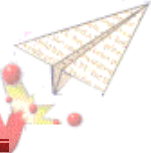
Donc, pour garantir une bonne capacité de remplissage il est nécessaire d'augmenter la déformabilité du béton et de diminuer le risque de ségrégation (assurer une bonne stabilité).



## 1.7 Cahier des charges d'un BAP

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. Notre propos sera donc focalisé sur leur cahier des charges en termes de rhéologie, dont le détail est décrit ci-dessous.

Le BAP se comportant comme un fluide binghamien, cela se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles.



Il doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées. Pour cela, une grande fluidité du béton pris dans sa globalité n'est pas une condition suffisante. Il faut que le béton présente une bonne résistance à la ségrégation dynamique, en phase d'écoulement dans une zone confinée, pour rester homogène, et que tel, il ait des caractéristiques rhéologiques suffisamment faibles pour assurer un débit de mise en place convenable.

Il doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort, car cela génère une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage.

Il faut s'assurer de leur pompabilité, le pompage apparaissant comme le moyen de transport naturel de ces bétons [20].

Enfin, on conclut que la formulation de ce type de bétons n'est pas aussi simple que dans le cas des bétons ordinaires car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : la fluidité et la stabilité. Pour cela il est nécessaire d'ajouter un agent de viscosité, d'augmenter la quantité des ajouts minéraux, et de choisir des teneurs appropriées de sable et de granulats ; avec une bonne composition de la pâte de ciment.

## 1.8 Diverses appellations des BAP

Il existe plusieurs termes définissent le BAP comme : béton autocompactant (SCC : self compacting concret en anglais), béton autonivelant, ou béton hyperfluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de la construction est béton autoplaçant, terme utilisé dans ce travail [1].

L'habitude a été prise de décliner les BAP en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant", ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc...) La seconde désigne sous l'appellation "béton autonivelant", ou BAN, les bétons destinés aux applications horizontales (dalles). Dans cette catégorie, il faut ajouter les mortiers autonivelant, qui connaissent un succès important pour les chapes (jusqu'à être désignés par extension par "chapes fluides").

Chaque famille de BAP est formulée suivant un même principe, mais possède néanmoins certaines particularités. Par exemple, la formulation des BAN comporte a priori moins de contraintes que celle des BAP. Dans leur cas, seul l'essai d'étalement est couramment effectué. L'essai à la boîte en L n'a pas de réelle utilité, puisque les dalles sont des milieux peu confinés.

Il est à noter que les BAN doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'autonivellement. La mesure du temps pour obtenir l'étalement final, ou encore un étalement de 50cm, est à ce titre une donnée utile pour évaluer la viscosité. Il est regrettable en revanche que la stabilité des BAN ne soit que rarement contrôlée avec l'essai au tamis [21].





## 2. Caractérisation d'un béton autoplaçant

### 2.1 Introduction

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant: sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité (vis à vis de la ségrégation et du ressuage). La formulation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique une composition spécifique.

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ses deux principales caractéristiques: la fluidité et l'homogénéité.

### 2.2 Fluidité

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant.

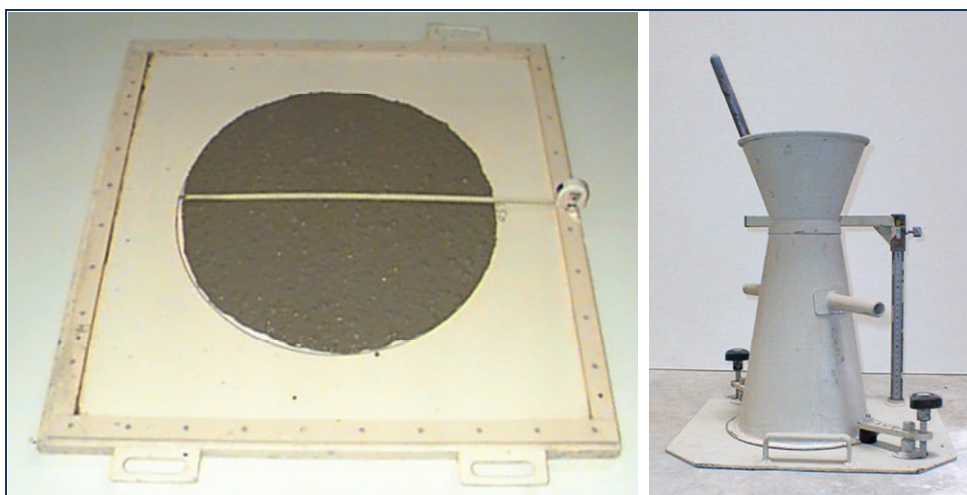
L'essai de référence pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai au cône d'Abrams. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206) [1]. L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

#### 2.2.1 Essai au cône d'Abrams

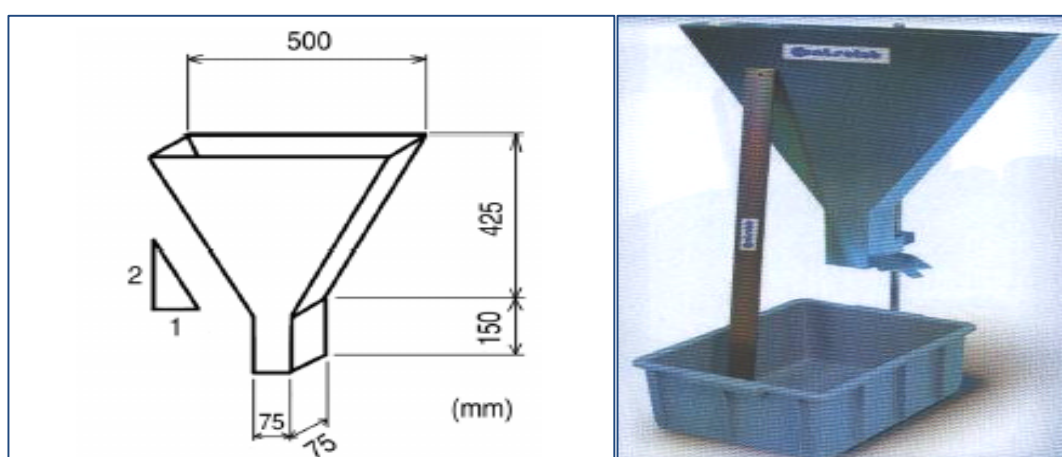
L'essai classique au cône d'Abrams (Figure 2.1) est utilisé pour mesurer la consistance d'un béton. Il est simple à réaliser et ne demande qu'une faible quantité de matériau (6 L). Il peut donc être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site [1]. Le principe de cet essai est de réaliser une galette de béton et de mesurer son diamètre. Pour un BAP la valeur visée de l'étalement est de 60 à 75cm (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) avec un affaissement supérieur à 25 cm [20].

#### 2.2.2 Essai au V-Funnel

L'essai au V-funnel (Figure 2.2) est utilisé généralement pour étudier la viscosité du matériau. Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 l de béton passant à travers une ouverture étroite. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante [1].



**Figure 2.1 :** Essai d'étalement au cône d'Abrams



**Figure 2.2 :** Essai au V-Funnel. [1]

### 2.2.3 Essais de l'Orimet-test

Il a le même principe que les essais précédents. Il s'agit d'un tube dont l'extrémité inférieure est un cône inversé de 8 cm de diamètre. Après remplissage du tube vertical avec un échantillon de 10 l de béton, la trappe située sous l'ouverture conique est ouverte. Le temps d'écoulement de la totalité de l'échantillon est enregistré et ne doit pas dépasser 5 s pour les BAP [1].

L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du matériau et l'essai au V-Funnel est relié à la viscosité, bien que le seuil d'écoulement soit également mobilisé aux parois du dispositif. Le résultat d'un essai empirique seul n'est cependant pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton. Quelques exemples montrent que deux mélanges de béton ayant une même valeur d'affaissement peuvent avoir un comportement différent lors de l'écoulement. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux doivent donc être déterminées.

La grande fluidité des BAP est un de leurs atouts majeurs puisqu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. Cependant, si cette propriété est

nécessaire, elle n'est pas suffisante pour qu'un béton soit considéré comme autoplaçant. La stabilité est également une caractéristique primordiale dans le cas des BAP car l'homogénéité des propriétés de la structure finale en dépend. Elle fait l'objet de la partie suivante.

## 2.3 Homogénéité

Du fait de leur fluidité, les BAP présentent un risque de ségrégation important, c'est à dire un risque de séparation entre la phase suspendante et les gros granulats. On parle de ségrégation dynamique lorsque cette séparation se produit pendant la phase de remplissage du coffrage et de ségrégation statique une fois le matériau mis en place.

### 2.3.1 Ségrégation dynamique

Différents essais sont disponibles pour mettre en évidence la capacité d'un BAP à s'écouler à travers un ferrailage plus ou moins dense.

#### 2.3.1.1 Essai de la boîte en L

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

Le principe de cet essai est remplir d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (Figure II.3) ; avec un volume de béton de 13 l après arasement. Le matériau est laissé au repos pendant 1 minute. La trappe est ensuite, permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distantes de 39 mm.

A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement  $H_1$  et  $H_2$ ).

Le taux de remplissage final  $H_2/H_1$  renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné. Il doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation. [1 ; 21]

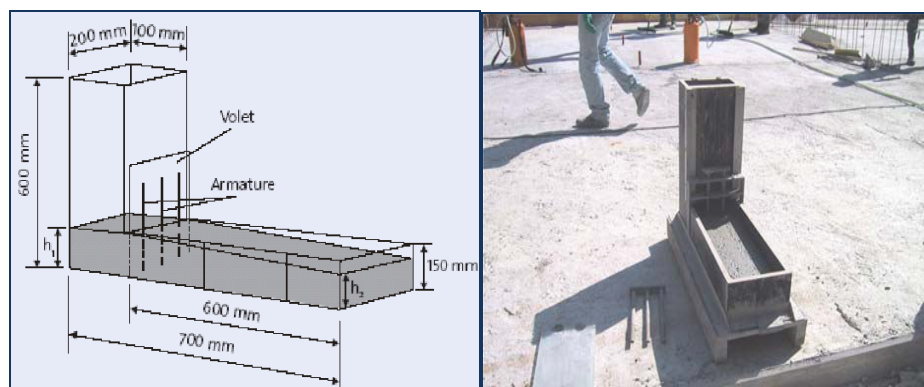


Figure 2.3 : Essai de la boîte en L. [22]



### 2.3.1.2 Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié (figure 2.5) a le même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers de barres d'armatures.

Le but de cet essai est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage. De ce fait, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique; sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures de diamètre 16 à 28 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. On déduit que le béton autoplaçant répond pleinement aux exigences recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et que la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [1 ; 22 ; 23].

Il est possible de comparer un essai d'étalement seul et un essai combiné : étalement et J-ring. La différence entre les étalements obtenus ne doit pas être supérieure à 50 mm [1].

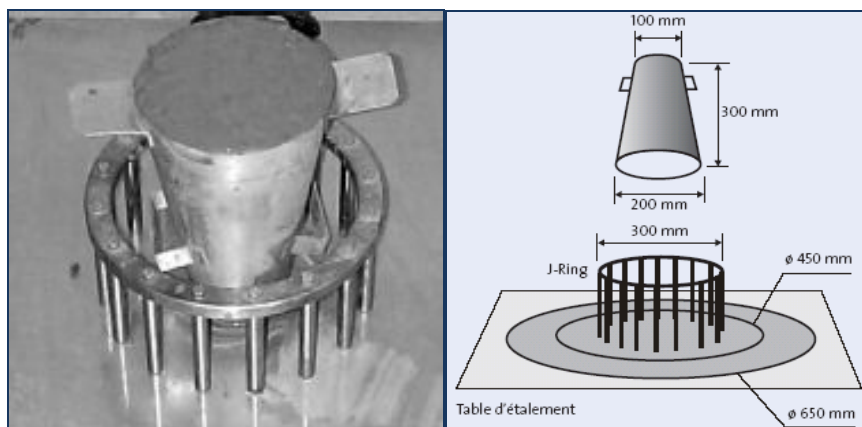


Figure 2.4 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring). [22 ; 23]

### 2.3.1.3 Essai du caisson (mesure de la capacité de remplissage)

Le ferrailage d'un coffrage est bien souvent plus complexe que celui utilisé dans les essais et n'est pas unidirectionnel. On peut donc citer l'essai au caisson, également connu sous le nom de « Kajima test », qui permet de s'assurer d'une manière plus réaliste de la capacité de remplissage d'un BAP [1].

Il s'agit de remplir à débit constant le caisson contenant 35 obstacles de 20 mm de diamètre, avec 35 litres de béton (Figure II.6). On estime l'aptitude de remplissage du béton par le rapport  $\left(\frac{A}{A+B}\right)(\%)$  [24].

Avec :

- ♦ A : rempli par le béton
- ♦ B : non rempli par le béton.

Un béton peut être considéré comme autoplaçant si le rapport est supérieur à 60%.

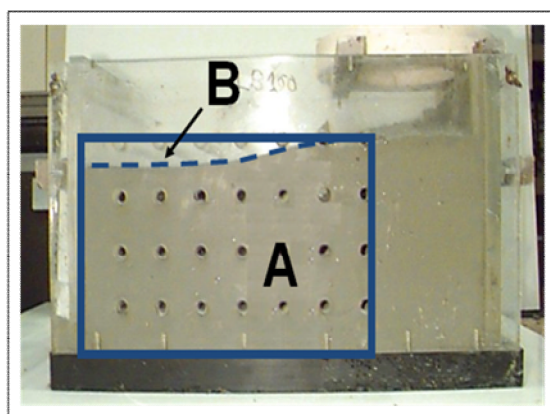


Figure 2.5 : Essai du caisson [24]

L'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai à la L-Box ou au V-funnel ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise. Cette ségrégation statique est présentée par la suite.

### 2.3.2 Ségrégation statique

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

#### 2.3.2.1 Essai au cylindre

L'essai de ségrégation au cylindre consiste à placer un cylindre (en aluminium ou en plastique) sur la surface de l'échantillon de béton à tester et à le laisser pénétrer dans le matériau (Figure II.7). Au bout de 45 s la hauteur de pénétration (Pd) est mesurée. Cette manipulation est répétée sur deux côtés diamétralement opposés de l'échantillon.

Le critère de stabilité associé à cet essai [1] est le suivant :

- si  $Pd \leq 8 \text{ mm}$  ———> le béton présente une bonne résistance à la ségrégation
- si  $Pd > 8 \text{ mm}$  ———> le béton offre une faible résistance à la ségrégation.

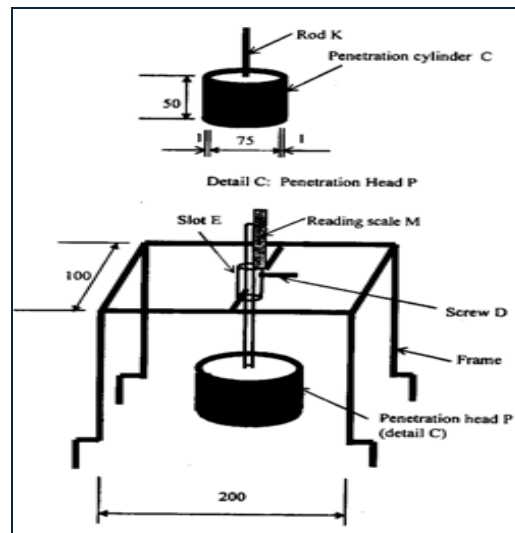


Figure 2.6 : Essai de stabilité au cylindre [1]

### 2.3.2.2 Essai au tamis

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 L de béton juste après le malaxage dans un seau, puis couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. On verse 5 kg de béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn, on mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers du tamis, et on calcule  $\Pi$  selon l'expression. [1 ; 6]

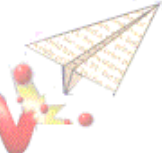
$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} \times 100}{P_{\text{échantillon}}}$$

Le critère de stabilité de cet essai [1] est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$ , alors la stabilité est satisfaisante.
- $15 < \Pi \leq 30\%$ , la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$ , la stabilité est très mauvaise.



Figure 2.7 : Essai de stabilité au tamis [25]



### 2.3.2.3 Essai à la colonne

Il s'agit de remplir la colonne (Figure II.9) et de laisser le matériau au repos pendant 1 min. Après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés. Chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés [1].

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

- si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ la masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

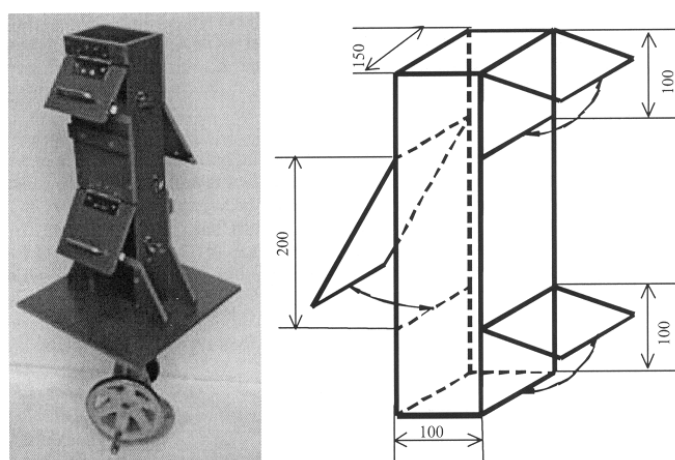


Figure 2.8: Essai de stabilité à la colonne [1]

## 2.4 Caractéristiques des BAP à l'état durci

Les essais sur béton durci visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place. Il s'agit d'essais mécaniques sur carottes, de comptage des granulats sur des éprouvettes sciées en deux pour estimer la ségrégation, d'essais d'arrachement d'armatures à différentes hauteurs d'une structure donnée [20].

### 2.4.1 Propriétés mécaniques des BAP (performances mécaniques)

La résistance mécanique d'un BAP est liée à la qualité du squelette granulaire et au rapport E/C, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28<sup>ème</sup> jour. permettant d'obtenir une très grande variété de textures, de teintes et d'aspects de surface [6].

Diverses études montrent que les superplastifiants ont des effets secondaires sur les BAP. De plus les fillers calcaires accélèrent la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours, ceci s'explique par une hydratation favorisée par une multiplication



des sites de nucléation des fines du filler, et cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante.

Les autres éléments influençant sont le volume de la pâte et le rapport E/L. des auteurs montrent que le volume de pâte a un effet réel mais limité sur la résistance en compression [26].



**Figure 2.9** : Résistance mécanique en compression de BAP. [27]

#### 2.4.2 Propriétés physico-chimiques des BAP

Plusieurs études montrent que les additions minérales comme les fillers calcaires, conduisent à une densification (accroissement de la densité), de la microstructure pour un même E/C dans un BAP plus qu'un BO. De plus, cela a pour effet de réduire la porosité de l'auréole de transition. Toutes ces modifications améliorent les propriétés de transfert et donc de la durabilité des BAP.

Ensuite, les fillers améliorent la distribution des tailles de pores et les propriétés physiques du béton (ouvrabilité et rétention d'eau). De plus, dans le BAP les fillers peuvent représenter une part importante du volume total : quand une partie du ciment est remplacée par des fillers inertes la percolation des produits hydratés n'est pas améliorée [26].





# 3. Formulation d'un béton autoplaçant

## 3.1 Introduction

La formulation d'un BAP est beaucoup plus complexe que celle des bétons ordinaires, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses.

Il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays, mais toutes les méthodes de formulation proposées dans la littérature sont basées sur les constats suivants :

« Lors d'un écoulement en milieu confiné les gros gravillons sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formulateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant. Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en superplastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc de blocage. Au contraire une variation du dosage en superplastifiant a peu d'influence sur la viscosité, mais un surdosage peut entraîner des problèmes de ressuage ». [1 ; 20 ; 21]

## 3.2 Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont fait sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En plus, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés, et l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur : [1 ; 21]

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup> (de l'ordre de 40% du volume total).
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'additions se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.
- Éventuellement utilisation d'un agent viscosant.



### 3.3 Différentes techniques de formulation des BAP

Il existe des techniques de formulation moins empiriques. On présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approches.

#### 3.3.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité [21].

#### 3.3.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton dans cette méthode est considéré comme un mélange biphasique, avec une phase solide « les granulats », et une phase liquide « la pâte » [21]. Dans le cas d'un BAP, Van Bui et Montgomery [1] montrent que :

- ♦ Il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement
- ♦ Il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte [21]. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

##### 3.3.2.1 Analyse de la méthode du volume minimal de la pâte

Les essais de caractérisation mettent en évidence le manque de fiabilité du volume de pâte calculé par cette méthode.

Les lois utilisées pour cette formulation sont issues de la littérature et concernent certains granulats, il faudrait donc déterminer expérimentalement les différents coefficients des gravillons utilisés pour la formulation.

La méthode du volume minimal de la pâte est basée sur la détermination de la quantité de pâte optimale qui aboutit à des résultats de fluidité satisfaisant  $> 65\text{cm}$ , ces essais ont permis de montrer la corrélation entre le volume de pâte et le résultat d'étalement. [21]



### 3.3.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

Le principe de formulation proposé par de Larrard se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire [1]. Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons basée sur l'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons.

Larrard et Sedran ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisés la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton comme la résistance, les déformations différées, etc.... . Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. [21].

#### 3.3.3.1 Analyse de l'approche par optimisation du squelette granulaire

Le logiciel BétonlabPro2 donne des résultats plus satisfaisants par rapport à la méthode du volume minimal de la pâte et la méthode japonaise, du point de vue à la fois technique et économique. Mais rien ne garantit que ce sont les formulations optimales. La masse des fines trouvées par le calcul est assez importante (plus de  $620 \text{ kg/m}^3$ ).

La méthode par optimisation du squelette granulaire, a permis de prouver la bonne concordance entre le seuil de cisaillement et l'étalement, ainsi qu'entre l'indice de non blocage et l'essai de la boîte en L. Cependant aucune corrélation n'a été prouvée entre l'indice de ségrégation et le pourcentage de laitance récoltée lors des essais de la stabilité au tamis [21].

### 3.3.4 Méthodes basées sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton.

Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C + A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas [21].



### 3.4 Principe et application des approches

#### 3.4.1 Approche Japonaise

Cette approche est développée à l'Université de Kochi. La formulation se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats.

Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main-d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants [1 ; 21] :

- ▶ **Dosage des gravillons** : la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire.
- ▶ **Dosage du sable** : le volume du sable est posé forfaitairement égal à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
- ▶ **Dosage du liant** : la méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- ▶ **Dosage de l'eau et du superplastifiant** : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

Deux grandeurs sont calculées : l'étalement normalisé D, et le temps d'écoulement relatif T :

$$D = (d^2 - d_0^2 / d_0^2) \quad \text{et} \quad T = (10/t)$$

Où d est le diamètre de la galette, d<sub>0</sub> la base du cône et t est le temps d'écoulement à l'entonnoir. D'après l'expérience, il faut avoir simultanément D = 5 et T = 1 pour obtenir un BAP acceptable.

D'un point de vue pratique, l'expérience montre que l'on a une relation linéaire entre D et T pour un dosage en superplastifiant donné et quand la teneur en eau varie. On peut donc déterminer, pour chaque dosage en superplastifiant et pour chaque combinaison de fines, le rapport T/D, à l'aide d'un seul mortier. Pour un rapport égal à 0.2, on ajuste alors la quantité d'eau. L'ouvrabilité et l'aptitude au remplissage du béton ainsi formulé doivent être vérifiées, à l'aide des essais présentés précédemment et les ajustements nécessaires réalisés [1 ; 15 ; 19] .



### 3.4.1.1 Analyse de l'approche japonaise

Il est difficilement envisageable d'utiliser cette méthode à la lettre, car les bétons formulés ainsi ne sont pas viables du point de vue économique. Le prix de revient de telles formules devient trop élevé, par exemple il est supérieur de 10 à 20% par rapport à celui des BAP utilisés actuellement en France [21].

Du point de vue du calcul de la proportion des granulats, cette méthode est proche des méthodes utilisées actuellement. La masse de gravillons est fixée en prenant un volume égal à la moitié de la compacité. La compacité des gravillons est déterminée par piquage des gravillons secs dans un cylindre. De plus cette méthode permet de déterminer le dosage en eau et en superplastifiant par des essais sur mortier.

La méthode japonaise donne un béton visqueux vu la quantité de pâte importante calculée pour cette méthode.

### 3.4.2 Approche Suédoise

Cette méthode est proposée par Petersson et al, 1996. Elle est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [21].

### 3.4.3 L'approche de la JSCE

La méthode est basée sur un ensemble de travaux d'enquêtes aussi bien que d'expériences acquises dans l'accomplissement de divers travaux. Elle a été proposée par la Japanese Society of Civil Engineers en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Avec cette méthode, l'autoplaçabilité est obtenue en fonction de la quantité de poudre présente dans le mélange (bétons de type poudre), ou en fonction du dosage de l'agent de viscosité (bétons de type agent de viscosité).

La quantité d'eau, le rapport eau/poudre et la quantité de poudre varient selon le type de béton considéré.

Les quantités des différents constituants sont déterminées comme suit :

- **Quantité de gros granulats** : elle doit être comprise entre 0,30 et 0,32 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de béton. La dimension maximale du granulat est limitée à 20 ou 25mm.
- **Quantité d'eau** :
  - ♦ Pour un béton de type « agent de viscosité », la quantité d'eau doit être ≤180kg/m<sup>3</sup> de béton et examinée pour chaque type d'agent de viscosité.

- ♦ Pour un béton de type « poudre », la quantité d'eau doit être comprise entre 155 et 175kg/m<sup>3</sup>.
- **Rapport massique eau/poudre :**
  - ♦ Pour le béton « type poudre », doit être compris entre 28 et 37%.
  - ♦ Pour le béton « type agent de viscosité », la quantité de poudre doit être comprise entre 0,16 et 0,19m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de béton.
- **Volume de vides :** il dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air.
- **Quantité de granulats fins :** elle se déduit des quantités précédentes (gros granulats, poudre, eau et air).
- **Quantité d'adjuvants :** elle est recommandée par les fabricants. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines). Le pourcentage de certains agents de viscosité par rapport à la quantité d'eau est donné ci-dessous :
  - ♦ Agent cellulosique : 0,15 à 0,30%
  - ♦ Agent acrylique : 3 à 5%
  - ♦ Agent glycol : 2 à 3%
  - ♦ Agent polysaccharide soluble : 0,05%

#### 3.4.4 Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [De Larrard et al 1994]

Au LCPC, T.SEDRAN et F.de LARRARD ont développé un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants comme : les distributions granulaires, les proportions du mélange, la compacité propre et la densité apparente.

Ce modèle mathématique est particulièrement intéressant pour :

- ⤴ Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés des bétons
- ⤴ Choisir le meilleur parti des matériaux pour les propriétés des bétons que ce soit à l'état frais (telles que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation) ou à l'état durci (telles que les résistances à la compression et à la traction, le retrait, le fluage).
- ⤴ Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone très ferrillée).



La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- **La proportion de liant** : elle est fixée à priori (70 % de ciment, 30 % d'addition par exemple).
- **Le dosage du superplastifiant** : il est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- **L'eau** : le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé. Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).
- **La viscosité** : elle est fixée de manière arbitraire à  $5.10^4$  La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante.
- **Les proportions granulats/ phase liante** sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée, basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [6].

### 3.5 Exemple de formulation

Le tableau suivant présente des exemples de formulations japonaises de BAP.

Tableau 3.1 : Exemples de formulations japonaises [28].

Type de béton	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Laitier (kg/m <sup>3</sup> )	Cendres (kg/m <sup>3</sup> )	Filler (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Gravillon (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Super-plastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	Agent viscosité (kg/m <sup>3</sup> )
[Nakataki et al, 1995]	200	200	100	0	704	898	165	6	0
[Hayakawa et al, 1995]	180	220	100	0	753	926	170	7,7	1,5
[Yurugi et al, 1992]	300	0	0	200	700	910	170	8	0,2



## 4. Fabrication, transport et mise en place des BAP

### 4.1 Fabrication

Les formules de BAP sont en général plus « pointues » que celles des bétons ordinaires. Les précautions et contrôles particuliers à mettre en place portent sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale, et les procédures de la fabrication des BAP qui doit intégrer les dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton, la séquence de malaxage (ordre d'introduction, temps de malaxage), la fourchette d'étalement acceptable, les variations de dosage en eau correspondantes, ainsi que les contrôles sur béton frais.

Il est nécessaire d'appréhender au stade de l'étude de formulation la sensibilité des BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau. La plage d'étalement du dosage en eau acceptable peut être obtenue en mesurant la résistance à la ségrégation du béton, les valeurs d'étalement, les taux de remplissage, et les densités en fonction du dosage en eau.

La formule possédant le plus fort dosage en eau doit présenter une stabilité satisfaisante. Celle contenant le dosage en eau le plus faible doit conduire à un temps de remplissage correct sans induire de ségrégation de la densité par manque de compactage gravitaire.

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Donc, le malaxage d'un béton autoplaçant ne nécessite pas de matériel particulier ; il s'agit juste d'un malaxeur étanche dont le temps de malaxage est généralement plus long de 50 à 100% que celui d'un béton ordinaire car on doit assurer une homogénéité du squelette granulaire d'une part, et une bonne dispersion du liant et ajouts chimiques dont les proportions sont très faibles d'autre part [6].

Le temps de malaxage est toutefois plus long que pour un béton classique, il faut que le mélange riche en éléments fins et en adjuvants soit le plus homogène possible.

### 4.2 Transport

L'hyperfluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements, à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport. La manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température. Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.





Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire.

Il est important d'appliquer les procédures de fabrication rigoureusement également pour les facteurs qui paraissent moins importants et qui sont négligés dans le cas d'un béton vibré, comme les résidus d'adjuvants dans le malaxeur, ou le reste d'eau dans le camion malaxeur, qui peuvent entraîner certains problèmes.

### 4.3 Mise en œuvre

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.



Figure 4.1 Mise en œuvre d'ouvrages

horizontaux.

Les BAP peuvent être coulés traditionnellement (à la benne) ou pompés, les coffrages doivent toutefois être étanches [21]. Les bétons autoplaçants peuvent être mis en place dans les moules par différentes méthodes [6 ; 21] :

#### ► Première méthode

Elle est traditionnelle et commune aux bétons ordinaires : elle consiste à mettre en place le béton par le biais d'une goulotte.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle favorise les phénomènes de ségrégation. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux

Selon le groupe AFGC (Association Française de Génie Civil) « bétons autoplaçants », il convient de limiter la hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m.



➤ *Deuxième méthode*

Permet d'éviter la chute du béton. Elle repose sur l'utilisation d'un tube plongeur, dans la partie basse du coffrage, immergée dans le béton frais.

➤ *Troisième méthode :*

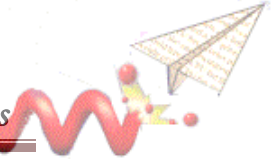
Consiste à mettre en place le BAP par le biais des moules par pompage. Cette méthode réduit les risques de bullage et favorise l'obtention de parements lisses.

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

#### 4.4. Contrôle

Les deux principaux essais pour contrôler la rhéologie des BAP sont décrits ci-après :

- △ La mesure d'étalement au cône d'Abrams : la fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams. Des valeurs de l'ordre de 600 à 700 mm correspondent à l'écoulement moyen d'un BAP.
- △ L'essai de la boîte en forme de L : la cohésion du béton et son aptitude à traverser une zone fortement armée peut se mesurer avec la boîte en forme de L. La méthode consiste à remplir de BAP une boîte contenant une zone d'armatures en mesurant la différence de hauteurs dans les parties verticales ( $H_1$ ) et horizontales ( $H_2$ ) qui doit être la plus faible possible.



## 5. Procédures expérimentales

### 5.1 Méthodologie et objectif de l'expérimentale

Notre travail expérimental a pour objectif l'étude de l'influence des différents types de fillers sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant. A cet effet, 81 éprouvettes ont été confectionnées, et la résistance mécanique a été mesurée à 3, 7 et 28 jours sur des éprouvettes cubiques 15x15x15cm

Pour cela nous avons choisi de faire varier la quantité de ciment en le remplaçant par deux types de fillers calcaires (par substitution) :

- l'un est plus fin **UF5**
- l'autre est plus gros **F50**.

Tous les types de béton ont été élaborés avec un dosage de superplastifiant constant, le même type de ciment et les mêmes granulats. Cependant, le rapport E/L est fixé au début à 0.40 (béton témoin) et variera par la suite selon le type et le dosage des fillers.

Les essais ont été effectués :

- au Laboratoire Central des Travaux Publics **LCTP** (Hussein-Dey) pour l'identification préalable du ciment utilisé.
- au laboratoire d'**ACT** (Algerian Concrete Technology) d'El Hamiz pour l'identification des granulats, les tests sur béton frais et écrasement des éprouvettes.

#### *Essais effectués*

##### *Sur ciment :*

On a procédé à la Mesure de la consistance, du temps de début et de fin de prise, de la résistance mécanique, et l'analyse chimique.

##### *Sur Gravier et sable :*

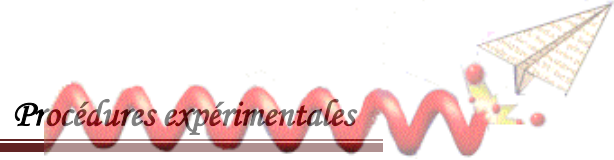
On a effectué une Analyse granulométrique, déterminé les masse volumique apparente et absolue, l'équivalent de sable, le module de finesse, los Angeles.

##### *Sur Béton frais:*

On a estimé l'Étalement, l'étalement modifié, déterminé la stabilité au tamis et on a mesuré la masse volumique apparente.

##### *Sur Béton durci :*

On a déterminé la Résistance à la compression et mesuré la masse volumique apparente.



### Matériaux utilisés

#### ➤ Le Ciment

- Le ciment utilisé dans la confection du béton est de type CPJ 42,5 provenant de la cimenterie ACC de M'sila.

#### ➤ Les Granulats

**Les granulats utilisés dans le béton sont comme suit :**

- Gravier de Bouzegza de classes 3/8 et 8/15.
- Sable roulé d'Akbou de classe 0/3.
- Sable roulé de Boussaâda de classe 0/1.

#### ➤ Les Additions

- Les Fillers calcaires employés sont de 2 types UF5 et F50 fournis par l'entreprise **ENG**.

#### ➤ L'Adjuvant

- Un seul type d'adjuvant a été utilisé : le Superplastifiant Glenium 26.

### Paramètres à varier

- Le choix du filler (deux types fillers calcaires).
- Le Dosage en fillers calcaires.
- Le rapport E/L avec l'addition du filler.

### Formulation

Pour la formulation du béton autoplaçant testé le dosage des constituants a été déterminé selon la méthode Japonaise.

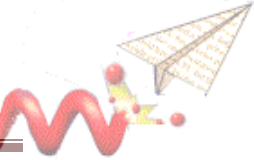
Les intervalles recommandés pour chaque constituant donné par cette méthode sont :

- ▶ Volume de gravillons limité en prenant le rapport **G/S** proche de 1.
- ▶ Volume de pâte compris entre: 330 à 400 l/m<sup>3</sup> (C+ F).
- ▶ Masse de ciment :  $M_c = 300$  à 450 Kg/m<sup>3</sup>
- ▶ Utilisation de fines.
- ▶ Dosage en superplastifiant proche de son dosage à saturation

### Bétons élaborés

#### ❖ Béton sans filler (béton témoin)

- **BAP1** sans fillers calcaires avec un dosage en superplastifiant de 2%C, avec E/C = 0.40.



❖ **BAP avec filler de type UF5**

- **BAP2** avec un dosage de **5%** du filler calcaire **UF5** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.40$ .
- **BAP3** avec un dosage de **10%** du filler calcaire **UF5** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.38$ .
- **BAP4** avec un dosage de **15%** du filler calcaire **UF5** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.32$ .
- **BAP5** avec un dosage de **20%** du filler calcaire **UF5** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.33$ .

❖ **BAP avec filler de type F50**

- **BAP6** avec un dosage de **5%** du filler calcaire **F50** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.43$ .
- **BAP7** avec un dosage de **10%** du filler calcaire **F50** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.44$ .
- **BAP8** avec un dosage de **15%** du filler calcaire **F50** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.54$ .
- **BAP9** avec un dosage de **20%** du filler calcaire **F50** ; et un dosage en super plastifiant de 2%C, avec  $E/C = 0.51$ .

Afin d'économiser le béton, suite au nombre important d'éprouvettes, les essais d'écrasement ont été effectués sur des éprouvettes cubiques.

## 5.2 Identification des matériaux

### 5.2.1 Essais sur ciment

#### *a) Essai de détermination des résistances mécaniques (NF EN 196-1)*

Le but de cet essai est de mesurer les résistances réelles d'un ciment qui se fait par essais de traction /compression sur des éprouvettes de mortier à 3 et 28 jours, cette dernière étant la caractéristique de base pour la désignation des classes.

L'essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm conservées dans l'eau jusqu'au jour de l'essai et qui sont d'abord rompues en flexion puis chacun des 2 morceaux sera soumis à l'essai de compression dans son sens transversal.

Cet essai est réalisé sur un mortier élaboré à partir de 3 mesures de sable normalisé pour une mesure de ciment (Ciment : 450 g, Sable normalisé : 1350 g, Eau : 225 g).



Figure 5.1: Essai de traction



Figure 5.2 : Essai de compression

### b) Essai de consistance

L'essai de consistance se fait à l'aide de l'appareil de Vicat. Il se fait pour déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage du ciment.

On réalise un échantillon de pâte de ciment (500g) plus des teneurs en eau suivantes : (24% ; 23.8% ; 23.4% ; 23.7% ; 23.6%) et on note à chaque fois la distance de la sonde du fond du moule à la fin de la pénétration.

La distance entre 5 et 7 cm correspond à la quantité d'eau optimale.



Figure 5.3 : Essai de consistance  
(Appareil de Vicat).

### c) Essai de prise

Avec cet essai ; on peut déterminer le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement, et la fin de prise est correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide.

Il se fait à l'aide de l'aiguille de Vicat. Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat (aiguille de 1mm<sup>2</sup> de section pesant 300g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment.

La pâte de ciment = 500 g de ciment + une quantité d'eau normalisée



Figure 5.4 : Essai de Prise  
(Appareil de Vicat)

### 5.2.2. Essais sur granulats

#### a) Coefficient de Los Angeles (NF P 18-73)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16.

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour ; après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm. Le coefficient Los Angeles [8] est calculé par la formule suivante :

$$LA = \frac{P \times 100}{5000} \dots\dots\dots$$



Figure 5.5 : Appareil de Los Angeles

Les granulats sont qualifiés comme suit :

- ♦ LA < 15 .....très bon,
- ♦ 15 ≤ LA < 20 ..... bon à moyen,
- ♦ 20 ≤ LA < 30 .....moyen à faible,
- ♦ LA ≥ 30 .....médiocre,

#### b) Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)

La valeur d'équivalent de sable exprime le pourcentage des fines contenues dans le sable et donne une indication sur la propreté du sable.

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H<sub>1</sub>) et du sédiment + flocculant (H<sub>2</sub>).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante [8]:

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \dots\dots\dots$$

Si :

- 65 < E.S < 70 % sable légèrement argileux
- E.S > 85% sable très propre



Figure 5.6 : Essai d'équivalent de sable

**c) Module de finesse (NF P 18-304)**

Le module de finesse d'un sable est défini par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5. Il est calculée pour définir la finesse du sable.

**d) Densités (apparente et absolue)**

Pour déterminer le squelette granulaire du béton. On mesure le volume absolu et apparent du sable et de chaque fraction granulaire.

**➤ La masse volumique apparente**

Pour déterminer la masse volumique apparente du granulat, on laisse tomber du gravier d'une dizaine de centimètres et sans le tasser dans un récipient de deux litres, le volume apparent de l'échantillon de gravier vaut 2 litres. Le récipient doit être arasé avec une règle par mouvement de va et vient. La pesée de cet échantillon sur une balance tarée à la masse du récipient indique la masse de gravier correspondant à cet échantillon.

La masse volumique apparente représente le rapport entre cette masse et le volume apparent correspondant.



**Figure 5.7 :** l'essai de la masse volumique apparente (les trois étapes)

**➤ La masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est mesurée sur un échantillon d'un volume apparent de l'ordre de 1 litre. Prendre un récipient gradué de 2 litres et le remplir d'un litre d'eau environ. Placer ce récipient sur une balance et tarer la balance.

Le volume absolu est mesuré en immergeant complètement l'échantillon dans le récipient gradué. En effet l'augmentation du volume de l'eau est intégralement produite par le volume des grains de gravier. La mesure de la variation de hauteur d'eau correspond donc au volume absolu du gravier.

La lecture de la masse sur la balance représente la masse de gravier correspondant à ce volume. La masse volumique absolue représente le rapport entre cette masse et le volume absolu correspondant





*Figure 5.8 : l'essai de la masse volumique absolu*

### 5.3 Essais sur BAP frais

#### 5.3.1 Essai d'étalement (*Slump flow*)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton, c'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer le diamètre étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires.

Les valeurs d'étalements au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 60 à 75cm.



*Figure 5.9: Essai d'étalement.*

#### 5.3.2 Essai d'étalement modifié (*J. Ring*)

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du blocage au droit des armatures.



**Figure 5.10:** Essai d'étalement modifié

### 5.3.3 Essai de stabilité au tamis

Le but de cet essai est d'évaluer les bétons autoplaçants vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage. En effet, on mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers du tamis, et on calcule selon l'expression.

$$\Pi = (P_{\text{laitance}} * 100) / P_{\text{échantillon}}$$

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$ , alors la stabilité est satisfaisante.
- $15 < \Pi \leq 30\%$ , la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$ , la stabilité est très mauvaise.



**Figure 5.11:** Essai stabilité au tamis.

### 5.3.4 Masse volumique

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume V (litre) et de masse M (kg) d'un échantillon de BAP frais. Ensuite, on pèse le récipient, soit de masse totale  $M_t$  en kg.

La masse volumique du béton frais sera alors :  $M_V = (M_t - M) / V$



Figure 5.12: Mesure de la masse volumique

## 5.4 Essais sur BAP durci

### 5.4.1 Essai de compression

Cet essai est pour suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement du béton à l'état durci. Les essais sont effectués sur les différents bétons à différents âges (3, 7, 28 jours).

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette. On note la charge maximale atteinte  $P$  (MN) et la surface de chargement  $S$  (m<sup>2</sup>). La contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

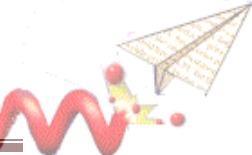
$$\sigma_c \text{ [MPa]} = P / a^2$$

Avec :

- $P$  : charge de rupture.
- $a$  : arête de l'éprouvette cubique (15cm).
- $\sigma_c$  : résistance à la compression.



Figure 5.13: Essai de compression



## 5.5 Caractéristiques des matériaux utilisés

### 5.5.1 Ciment

Les tableaux 5.1 à 5.5 résument les différentes caractéristiques mécaniques et physicochimiques du ciment CPJ d'ACC.

**Tableau5.1 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ d'ACC**

Ciments	Résistances (MPa)	Age (jours)	
		2j	28j
CPJ 42,5	Compression	20	44
	Flexion	6.1	9.3

- Ces résultats permettent de classer le ciment dans la classe : 42.5 (Tableau 1.1)

**Tableau5.2 : Caractéristiques physiques du ciment CPJ d'ACC**

Caractéristiques	CPJ	unités
Consistance normale	23,6	%
Début de prise	135	mn
Fin de prise	200	mn
Masse spécifique	3,1	g/cm <sup>3</sup>
Surface spécifique	3500	cm <sup>2</sup> /g

- La durée du temps de prise (140mn > 60mn) confirme la classe du ciment obtenue pour les résistances (Tableau 1.1).

**Tableau5.3: Composition chimique du ciment**

Composition	Teneurs en%
Silice totale (SiO <sub>2</sub> )	20.37%
Oxyde d'alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.42%
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.20%
Chaux totale (CaO)	62.58%
Magnésie (MgO)	1.39%
Anhydride sulfurique (SO <sub>3</sub> )	2.09%
Perte au feu	4.37%
Bilan chimique pondéral	100.42%

Tableau 5.4 : Résultats analytiques intermédiaires

<i>Composition</i>	<i>Teneurs en %</i>
Anhydride carbonique (CO <sub>2</sub> )	3.86%
Eau de constitution (H <sub>2</sub> O)	0.51%
Insolubles	0.93%
Carbonates(CaCO <sub>3</sub> )	8.77%

Tableau 5.5: Composition minéralogique

<i>Composition</i>	<i>Teneurs en %</i>
Silicate tricalcique (C <sub>3</sub> S)	51.51%
Silicate bicalcique (C <sub>2</sub> S)	16.62%
Aluminate tricalcique (C <sub>3</sub> A)	7.26%
Alumino-ferrite tétracalcique (C <sub>4</sub> AF)	12.77%

### 5.5.2 Granulats

Les tableaux 5.6 à 5.12 résument les différentes caractéristiques mécaniques et physiques du granulat.

#### ❖ Gravier (3/8) de Bouzegza

Tableau 5.6: Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1500 g)

<i>Ouverture des tamis (mm)</i>	<i>Poids (g)</i>	<i>Teneurs (%)</i>	
	<i>Refus cumulés</i>	<i>Refus cumulés</i>	<i>Tamisât cumulés</i>
8	181	12.07	87.94
6	1088.7	72.58	27.42
5	1335.8	89.05	10.95
2.5	1490	99.34	0.67
1.25	1500	100	/

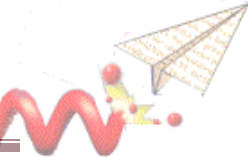


Tableau 5.7: Caractéristiques physiques

<i>Caractéristiques</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Masse volumique apparente	1.45	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Los Angeles	20	%

## ❖ Gravier (8/15) de Bouzegza

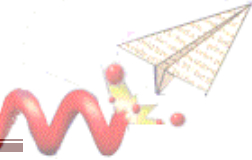
Tableau 5.8: Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 3000 g)

<i>Ouverture des tamis (mm)</i>	<i>Poids (g)</i>	<i>Teneurs (%)</i>	
	<i>Refus cumulés</i>	<i>Refus cumulés</i>	<i>Tamisât cumulés</i>
16	206.6	6.88	93.12
12.5	104.4	34.8	65.20
10	2230	74.4	25.60
8	2760	92	8
6	2947	98.24	1.76
<5	3000	100	/

Tableau 5.9: Caractéristiques physiques

<i>Caractéristiques</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Masse volumique apparente	1.42	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Los Angeles	25.5	%

- Les coefficients de los Angeles montrent que la résistance à la fragmentation des granulats 3/8 est bonne et les granulats 8/15 sont moyens.



## ❖ Sable (0/3) d'Akbou

Tableau 5.10: Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1000 g)

Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)	Teneurs (%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
5	60	6	94
2.36	212	21.2	78.8
1.16	391	39.1	60.9
0.6	736	73.6	26.4
0.3	938	93.8	6.2
0.1	989	98.9	1.1
<0.07	993	99.3	0.7

Tableau 5.11: Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.38	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.64	g/cm <sup>3</sup>
Équivalent de sable (ES)	79.14	%
Module de finesse (M <sub>f</sub> )	3.32	/

## ❖ Sable (0/1) de Boussaâda

Tableau 5.12: Analyse granulométrique (le poids de l'échantillon est 1000 g)

Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)	Teneurs (%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
0.3	315	31.5	68.5
0.15	970	97	3
0.07	995	99.5	0.5
<0.07	1000	100	/

Tableau 5.13: Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.44	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.7	g/cm <sup>3</sup>
Équivalent de sable (ES)	65	%
Module de finesse (M <sub>f</sub> )	1.28	/

- On constate d'après les résultats obtenus par l'essai d'équivalent de sable (ES) que les sables (0/3) et (0/1) sont légèrement argileux.
- Le module de finesse de sable (0/3) d'AKBOU est élevé (3.32), donc une correction de ce dernier est nécessaire par le sable (0/1) de (BOUSSAADA) qui a un module de finesse très petit (1.28).

La correction est faite selon la méthode d'Abrams :

$$S_1 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \rightarrow S_1 = \frac{2.5 - 1.28}{3.32 - 1.28} = 59.80 \%$$

$$S_2 = \frac{Mf_1 - Mf_x}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \rightarrow S_2 = \frac{3.32 - 2.5}{3.32 - 1.28} = 40.20 \%$$

Avec : S<sub>1</sub> : sable d'Akbou

S<sub>2</sub> : sable de Boussaâda.

On a trouvé les fractions suivantes :

- Sable d'Akbou : 59.80%
- Sable de Boussaâda : 40.20%

### 5.5.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans la confection du béton est l'eau potable d'Alger.

### 5.5.4 Adjuvant

On a utilisé le Superplastifiant Glenium 26 dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant :



Tableau 5.14 : Caractéristiques du superplastifiant Glenium 26.

Aspect	Liquide
couleur	brun
Masse volumique	1.08+- 0.02 g/cm <sup>2</sup>
PH	7.0+-1
Teneur en chlorures	< 0.1%
Extrait sec	24+-2%
Na <sub>2</sub> O eq	< 2%
Transport	Non classé
Étiquetage	Pas de symbole exigé.

### 5.5.5 Les fillers

On a utilisé deux types de fillers qui nous ont été fournis par l'entreprise **ENG** :

- ▶ Un filler très fin **UF5** ; (20 μm)
- ▶ Un filler plus gros **UF50** ; (500μm).

Les caractéristiques physiques et chimiques de ces fillers sont présentées dans les fiches techniques (Annexe).

### 5.6 Formulation des BAP

Pour la formulation de notre béton, on a procédé à l'optimisation de la composition suivante :

#### ❖ *Optimisation de la composition du BAP*

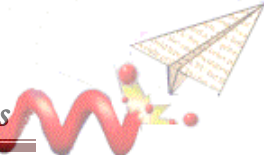
Le volume de la pâte pour 1m<sup>3</sup> du BAP : 320 l/m<sup>3</sup>

- 430 Kg/m<sup>3</sup> du ciment. .
- On fixe le volume du gravier (3/8) à 75%, et 25% pour le gravier (8/15) ; tel que G/S=1.
- On fixe le rapport E/C à 0,40 pour un béton témoin (sans fillers) ; et ce dosage va diminuer quand on ajoute les fillers.
- Le dosage en superplastifiant est fixé à 2%.
- 4 dosages du filler ont été retenus : 5% ; 10% ; 15% ; 20% du poids du ciment.

Les compositions des BAP avec et sans fillers sont présentées dans les tableaux suivants :

#### a) *BAP sans filler calcaire*

La composition du BAP témoin est présentée dans le tableau 5.15 suivant.



**Tableau 5.15: 1<sup>ère</sup> composition du BAP sans fillers (BAP1).**

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	430	Kg/m <sup>3</sup>
Eau	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>

**b) Des BAP avec filler calcaire UF5**

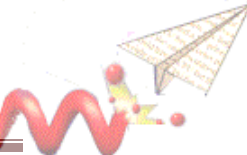
Les compositions du BAP avec filler calcaire UF5 sont présentées dans les tableaux 5.16, 5.17, 5.18 et 5.20.

**Tableau 5.15: Composition du BAP avec 5% du fillers UF5 (BAP2).**

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	408.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (5%)	21.50	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 5.16: Composition du BAP avec 10% du fillers UF5 (BAP3).**

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	387	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (10%)	43	Kg/m <sup>3</sup>



**Tableau 5.17:** Composition du BAP avec 15% du fillers UF5 (BAP4).

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	365.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.33%)	142	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (15%)	64	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau 5.18:** composition du BAP avec 20% du fillers UF5 (BAP5).

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	365.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.32%)	137	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (20%)	86	Kg/m <sup>3</sup>

**c) Des BAP avec filler calcaire F50**

Les compositions du BAP avec filler calcaire UF5 sont présentées dans les tableaux 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22 suivants.

**Tableau 5.19:** composition du BAP avec 5% du fillers UF50 (BAP6).

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	408.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF50 (5%)	21.50	Kg/m <sup>3</sup>

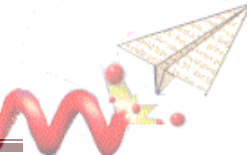


Tableau 5.20: composition du BAP avec 10% du fillers UF50 (BAP7).

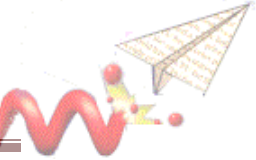
<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	387	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (10%)	43	Kg/m <sup>3</sup>

Tableau 5.21: composition du BAP avec 15% du fillers UF50 (BAP8).

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	365.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (15%)	64	Kg/m <sup>3</sup>

Tableau 5.22: composition du BAP avec 20% du fillers UF50 (BAP9).

<i>Constituants</i>	<i>Quantités</i>	<i>Unités</i>
Ciment	365.5	Kg/m <sup>3</sup>
Eau (0.40%)	172	l/m <sup>3</sup>
Sable 0/3	537.74	Kg/m <sup>3</sup>
Sable 0/1	369.71	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	601.76	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	300.88	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8.6	l/m <sup>3</sup>
Filler UF5 (20%)	86	Kg/m <sup>3</sup>



## **5.7 Préparation de la gâchée**

La préparation des BAP consiste à :

- ▶ Verser dans un malaxeur de capacité  $0.05 \text{ m}^3$  les quantités nécessaires des granulats (gravier et sable) et du ciment (et du filler). On mélange l'ensemble à sec pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange.
- ▶ On introduit la première moitié d'eau de gâchage accompagnée de la moitié de la quantité du superplastifiant. On continue à malaxer pendant une minute.
- ▶ On introduit la deuxième moitié d'eau accompagnée de la quantité de superplastifiant restante, et on malaxe une dernière fois pendant deux minutes.
- ▶ Juste après l'arrêt du malaxage, on mesure le diamètre de la galette d'étalement et l'étalement modifié, ainsi que sa masse volumique et sa résistance à la ségrégation par l'essai au tamis.
- ▶ On déverse sans vibration, le béton frais dans des éprouvettes cubiques ( $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ ) dont les parois ont été déjà humidifiées par une huile de décoffrage.
- ▶ On stocke les éprouvettes dans une salle en attendant de les démouler 24 heures après. Afin d'assurer un bon mûrissement du béton, on doit maintenir une humidité satisfaisante et une température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage. Les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau à une température d'environ  $20^\circ\text{C}$  jusqu'à l'échéance de l'essai d'écrasement.

## 6. Résultats et interprétations

### 6.1. Caractéristiques rhéologique

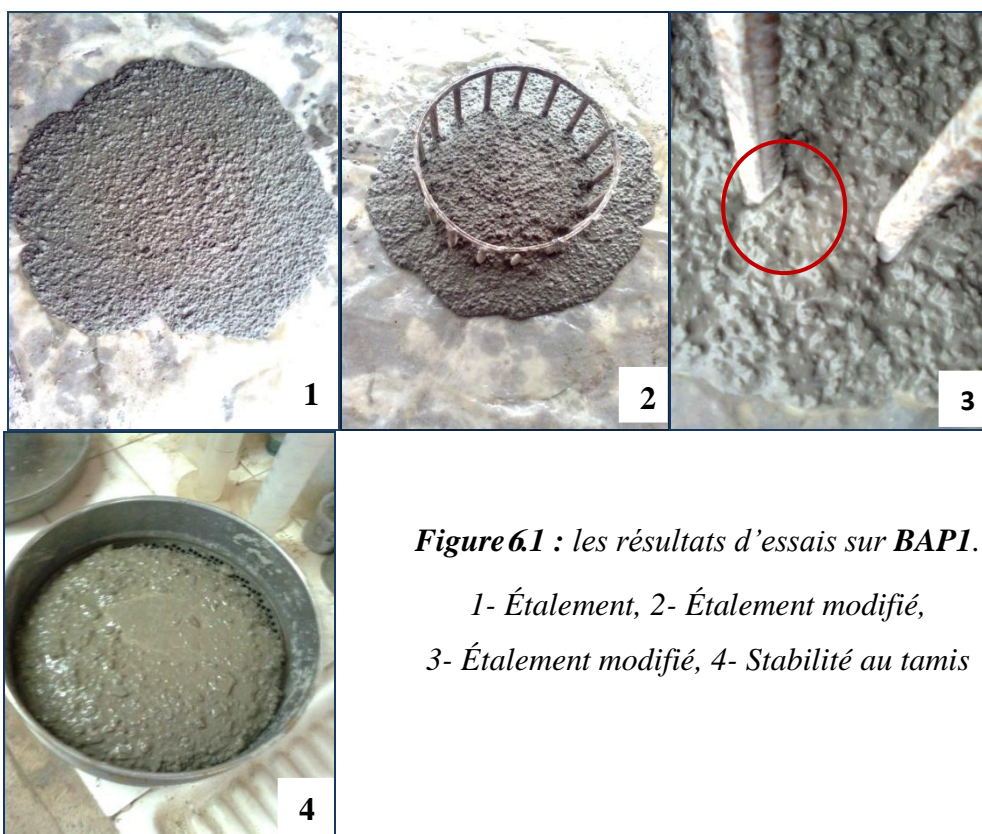
Cette partie est consacrée la caractérisation rhéologique (étalement au cône d'Abrams, étalement modifié, stabilité au tamis) des bétons autoplaçant testés.

#### 6.1.1. Béton sans filler (béton témoin)

Le tableau 6.1 et la figure 6.1 résumant les différentes caractéristiques rhéologiques du BAP témoin.

*Tableau 6.1: Résultats des essais rhéologiques sur le BAP1 frais*

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	62	cm
Étalement modifié	Bon	visuel
Stabilité au tamis	29.9	%
Masse volumique	2.43	Kg/m <sup>3</sup>



*Figure 6.1 : les résultats d'essais sur BAP1.*

1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ *Observations visuelles et commentaires :*

D'après les résultats obtenus par les essais recommandés à l'état frais sur le BAP sans filler calcaire (BAP1), on remarque :

- Un bon étalement dans l'essai au cône d'Abrams.
- Après l'essai d'étalement modifié : le béton s'écoule de manière uniforme au travers de l'anneau (pas de blocage) et la répartition des granulats paraît homogène.
- Après l'essai de stabilité au tamis : une stabilité critique et pas de risques de ségrégation ou de ressuage.

### **6.1.1.1 Interprétations et discussion**

Les résultats obtenus par les essais d'étalement au cône d'Abrams, et l'étalement modifié montrent que le BAP1 possède de bonnes propriétés rhéologiques ; La valeur trouvée par l'étalement (620 mm) est jugée suffisante pour une fluidité d'un béton autoplaçant. De plus, on a constaté un bon écoulement et une absence de blocage à travers l'anneau dans l'essai d'étalement modifié. Ces propriétés sont dues à :

- La quantité de la pâte.
- L'optimisation du squelette granulaire
- L'efficacité de superplastifiant.
- Le rapport optimum E/C.

#### **a) L'influence du volume de la pâte**

On sait que le volume de pâte joue un rôle important dans le processus de formulation du BAP par augmentation de son volume qui provoque l'écartement des granulats les uns des autres. Ceci engendre la diminution des forces de frottements qui ont tendance à limiter l'étalement du béton et bloquer son passage dans les zones confinées [5,6].

A la lumière de cela, on a choisi une bonne optimisation de la pâte composée de 430 k g/m<sup>3</sup> du ciment ; ce dernier joue le rôle d'un granulat inerte ultrafin et qui possède la propriété de liaison. Une quantité suffisante de sable roulé de 0/1 et 0/3 est ajoutée afin de minimiser les frottements entre les granulats, ce qui optimise le diamètre d'étalement du BAP.

#### **b) Optimisation du squelette granulaire**

Afin d'obtenir une bonne combinaison des granulats, on a choisi une combinaison massique de 25% de gravier 8/15 et 75% de gravier 3/8. Ainsi, on a minimisé le volume du gros granulat, ce qui entraîne l'augmentation du volume de mortier qui contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité et la déformabilité du BAP, qui nous a évité le risque de blocage aux ferraillements denses.

### c) Effet du superplastifiant

On a constaté qu'un dosage de 2% en superplastifiant est suffisant pour défloculer et disperser tous les grains de ciment. Les molécules superplastifiantes se fixent par adsorption à la surface du ciment et créent des forces de répulsions suffisantes pour empêcher le contact entre les grains. Elles réduisent également la tension superficielle de l'eau par rapport au ciment. Ce mécanisme d'action est dû à sa composition chimique qui est constituée des chaînes latérales greffées en plus des chaînes principales longues (masse molaire élevée). [1 ; 8 ; 9 ; 17]

Les résultats de l'essai de la stabilité au tamis permettent de qualifier le BAP1 comme étant un béton moins stable (29.9 %, une stabilité critique) à cause du dosage maximal en superplastifiant 2% (proche au point de saturation). Dans le but de diminuer l'effet négatif de ces ajouts, on incorpore généralement un agent de viscosité qui augmente la viscosité d'eau, empêche le ressuage et évite les risques de ségrégation en rendant la pâte plus visqueuse.

### d) Rapport optimum de E/C

La quantité d'eau qui correspond au rapport  $E/C = 0.40$ , et nécessaire pour hydrater l'ensemble des grains de ciment assure le bon étalement.

## 6.1.2. BAP avec filler de type UF5

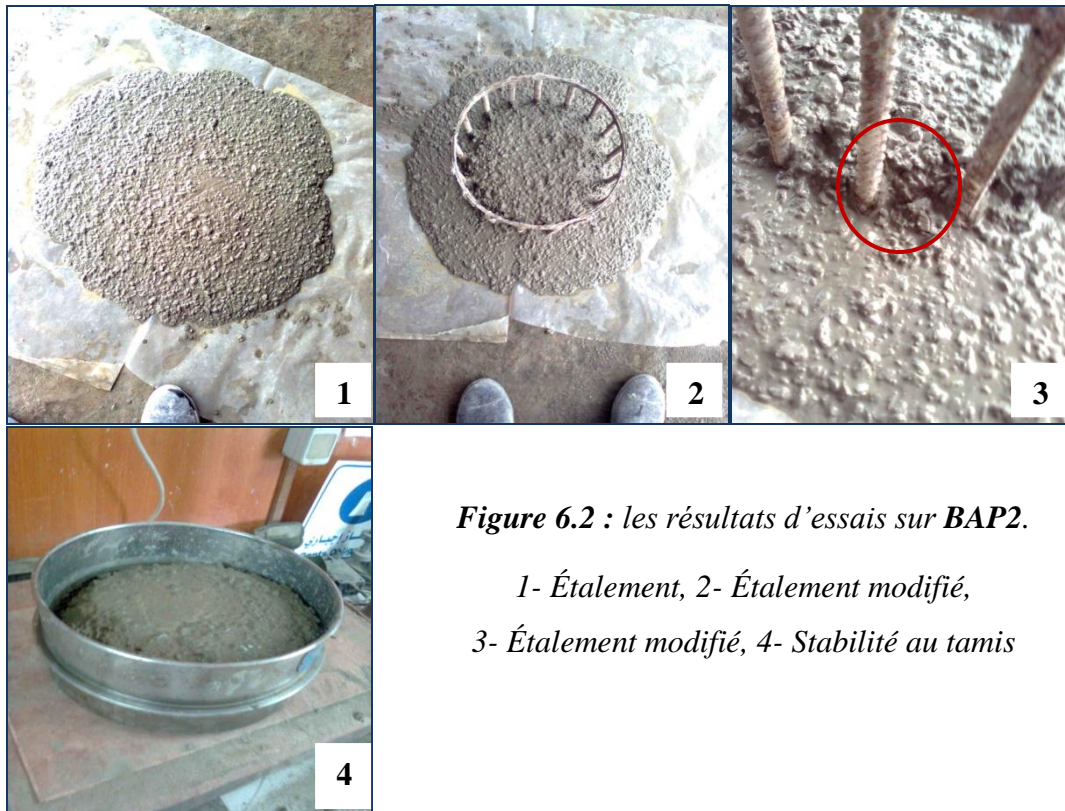
Les tableaux 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 et les figures 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 résument les différentes caractéristiques rhéologiques des BAP dosés avec filler de type UF5.

### a) BAP2 dosé à 5%de filler calcaire UF5

**Tableau 6.2:** Résultats des essais rhéologiques sur le BAP2 frais

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	62	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	29	%
Masse volumique	2.33	Kg/m <sup>3</sup>





**Figure 6.2 :** les résultats d'essais sur **BAP2**.

- 1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

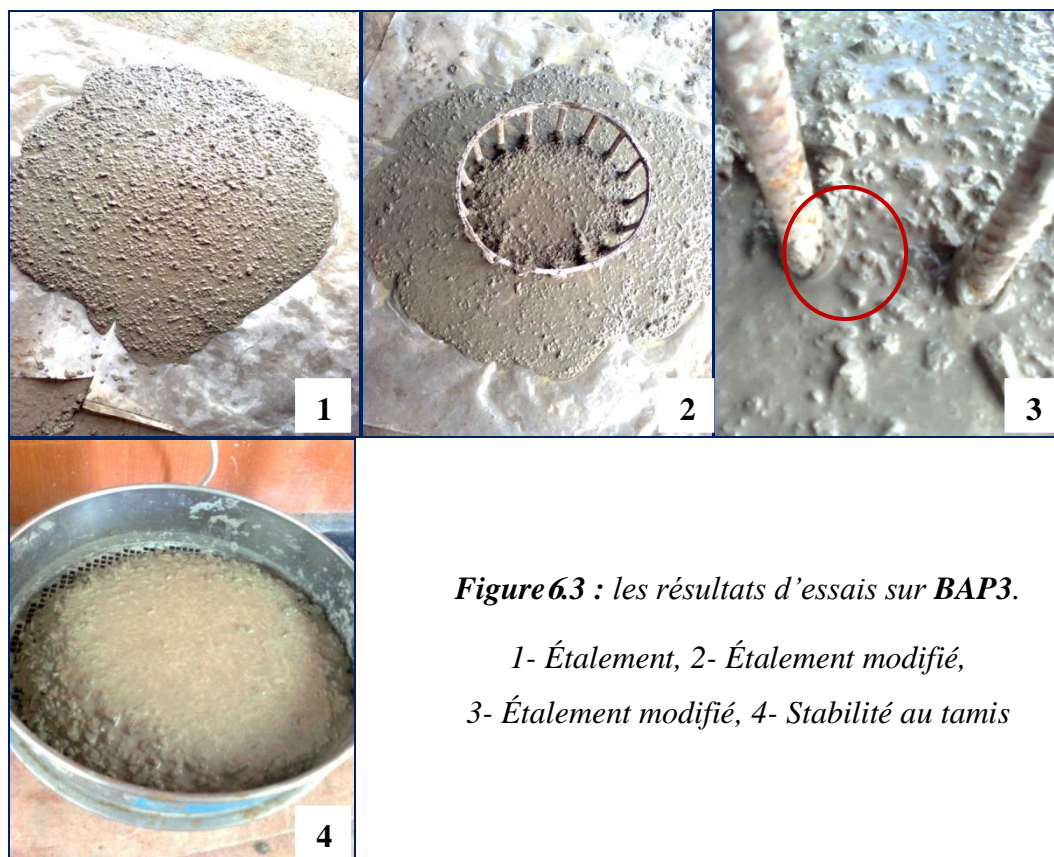
➤ **Observations visuelles et commentaires**

Pour le BAP avec 5% du fillers d'UF5, on remarque presque les mêmes résultats obtenus pour un BAP sans filler.

**b) BAP3 dosé à 10%de filler calcaire UF5**

**Tableau 6.3:** Résultats des essais rhéologiques sur le **BAP3** frais

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	65	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	8.6	%
Masse volumique	2.45	Kg/m <sup>3</sup>



**Figure 6.3** : les résultats d'essais sur **BAP3**.

1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ **Observations visuelles et commentaires**

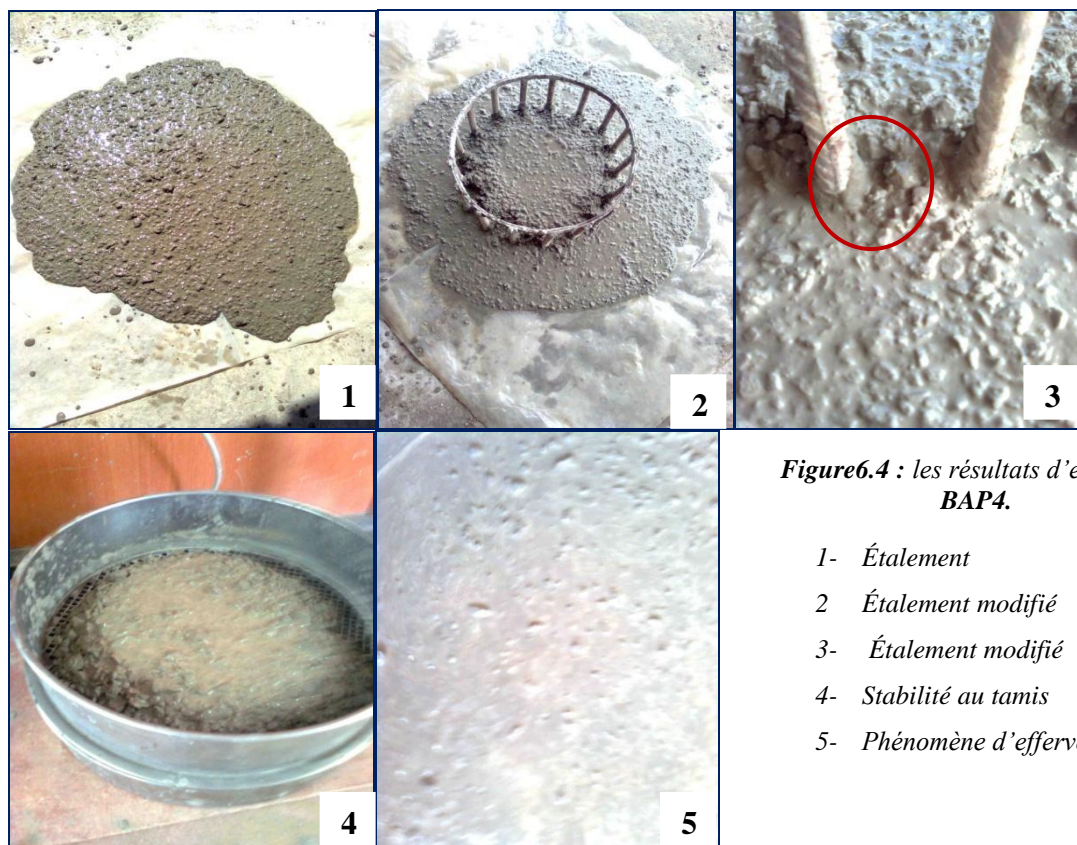
Selon les résultats obtenus, on remarque qu'avec 10% du fillers d'UF5 :

- Un très bon étalement, Une stabilité suffisante et sans risques de ségrégation ou de ressuage par apport au BAP1 et BAP2.
- Un bon écoulement et pas de blocage, après l'essai d'étalement modifié.

c) **BAP4** dosé à 15%de filler calcaire UF5

**Tableau 6.4**: Résultats des essais rhéologiques sur le **BAP4** frais

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	69	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	7	%
Masse volumique	2.44	Kg/m <sup>3</sup>



**Figure 6.4 :** les résultats d'essais sur **BAP4**.

- 1- Étalement
- 2- Étalement modifié
- 3- Étalement modifié
- 4- Stabilité au tamis
- 5- Phénomène d'effervescence

#### ➤ Observations visuelles et commentaires

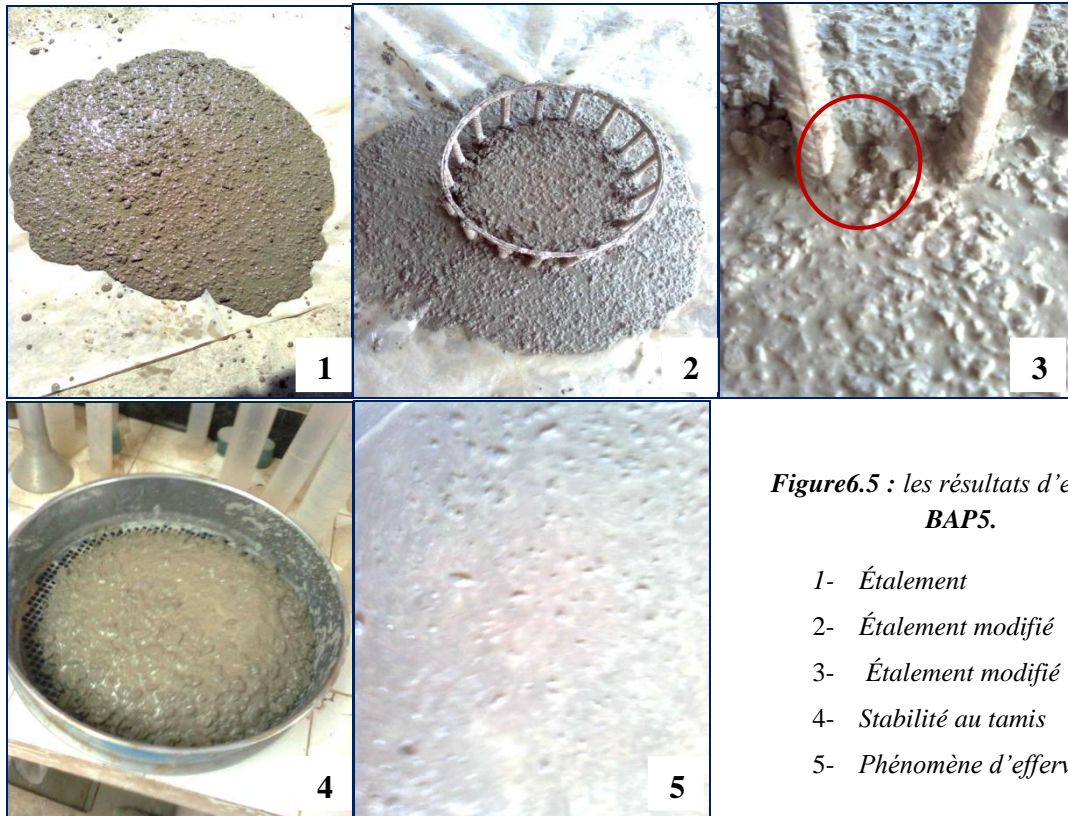
Selon les résultats obtenus, on remarque qu'un BAP dosé à 15% de filler d'UF5, a :

- Une meilleure fluidité et une stabilité suffisante car les deux valeurs d'étalement et de stabilité sont augmentées par rapport aux BAP1, BAP2 et BAP3.
- Ensuite, on n'a remarqué pas un risques de ségrégation ou de ressuage, ou de blocage. Pendant les trois essais.
- Changement de couleur du BAP testé.
- Phénomène d'effervescence pendant le malaxage et les essais.

#### d) BAP5 dosé à 20%de filler calcaire UF5

**Tableau 6.5:** Résultats des essais rhéologiques sur le **BAP5** frais

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	70	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	4.8	%
Masse volumique	2.43	Kg/m <sup>3</sup>



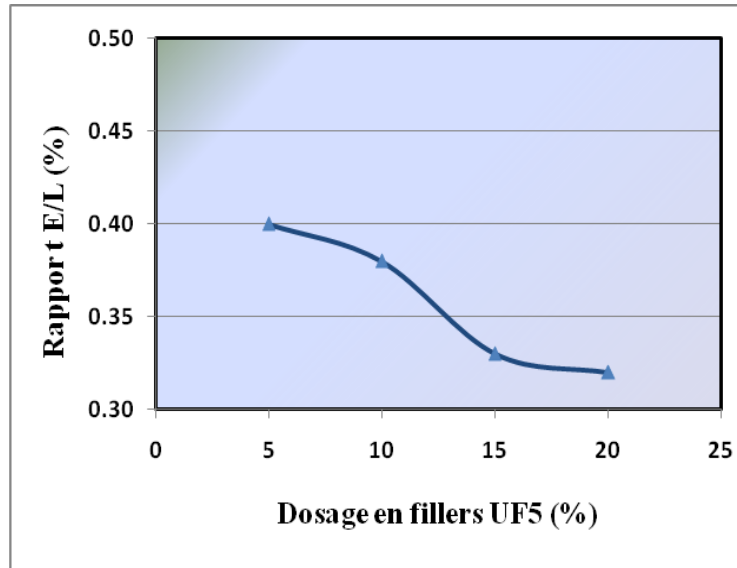
**Figure 6.5 :** les résultats d'essai sur **BAP5**.

- 1- Étalement
- 2- Étalement modifié
- 3- Étalement modifié
- 4- Stabilité au tamis
- 5- Phénomène d'effervescence

➤ **Observations visuelles et commentaires**

Un BAP dosé à 20% de filler d'UF5 nous donne de très bons résultats rapportés aux bétons précédents, tel que :

- Il a une meilleure fluidité et une meilleure stabilité. Ensuite, on n'a remarqué pas de risques de ségrégation ou de ressuage, ou de blocage. Pendant les trois essais.
- Changement de couleur du BAP testé.
- Phénomène d'effervescence pendant le malaxage et les essais.



**Figure 6.6 :** Courbe de l'influence du dosage en fillers UF5 sur le rapport E/L.

### 6.1.2.1 Interprétations et discussion

La substitution du ciment par 5% de filler UF5, avec un dosage constant de superplastifiant (2%) pour le BAP2, a presque les mêmes résultats obtenus pour le BAP1 (béton témoin), donc on peut dire que cette quantité n'est pas suffisante pour améliorer le comportement rhéologique du BAP.

Cependant, à partir des dosages 10%, 15% et 20%, le comportement rhéologique du béton est amélioré de plus en plus, où on a constaté :

- Une augmentation du diamètre de la galette l'étalement : 650 mm pour BAP3, 690 mm pour BAP4 et 700 mm pour BAP5,
- Une optimisation de la stabilité allant de 29% pour BAP2 (dosé à 5% de UF5) jusqu'à 4.8 % pour BAP5 (dosé à 20% de UF5),
- Un bon écoulement à l'essai de l'étalement modifié.

Ces propriétés sont dues aux effets physico-chimiques des fillers calcaires de UF5 ; sur l'ouvrabilité des bétons testés. En effet, lorsqu'on remplace une quantité de ciment par 10%, 15%, 20% de filler UF5 (par substitution), la quantité des particules fines augmente dans le mélange. Par conséquent, la pâte est renforcée, la fluidité se trouve améliorée et on obtient un mélange stable et maniable.

En plus, on a remarqué que le rapport E/L est diminué de plus en plus quand le dosage des fillers est augmenté (figure 6.6), On peut expliquer ce phénomène par une surface spécifique élevée et une forme sphérique du filler ; en plus de son activité chimique.

Lorsque la quantité de particules fines est accrue dans le béton, l'ajout d'eau est nécessaire pour assurer sa maniabilité et sa fluidité. L'eau a l'avantage d'engraisser et par conséquent lubrifier les grains. D'autre part, on sait que ce type de filler a une forme sphérique qui va aussi rendre les grains glissants, donc les fillers ont la même

action de l'eau. Ensuite, les fillers ont un rôle de remplissage en corrigeant la granulométrie des éléments fins dans le mélange. Donc la quantité d'eau nécessaire pour une même ouvrabilité sera réduite.

L'activité chimique, tel que l'hydratation du silicate de calcium  $C_3S$  (le premier composant due à l'hydratation du ciment) est accélérée en présence de fillers très fin, donc le besoin en eau va diminuer [11 ; 13].

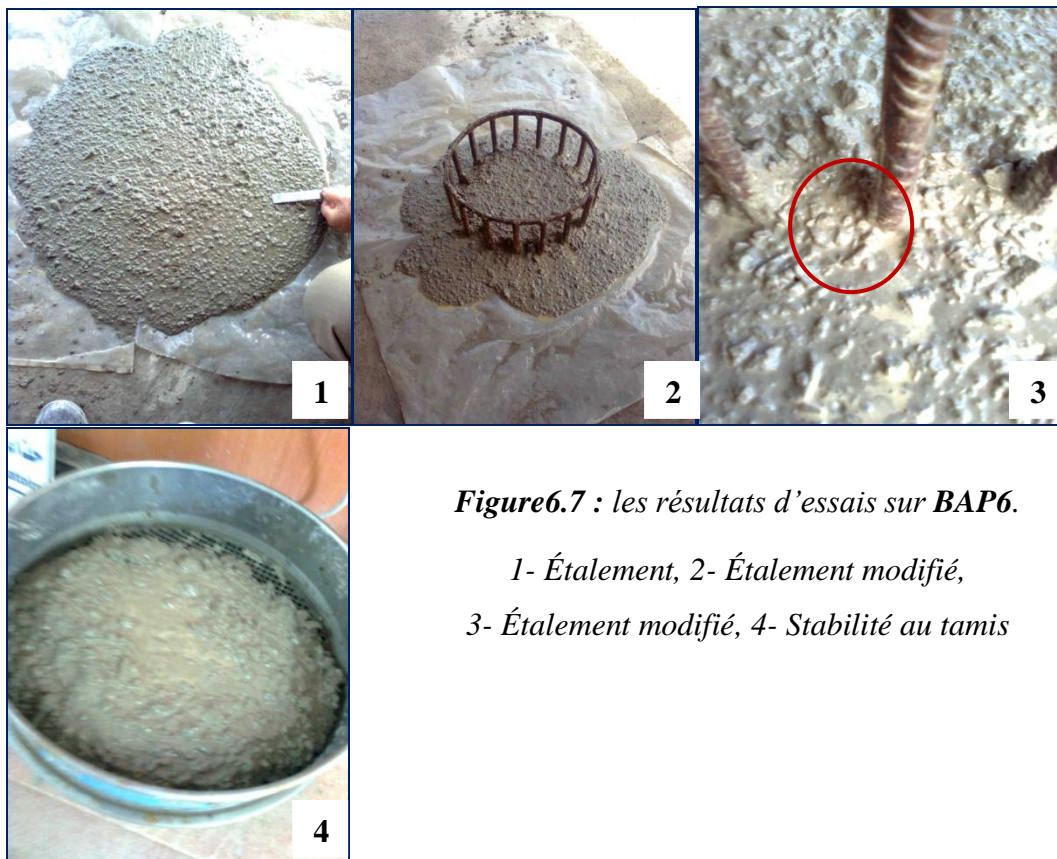
### 6.1.3. BAP avec filler de type F50

Les tableaux 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 avec les figures 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 suivants résument les différentes caractéristiques rhéologiques des BAP dosés avec filler de type F50.

#### a) BAP6 dosé à 5% de filler calcaire F50

*Tableau 6.6: Résultats des essais rhéologiques sur le BAP6 frais*

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	62	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	4	%
Masse volumique	2.41	Kg/m <sup>3</sup>



*Figure 6.7 : les résultats d'essais sur BAP6.*

- 1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ *Observations visuelles et commentaires*

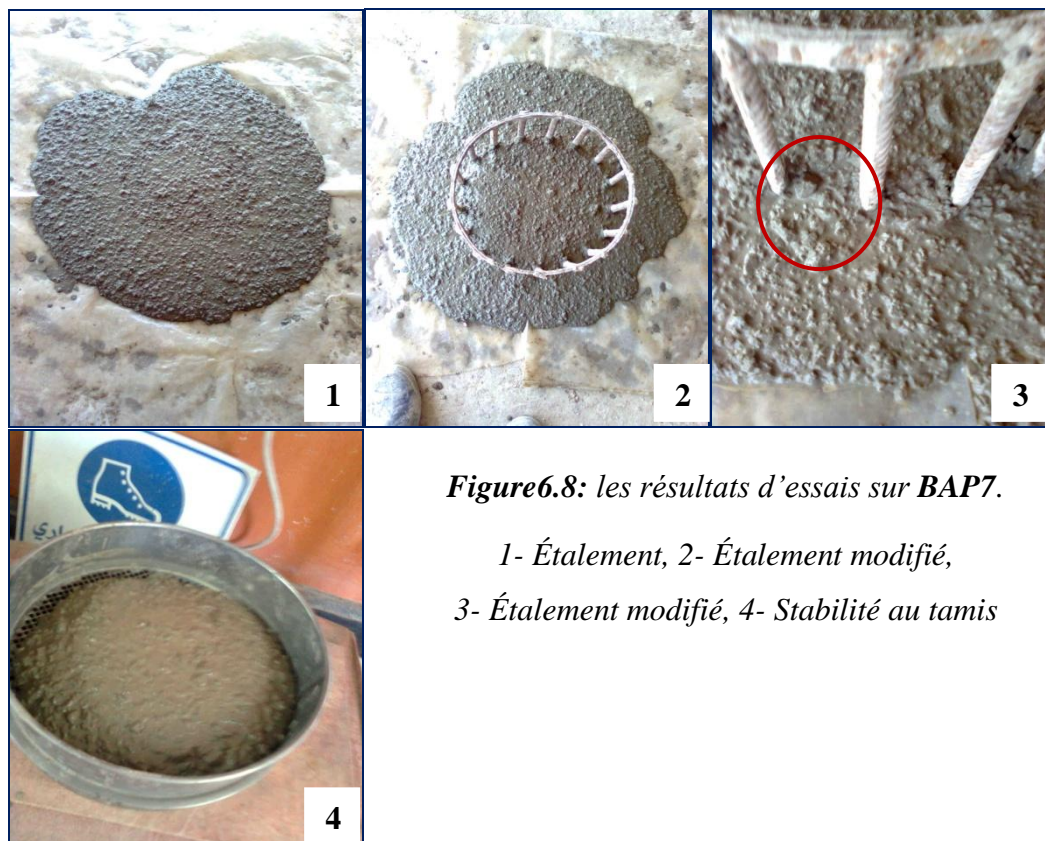
Selon les résultats obtenus, on Remarque qu'avec 5% du fillers de **F50** :

- Un bon étalement, une stabilité suffisante.
- Pas de risques de ségrégation ou de ressuage, ou de blocage Pendant les trois essais.

b) **BAP7 dosé à 10%de filler calcaire F50**

*Tableau 6.7: Résultats des essais rhéologiques sur le BAP7 frais*

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	63	Cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	4.42	%
Masse volumique	2.47	Kg/m <sup>3</sup>



**Figure6.8:** les résultats d'essais sur **BAP7**.

1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ *Observations visuelles et commentaires*

- Pour le BAP dosé à 10% du fillers de **F50**, on remarque presque les mêmes résultats obtenus pour le BAP6 (avec 5% du fillers de **F50**).

c) **BAP8 dosé à 15% de filler calcaire F50**

*Tableau 6.8: Résultats des essais rhéologiques sur le BAP8 frais*

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	59	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	4.7	%
Masse volumique	2.35	Kg/m <sup>3</sup>



*Figure 6.9: les résultats d'essais sur BAP8.*

1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ *Observations visuelles et commentaires*

Selon les résultats obtenus, on remarque qu'un BAP dosé à 15% de filler de **F50**, a :

- Une faible fluidité rapport les bétons précédant,
- Une stabilité suffisante.
- L'écoulement est mouvais.

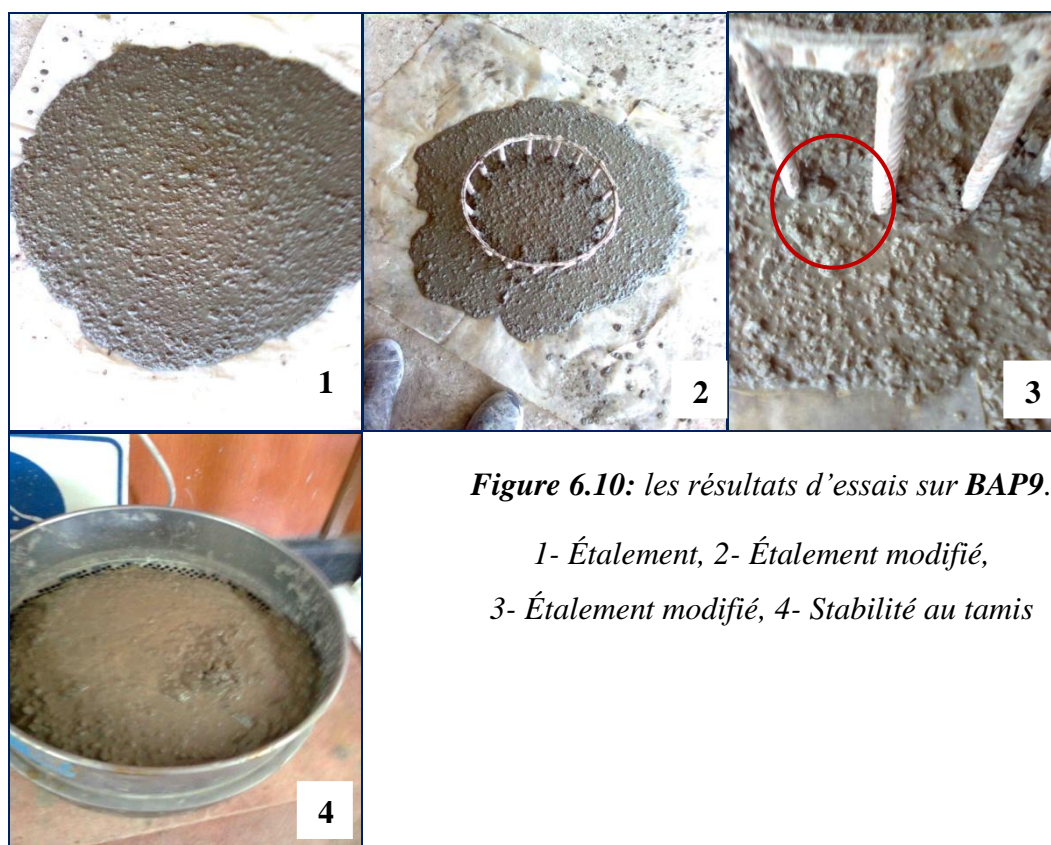


- Ensuite, on n'a remarqué pas un risques de ségrégation ou de ressuage, ou de blocage. Pendant les trois essais.

d) **BAP9 dosé à 20%de filler calcaire F50**

*Tableau 6.9: Résultats des essais rhéologiques sur le BAP9 frais*

<i>Essais</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>
Étalement au cône d'Abrams	58	cm
Étalement modifié	Bon	Visuel
Stabilité au tamis	5.7	%
Masse volumique	2.39	Kg/m <sup>3</sup>



*Figure 6.10: les résultats d'essais sur BAP9.*

- 1- Étalement, 2- Étalement modifié,  
3- Étalement modifié, 4- Stabilité au tamis

➤ *Observations visuelles et commentaires*

Pour le BAP dosé à 20% du fillers de **F50**, on remarque presque les mêmes résultats obtenus pour le BAP6 (avec 15% du fillers de **F50**).

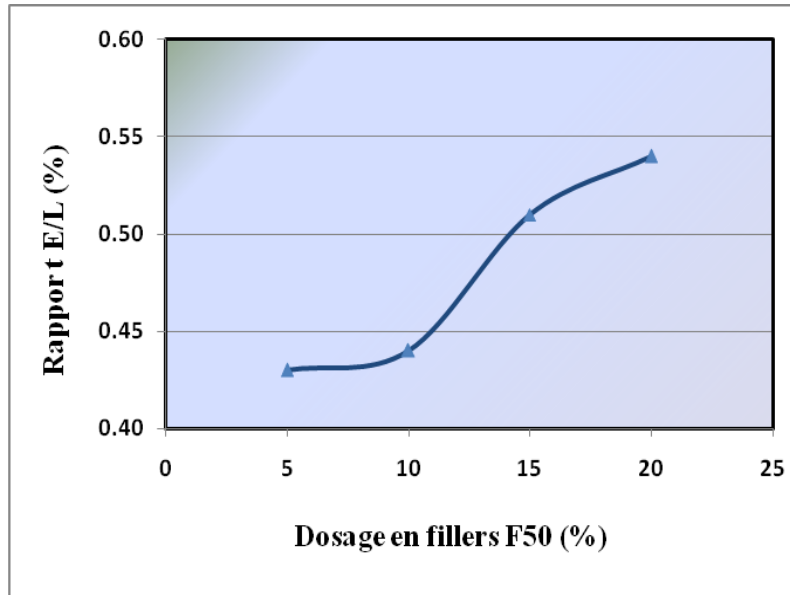


Figure 6.11 : Courbe de l'influence du dosage en fillers F50 sur le rapport E/L.

### 6.1.3.1 Interprétations et discussion

Les BAP6; BAP7; BAP8 ; BAP9 contenant de filler de type F50 et un dosage constant de superplastifiant, ont des comportements rhéologiques différents.

Les BAP6 et BAP7 ont une bonne fluidité ; le diamètre d'étalement varie entre 620 et 630 mm avec un bon écoulement et sans risque de blocage ou du ressuage pendant l'essai de l'étalement au cône d'Abrams ainsi que l'étalement modifié. Cela dues au volume de pâte nécessaire qui permet d'améliorer la maniabilité et la cohésion entre les constitutions du mélange, aussi le filler assure la correction granulométrique des éléments fins.

Mais pour BAP8 et BAP9 qui continent 15 et 20 % de F50; on note une diminution de la fluidité jusqu'à 590mm, avec un mauvais écoulement, donc on ne peut considérer les BAP8 et BAP9 comme des bétons autoplaçants.

En plus, on a constaté que le rapport E/L augmente quand le dosage des fillers F50 est accrue (figure 6.11), On peut expliquer ce phénomène par l'absorption du fillers de type F50 et l'enrichissement du mélange en particules fines.

L'essai de stabilité au tamis montre que le dosage en filler F50 est diminué légèrement la stabilité de béton. On note une stabilité de 4% pour le BAP6, 4.42% pour le BAP7, 4.7% pour le BAP8 et de 5.7 pour le BAP9.

## 6.2. Caractéristiques physiques

Le paragraphe qui va suivre sera consacré aux caractéristiques physico-mécaniques (résistance à la compression) à différents âges approuvés avec et sans fillers calcaires.

### 6.2.1. Béton sans filler (béton témoin)

Le tableau 6.10 illustre la variation de la résistance à la compression et la masse volumiques des bétons utilisés.

*Tableau 6.10: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP1*

<i>Age (jours)</i>	<i>3</i>	<i>7</i>	<i>28</i>
<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	22.11	31.51	40.87
<i>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	2380	2410	2.43

### 6.2.2. Interprétations et discussions

D'après les résultats de l'essai d'écrasement sur le BAP1 (béton témoin), on a constaté que le BAP1 a une bonne résistance à la compression (jusqu'à 40.87 MPa à 28 jours). Cela est dû au rapport E/C optimum, l'efficacité du superplastifiant qui assure la défloculation, la dispersion des grains et la réduction de la quantité d'eau.

La bonne optimisation du squelette granulaire, qui nous donne une bonne compacité et bonne résistance à la compression.

### 6.2.3. BAP avec filler de type UF5

#### *a) La masse volumique*

La figure 6.12 suivante présente l'évolution de la Masses volumiques des BAP dosés avec filler de type UF5, à 28 jours.

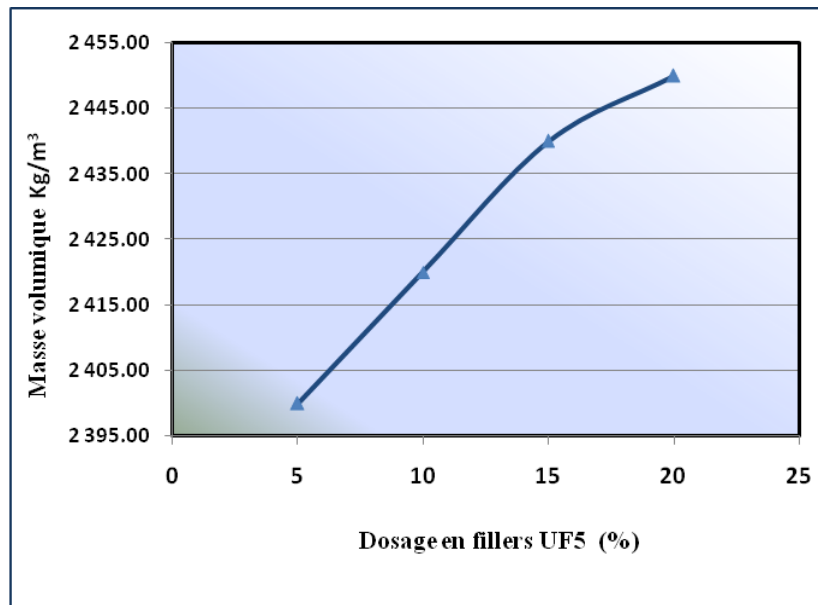


Figure 6.12 : Évolution de la masse volumique en fonction de la composition de béton.

### b) la résistance à la compression

Les deux figures 6.13 et 6.14 suivantes, résument l'évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton à 3,7 et 28 jours (figure 6.13) et au jeune âge 3 jours (figure 6.14).

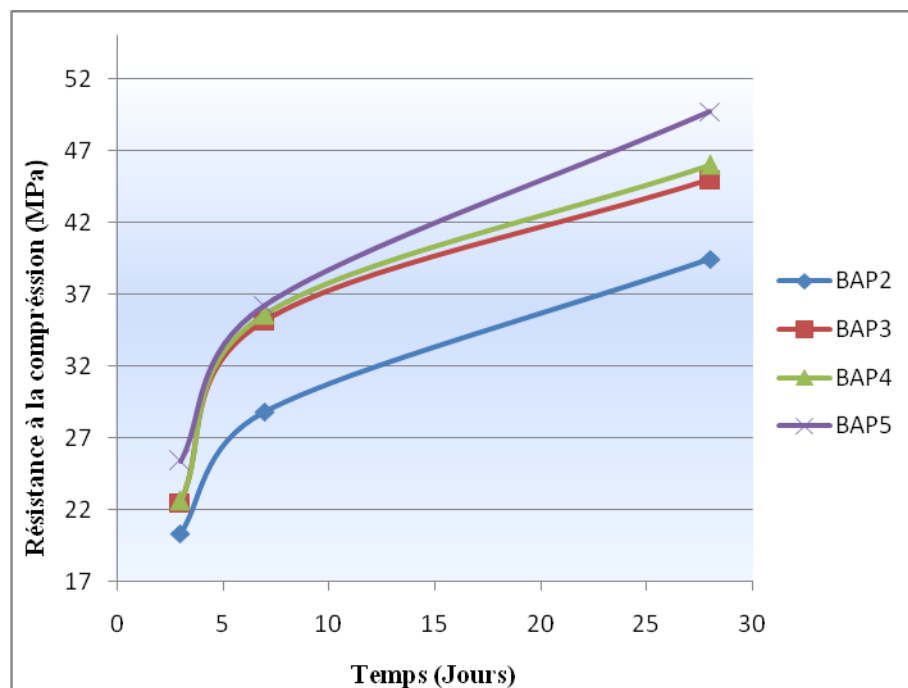


Figure 6.13 : Évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton.

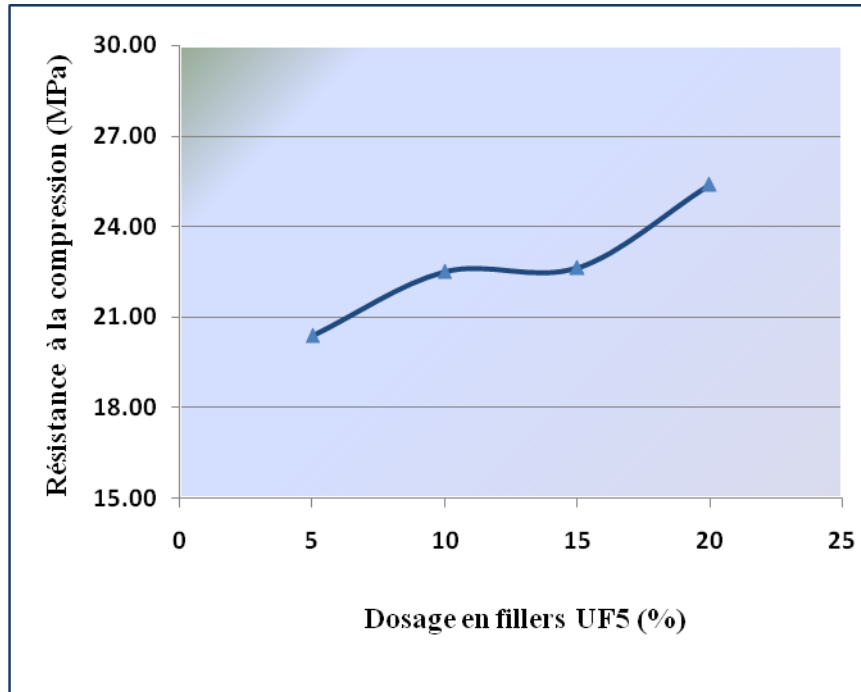


Figure 6. 14: Évolution de la résistance mécanique à 3 jours en fonction de la composition de béton.

### 6.2.3.1 Interprétations et discussions

L'essai d'écrasement effectué a montré que le BAP2 (dosé à 5% de filler UF5) présente une faible résistance relativement au béton témoin BAP1. Ceci nous permet d'affirmer que cette quantité de filler n'est pas suffisante pour réagir avec toute la quantité de ciment et de rendre la matrice du béton plus compacte.

D'après les figures 6.12, 6.13, la résistance à la compression et la masse volumique de BAP sont améliorées par le remplacement du ciment avec 10, 15 et 20% de filler UF5. Ces propriétés sont dues à :

- La présence du superplastifiant qui diminue la quantité d'eau de gâchage et la porosité.
- La surface spécifique élevée du fillers UF5 qui joue le rôle d'un correcteur granulométrique (elle comble les vides existant dans le squelette granulaire), donc la diminution de la porosité et le rapport E/L, qui en provoque l'augmentation de la compacité et la résistance en compression.

Le schéma sur la figure 6.14 nous permet d'affirmer que les BAP3; BAP4 et BAP5 ont des meilleures résistances au jeune âge que le BAP1 et BAP2, cela s'explique par :

- L'accélération de la vitesse d'hydratation du silicate de calcium  $C_3S$  (le premier composant résulte à l'hydratation de ciment), qui induit une augmentation des résistances dans les premiers jours. [11 ; 13]

- Des nouveaux composés hydrate tels que les carboaluminate de calcium hydraté  $C_3A \cdot CaO_3,11H_2$  (MCA) qui résulte à la réaction entre le carbonate de calcium et l'aluminate de calcium hydraté. Le MCA, de plus petite taille, augmenterait la résistance et diminuerait la perméabilité. [11 ; 13]

#### 6.2.4. BAP avec filler de type F50

##### a) La masse volumique

La figure 6.15 suivante présente l'évolution de la Masse volumiques des BAP dosés avec filler de type F50, à 28 jours.

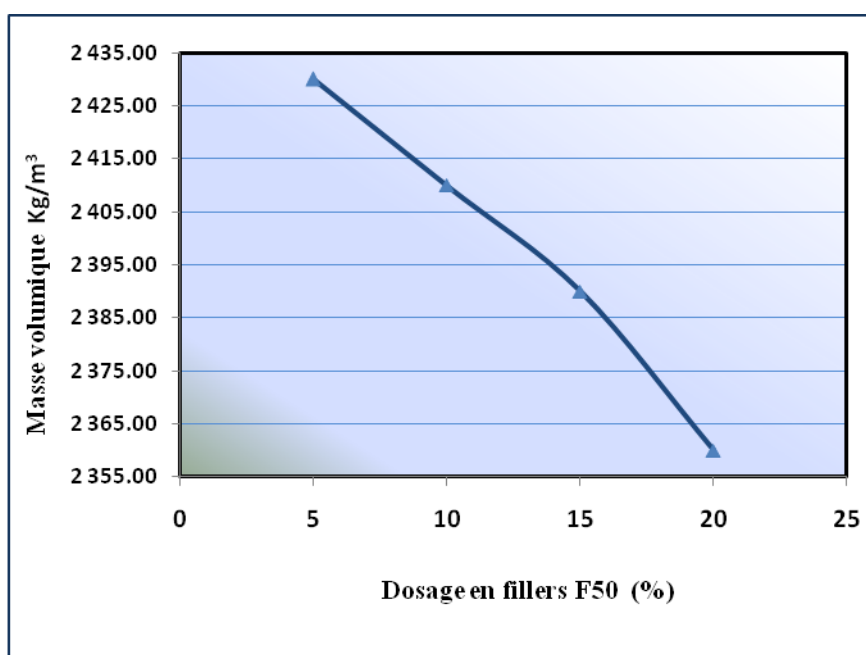


Figure 6.15 : Évolution de la masse volumique en fonction de la composition de béton

##### b) la résistance à la compression

Les deux figures 6.16 et 6.17 suivantes, résument l'évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton à 3,7 et 28 jours (figure 6.16) et au jeune âge 3 jours (figure 6.17).

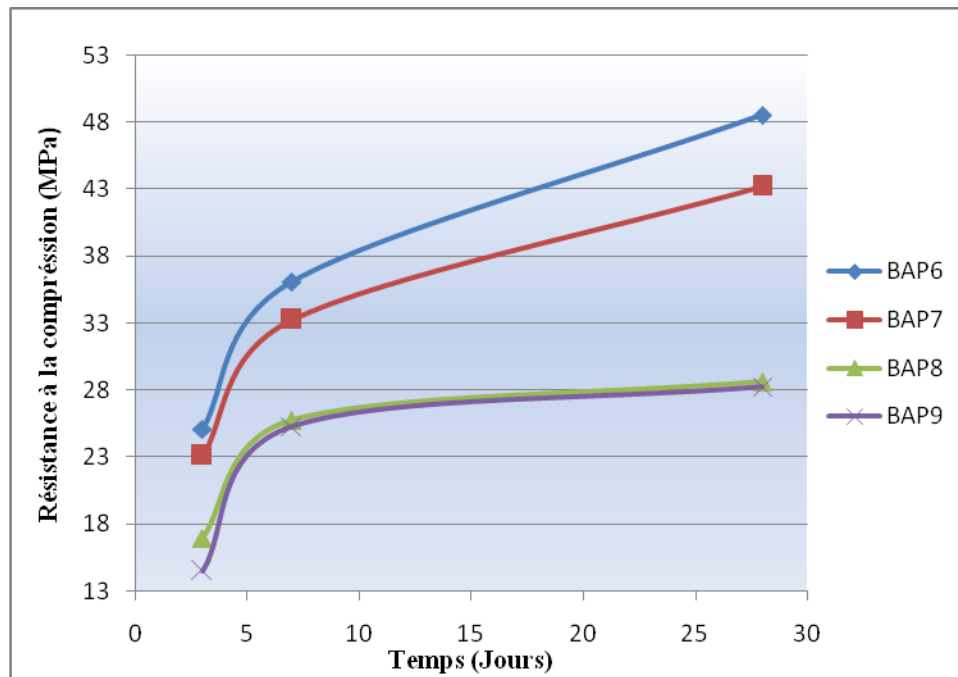


Figure 6.16 : Évolution de la résistance mécanique en fonction de la composition de béton.

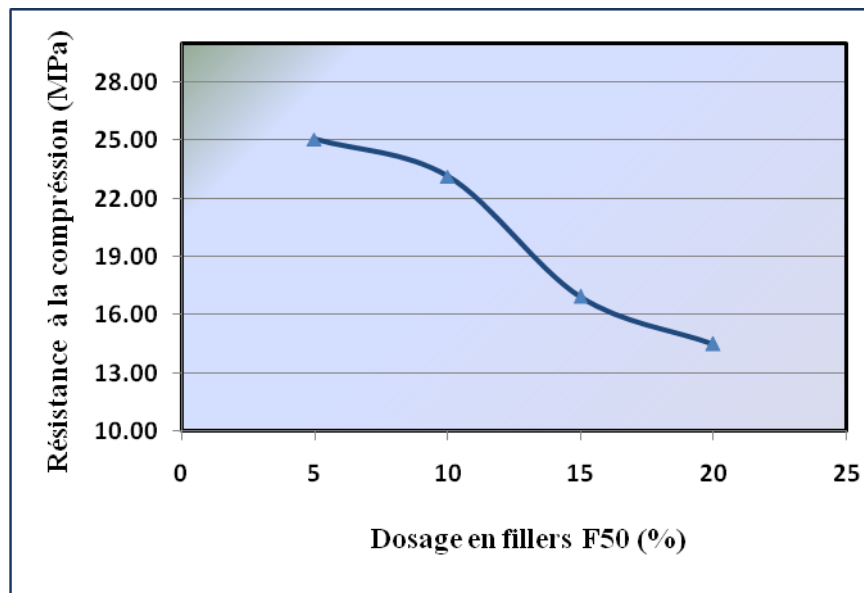


Figure 6.17 : Évolution de la résistance mécanique à 3 jours en fonction de la composition de béton.

#### 6.2.4.1 Interprétations et discussions

Les essais d'écrasement réalisés ont montré que le BAP6 dosé à 5 % de fillers F50 présente une meilleure résistance que le BAP1 (béton témoin). Cela explique le rôle d'un correcteur granulométrique et que la quantité de ciment est dominante.

Cependant, la substitution de la quantité du ciment par 10 ; 15 et 20% de filler F50 pour les BAP7; BAP8 et BAP9, implique une chute de résistance respectivement par rapport au BAP6 (dosé à 5%). Cette diminution s'explique par l'augmentation de filler F50 qui est inertes et il a une petite surface spécifique dans le béton et que la quantité de ciment n'est pas suffisante pour assurer la résistance du béton désirée.

En plus, l'accroissement du rapport E/L quand le dosage des fillers est augmenté, ce qui aboutit finalement à la diminution de résistances mécanique du BAP.

### 6.3 Aspect macroscopique des BAP testés

#### a) BAP avec filler de type UF5



Figures 6.18 : Illustration macroscopique du BAP dosé fillers UF5.

#### b) BAP avec 5% filler de type F50



Figures 6.19 : Illustration macroscopique du BAP dosé 5% de fillers UF5.

#### Commentaires

Après les photos précédentes, nous renseignent que les BAP avec les différents dosages de filler UF5 et avec 5% de filler F50:

- Une bonne adhérence entre la pâte et les granulats.



- l'absence totale de la ségrégation, ce qui va influencer positivement sur les résistances mécaniques
- L'absence de pores, permet d'obtenir des bétons compacts avec une meilleure résistance
- Un Parement lisse, qui est lié directement à la facilité de remplissage et ceci malgré l'absence de vibration pendant le remplissage des moules.

**c) BAP avec 10, 15 et 20 % filler de type F50**



**Figures 6.20** : Illustration macroscopique du BAP dosé 10,15 et 20 % de fillers F50.

**Commentaires**

Après les photos précédentes, nous renseignent que les BAP avec les dosages 10,15 et 20 % de filler F50:

Moins de compacité et moins de résistance à la compression par apport aux bétons à base de UF5.

**6.4 Conclusions et comparaisons**

D'après les études expérimentales effectuées au cours de notre étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Il nous a été possible de formuler des bétons très fluide ; stable ; homogène et avec de meilleures performances mécaniques ;
- Le superplastifiant a amélioré la fluidité des BAP, diminué le rapport E/C, ce qui limite la porosité du béton et améliore sa résistance mécanique.
- La substitution du ciment avec une grande quantité de filler ayant des surfaces spécifiques très élevées UF5 (à partir de 10%) ; influe sur le BAP, d'où:
  - ◆ L'amélioration d'étalement et l'écoulement ;
  - ◆ Une stabilité suffisante ;

- ♦ Diminution du rapport E/L, donc augmentation des résistances mécaniques ;
  - ♦ De nouveaux composés hydratés qui engendrent une amélioration de la résistance mécanique au jeune âge ;
  - ♦ Augmentation des résistances mécaniques à 28 jours par rapport au BAP1 (béton témoin).
- La substitution du ciment par une faible quantité (5%) de filler de F50 qui a une surface spécifique inférieure à celle de UF5 améliore l'ouvrabilité et la résistance en compression du BAP. Elle augmente ainsi sa densité et sa compacité, qui donne un béton étanche, performant et durable.

Par contre, l'augmentation de ce type de filler influe négativement sur les caractéristiques rhéologiques et physiques du BAP :

- ♦ Diminution de l'étalement et de la stabilité;
- ♦ mauvais écoulement ;
- ♦ Augmentation du rapport E/L, qui implique une chute de résistance mécanique à 28 jours par rapport au BAP1 (béton témoin) et au BAP6 (dosé à 5% de filler F50).

En effet, La substitution du ciment avec une grande quantité de filler calcaire UF5 améliore l'ouvrabilité et la résistance à la compression du BAP. On constate ainsi une augmentation de sa densité et sa compacité, qui nous donne un béton étanche, performant et durable. Cela est dû aux surfaces spécifiques élevées et à la forme sphérique du filler UF5, qui engendrent une activité chimique sur le BAP.

Par contre, La substitution du ciment avec une grande quantité de filler calcaire F50 diminue l'ouvrabilité, la résistance en compression du BAP. Elle est inerte dans le béton.

Les bétons autoplaçants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton, car ils offrent de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique, technique que social.

L'absence de vibration aide à la réduction des coûts de production, permet d'avoir des éléments de géométries complexes et fortement ferraiillés. L'utilisation de béton autoplaçant entraîne la réduction des nuisances sonores, ainsi que la pénibilité du travail.

Nous avons étudié l'influence de deux types de fillers calcaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP, ainsi que l'action de superplastifiant. Pour répondre à nos objectifs, nous avons commencé par définir les formulations du béton, à partir de matériaux identiques, pour cela, notre choix s'est porté sur la méthode Japonaise. Toutes les formulations ont été caractérisées à l'aide d'essais spécifiques.

Nos résultats expérimentaux ont montré que :

- L'utilisation de la méthode Japonaise pour la formulation des BAP s'est avérée très efficace pour l'obtention de bonnes propriétés rhéologiques et mécaniques.
- L'utilisation d'un superplastifiant permet l'obtention de bonnes propriétés rhéologiques ainsi que l'amélioration des résistances mécaniques pour des petits rapports E/L.
- La finesse des fillers calcaires joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances du BAP. La cause est due à la réactivité chimique de ces fines et à la formation de nouveaux composés tels que les carboaluminates. Leur présence dans le béton va diminuer le rapport E/L et améliorer sa résistance mécanique au jeune âge. Donc, c'est l'augmentation de la densité et de la compacité, donnera un béton étanche, performant et durable.
- On constate que lorsque le taux de filler calcaire F50 (surface spécifique moins élevée) est de 5%, joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances du BAP. Mais, l'augmentation de ce dosage influe négativement sur les caractéristiques rhéologiques et physiques du BAP. Et cela est dû à la demande en eau, ainsi qu'à l'augmentation des fines inertes dans le béton.
- L'étude macroscopique des bétons dosés avec filler UF5 et 5% de F50 confirme bien les résultats obtenus sur le béton frais tel que la stabilité au tamis qui est expliquée par la bonne répartition des grains de différente taille (absence de la ségrégation). Ainsi que l'absence des bulles d'air et l'état de surface parfaite qui est expliqué par la bonne capacité de remplissage pour le cas de BAP. Par contre, les bétons dosés à 10,15 et 20 % de filler F50 ont une mauvaise adhérence entre la pâte, les granulats et le filler.

- Du point de vue économique, on peut économiser une quantité de ciment et la remplacer par des fillers qui coûtent moins cher que le ciment et qui a un grand rôle dans l'amélioration des performances de BAP. Mais, il faut prendre en considération la finesse et l'optimisation de taux du filler à remplacer.

Le béton autoplaçant est en plein essor, il faut néanmoins continuer les recherches et les essais sur le matériau pour faciliter la réalisation et, par la même occasion, la mise en place pour que le BAP devient le nouveau « béton ordinaire » sur les chantiers. Il sera nécessaire, dans les prochaines années, de compléter les projets de normes afin d'en écrire les normes. Pour cela, on propose quelques thèmes comme :

- ♦ L'influence du fillers calcaires sur le dosage du superplastifiant.
- ♦ La résistance au feu.
- ♦ Le comportement des BAP aux différents traitements de surfaces.
- ♦ Les caractéristiques physico-chimiques du BAP exposé à température élevée.
- ♦ Mécanismes de ségrégation dans les BAP.
- ♦ Retrait et fissuration des BAP.
- ♦ Influence de la forme et de la granulométrie des fillers sur leur demande en eau.

## *Références Bibliographique*

- [1] Sandrine Bethmont. Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP). Thèse de doctorat, l'école nationale des ponts et chaussées.
- [2] Walraven. Structural aspect of self-compacting concrete, proceedings of the third international rilem conference on scc, août 2003, Reykjavik, Islande.
- [3] Bétons autoplaçants-monographie d'ouvrages en BAP. Collection technique ciment de béton, 2003.
- [4] Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons hauts performances. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [5] P. rougeau et Chmarry Dippe, O. Francy. Les BAP : synthèse des connaissances et campagne expérimentale. février 2001.
- [6] Z. Abib. Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants. Thèse de magister USTHB, 2004.
- [7] Gilles Escadrille. Formation continue actualisante. (Responsable pédagogique), Carmeuse France, 17 et 18 octobre 2001.
- [8] Francis Gorisse. Essais et contrôle des bétons.
- [9] R. Degeimbr. Technologie des bétons, 2<sup>ème</sup> édition. Université de Liege.
- [10] Sabine Caré, Richard Linder, Véronique Baghel-bouny ; François de Larrard, Yves Charonnat. « Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons ». Plan d'expérience et analyse statistique, février 2000. Éditions du LCPC série mat n°0502 « études et recherches du LCPC »
- [11] Frédéric Michel. « Caractérisation physique des fillers calcaires ». Thèse DEA, en sciences appliquées. Université de Liège, juin 2006.
- [12] A. el Hilali, E. Ghorbel, P. Gonnon. Influence des fillers sur l'ouvrabilité des BAP. Université de cergy-pontoise.
- [13] Christine Warland. « Influence de la forme et de la granulométrie des fillers sur leur demande en eau ». TFE 2004-2005.
- [14] J. Baron et J-P. Ollivier. Les bétons : bases et données pour leur formulation. Eyrolles, 1999.
- [15] P. Claude Aitcin. « Liant hydraulique, GCI 710 ». Université de Sherbrooke Canada.
- [16] Georges Dreux. Nouveau guide du béton, 3<sup>ème</sup> édition.
- [17] François Perche. Adsorption des polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments. Thèse de doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- [18] ERCE – CTC est- GRANITEX. Les adjuvants : définitions et opportunités d'utilisation. Journée d'information (ciment, béton, adjuvants), 2004.
- [19] A.Daoud. Étude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant contribution a la modélisation numérique de l'interface, thèse de doctorat, INSA Toulouse, juin2003.
- [20] Thierry Sedran. Rhéologie et rhéomètre des bétons : application aux bétons autonivelants. Thèse de doctorat. L'école Nationale Des Ponts et Chaussées.
- [21] Ph.Turcry. Retrait et fissuration des BAP : influence de la formulation. Thèse de doctorat. L'école centrale de Nantes de l'université de nantes, février2004.
- [22] N. Rebouh. Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants. Projet de fin d'étude ENP, 2006.
- [23] Martin Vachon Italcementi group. Béton autoplaçant: point d'avancement sur le développement des normes ASTM, (power point).
- [24] Les bétons autoplaçants, SIKA France, (power point).
- [25] Bétons autoplaçants en Belgique, dossier ciment 36 août 2005.
- [36] Hanna Fares. Les propriétés physico-chimiques de béton autoplaçants exposé à température élevé. Thèse de doctorat 2009.
- [27] Patrick Guiraud. Des solutions constructives pour des chantiers à faible impact sonore, octobre 2006.
- [28] Chapitre I ETA T des connaissances proposition d'un programme de recherche

## ANNEXE "A"

### Mode opératoire des essais rhéologiques sur BAP frais

#### 1. Essai d'étalement (Slump flow)

##### a) But

Le but de cet essai est de mesurer la consistance d'un béton.

##### b) Appareillage

- **Table d'étalement** : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton.
- **Cône d'Abrams** : moule en métal non directement attaquant par la pâte de ciment, d'une épaisseur min. de 1,5mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :
  - Diamètre de la base :  $(200 \pm 2)$  mm ;
  - Diamètre du haut :  $(100 \pm 2)$  mm ;
  - Hauteur :  $(300 \pm 2)$  mm.
- **Entonnoir** : conçu en matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abrams.
- **Règle**, graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm.
- **Seau** : d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.

##### c) Mode opératoire

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque ainsi que le cône d'Abrams
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif. Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer.
- Équiper la partie supérieure du cône de l'entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, à l'aide du seau, jusqu'à l'arase supérieure du cône
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement. L'enlèvement du moule doit se faire, par une remontée verticale régulière sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion, en maximum 5 s. Maintenir le moule au-dessus du béton minimum.

et à une hauteur (par rapport à la base du moule) de maximum 30 cm. L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 s.

- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer (au centimètre le plus proche) l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires et noter ces deux valeurs D1 et D2. Exemple : 68/70 cm. Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être rejeté et reconduit. Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.
- Après mesure de l'étalement, un contrôle visuel de la galette de béton peut aussi s'avérer intéressant. En effet, les gros granulats doivent être apparents à la surface du mélange et être uniformément répartis. De plus, sur le pourtour de la galette, il ne peut y avoir une auréole de laitance.

## **2. Essai d'étalement modifié "J-Ring"**

C'est la même procédure appliquée comme le précédent mais cette fois-ci le cône se met à l'intérieur d'un anneau d'armatures de diamètre de 300mm espaçant de 43,5mm et de 150mm de hauteur

## **3. Essai de stabilité au tamis**

### **a) But**

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation.

### **b) Appareillage**

- *Seau* de 10 l muni d'un bec verseur + couvercle.
- *Tamis* (toile à mailles carrées) 5 mm, diamètre de 315 mm + fond.
- *Bascule* : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.
- *Minuterie ou horloge* capable de mesurer à 1 s près.
- *Main écope*.

### **c) Mode opératoire**

- Prélever un échantillon de béton Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. Le seau doit être rempli à raison d'au minimum 9 litres de béton. l'échantillon global doit être re-homogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 minutes.
- Peser le fond seul :  $P_{\text{fond}}$
- Peser le fond et le tamis à vide.



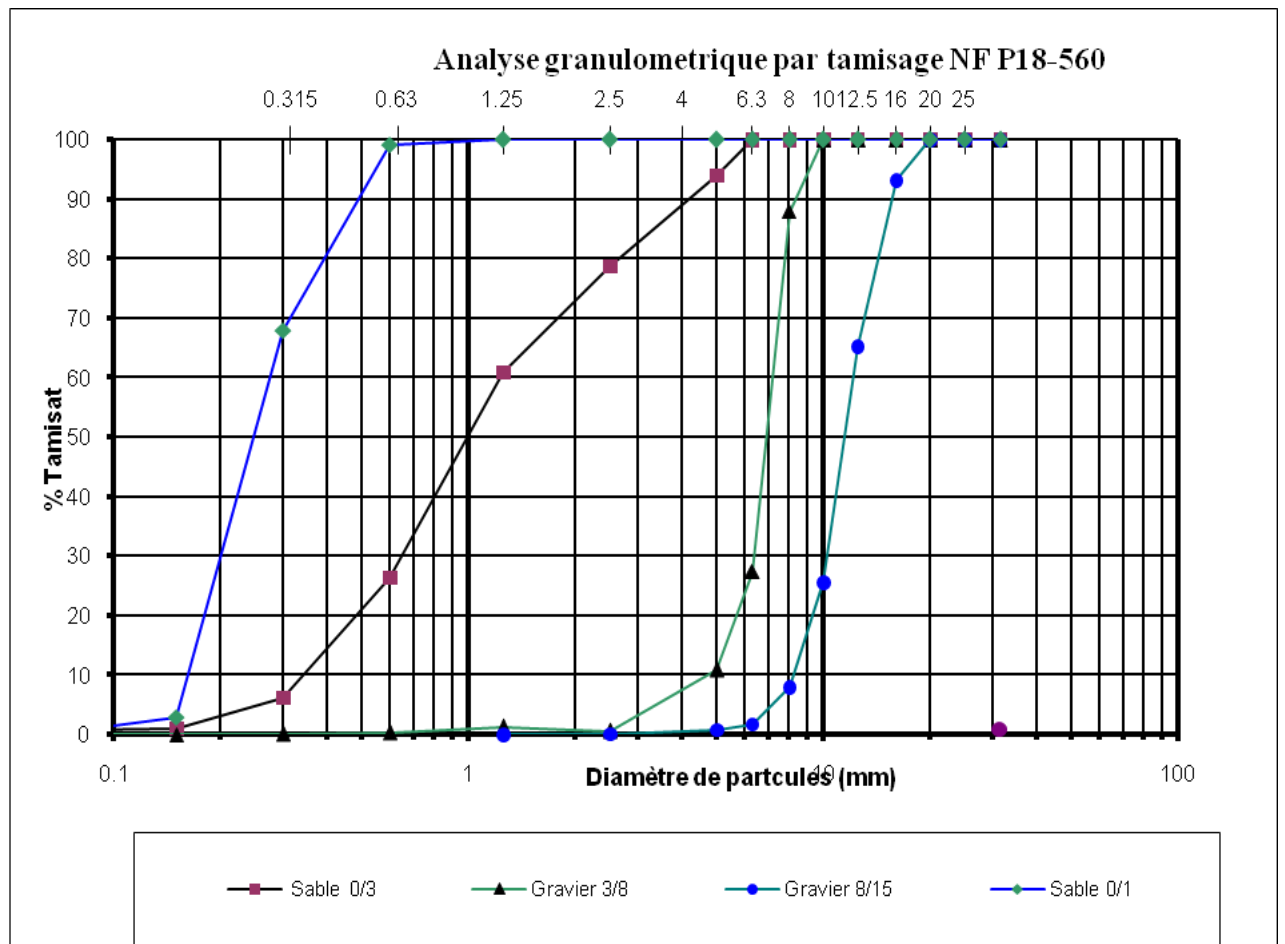
## *PARTIE ANNEXE*

---

- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes.
- Verser sur le tamis une quantité de béton égale à  $(4,8 \pm 0,2)$  kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de  $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ .
- Noter immédiatement la masse réelle de l'échantillon de béton versé sur le tamis  $P_{\text{échantillon}}$
- Attendre 2 minutes.
- Retirer le tamis ainsi que le fond et remettre la balance à zéro.
- Peser le fond avec la laitance  $P_{\text{fond} + \text{laitance}}$
- Déterminer  $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond} + \text{laitance}} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon :  $(P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \times 100$ . Le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.

# ANNEXE "B"

## Courbes granulométriques



## ANNEXE "C"

**Les résultats de l'essai de la résistance à la compression et de la masse volumiques des BAP dosés avec les deux types de fillers calcaires UF5 et F50.**

### 1. BAP avec filler de type UF5

*Tableau 1 .1: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP2*

Age (jours)	3	7	28
Résistance à la Compression (MPa)	16.38	28.85	39.44
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2370	8160	2400

*Tableau 1 .2: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP3*

Age (jours)	3	7	28
Résistance à la Compression (MPa)	22.5	35.18	45
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2390	2430	2420

*Tableau 1 .3: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP4*

Age (jours)	3	7	28
Résistance à la Compression (MPa)	22.64	35.60	46
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2410	2420	2440

*Tableau 1 .4: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP5*

Age (jours)	3	7	28
Résistance à la Compression (MPa)	25.39	36.26	49.70
Masse volumique(kg/m <sup>3</sup> )	2440	2450	2450

**2. BAP avec filler de type F50**

*Tableau 1.5: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP6*

<i>Age (jours)</i>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	25.08	36.08	48.52
<i>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	2390	2430	2430

*Tableau 1.6: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP7*

<i>Age (jours)</i>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	23.14	33.26	43.20
<i>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	2380	2390	2410

*Tableau 1.7: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP8*

<i>Age (jours)</i>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	16	25.76	28.63
<i>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	2320	2380	2390

*Tableau 1.8: Résistance à la Compression et la Masses volumiques du BAP9*

<i>Age (jours)</i>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	14.50	25.30	28.26
<i>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	2410	2370	2360



# ALCAL F 50

## Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au nord-est de Constantine il est constitué de calcaire d'origine biochimique nérotique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

### Caractéristiques chimiques

CaCO <sub>3</sub>	98 +/-1
CaO	55.5% - 56.33 %
SiO <sub>2</sub>	0.04% - 0.06%
Na <sub>2</sub> O	0.05% - 14%
MgO	0.38% - 0.57%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03% - 0.08%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.025% - 0.03%
Perte au feu	43%
Ph	9

### Caractéristiques physiques

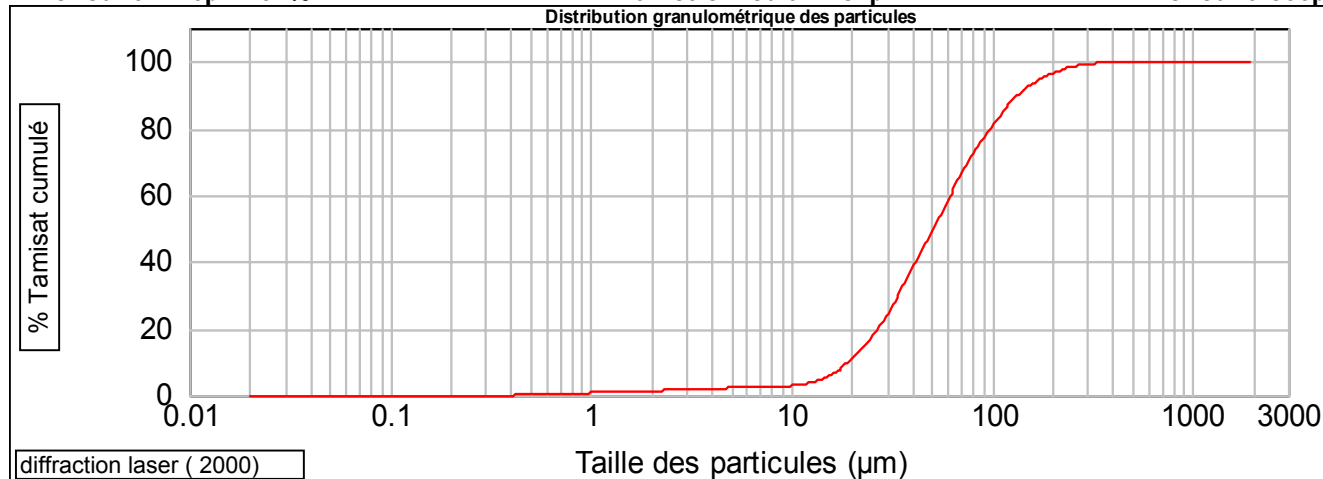
Dureté ( MOHS ) :	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée:	1,31gr/cm <sup>3</sup>
Indice de réfraction :	1,71
BLancheur (CR310 MINOLTA ) :	L: 91,69 a+1,18 b+5,86

### Répartition granulométrique

Inférieur à 40µm :37%

Diamètre médian : 51µm

Inférieur à 500µm :100%



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

### Conditionnement

Vrac  
Big Bag ( 1 tonne )

### Principales utilisations

Etanchéité  
Céramique



## ALCAL UF5

### Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au nord-est de Constantine il est constitué de calcaire d'origine biochimique Néré tique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

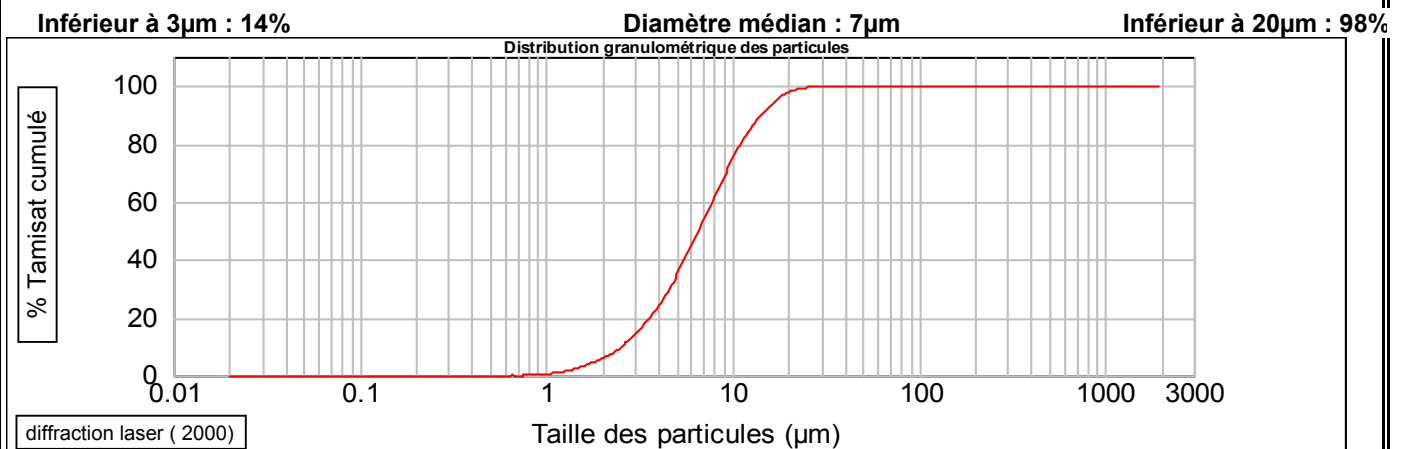
#### Caractéristiques chimiques

CaCO <sub>3</sub>	98 +/-1
CaO	55.62% - 55.66%
SiO <sub>2</sub>	0.04% - 0.095%
Na <sub>2</sub> O	0.026% - 0.14%
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04% - 0.055%
MgO	0.3% - 0.4%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.013% - 0.03%
Perte au feu	43,00%
Ph	9

#### Caractéristiques physiques

Dureté ( Mohs):	3
Poids spécifique:	2,7
Densité apparente non tassée:	0,82g /cm <sup>3</sup>
Blancheur (CR 310 MINOLTA ):	L: 94.81 a+0.34 b+2.18
Prise d'huile (NF.T30.022):	26g/100g de poudre
Prise D O P ( NF.T 30.022):	36g/100g de poudre
Humidité à l'ensachage:	0,02%
Indice de réfraction:	1,71

#### Répartition granulométrique



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

#### Conditionnement

En vrac  
Big-bag ( 1tonne )  
Palettes houssées (48 sacs de 25kg)

#### Principales utilisations

Peinture mate et satinée en phase aqueuse et phase solvant.  
Peinture en poudre hydrodispersible  
Peinture routière et Peinture industrielle  
P V C plastifié  
Caoutchouc et plastique industriel  
Différentes colles  
Composites  
Etanchiété, isolation  
Cablerie