

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA-

FACULTE DES SCIENCES DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER en : Génie Civil

Option : Matériaux & Structure

Par

IDJAHNINE Mohamed Yahia A/Halim

Intitulé:

Formulation & Caractérisation

des bétons autoplaçants avec comme ajout le

déchet de brique broyé

Soutenu le : 15/ 06 / 2009 , devant le jury composé de:

| | | |
|------------------------------|---|--------------------|
| M. Bouafia Youcef | Professeur à l'université de Tizi Ouzou | Président |
| M. Chelouah Nasser | Maître de conférence à l'université de Béjaia | Directeur de thèse |
| M.Tahakourt Abdelkader | Professeur à l'université de Béjaia | Examineur |
| M.Maza Mustapha | Maître de conférence à l'université de Béjaia | Examineur |

2008-2009

REMERCIEMENTS

- Je tiens à remercier en premier lieu ***DIEU MISERICORDIEUX*** qui m'a donné la force et la volonté de faire ce travail ;
- Mes sincères remerciements vont au **Dr. CHELOUAH** qui a bien voulu diriger et encadrer les travaux de cette thèse, avec sa gentillesse, ses précieux conseils son dévouement le plus sincère, Qu'il trouve ici l'expression de mon respect;
- Mes remerciements vont à mon très cher père pour son aide inestimable, Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère oh ! combien motivant;
- M Abib Zinneddine doctorant à l'USTHB qui m'a fait profiter de son expérience dans le domaine oh ! combien généreux ;
- Un amical remerciement est également adressé à M. Meddahi Madjid PDG de GRANITEX-NP ;
- Ma gratitude va également à M Bouzekri, M.Bouhired du LTP-Est et toute leur équipe ;
- Mes vifs remerciements aux **Messieurs** les membres de jury **M.Tahakourt, M.Bouafia** et **M.Maza** pour leur compréhension qui ont bien accepté de juger mon travail ainsi qu'avec leur compétence la plus absolue et la plus prometteuse, Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde admiration ;
- Tous les enseignants du département de génie-civil et les techniciens du laboratoire béton;

Dédicace :

Je dédie ce travail à :

- ✚ Mon très cher père ;
- ✚ Mon frère Mouad et mes sœurs ;
- ✚ M^{elle} Maouche Sabrina ;
- ✚ M. Abib Zineddine ;
- ✚ Tous mes amis ; Said Bitout, Boubker, Riad, Redouane, Zaziche, Dedine, Patrick, Reda, Halim, le très remarquable conducteur de travaux Ferhat Amrane.

Mohamed Yahia

Sommaire

| | |
|---|----------|
| Introduction générale | 1 |
| <hr/> | |
| Partie 1 : Notification bibliographique | |
| <hr/> | |
| Chapitre I : Généralités sur le béton et ses constituants | |
| I. Historique sur le béton et ses constituants | 6 |
| I.1. Introduction | 6 |
| I.2. Constituants du béton | 8 |
| I.2.1. Ciment | 8 |
| I.2.1.9. Caractéristiques physico-chimiques des ciments Portlands | 11 |
| I.2.2. Les ajouts minéraux | 14 |
| I.2.2.1. La fumée de silice | 15 |
| I.2.2.2. Le déchet de brique (brique broyée) | 19 |
| I.2.2.2. 1. L'activité pouzzolanique | 19 |
| I.2.3. Eau de gâchage | 21 |
| I.2.4. Granulats | 21 |
| I.2.5. Adjuvants | 22 |
| Conclusion | 23 |
| Références bibliographiques | 24 |
| <hr/> | |
| Chapitre II : les bétons autoplaçants | |
| <hr/> | |
| II.1. Définition du béton autoplaçant | 25 |
| II.2. Historique des bétons autoplaçants | 26 |
| II.3. Composition des bétons autoplaçants | 27 |
| II.4. Matières premières utilisées dans les BAP | 29 |
| II.5. Propriétés des BAP | 36 |
| II.5.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage | 36 |
| II.5.2. Fluidité | 39 |
| II.5.2.1. Essai d'étalement | 40 |
| II.5.2.2. Vitesse d'écoulement | 40 |
| II.5.2.3. Essai de la table de fluidité | 41 |
| II.5.2.4. Essai de la boîte en L | 41 |
| II.5.2.5. Essai du Box | 42 |
| II.5.3. La stabilité | 42 |
| II.5.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V | 42 |
| II.5.3.2. Essai de tassement | 43 |
| II.5.4. Ségrégation dynamique | 44 |
| II.5.4.1. Essai de stabilité au tamis | 44 |
| II.5.5. Ségrégation statique | 45 |
| II.5.5.1. Essai à la bille | 45 |
| II.6. Caractéristiques des BAP à l'état durci | 46 |
| II.6.1. Propriétés mécaniques des BAP | 46 |
| II.6.2. Retrait | 47 |
| II.7. Optimisation des BAP | 48 |
| II.7.1. Optimisation de la teneur en gros granulats | 49 |
| II.7.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux | 50 |
| II.7.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques | 52 |

| | |
|--|----|
| II.8. Méthodes de formulation | 53 |
| II.8.1. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées | 53 |
| II.8.2. L'approche japonaise | 55 |
| II.9. Pratique actuelle de la formulation des BAP | 56 |
| II.9.1 Exemples de formulation | 57 |
| II.10. Fabrication des BAP | 59 |
| II.11. Transport et mise en place des BAP | 60 |
| Conclusion | 61 |
| Références bibliographiques | 62 |

Partie 2 : Partie expérimentale

Chapitre III : Caractérisation des matériaux et étude d'essais

| | |
|---|----|
| III.1 Caractérisation des matériaux..... | 64 |
| III.1.1 Granulats | 64 |
| III.1.1.1 Sable | 64 |
| III.1.1.2 Gravier | 65 |
| III.1.2 Ajouts..... | 65 |
| III.1.2.1 Le déchet de brique broyée | 66 |
| III.1.2.2 La fumée de silice | 66 |
| III.1.3 Ciment | 67 |
| III.1.4 L'eau de gâchage | 67 |
| III.1.5 Adjuvant (Superplastifiant) | 68 |
| III.2 Méthodes d'essais | 69 |
| III.2.1 Essais sur granulats | 69 |
| III.2.1.1 Essai d'équivalent de sable | 69 |
| III.2.1.2 Module de finesse | 70 |
| III.2.1.3 Masses volumiques | 71 |
| III.2.1.4 Essai Los Angeles | 73 |
| III.2.2 Essais sur ciment | 75 |
| III.2.2.1 Début et fin de prise (Aiguille de Vicat) | 75 |
| III.2.2.2 Stabilité du ciment (essai le CHATELIER) | 77 |
| III.3 Formulation du béton et essais préliminaires | 79 |
| III.3.1 Composition du béton ordinaire | 79 |
| III.3.1.1 Méthode Dreux-Gorisse | 79 |
| III.3.1.2 Formulation préliminaire | 84 |
| III.3.1.3 Méthode expérimentale | 84 |
| III.3.2 Composition du BAP | 85 |
| III.3.2.1 Principes de formulation | 85 |
| III.3.2.2 Essais préliminaires | 86 |
| III.3.2.3 Interprétations | 87 |
| III.3.2.4 Formulation préliminaire du BAP | 88 |
| III.3.2.5 Orientation technique pour la formulation | 89 |
| III.3.2.6 Récapitulation technique de la formulation | 90 |
| III.4 Essais d'études et caractérisation à l'état frais | 91 |
| III.4.1 Essai de stabilité au tamis | 91 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| III.4.1.1 | Interprétation | 93 |
| III.4.2 | Essai du contrôle du volume d'air entraîné | 94 |
| III.4.2.1 | Essai à l'aéromètre | 94 |
| III.4.2.2 | Interprétation | 96 |
| III.4.3 | Essai de consistance | 97 |
| III.4.3.1 | Mesure de l'affaissement (Cône d'ABRAMS) | 97 |
| III.4.3.1.2 | Classe d'affaissement | 99 |
| III.4.3.1.3 | Limites de l'essai d'affaissement | 99 |
| III.4.3.2 | Mesure de l'étalement | 101 |
| III.4.3.2.1 | Vitesse d'écoulement | 101 |
| III.4.4 | Confection des éprouvettes | 103 |
| III.4.4.1 | Dimensions des moules | 103 |
| III.4.4.2 | Démoulage et conservation des éprouvettes | 104 |
| III.4.4.3 | Surfaçage des éprouvettes | 104 |
| III.5 | Essais d'études et caractérisation à l'état durci | 105 |
| III.5.1 | Essais destructifs | 105 |
| III.5.1.1 | Essai de compression | 105 |
| III.5.1.2 | Interprétation..... | 107 |
| III.5.2 | Essais non destructifs | 111 |
| III.5.2.1 | Auscultation sonore ou dynamique (Ultrason)..... | 111 |
| III.5.2.2 | Le retrait | 116 |
| III.5.2.2.1 | Le retrait plastique..... | 116 |
| III.5.2.2.2 | Le retrait endogène | 116 |
| III.5.2.2.3 | Le retrait de séchage | 116 |
| III.6 | Notification économique et avantageuse | 120 |
| III.7 | Quelques recommandations | 121 |
| | Conclusion générale..... | 123 |

Introduction

Les édifices du 21^{ème} siècle se traduisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ce type d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables c'est pour cela qu'il y a aujourd'hui un intérêt croissant pour ce qui a trait à la qualité, aussi bien de la part de l'industrie que de l'ingénieur.

Les progrès des vingt dernières années dans le domaine de formulation ont conduit à une évolution notable du matériau béton.

On peut même dire qu'il s'agit d'une véritable révolution offrant aux concepteurs et aux ingénieurs un produit de plus en plus performant et satisfaisant au critère d'économie en introduisant des additions minérales à caractère pouzzolanique, ainsi la gamme s'est enrichie de nouveaux matériaux.

Toutefois, pour construire des structures fiables et durables, il est nécessaire non seulement, de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Le béton, dont la fabrication fait appel à des résidus industriels et des matériaux et technologies respectueux de l'environnement, constitue peut-être l'une des principales contributions de l'industrie de la construction pour réduire ses émissions de gazes à effet de serre.

En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium.

Pour chaque tonne de ciment Portland produite, environ une tonne de dioxyde de carbone (CO₂), provenant principalement de la transformation du calcaire en chaux et en dioxyde de carbone, ainsi que de la production d'énergie (électrique, thermique, transport) nécessaire à ce procédé, est relâchée dans l'atmosphère.

L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclables peut être, tels que les ajouts cimentaires, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions de GES et se traduit par la fabrication d'un béton durable sur le plan environnemental. La minimisation de l'élimination de ces résidus industriels et la diminution de la demande en ressources naturelles (comme le calcaire et le minerai de fer) sont autant d'autres avantages bien réels. Il importe également de noter que le béton à base d'ajouts cimentaires présente généralement une durée de vie plus longue que le béton « traditionnel ».

La durabilité d'une structure en béton dépend étroitement des différentes étapes de sa réalisation et de la méthode de sa conception.

Jusqu'à la mise en service de la structure, le béton mis en place traverse trois étapes importantes où certaines exigences doivent être satisfaites.

On distingue : l'état frais, l'état à jeune âge et l'état durci.

- **À l'état frais** : On doit s'assurer d'une bonne mise en place dans les coffrages, en ayant un béton uniforme et homogène qui remplit parfaitement les différentes zones même celles où l'accès est difficile à cause d'une forte concentration en armatures.
- **À jeune âge** : On doit assurer une résistance suffisante du béton à la traction, afin d'éviter les fissures causées par le retrait plastique et le dégagement excessif de chaleur. De bonnes conditions de mûrissement et une génération modérée de température sont alors recommandées.
- **À l'état durci** : On s'intéresse à des performances mécaniques appropriées et à de faibles valeurs de perméabilité. Ces facteurs combinés contribuent à garantir une durée de service prolongée de la structure.

Des trois états présentés ci-dessus, l'état frais du béton constitue, l'étape la plus importante et la plus délicate.

En effet, même si l'on arrive à produire en laboratoire un béton conforme aux exigences en matière de performances mécaniques, il se peut que ces objectifs ne soient pas atteints au niveau de la structure si la mise en place est imparfaite ; une présence de nids d'abeille et des signes de ségrégation après le décoffrage peuvent être constatés s'il y a une insuffisance ou un excès d'énergie de vibration durant la mise en place.

Ceci est le résultat d'une main-d'œuvre peu qualifiée et un manque de surveillance et de coordination sur chantier entre l'ingénieur concepteur et l'ingénieur chargé de l'exécution des travaux.

Afin d'assurer des structures uniformes, d'éviter de telles erreurs de mise en place du béton et de répondre au critère d'économie l'idée de produire des bétons fluides avec des ajouts écologiques, économiques et substituables au ciment ayant de préférence un caractère pouzzolanique, qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, est une solution intéressante ; c'est ainsi que le concept du béton autoplçant est né.

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

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

Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité.

Selon la densité du ferrailage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main d'œuvre considérable et réduit de façon très importante les nuisances sonores.

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

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

- 1) Formulation du béton avec le déchet de brique comme ajout minéral additif, dans le but de pouvoir conclure la possibilité d'un travail de substitution ;
- 2) Développement d'une formulation de béton autoplaçant qui répond à certains critères rhéologiques, tel qu'une bonne déformabilité, tout en assurant une meilleure résistance au ressuage, à la sédimentation et à la ségrégation ;
- 3) Valorisation du déchet de brique comme ajout minéral et mise en évidence de l'effet pouzzolanique.
- 4) Caractérisation des bétons autoplaçants avec la fumée de silice et le déchet de brique ;
- 5) Comparaison entre le comportement d'un béton autoplaçants avec le déchet de brique et celui d'un béton sans ajout vis-à-vis les résistances mécaniques, le retrait et l'activité pouzzolanique.

On examine alors la possibilité d'une activité d'origine hydraulique de cette poudre, due à ce que sa surface minérale favorise la germination du silicate de calcium hydraté (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Cet effet est entièrement distinct de l'effet Filler qui lui, concerne la contribution des éléments fins dans une granularité optimale de l'ensemble des grains du béton (additions, ciment, fines, sables et gravillons).

La présente thèse se compose de quatre chapitres présentés comme suit :

Les deux premiers chapitres feront l'objet d'un rappel bibliographique:

Afin d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs à la technologie des bétons, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par des généralités.

Ce premier chapitre présente également les diverses caractéristiques physico-chimiques de la pâte liante.

Le second chapitre présente des notions fondamentales relatives aux caractéristiques rhéologiques des bétons autoplacants et les résultats donnés dans la littérature, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur l'optimisation des teneurs en gros granulats, sable, liant, ajouts chimiques et minéraux, et la caractérisation mécanique des bétons autoplacants, ainsi qu'à quelques notions sur le déchet de brique comme ajout montrant l'intérêt de son utilisation dans le but de promouvoir une plus grande utilisation d'ajouts cimentaires dans le béton et d'améliorer l'uniformité de l'application et du rendement de cette technologie.

L'objectif du présent document est de présenter les concepts de base de l'utilisation d'ajouts cimentaires dans la fabrication du béton et son incidence en construction.

L'industrie de la construction a commencé à mettre au point et à utiliser des matériaux et des technologies plus éco énergétiques et respectueux à l'environnement dans la construction.

Les autres avantages comprennent la minimisation de l'élimination des résidus industriels, une réduction de la demande en ressources naturelles (par exemple, moins de calcaire pour fabriquer le ciment) et, moyennant un usage judicieux des ajouts cimentaires, de la production d'un béton qui présente des propriétés et une durabilité améliorées.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale :

Nous présentons au troisième chapitre l'ensemble des essais effectués au laboratoire des matériaux de construction à la faculté de génie civil, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

Les résultats des essais d'identification des matériaux utilisés et les essais effectués sur le béton frais et durci, ainsi que leurs interprétations sont regroupés au quatrième chapitre. À la fin de ce chapitre, nous présentons une notification économique ainsi qu'avantageuse du BAP avec ajout la brique broyée.

Quelques recommandations ainsi que d'éventuels travaux de recherches futures sont proposées.

I. Historique sur le béton et ses constituants

I.1. Introduction

Le béton est un composite hétérogène qui résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, parfois d'ajouts minéraux et de faibles quantités d'adjuvants. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir après le durcissement, un produit solide dont les capacités de résistances dépassent celles des meilleures roches naturelles.

Cette roche artificielle résiste bien à la compression et mal à la traction, c'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction qui remonte aux romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé, ce qui a permis de compenser son insuffisante résistance à la traction.

L'invention du béton armé est attribuée à Joseph LAMBOT, qui en 1848 fait flotter une barque en ciment armé et à Joseph MONIER, qui construisit grâce à ce matériau des bacs à fleurs en 1819.

L'utilisation du béton armé dans la construction s'étend rapidement en France sous l'impulsion de Joseph MONIER, COIGNET, François HENNEBIQUE et de Gabriel ARMAND.

En 1930, un pas conceptuel important est alors franchi avec l'invention du béton précontraint par Eugène FREYSSINET.

L'utilisation du précontraint autorise la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière.

Elle permet d'obtenir une grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction.

La reconstruction qui suit la deuxième guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art en France.

Pierre LEHELLE et Yves GUYON précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception.

Ensuite la Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (STUP) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène FREYSSINET donnant une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Des recherches menées depuis 1970 sur le béton et particulièrement sur ses constituants actifs conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés.

À Partir de 1980, on fabrique et on met en place des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 MPa et même 140 MPa (BTHP) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis.

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

Des chercheurs de l'université de Sherbrooke à leur tête P.C.AITCIN fabriquent des bétons de 400 MPa en utilisant des traitements thermiques et mécaniques appropriés et simples.

Pierre RICHARD, de son côté, a pu fabriquer un béton de 800 MPa en utilisant une poudre métallique.

En 1986, des chercheurs Japonais ont essayé pour la première fois de fabriquer un béton fluide qui se met en place sous l'effet gravitaire et sans vibration et qui résiste bien à la ségrégation et au ressuage, ce type de béton est appelé **béton autoplacant** ou béton autonivelant. [1]

I.2. Constituants du béton

I.2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau ; il forme une pâte faisant prise qui durci progressivement. Grâce à ses caractéristiques, cet élément permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, obtenu principalement par la pulvérisation du clinker et du sulfate de calcium hydraté, le ciment fut découvert par un maçon de Leeds, Joseph Aspdin en Angleterre. [1]

La composition chimique du ciment portland est comme suit : [21]

| Produit du cimentier | Formulation chimique | Abréviation |
|----------------------|---------------------------------------|----------------|
| Silice | SiO_2 | S |
| Chaux | CaO | C |
| Alumine | Al_2O_3 | A |
| Oxyde de fer | Fe_2O_3 | F |
| Gypse | $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ | CSH_2 |
| Anhydrite | CaSO_4 | CS |
| Calcite | CaCO_3 | / |

Le clinker de Portland comporte quatre (04) composés principaux : [21]

| Composés Chimiques | Formulation Chimique | Abréviation | Appellation minéralogique |
|-------------------------------|--|-----------------------|---------------------------|
| Silicate tricalcique | 3CaO SiO_2 | C_3S | Alite |
| Silicate bicalcique | CaOSiO_2 | C_2S | Bélite |
| Aluminate tricalcique | $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ | C_3A | Célite |
| Ferro aluminate Tetracalcique | $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | Ferrite |

Ces quatre (04) composés forment plus de 90% du clinker de Portland et le C_3S est toujours le minéral le plus abondant. Les autres composés mineurs sont :

la magnésie (MgO), la chaux libre (CaO), les alcalis (Na₂O, K₂O), le trioxyde de soufre (SO₃) ainsi que des traces d'oxyde de titane (TiO₂) et de phosphore (P₂O₅). [21]

I.2.1.1. L'aluminate tricalcique C₃A

Le C₃A est un composé qui s'hydrolyse rapidement. Sa vitesse de réaction est contrôlée par l'ajout de gypse. Il est responsable en partie des résistances à bas âge (1 jour). Ce composé libère beaucoup de chaleur lors de son hydratation. Sa vitesse de réaction a un effet direct sur les temps de prise du ciment portland. C'est le composé qui est principalement attaqué par les sulfates. Son contenu dans le ciment se situe entre 7 et 15 %.

Donc si on veut produire un ciment à basse chaleur d'hydratation ou un ciment résistant aux sulfates on limitera le contenu C₃A. [21]

I.2.1.2. Le silicate tricalcique C₃S

Par addition d'eau, ce composé durcit rapidement, il est responsable en partie de la prise du ciment. Par sa vitesse de réaction on lui attribue le développement de résistance à bas âge. Après le C₃A il est le composé qui dégage le plus de chaleur d'hydratation. Son contenu dans le ciment peut varier entre 35 et 55 %. [21]

I.2.1.3. Le silicate bicalcique C₂S

Ce composé durcit lentement, il est surtout responsable des gains de résistances au delà d'une semaine. Son contenu dans le ciment varie de 15 à 35 %. [21]

I.2.1.4. Le ferro aluminate tetracalcique C₄AF

Ce composé s'hydrate rapidement mais contribue peu ou pas aux résistances de la pâte de ciment. C'est le composé qui est responsable de la couleur du ciment. Il permet de diminuer la température de formation du clinker au four. Dans le ciment il varie de 5 à 10 %. [21]

I.2.1.5. La CaO libre

La chaux libre est la chaux non combinée apparaissant sous la forme CaO dans le clinker. Cependant dans le ciment, la chaux libre apparaît principalement sous la forme d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, à cause de l'hydratation de CaO avec l'eau libérée par l'addition de gypse humide dans le broyeur à clinker. Dans la détermination de la qualité du ciment, la présence de CaO joue donc un rôle important. Il faut donc qu'elle soit limitée le plus possible pour éviter les dangers d'expansion dans la pâte de ciment. [21]

I.2.1.6. La magnésie MgO

La magnésie qui provient de la dolomite $MgCO_3$, ne se combine pas avec les principaux oxydes. Une partie entre en solution dans les constituants majeurs du clinker et le reste se cristallise sous forme de périclase (MgO).

L'hydratation de la périclase, comme la CaO cause l'expansion. Comme la magnésie est cuite à très haute température, elle ne s'hydrate que très lentement. [21]

I.2.1.7. Les alcalis (K_2O , Na_2O)

Les alcalis sont introduits dans le ciment par les matières premières. Au four les oxydes alcalins se combinent au SO_3 et forment des sulfates alcalins. Le contenu en SO_3 dans le clinker n'est généralement pas suffisant pour réagir avec tous les alcalis alors il peut réagir avec d'autres composés du clinker (C_2S et C_3A).

Une forte teneur en alcalis peut créer des expansions distinctives dans un béton contenant des agrégats réactifs. [21]

Ces réactions alcalis-silice peuvent être contrôlées par l'ajout d'additifs minéraux.

I.2.1.8. Le trioxyde de soufre SO_3

Le SO_3 provient principalement du gypse dosé en fonction du C_3A pour régulariser la prise du ciment et du combustible utilisé au four lors de la cuisson. Un surdosage en gypse entraînerait un gonflement au niveau de la pâte. [21]

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 :

Tableau 1.1 : Résistances mécaniques des ciments courants. [11]

| Classe des ciments | Résistance à 2 jours (MPa) | Résistance minimale à 28 jours (MPa) | Résistance maximale à 28 |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 32.5 | / | ≥ 32.5 | ≤ 52.5 |
| 32.5R | ≥ 13.5 | ≥ 32.5 | ≤ 52.5 |
| 42.5 | ≥ 12.5 | ≥ 42.5 | ≤ 62.5 |
| 42.5R | ≥ 20 | ≥ 42.5 | ≤ 62.5 |
| 52.5 | ≥ 20 | ≥ 52.5 | / |
| 52.5R | ≥ 30 | ≥ 52.5 | / |

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.

A noter que le C_3S et le C_2S sont les deux composés principalement responsables des résistances en compression ; C_3S à très court terme moins d'une semaine, C_2S d'une semaine et plus. [21]

I.2.1.9. Caractéristiques physico-chimiques des ciments Portland

1) Hydratation du ciment

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, des réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus au moins enchevêtrées produisant la prise.

La réaction d'hydratation peut se développer en quatre (04) périodes principales : [13]

a) Période initiale

Au cours de la quelle le silicate tricalcique C_3S se dissout superficiellement pour former un mono silicate de calcium hydraté et l'ettringite primaire.

b) Période dormante

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

c) Période de prise

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

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

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

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

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

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

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

d) Période de durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des mois voir même des années avec une vitesse de plus en plus lente au cours des quelles les résistances mécaniques continuent à croître.

Il faut noter que la quantité d'eau nécessaire pour un gâchage correct du béton est supérieure à celle nécessaire aux seules réactions chimiques, car il faut distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés, son pourcentage étant en général de l'ordre de 20 à 25% du poids de ciment ;
- L'eau adsorbée aux surfaces des granulats,
- L'eau libre dans les fins réseaux capillaires, qui s'élimine plus ou moins par séchage et qui est nécessaire pour obtenir la plasticité et la maniabilité indispensables au gâchage et à la mise en place des bétons. [29]

2) Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique, plus de 500 joules par gramme de ciment sont libérés et selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus au moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C₃A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, cette chaleur à 12 heures, est de l'ordre de 300 j/g pour certains CPA-CEM I. [29]

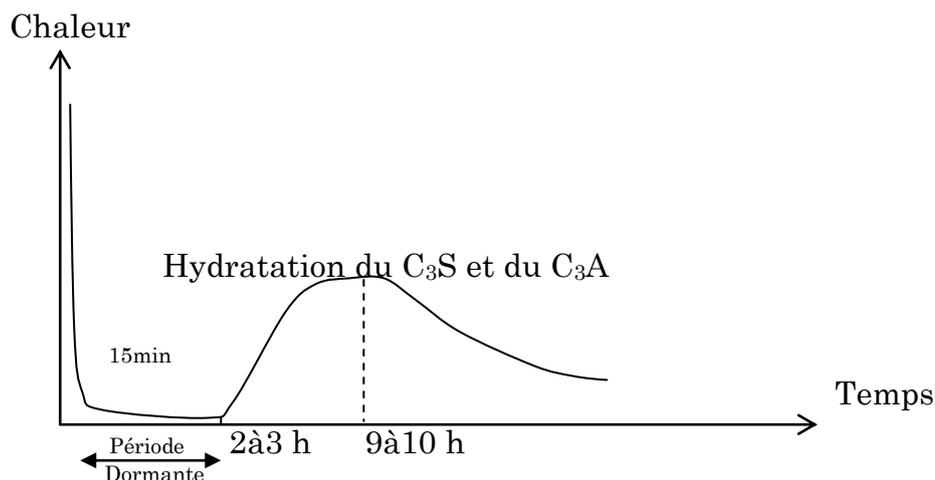


Figure 1.1 : Chaleur d'hydratation du ciment

3) Finesse de mouture

La finesse a une relation directe avec presque toutes les propriétés physiques du ciment.

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

Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées avec une accélération de l'hydratation du ciment qui générera plus de chaleur d'hydratation ainsi une augmentation de la demande en eau, mais par contre, avec une finesse trop basse on obtient un béton avec une pauvre maniabilité, un ressuage excessif et par conséquent les risques de retrait et de fissuration sont accrus. [1]

4) Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

La norme *NFP 15-433* impose les valeurs limites, à 28 jours, de

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portlands CPA-CEM I et CPJ-CEM II de classe 32.5 ;

- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R, 42.5 et 42.5R.

5) Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

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

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5% pour les CPA-CEM I ainsi que pour les clinkers des ciments courants.

6) Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ 10% de celles constatées dans l'air.

7) Teneur en insoluble

C'est la portion de ciment qui n'est pas soluble dans l'acide chlorhydrique. Il s'agit habituellement de silice (SiO_2) qui ne s'est pas combinée au four. La teneur en insoluble est un indice de l'accomplissement des réactions chimiques au four.

8) Résistances aux sulfates

Plus le C_3A est bas, meilleure est la résistance du béton à ces attaques de sulfates. [19]

I.2.2. Les ajouts minéraux

Ce sont des particules très fines incorporées dans le béton pour améliorer ses caractéristiques physico-chimiques. On cite : la fumée de silice, les cendres volantes, laitiers de haut fourneau, pouzzolanes, fillers calcaires, etc.....

I.2.2.1. La fumée de silice

La fumée de silice est une nouvelle venue parmi les liants hydrauliques. A l'origine elle a été présentée comme une pouzzolane. Cependant, son action dans le béton n'est pas seulement celle d'une pouzzolane très réactive, car elle présente d'autres qualités particulièrement bénéfiques pour les bétons. Ajoutons aussi que la fumée de silice est un matériau peu économique.

La fumée de silice est aussi appelée *microsilice* ou *fumée de silice condensée*, mais le terme « fumée de silice » est le plus généralement utilisé.

C'est un sous-produit des usines de fabrication du silicium métallique (Si) et des différents ferro-alliages contenant du silicium comme le (FeSi, CaSi) ferrosilicium obtenu dans un four à arc électrique à une température de 2000 °C ou le quartz de grande pureté est réduit à l'état de silicium et de charbon.

Le SiO entraîné par les gaz depuis la zone de combustion des fours s'oxyde et se condense sous formes de particules de silice amorphe (SiO₂) sphériques extrêmement fines d'où le nom de fumée de silice. La silice, sous forme de verre (amorphe), est très réactive et la petitesse des particules, accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium produit lors de l'hydratation du ciment Portland. [1]

L'idée de son utilisation 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 haut réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice et à contribuer en l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Les très petites particules de fumée de silice peuvent combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore le remplissage des vides. Lorsque le four comprend un système de récupération de chaleur efficace, la majeure partie du carbone est brûlée si bien que la fumée de silice est pratiquement sans carbone et de couleur claire. Toutefois, les fours n'ayant pas de système complet de récupération de chaleur laissent échapper un peu de carbone dans la fumée, qui présente par conséquent une couleur foncée. [25]

I.2.2.1.1. Propriétés physico-chimiques de la fumée de silice

Les particules de fumée de silice ont une structure vitreuse et sont extrêmement fines, la plupart ont un diamètre compris entre 0,03 et 0,3 µm : le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0,1 µm ; elles sont donc 100 fois plus fines que les grains de ciment et contiennent en général plus de 90% de silice.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2,20, mais elle est un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est nettement moins dense que le ciment Portland dont la densité est de 3,1.

La suspension présente un pH de 5,5 sans que cela n'entraîne de conséquences lorsqu'on l'utilise dans le béton.

Les fumées de silices ont une composition chimique très constante, le laboratoire de la société canadienne SKW qui produit des fumées de silice provenant de la fabrication de silicium ou de ferro-silicium a publié les résultats de la compilation de l'analyse chimique de 32 échantillons de fumées de silice prélevés quotidiennement. [25]

Tableau 1.2 : Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada. [2]

| Teneur (%) | Moyenne | Écart-type | Valeur la plus élevée | Valeur la plus faible |
|---|---------|------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO ₂ | 92.1 | 1.3 | 94.9 | 89.1 |
| Al ₂ O ₃ | 0.25 | 0.12 | 0.70 | 0.16 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.79 | 0.70 | 3.1 | 0.22 |
| Na ₂ O | 0.17 | 0.04 | 0.11 | 1.1 |
| K ₂ O | 0.96 | 0.22 | 1.44 | 0.56 |
| SO ₃ | 0.36 | 0.1 | 0.57 | 0.16 |
| SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O | 93.1 | 1.44 | 95.7 | 90.3 |

I.2.2.1.2. Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, telles que la très grande finesse et la teneur en silice (plus de 92%) ainsi que sa structure vitreuse, les fumées de silice peuvent agir selon quatre mécanismes d'action : [25]

a) Effet pouzzolanique

Grâce à leur finesse, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H.



b) Effet physico-chimique

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compact et imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de $0.1 \mu\text{m}$ commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins, ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit.

c) Effet physique

Les particules de fumée de silice étant vitreuses et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment.

D'après **P-C.AITCIN**, la fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment. [25]

L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un superplastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles.

d) Effet Filler

Il s'agit de la densification de la pâte par les particules très fines ; avec un rapport E/C faible les petites microsphères de la fumée de silice déplacent l'eau piégée entre les grains de ciment d'où plus d'eau pour la maniabilité et donc un béton plus maniable avec une diminution de porosité dans la pâte hydratée. [19]

I.2.2.1.3. Influence de la fumée de silice sur les propriétés des bétons

Par leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques, les fumées de silice peuvent influencer sur les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci :

- **À l'état frais**

L'utilisation des fumées de silice, permet :

- ❖ D'augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons autoplaçants ;
- ❖ De faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

- **À l'état durci**

- ❖ Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton aux gaz et aux liquides.
(Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement imperméables);
- ❖ Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance en compression à 28 jours (d'après P.C.AITCIN, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1 kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4 kg de ciment); [25]
- ❖ Réduire considérablement la quantité de chaleur qui se développe dans le béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.
- ❖ Améliore quelques performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction.
- ❖ Augmente le module d'élasticité.
- ❖ Réduit le fluage.
- ❖ Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- ❖ Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion.
- ❖ Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
[10]

Ainsi l'utilisation des ajouts est une pratique inconnue par les constructeurs de notre pays aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi c'est pourquoi il nous a paru important d'étudier et d'évaluer l'influence du déchet de brique comme ajout au ciment sur les propriétés d'un nouveau type de béton qui est le béton autoplaçant et qui serait une idée innovante et intéressante.

I.2.2.2. Le déchet de brique (brique broyée) et l'activité pouzzolanique

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les principales pouzzolanes sont : les matériaux volcaniques (cendre, scorie...), les cendres des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux, les cendres de balles de riz, la bagasse des cannes à sucre et **l'argile calcinée**. D'autres minéraux tels que les feldspaths et les zéolites peuvent manifester des propriétés pouzzolaniques. La chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker réagit avec le matériau pouzzolanique à l'intérieur d'un mortier pour former des produits qui participent aux résistances mécaniques du mortier. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques, au renforcement de l'imperméabilité et de la durabilité du mortier, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait du mortier au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Une possibilité de récupérer des déchets de briques pour les utiliser comme ajout pouzzolanique dans du ciment Portland artificiel serait une solution intéressante. Pour ce faire, nous allons étudier la réactivité ainsi l'indice d'activité pouzzolanique par la vérification des résistances en compression des mortiers de ciment contenant des proportions définies de ces déchets par rapport aux résistances d'autres mortiers de ciment ne contenant pas ces ajouts. [5]

I.2.2.2.1. Détermination de l'effet pouzzolanique par la diffraction des rayons X

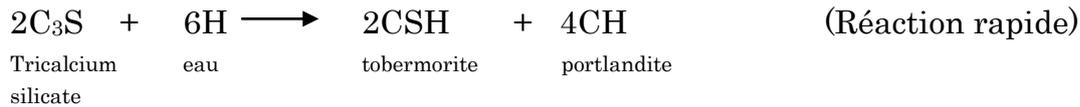
Le diffractomètre est un appareil permettant de mesurer la diffraction d'une onde sur une cible.

Une poudre formée d'une phase cristalline donnée va toujours donner lieu à des pics de diffraction dans les mêmes directions, avec des hauteurs relatives à peu près constantes. Ce diagramme de diffraction forme ainsi une véritable signature de la phase cristalline. Il est donc possible de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un mélange (mélange de poudre ou échantillon massif polyphasique), à condition d'avoir auparavant déterminé la signature de chaque phase.

La diffraction X permet à partir de la structure cristalline de mettre en évidence la nature des phases. La recherche de phase s'effectue par analyse du spectre et

comparaison à des fiches étalons en attribuant un facteur de mérite qui qualifie la justesse de la comparaison.

En effet, en présence d'eau, les composés principaux du clinker à savoir: C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF réagissent suivant des réactions qui produisent de grandes quantités de chaux hydraté appelée portlandite, comme l'illustre l'équation suivante:



C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O.

La portlandite (CH) libérée lors des réactions d'hydratation du ciment réagit avec les poudres de déchet suivant les réactions pouzzolaniques fournissant ainsi les silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui contribuent aux résistances mécaniques du mortier.

Les indices d'activité pouzzolanique des éprouvettes contenant 10 % et plus des déchets sont inférieurs à ceux du ciment.

Cela pourrait s'expliquer par la lenteur de la réaction pouzzolanique. Car, plus le pourcentage de remplacement du ciment par le matériau pouzzolanique est grand, plus les résistances des mortiers ainsi obtenus prennent du temps pour rattraper celles du mortier ne contenant pas d'ajouts.

Les ciments ayant des ajouts pouzzolaniques ont l'avantage de fournir des mortiers dont les résistances augmentent à long terme (mortiers durables).

Il serait nécessaire de suivre l'évolution des résistances en compression à long terme des mortiers, afin d'en déceler les maxima. [5]

I.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au delà des tolérances réglementaires suivantes :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance

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

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances. [11]

I.2.4. Granulats

On définit les granulats comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 et 40 mm (Sable, graviers, cailloux) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

On distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivière et les granulats concassés, obtenus à partir des roches exploitées en carrières.

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.

I.2.5. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités n'excédant pas 5% de la masse du ciment, afin d'améliorer certaines propriétés, contrairement au ciment, aux granulats et à l'eau, ils ne sont pas essentiels au béton, mais sont cependant un constituant important de plus en plus utilisé, au point que, actuellement dans la majorité des pays, un béton confectionné sans adjuvant est une exception.

Les principaux adjuvants sont : [1]

- ⤴ **Les superplastifiants** ils permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.
- ⤴ **Les retardateurs de prise** 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 du reprise de bétonnage.
- ⤴ **Les accélérateurs de prise** ils trouvent leur utilisation dans la réalisation de scellement ou d'étanchement ainsi par temps froid.
- ⤴ **Les accélérateurs de durcissement** ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques à jeune âge afin de décoffrer rapidement et augmenter par conséquent la cadence de travail, en particulier en temps froid.
- ⤴ **Les entraîneurs d'air** ils favorisent la formation de microbulles d'air (agrégats fictifs) de façon homogène afin d'augmenter la résistance du béton aux cycles gel-dégel.
- ⤴ **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, bêche à eau. [8]

Conclusion

- Le béton de ciment Portland va toujours être le matériau de construction le plus couramment utilisé dans l'avenir. Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton.
- Les déchets peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker, comme adjuvants pour le ciment, ou encore comme granulats pour le béton. Cette thèse traite la possibilité d'employer le déchet de brique comme ajout dans le béton, application qui est particulièrement prometteuse surtout si elle présente un caractère pouzzolanique. Parmi les divers matériaux étudiés on trouve les laitiers, les déchets des centrales thermiques, le béton récupéré, les déchets provenant de l'exploitation de mines ou de carrières, les déchets de mines de charbon, le verre de récupération, les résidus d'incinérateurs, les boues rouges, **l'argile cuite** et la sciure de bois. L'usage de ces matériaux est toutefois limité en ce sens que plusieurs d'entre eux proviennent d'endroits très éloignés des chantiers de construction. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont les rebuts qui ont le meilleur potentiel étant donné leurs propriétés très recherchées telles que leur solidité, leur résistance mécanique, leur forme, leur résistance à l'abrasion et leur granulométrie.
- Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel.

II. Le béton autoplaçant

II.1. Définition du béton autoplaçant

De nombreux termes définissent ce béton : béton autonivelant, béton autocompactant (Self Compacting Concrete en Anglais) ou béton hyper fluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de la construction est béton autoplaçant, terme utilisé dans cette thèse et comme abréviation BAP.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables.

Quelques fois, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales, de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales.

Les principes de formulations des bétons autoplaçants se distinguent par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + sables + eau + adjuvants + fines) plus élevé que les bétons ordinaires, ils se caractérisent aussi par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants appelés superplastifiants.

Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents viscosifiants, entre également parfois dans leur formulation. Ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte, pour lui conférer un certain nombre de propriétés qui visent à limiter la ségrégation.

Pour ces bétons, on essaie le plus possible de travailler avec des granulats de 16 mm de taille maximale, voir dans la mesure du possible moins.

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement le béton autoplaçant du béton ordinaire, le BAP s'écoule sous son propre poids avec un débit suffisant sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des moyens de vibration ou de serrage. Le BAP doit pouvoir ainsi s'écouler sans vibration dans des zones confinées ou très ferraillées, tout en possédant une fluidité élevée et une bonne résistance à la ségrégation. [7], [6].

II.2. Historique des bétons autoplaçants

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique.

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

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ces bétons contiennent souvent des agents de viscosité ou agents colloïdaux afin de résister à la ségrégation des gros granulats et au phénomène de ressuage.

L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir de plus en plus répandue partout dans le monde. En effet depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répandue dans le domaine de la construction. [7]

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confinés, pieux,.....etc.). [6]

À titre d'exemple nous citons quelques réalisations japonaises :

- ♦ Le pont Kiba park. où 650 m³ de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa [17] ;
- ♦ Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMURA et coll. 1994) [22] ;
- ♦ Le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll. 1995) [14].

- ♦ Le stade de Fukuoka où 10 000 m³ de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées et de formes compliquées (IZUMI et coll. 1995) [15]

D'autre part, plusieurs autres structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux, etc.) ont été construites totalement ou partiellement avec des bétons autoplaçants.

II.3. Composition des bétons autoplaçants

Les approches de composition des BAP, sont basées sur les critères suivants : [3], [6]

a) Une quantité de fines importante

La composition des bétons autoplaçants comporte une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m³ de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et limiter les risques de ressuage et de ségrégation.

Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du béton.

b) Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

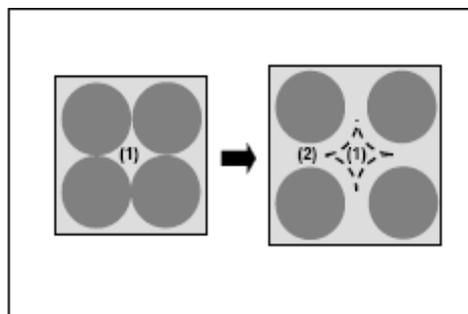


Figure 2.1 : Notion d'excès de pâte :
la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).[28]

c) Utilisation des superplastifiants

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage.

d) Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau.

Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

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 faibles.

Les agents de viscosité ont la réputation de rendre les bétons autoplaçants moins sensible à des variations de la teneur en eau, ils peuvent en parallèle conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la maniabilité.

e) Un faible volume de gravillon

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats.

Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20 mm.

Le rapport gravillon/sable pour les BAP est voisin de 1. [12]

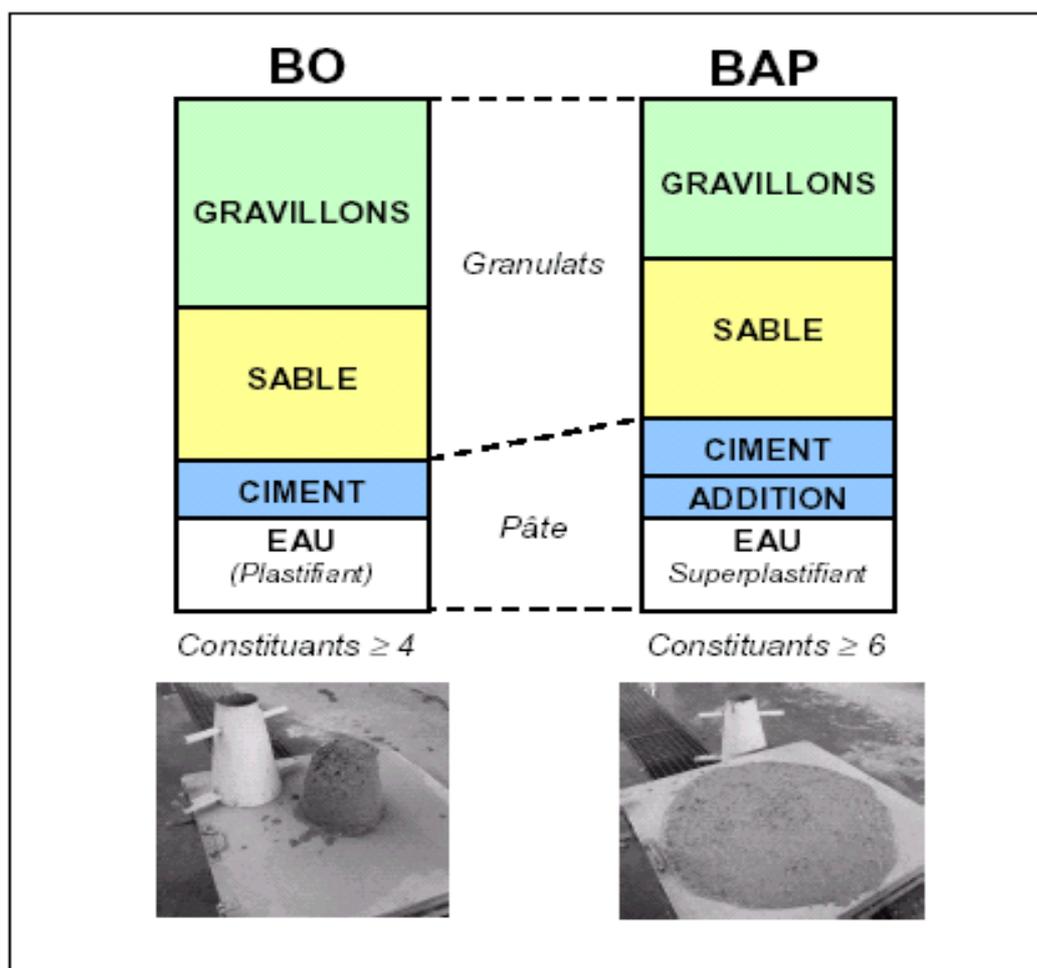


Figure 2.2 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP).
Aspect à l'état frais d'un BO et d'un BAP [28]

II.4. Matières premières utilisées dans les BAP

II.4.1. Liants et granulats [3]

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 52.5 ou 42.5.

Le liant est constitué de ciment au quel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non, ce sont principalement :

- Des fillers calcaires (calcite, dolomite,...) ;
- Des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau ;
- Des cendres volantes ;
- Des fumées de silice.

Le développement durable du béton permet entre autre de réduire l'émission des gaz à effet de serre.

La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO₂ dans l'atmosphère, le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO₂ émise.

Le remplacement d'une fraction de ciment par des cendres volantes ou de laitier permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long.

Les fillers calcaires ont un effet inverse, ils constituent des sites pour la formation des hydrates et favorisent ainsi la prise du matériau.

La fumée de silice lorsqu'elle est introduite dans le BAP (CLERGUE et MONACHON, 1998), conduit à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées.

La brique broyée qu'on utilisera pour la première fois dans ce nouveau type de béton comme ajout constituera peut être une poudre à réactivité pouzzolanique et du fait son utile incorporation au béton pourrait donner des caractéristiques mécaniques ainsi que rhéologiques très intéressantes.

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.

Les coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés. [26], [7].

II.4.2. Les adjuvants

L'usage des adjuvants a besoin d'être bien contrôlé, parce que toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés du béton.

L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes telles que : les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tels que les lignosulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,40 ou plus. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est recommandé.

Les produits à base de poly-naphtalène sulfonate et de poly-mélatamine sulfonate sont les plus utilisés depuis plusieurs années. Ils peuvent accomplir jusqu'à 30% de réduction d'eau. [26]

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de polyacrylates a été développée récemment et peut accomplir la même réduction de l'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus inférieure. Quelques ajustements sont faits pour diminuer les effets secondaires de ces produits; tel que l'entraînement excessif d'air ou un retard excessif de la prise du ciment.

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (ou modificateur de la viscosité) permettent la production de béton autoplaçant.

Les bétons autoplaçants nécessitent un usage simultané de superplastifiant et d'agent colloïdal. Quelques-uns de ces produits sont à base de gomme de polysaccharide et d'autres à base d'hydroxyde propyle méthyle cellulose (HMPC).

Ces produits augmentent la viscosité et la stabilité des bétons autoplaçants qui ont besoin d'un dosage élevé en superplastifiants pour obtenir une bonne fluidité.

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton dû à un fort dosage en superplastifiant. La sélection et le dosage de ces deux adjuvants devraient être bien contrôlés et leur compatibilité bien étudiée avant d'utiliser leur effet synergique pour optimiser les propriétés du béton autoplaçant. [26]

II.4.2.1. Superplastifiant

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.

Les superplastifiants utilisés pour les BAP sont les mêmes que ceux employés pour les autres types de bétons.

Les principaux superplastifiants sont à base de : [8]

- ✓ Copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS).
- ✓ Copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS).
- ✓ Polymère avec fonction acrylate (PA).
- ✓ Polymère avec des fonctions carboxylate (PC).
- ✓ Monomère avec les fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC).

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau.

Les particules sont ainsi dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante.

Pour une composition granulaire donnée, la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croit avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants (TANGTERMSIRIKUL et al. 1988). [26]

Pour mettre en évidence la tendance qu'ont les grains de ciment à flocculer lorsqu'on les met dans l'eau, P.C.AITCIN [27] a réalisé un simple essai, il s'agit d'introduire 50 gr de ciment dans un vase gradué de 1 litre, d'agiter le tout et de laisser les grains de ciment sédimenter.

Avant le début de la sédimentation, les grains de ciment forment une suspension homogène, mais très vite on voit les plus gros grains de ciment se déposer au fond du vase gradué.

Après quelques dizaines de minutes à 1 ou 2 heures, on voit assez subitement l'eau de la partie supérieure du vase devenir claire alors que l'on voit tous les grains de ciment se graduer et occuper un volume nettement plus élevé que le volume occupé par 50 gr de ciment sec au fond du vase comme le montre la figure 2.3.

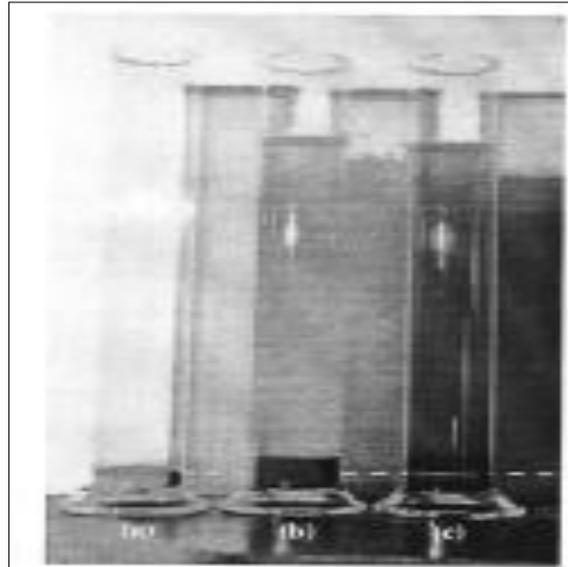


Figure 2.3 : Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant [27]

- (a) Volume occupé par 50 gr de ciment au fond du vase gradué.
- (b) Volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension.
- (c) Volume occupé après 24 heures par 50 gr de ciment mis en suspension où l'on a remplacé 10 cm³ d'eau par 10 cm³ de superplastifiant.

Si l'on répète la même expérience mais cette fois-ci en remplaçant 10 cm³ d'eau par 10 cm³ d'un superplastifiant de type polynaphtalène sulfonate (PNS), on commence encore par voir se déposer les gros grains de ciment au fond du vase gradué, mais on ne voit plus les grains de ciment se déposer en bloc au fond du vase. On voit plutôt les particules de ciment qui continuent à se sédimenter régulièrement pour finalement, après 24 ou 48 heures, ne former au fond du vase qu'une couche de la même épaisseur que 50 gr de ciment sec.

a) La compatibilité ciment–superplastifiant

Avec le développement de la technologie des bétons à haute performance et les bétons autoplacants, on a vu apparaître de plus en plus fréquemment des phénomènes d'incompatibilité ciment-superplastifiant. Ces phénomènes d'incompatibilité sont liés à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium présent dans le ciment.

En plus de leur action dispersante, les superplastifiants peuvent réagir avec le C₃A (Aluminates tricalcique), bloquer la formation d'ettringite et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solution de la plupart des différentes formes de sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment.

b) Mécanisme d'action des réducteurs d'eau et des superplastifiants

Les grains de ciment dans une solution de ciment et d'eau se trouvent souvent floculés à cause des charges attractives entre les sites (-) et (+) qui se trouvent sur les surfaces des grains de ciment, ainsi que la tension superficielle élevée d'eau à cause des liants d'hydrogène entre les molécules d'eau (plus de ciment est retenu en suspension-système floculé).

Les réducteurs d'eau et les superplastifiants sont des surfactants qui :

- Réduisent la tension superficielle de l'eau (surtout le RD).....moins de floculation des grains de ciment par l'eau.
- S'adsorbent à l'interface entre l'eau et le ciment (aussi les granulats).

Les réducteurs d'eau sont des molécules qui présentent des extrémités fortement chargées qui viennent neutraliser des sites opposés sur les grains de ciment (adsorbition). Il y a aussi des RD qui sont non ioniques qui viennent se fixer sur les grains de ciment.

Lors de cette adsorbition, les extrémités polaires négatives des molécules de RD ou de superplastifiant s'orientent vers la solution (au lieu que vers les solides) causent une répartition des charges électriques négatives sur les grains de ciment qui réduisent la tension superficielle de l'eau dans la solution et causent aussi des forces répulsives entre les grains de ciment. [19]système dispersé.

II.4.2.2. Agent de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation. Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

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

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de

collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

Il permet de conserver une répartition homogène des différents constituants, l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage. [8]

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps, sur une durée de l'ordre d'une heure.

Concernant l'adsorption d'une partie des polymères à la surface des grains de ciment, celle-ci varie selon la nature des polymères et les caractéristiques du ciment. La quantité de polymère adsorbée est d'autant plus élevée que la finesse du ciment est grande. Cependant, deux ciments de finesse identiques peuvent retenir des quantités de polymères différentes.

Les caractéristiques minéralogiques des grains de ciment sont autant de paramètres déterminants. Selon BURGE (1999), la quantité de polymère adsorbée par un ciment donné dépend du caractère ionique plus ou moins prononcé de l'adjuvant et de son poids moléculaire. [14]

L'adsorption est d'autant plus forte que le polymère est fortement ionique et de poids moléculaire faible. BURGE (1999) montre que les polymères peu ioniques permettent d'obtenir une meilleure fluidification des bétons autoplaçants.

Jusqu'à présent, il n'est pas encore possible de fabriquer des superplastifiants qui soient efficaces avec n'importe quel ciment, pour n'importe quel E/C, parce que la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Cependant, lorsqu'on fabrique un ciment portland, si on prend en considération l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, il est possible d'ajuster la composition du ciment portland pour qu'il devienne parfaitement compatible avec tous superplastifiants que l'on retrouve sur le marché.

Il faut reconnaître que les superplastifiants, quand ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels des bétons durables tout autant que le ciment. Grâce aux propriétés dispersantes très efficaces des superplastifiants, il est maintenant possible de fabriquer des bétons fluides à des rapports E/L très faibles de l'ordre de 0.32 ou même moins. [3], [14].

II.5. Propriétés des BAP

La rhéologie des bétons frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même. Un des avantages des bétons autoplacants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité). En plus d'une ouvrabilité élevée on cherche aussi à améliorer la stabilité volumétrique des bétons autoplacants.

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

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais.

II.5.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage

Le béton 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). [23]

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. (1992) [23] pour évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères.

L'essai comme le montre la figure 2.4 consiste à déverser 30 litres de béton autoplacant dans un contenant cubique dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 50 mm. Le maillage est supposé simuler une zone fortement congestionnée d'un coffrage.

Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le moment de l'essai, on applique une pression uniforme de 0.1 kg/cm^2 sur toute la surface du béton et on ouvre la trappe. Lorsque l'écoulement cesse, on mesure la quantité du béton ayant traversée le grillage.

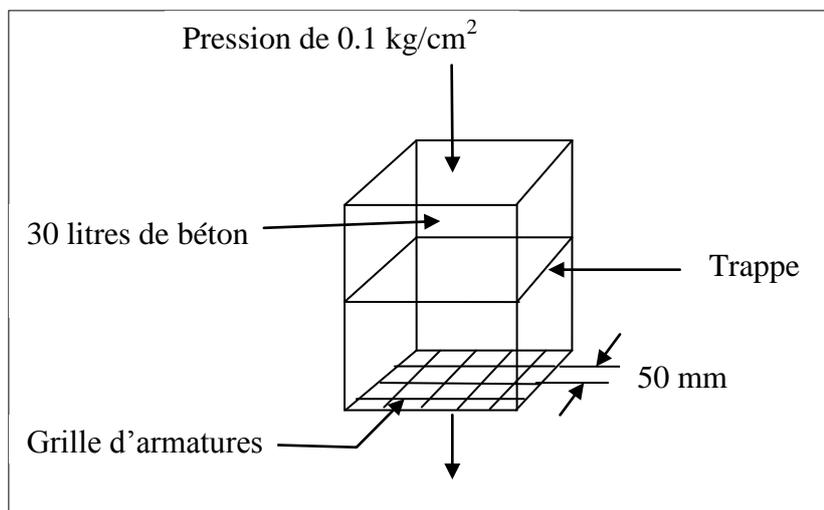


Figure 2.4 : Essai de la boîte, capacité de remplissage (OZAWA et coll. 1992). [23]

La relation entre le volume du béton passant à travers le grillage et l'affaissement est présentée par le graphe de la figure 2.5 :

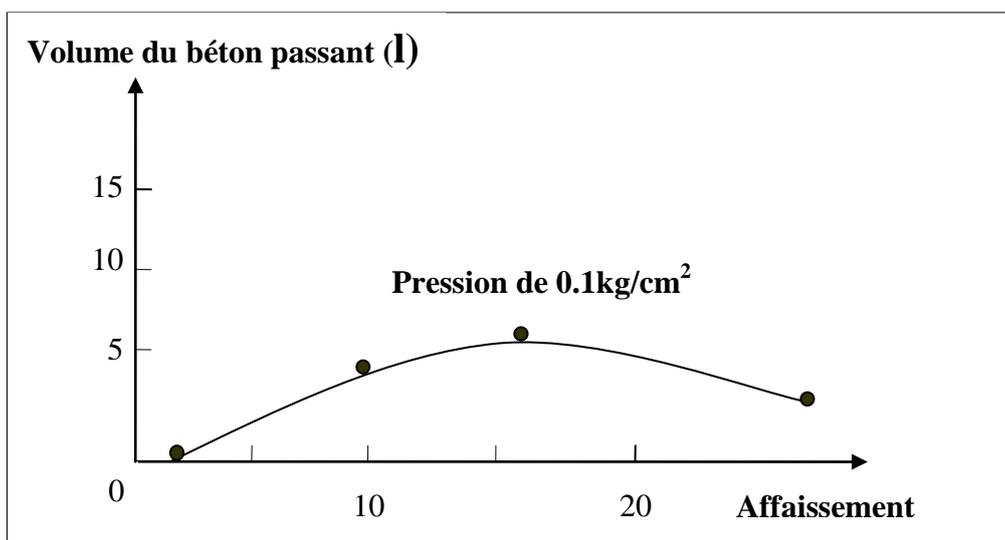


Figure 2.5 : Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte, OZAWA et coll. 1992). [23]

Cette relation n'est en fait pas linéaire, mais elle possède plutôt un optimum pour les bétons à faible affaissement, il y a une difficulté d'écoulement à cause d'un manque de déformabilité.

Par contre, dans le cas des affaissements élevés, on assiste à un phénomène de ségrégation. Le béton possède une très faible viscosité et les granulats se séparent du mortier pour former des arches et bloquent l'écoulement.

La capacité de remplissage maximale correspond à un affaissement où la courbe de la déformabilité et celle de la résistance à la ségrégation se coupent (cf. figure 2.6) :

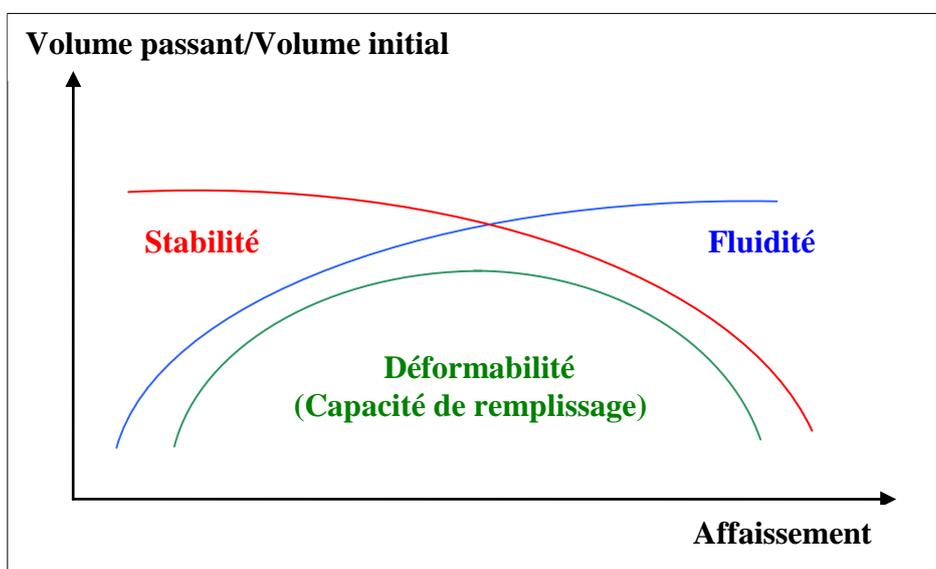


Figure 2.6 : Capacité de remplissage ou déformabilité maximale (OZAWA et coll. 1992). [23]

La capacité de remplissage est contrôlée principalement par la déformabilité du béton à faible affaissement et par la résistance à la ségrégation à affaissement élevé. L'eau libre est l'un des facteurs qui définissent la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation. Il s'agit de la fraction d'eau de malaxage qui n'est pas retenue, physiquement ou chimiquement, par les granulats et le liant. Cette eau est responsable de l'amélioration de l'ouvrabilité du béton, et elle est calculée de la manière suivante :

$$E_l = E - (E_g + E_p) \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

- E_l : Eau libre ;
- E : Eau totale dans le mélange ;
- E_g : Eau retenue par les granulats ;
- E_p : Eau retenue par le liant.

OZAWA et coll. (1992) [23] ont montré que la déformabilité est uniquement fonction de l'eau libre. En effet, ils mesurent le volume de sable maximal que peut contenir un mortier de rapport E/L donné pour que toute la quantité de mortier passe à travers un cylindre percé de trous ayant un diamètre égal à l'espacement entre les gros granulats dans un béton.

On constate que, plus le rapport E/L augmente, plus on peut mettre du sable pour une quantité fixe de pâte. Cependant cet essai montre la présence d'un rapport E/L optimal au-dessus duquel un excès de la quantité de sable ajoutée provoque un arrêt d'écoulement par blocage des grains de sable au droit des trous. C'est la ségrégation au niveau du mortier.

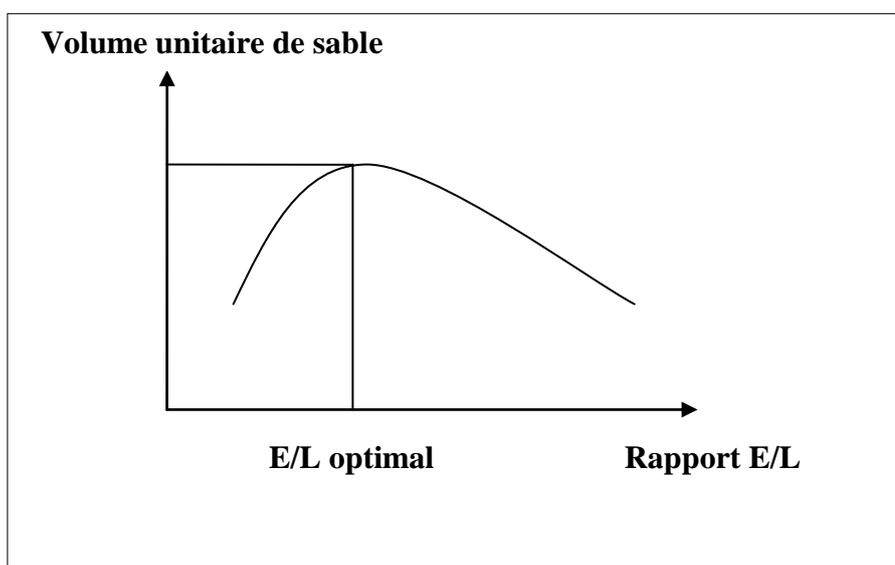


Figure 2.7 : Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L. [17]

II.5.2. Fluidité

Les essais développés dans cette partie s'apparentent beaucoup plus à des essais technologiques qui dépendent certes des propriétés rhéologiques du béton mais ne permettent pas de déterminer un seuil de cisaillement ou une viscosité plastique, paramètres fondamentaux de la rhéologie des fluides d'une manière générale.

II.5.2.1. Essai d'étalement

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à choc.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.



Figure 2.8 : Caractérisation du BAP à l'essai d'étalement

Dans le cas du cône d'Abrams l'étalement est noté Slump flow et il est appelé Flow table dans l'essai au cône DIN.

La valeur du Slump flow d'un BAP est comprise entre 540 et 700 mm. Il existe une corrélation entre le Slump flow et le Flow table.

À titre indicatif, quelques valeurs sont données dans le tableau 2.1

Tableau 2.1 : Corrélation entre le Slump flow et le Flow table sans choc

| | | | |
|------------------------|-----|-----|-----|
| Slump Flow (mm) | 540 | 600 | 700 |
| Flow table (mm) | 430 | 500 | 680 |

II.5.2.2. Vitesse d'écoulement

On mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante.

La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6.25 à 2.5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement T_{50} variant entre 4 à 10 secondes.

II.5.2.3. Essai de la table de fluidité

L'essai d'affaissement est exécuté sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20 mm. Sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente de vitesse égale à 12.5 mm/s introduits par une manivelle.

Le nombre d'amplitudes qui correspondent à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont ainsi mesurés (KASAI et coll. 1991). Cet essai est aussi semblable à l'essai d'étalement « DIN1048 Flow table ». [17]

II.5.2.4. Essai de la boîte en L

On remplit la partie verticale du L de béton (cf. figure 2.9) et on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales. Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Pour des applications moins ferrillées, il est possible d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume la teneur en granulat d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant.

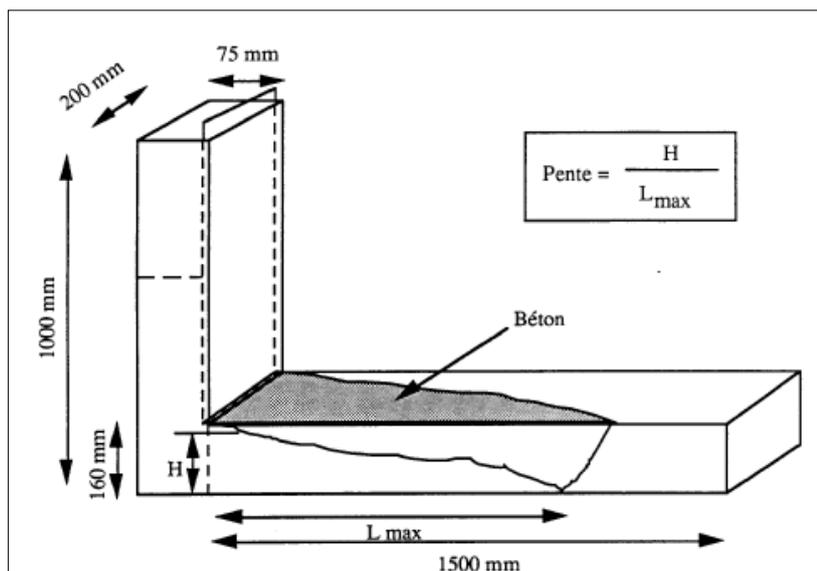


Figure 2.9 : Essai de la boîte en L, d'après l'Université de Sherbrooke. [17]

II.5.2.5. Essai du Box

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte en Plexiglas de $150 \times 150 \times 400$ mm.

Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments.

Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable (KASAI et coll. 1999).

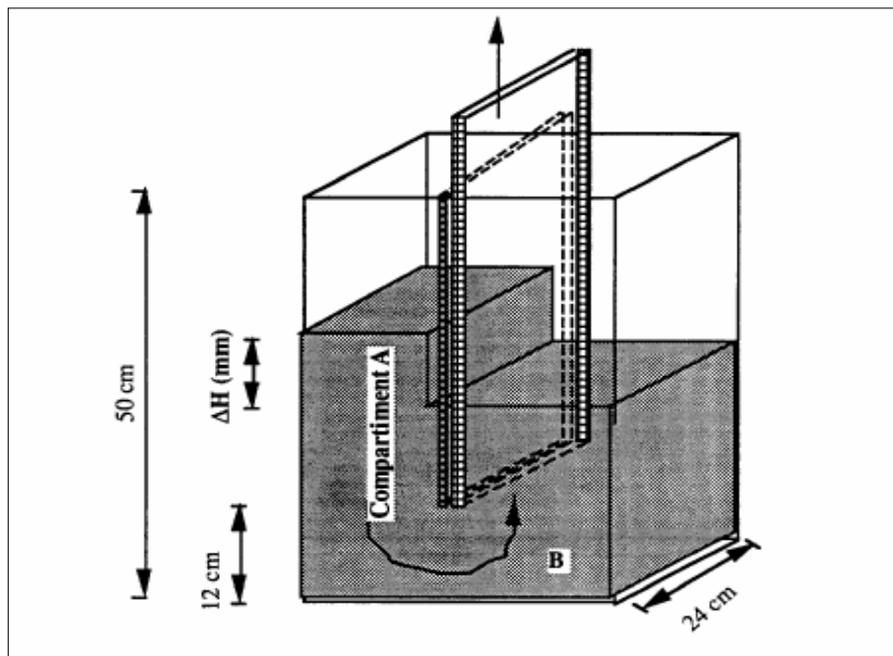


Figure 2.10 Essai du Box, d'après KASAI et coll 1999.

II.5.3. La stabilité

II.5.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V

L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité.

Une section rectangulaire a été choisie pour imposer un écoulement du même type que celui qui est imposé entre deux armatures parallèles. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.

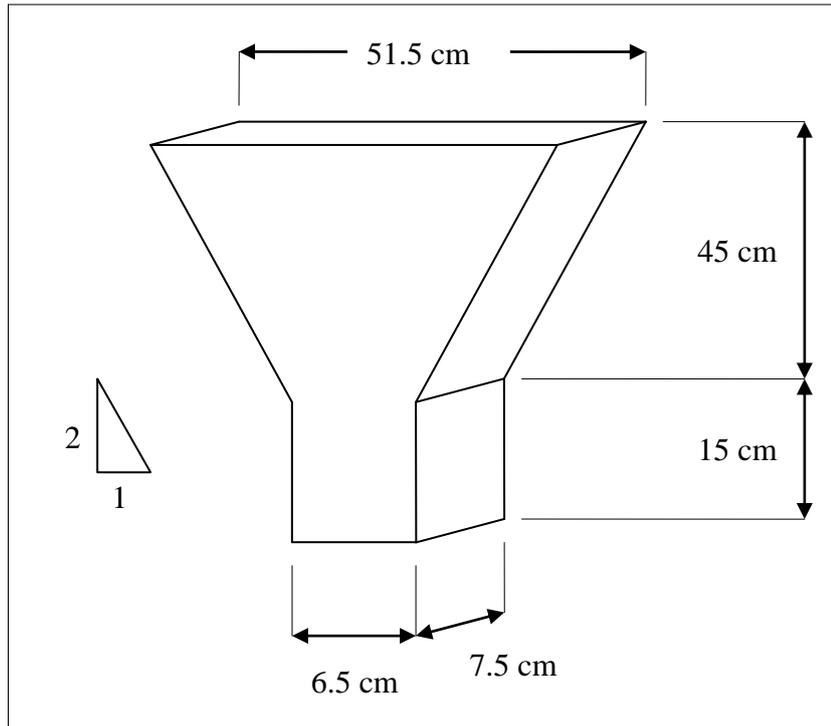


Figure 2.11 : Essai de l’entonnoir en forme de V, d’après SAKATA et al, (1996). [26]

II.5.3.2. Essai de tassement

Cet essai est réalisé sur des colonnes de béton de 70 cm ou de 150 cm de hauteur (MANAI, 1995). Il s’agit de fixer une plaque circulaire en Plexiglas de 150 mm de diamètre et de 4 mm d’épaisseur ancrée dans le béton à l’aide de 4 boulons de 35 mm de longueur chacun, sur la surface du béton frais. On met au contact de la plaque en Plexiglas l’aiguille de 24 mm de longueur d’un comparateur de détection de déplacement qui est caractérisée par une précision de 0.2 µm. On note la variation du tassement au cours du temps jusqu’à la stabilisation du mouvement (prise de béton).

On détermine ainsi le tassement relatif T (%) par division de la valeur maximale du tassement (Th) sur la hauteur de la colonne (h).

$$T(\%) = \frac{T_h}{h} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

Cet essai, nous permet également de mesurer le volume d’eau de ressuage externe apparue à la surface supérieure du béton.

Une fois durcies, les colonnes de béton peuvent être sciées verticalement afin d’évaluer la répartition des gros granulats. Ceci nous donne une idée sur la résistance à la ségrégation du béton.

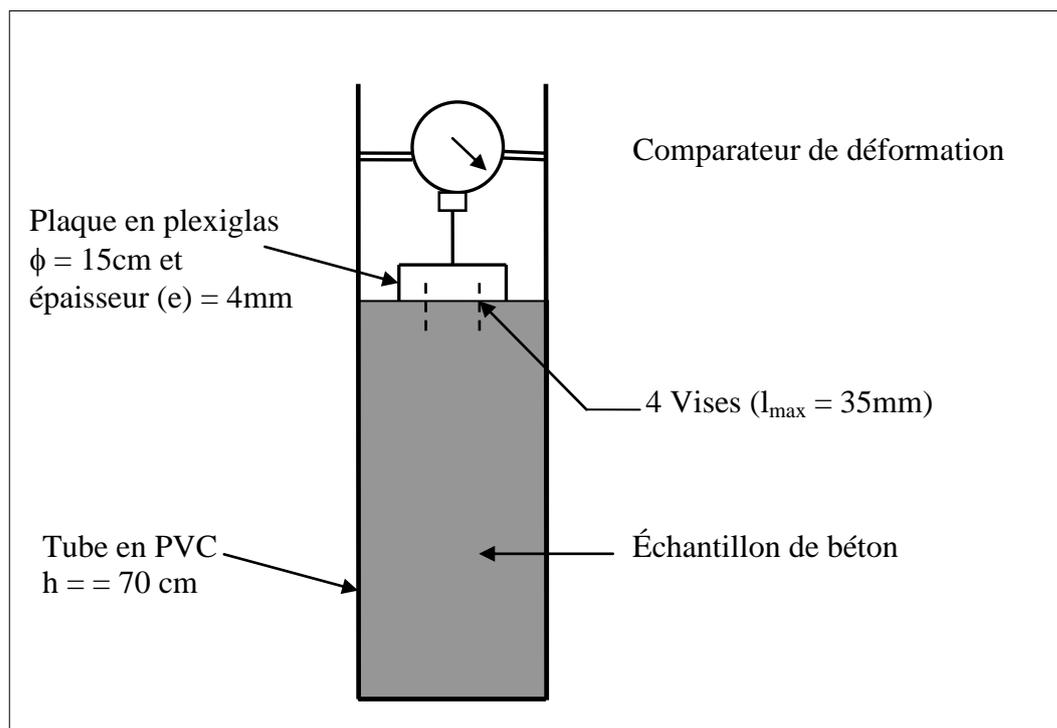


Figure 2.12 : Essai du tassement (MANAI, 1995). [20]

II.5.4. Ségrégation dynamique

Pour la ségrégation dynamique, comme pour la ségrégation statique, il n'existe pas d'essais conventionnels. De ce fait, plusieurs systèmes ont été développés. Les essais pour caractériser la résistance à la ségrégation dynamique ont pour but d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent par exemple mettre en évidence des phénomènes de blocage de l'écoulement par formation de voûtes avec les granulats.

II.5.4.1. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

L'essai consiste à verser 10 litres de béton dans un sceau juste après le malaxage. Il faut couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à $4.8\text{ kg} \pm 0.2\text{ kg}$, avec une hauteur de chute du béton de $50 \pm 5\text{ cm}$; après 2 minutes, on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

II.5.5. Ségrégation statique

Il est important d'évaluer la capacité du béton à rester homogène une fois mis en place, c'est à dire la résistance à la ségrégation statique des granulats qui ont une répartition hétérogène.

II.5.5.1. Essai à la bille

On mesure l'enfoncement d'une bille simulant un granulat de diamètre de 20 mm dans un cylindre de béton 16 × 32 cm.

La bille est reliée au balancier par une tige rigide et sa densité est ajustée par un contre poids.

La bille est initialement enfoncée de sa hauteur dans le béton puis lâchée.

Plus le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton (de 6 cm pour les études du LCPC) est faible, plus la tendance à la ségrégation du matériau est élevée.

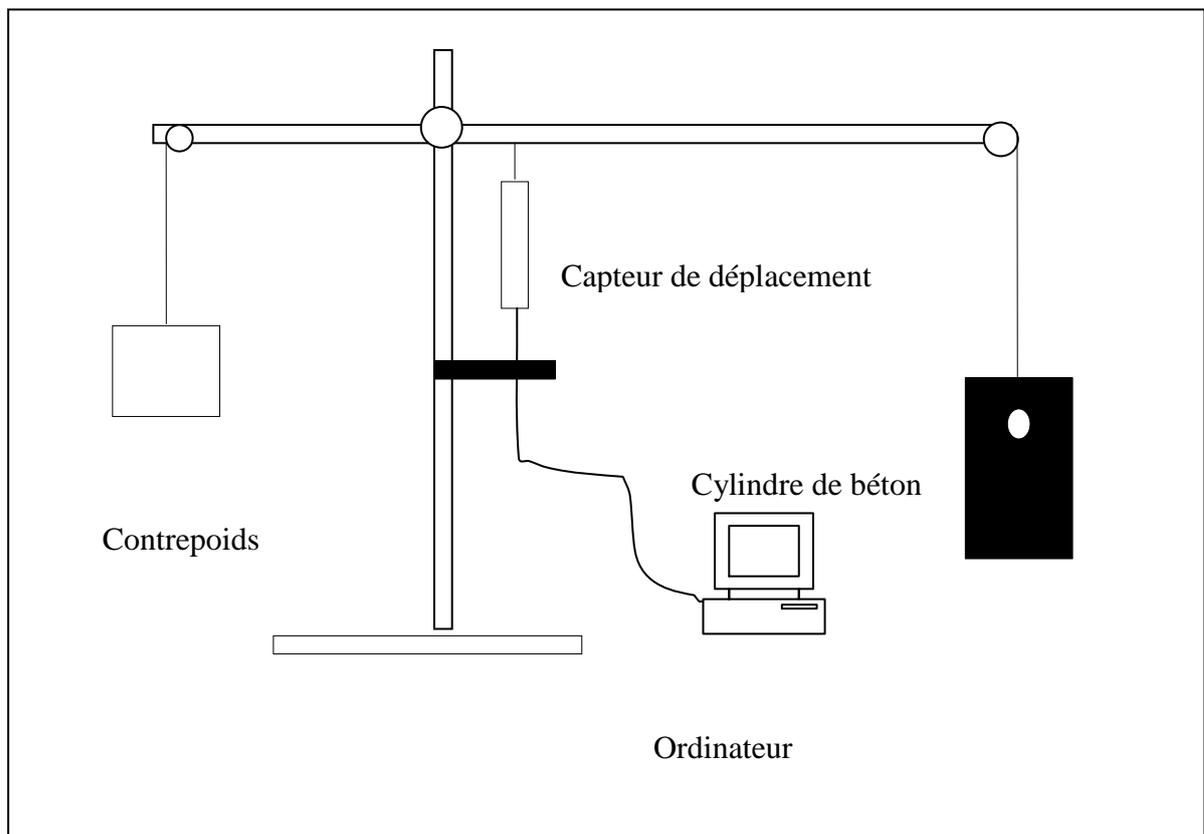


Figure 2.13 : Essai à la bille. [26]

II.6. Caractéristiques des BAP à l'état durci

II.6.1. Propriétés mécaniques des BAP

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, 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^{ème} jour).

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux bétons ordinaires en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants car un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable.

Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

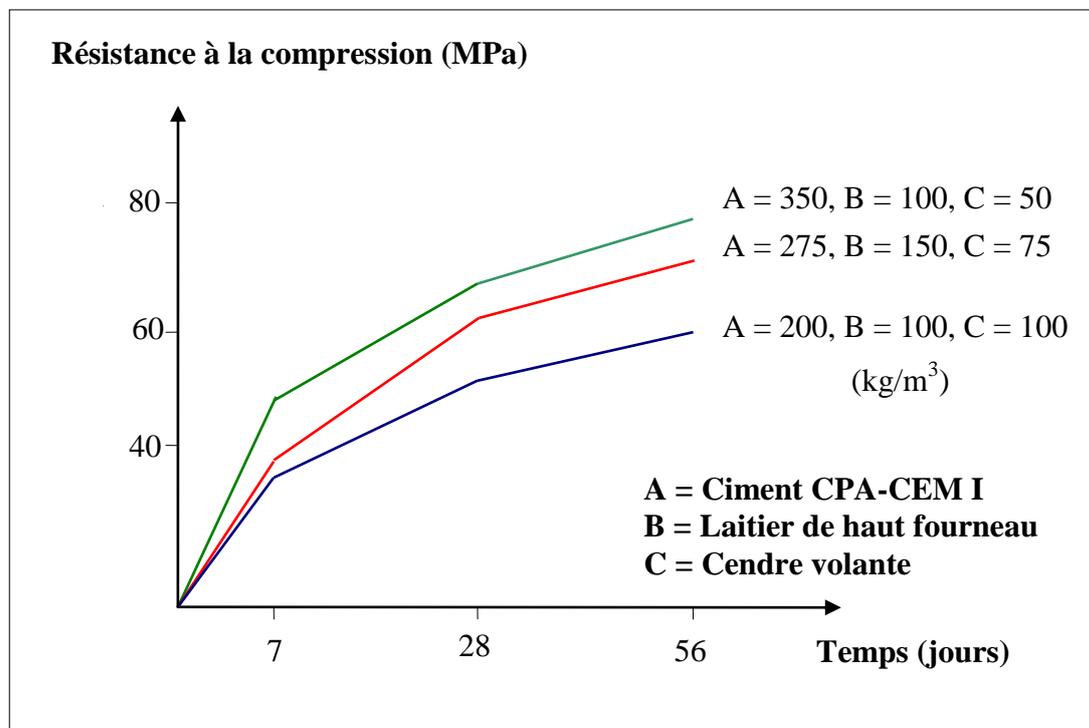


Figure 2.14 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après HAYAKAWA et al (1993). [26]

II.6.2. Retrait

En vue du volume de pâte qui est très important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires.

Le retrait plastique

Il peut affecter le béton à l'état frais au très jeune âge (pendant la prise initiale) et est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface.

Il provoque une forte contraction de la pâte qui est susceptible de le faire fissurer à la surface externe.

Le retrait endogène

Il résulte du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau+ciment). Ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton. Il fait apparaître des vides dans la pâte de ciment hydraté (capillaires vides) qui ont pour effet de diminuer le taux d'humidité interne (auto-dessiccation). [26]

Il y a alors un processus de réorganisation de l'eau dans la pâte de ciment qui provoque une contraction que l'on désigne par retrait endogène.

Le retrait de séchage

Est une diminution du volume de la pâte provoquée par une réorganisation de l'eau. Il survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait.

La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte de ciment. Lorsqu'on abaisse graduellement le taux d'humidité on observe que certaines catégories de pores s'assèchent en premier.

Dès que l'humidité est inférieure à 100 %, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper. Cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait.

Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C soit grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé. [26]

II.7. Optimisation des BAP

L'optimisation des performances d'un béton consiste à minimiser la teneur en eau tout en gardant une maniabilité suffisante à l'état frais afin de faciliter sa mise en place.

La diminution de la teneur en eau conduit généralement à de bonnes caractéristiques mécaniques telles que des résistances plus élevées, un retrait et un fluage plus faible et une durabilité accrue.

Pour confectionner un béton autoplacant, on utilise souvent des adjuvants chimiques (superplastifiants, réducteurs d'eau, agents colloïdaux et agent entraîneur d'air) et des ajouts minéraux (fumée de silice, laitier, cendre volante et filler calcaire).

Ce type de béton se caractérise par la diversité des matériaux cimentaires qu'il contient par rapport aux bétons ordinaires.

Le béton autoplacant contient également des proportions bien précises de gros granulats pour faciliter la déformabilité de la matrice.

L'étude de l'influence des différents adjuvants chimiques et ajouts minéraux et des dosages de gros granulats sur les propriétés des bétons fluides à l'état frais et durci a attiré l'attention de plusieurs chercheurs.

Dans la partie suivante nous exposons les résultats de quelques recherches sur l'optimisation et le développement de formulation des bétons autoplacants du point de vue de la teneur en granulats et en ajouts chimiques et minéraux.

Les objectifs principaux de ces recherches étaient l'amélioration de la rhéologie, des performances mécaniques et de la durabilité des bétons fluides. [3]

II.7.1. Optimisation de la teneur en gros granulats

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités et la taille optimale des gros granulats capables de donner un maximum d'ouvrabilité au béton.

Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés des bétons durcis.

Selon YURUGI et coll, (1989) [31], le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage (plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue).

OKAMURA et coll, (1994) [24], mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un béton autoplaçant est de limiter la teneur en gros granulats, car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation.

Ils rapportent que les collisions et les frictions entre les gros granulats augmentent près des obstacles et l'énergie requise pour l'écoulement est consommée par les contraintes internes.

Ils ont montré que la probabilité de blocage devient négligeable pour des volumes de gros granulats inférieurs à 50% du volume des solides.

Christophe CHUCHE du MBT (Master Building of Technologie) [7], [17] a développé des bétons autoplaçants de 640 ± 40 mm d'étalement avec un rapport E/L de 0.34 à 0.5 et un rapport G/S de 0.7 à 1.05, dont le volume des granulats de la fraction 3/8 représente $65 \pm 4\%$ du volume des gros granulats.

Ces bétons contiennent une grande teneur en fines (éléments inférieurs à $315 \mu\text{m}$) jusqu'à 700 kg/m^3 composées essentiellement de 500 kg/m^3 de liant.

Il a également utilisé un superplastifiant à base de polymère carboxylate avec des dosages variant de 1.1 à 2.4% de la masse du liant.

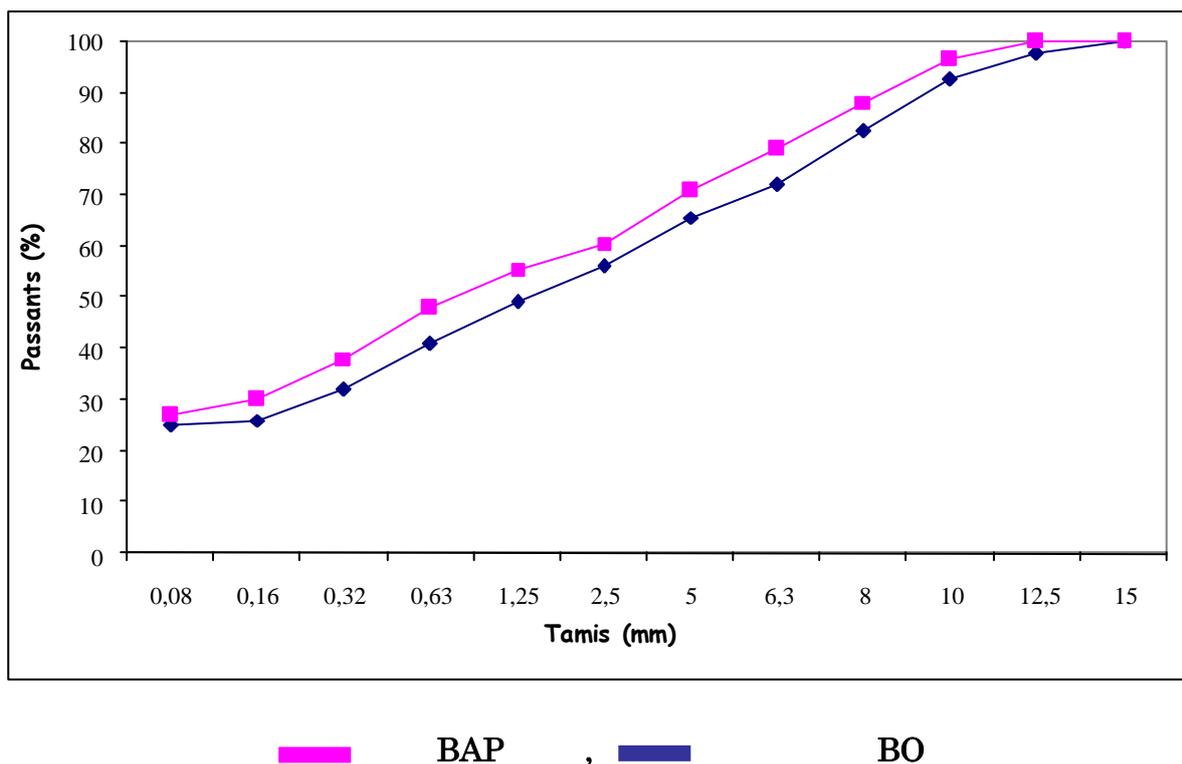


Figure 2.15 : Courbe de référence d'un béton autoplaçant, d'après MBT France. [7]

II.7.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux

L'utilisation des ajouts minéraux est intéressante sur le plan rhéologique, car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton.

Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton, d'autre part, le grand volume de liant utilisé dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie de ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton.

GJORV (1991) [17], a montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m³, on peut ajouter jusqu'à 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique.

KHAYAT et GUIZANI, (1994) [18] indiquent qu'une matière pouzzolanique telle que la cendre volante (particules sphériques et lisses) améliore la déformabilité du béton.

Le laitier est supposé améliorer la maniabilité (particules vitreuses).

La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation.

Sur le plan mécanique, MITSUTAKA et coll. (1993) [17] trouvent que les résistances à la compression de certains BAP (étalement de 650 ± 50 mm) sont en général supérieures à 40 MPa après 28 jours parce que ces bétons contiennent une grande teneur en fines (500 kg/m^3) composées essentiellement de ciment portland (200 à 350 kg/m^3), (100 à 200 kg/m^3) de laitier et (50 à 100 kg/m^3) de cendre volante.

La résistance est aussi élevée grâce aux rapports E/C relativement bas (0.35 et 0.40).

Il est à noter que ces bétons contiennent 9.6 kg/m^3 de superplastifiant (naphtalène) et 1 kg/m^3 d'agent colloïdal (polysaccharide).

La résistance à la compression à jeune âge est plus faible avec les hautes teneurs de remplacement en pouzzolanes (200 kg/m^3 de laitier et 100 kg/m^3 de cendre volante) qui réagissent lentement.

Toutefois, les mélanges qui présentent une teneur élevée en ciment (350 kg/m^3) ont eu des résistances plus élevées.

AWAD et coll. (1995) [4] ont développé des bétons BAP de 650 mm d'étalement (E/L = 0.22 à 0.37) qui ont atteint une résistance à la compression de 25 MPa à 24 heures et 90 MPa à 28 jours.

II.7.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques [3]

L'utilisation des superplastifiants et des agents colloïdaux permet l'amélioration de la déformabilité et la stabilité des BAP. Les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorent les propriétés mécaniques et la stabilité du béton autoplaçant.

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

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons ; par contre, ils augmentent la demande en eau du mélange et leur utilisation nécessite la présence de superplastifiants. Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats.

On assiste à une bonne déformabilité combinée à une résistance à la ségrégation.

KHAYAT et GUIANI (1996) [17] ont montré aussi que la stabilité du béton accroît avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. On assiste à une diminution du taux de ressuage externe et du tassement à l'état frais du béton.

KASAI (1987) et KHAYAT (1991) rapportent que l'écoulement visqueux permet de réduire la vitesse à l'interface eau-béton.

Une étude faite par YURUGI et coll. (1989) [31] sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0.05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1.2 à 3% de la masse de liant) a relevé que le ressuage était nul quand à la teneur en agent colloïdal dépasse 0.03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées).

Ceci est attribué à la combinaison de l'agent colloïdal et du superplastifiant qui améliorent respectivement la déformabilité et la résistance à la ségrégation du béton.

II.8. Méthodes de formulation

II.8.1. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées

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 sec avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants ci-après :

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

Ce modèle permet également de prendre en compte quantitativement l'effet de confinement qu'exercent les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton et donc l'ouvrabilité de ce béton. Ce modèle a été utilisé avec succès pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité de différents bétons, (tels que les bétons à hautes performances, béton compacté au rouleau) en fonction de leur composition. [6]

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 telle que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou à l'état durci telle que les résistances à la compression et à la traction, retrait, fluage ;
- ♦ Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone très ferrailée).

Le cahier des charges exige les critères suivants :

- ♦ Étalement au Flow test compris entre 600 et 700 mm ;
- ♦ La viscosité plastique doit être d'une part inférieure à 200 Pa.s, permettant d'avoir un coulage rapide sur chantier et d'autre part supérieure à 100 Pa.s pour éviter la ségrégation.

Pour tout projet deux paramètres sont toujours nécessaires à connaître :

1. La résistance à la compression à 28 jours.
2. L'environnement de bétonnage traduisant un confinement potentiel. Pour cela il faut tenir compte l'effet de paroi (espacement des armatures, ex..).

Le choix des matériaux sur la base des ressources locales devra être réalisé et les caractéristiques suivantes devraient être connues :

- ❖ La compatibilité ciment–superplastifiant et superplastifiant-agent retardateur.
- ❖ La nature des additions minérales (filler calcaire, cendres volantes, laitiers, fumée de silice,...) nécessaires pour limiter la quantité du liant.

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

- 1) Une proportion de liant est fixée à priori (par exemple 70% de liant et 30% de filler). Le choix des fillers sera en fonction des matériaux locaux disponibles.
- 2) Détermination du dosage en saturation du superplastifiant
- 3) Détermination du besoin en eau de ce mélange en présence de superplastifiant. Cette grandeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour entrer dans le programme du modèle de suspension solide.
- 4) Les calculs sont effectués avec un logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi). La viscosité est fixée d'une manière arbitraire à 5.10^4 Pa.s (valeur correspondante aux bétons autoplaçants selon l'expérience du LCPC). La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant filler est maintenue constante. Les proportions granulats / pâte liante sont optimisées.
- 5) Le béton est fabriqué (10 à 15 l) et sa teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée.
- 6) Le dosage en superplastifiant est ajusté afin d'obtenir la valeur d'étalement souhaitée, ceci n'a pas d'influence sur la viscosité plastique. À ce niveau le béton obtenu répond aux critères rhéologiques de contrainte de cisaillement et de viscosité plastique.
- 7) Enfin, l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'ajout d'un retardateur de prise s'impose dans le cas d'un raidissement du béton.

Il est encore nécessaire d'étendre les modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique.

Par ailleurs les formulations proposées doivent être confrontées à des expérimentations en vraie grandeur afin d'appréhender les problèmes de ségrégation.

II.8.2. L'approche japonaise

La méthode de formulation des bétons autoplaçants est la suivante :

La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide. Selon les auteurs [6], ce pourcentage permet de prévenir le risque de blocage si le mortier est correctement formulé.

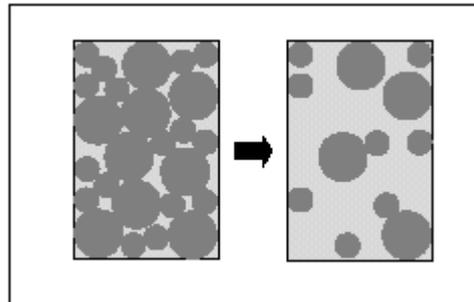


Figure 2.16 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [28]

Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est fixé à 40% du volume total du mortier. L'estimation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés par deux essais :

- ✧ Un essai d'étalement au cône
- ✧ Un essai d'écoulement à l'entonnoir

Les auteurs en tirent deux grandeurs :

Avec :

1. L'étalement relatif :
$$\Gamma_m = \frac{r_1 r_2 - r_0^2}{r_0^2} \dots\dots\dots (3)$$

2. La vitesse relative d'écoulement :
$$R_m = \frac{10}{t} \dots\dots\dots (4)$$

- ✧ r_1 et r_2 : les diamètres d'étalement selon deux médianes et r_0 le diamètre inférieur du cône
- ✧ t : est le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes.
- ✧ Γ_m : représente la fluidité du mortier, (plus Γ_m est grand, plus le mortier est fluide)
- ✧ R_m : représente la viscosité du mortier (plus R_m est faible, plus la viscosité est élevée). [6]

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

Les auteurs ont montré que pour un dosage en superplastifiant donné et pour différents rapports volumiques eau/poudre (V_w/V_p), il y a une relation de linéarité entre R_m et Γ_m .

II.9. Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

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

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- 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/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

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

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. **Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale.** Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du superplastifiant dans le concept du BAP.

II.9.1 Exemples de formulation

Des exemples de formulation de BAP sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 2.2 : Différentes formulations de BAP.[26]

| | BAP 1 | BAP 2 | BAP 3 | BAP 4 | BAP 5 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ciment (C) | 155 | 331 | 155 | 270 | 350 |
| Eau (E) | 160 | 175 | 159 | 196 | 170 |
| Filler calcaire (F) | / | 216 | / | / | / |
| Laitier (LHF) | 150 | / | 171 | 210 | / |
| Cendre volante (CV) | 200 | / | 202 | 210 | / |
| Sable (S) 0/5 | / | 710 | 760 | / | 828 |
| Gravillon (G) 5/16 | / | 875 | 874 | / | 877 |
| Superplastifiant (L) | 1.7 | 2.6 | 1.2 | 2.7 | 1.1 |
| Agent de viscosité (L) | 1 | 0.5 | 0.012 | / | / |
| Entraîneur d'air (L) | / | / | / | 0.05 | / |
| Liant (L) | 500 | 547 | 528 | 690 | 440 |
| G/S | / | 1.23 | 1.15 | 1.1 | |
| E/L | 0.32 | 0.32 | 0.30 | 0.41 | 0.39 |
| Étalement au cône d'Abrams (mm) | 680 | 600 | 570 | 700 | 600 |
| Air occlus (%) | 4.2 | 4 | 2 | 5.4 | / |

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

Les dosages sont exprimés en (kg/m³), excepté pour les adjuvants.

Tableau 2.3 : Formulation de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par PERSSON. [6]

| | BÉTON AUTOPLAÇANT | | | | BÉTON ORDINAIRE | | | |
|--|-------------------|------|-------|------|-----------------|-------|------|------|
| | BAP1 | BAP2 | BAP3 | BAP4 | BT1 | BT2 | BT3 | BT4 |
| Ciment (C) | 500 | 400 | 340 | 260 | 389 | 360 | 285 | 250 |
| Eau (E) | 133 | 153 | 170 | 207 | 126 | 137 | 142 | 200 |
| Fumée de silice (FS) | 50 | / | / | / | / | / | / | / |
| Filler siliceux (F) | 50 | 145 | 165 | 185 | 106 | 68 | 33 | / |
| Sable 0/8 mm | 880 | 790 | 840 | 1000 | 694 | 780 | 860 | 1000 |
| Gravillon quartzite 8/11 mm (G) | 600 | 305 | 285 | 395 | 135 | 270 | 330 | 300 |
| Gravillon quartzite 11/16 mm (G) | 800 | 620 | 525 | 270 | 660 | 560 | 420 | 600 |
| Superplastifiant avec agent de viscosité | 5 | 2 | 1.2 | 1 | / | / | / | / |
| Superplastifiant sans agent de viscosité | / | / | / | 7 | 3.6 | 2.6 | .93 | / |
| Réducteur d'eau | / | / | / | / | 1.7 | 0.9 | 1.1 | / |
| Entraîneur d'air | / | / | 0.024 | / | 0.05 | 0.045 | 0.02 | / |
| Liant (L)* | 600 | 545 | 505 | 445 | 495 | 428 | 318 | 250 |
| G/S | 0.98 | 1.17 | 0.96 | 0.67 | 1.15 | 1.06 | 0.87 | 0.9 |
| E/L | 0.22 | 0.28 | 0.34 | 0.47 | 0.25 | 0.32 | 0.45 | 0.8 |
| Air occlus | 1.3 | 1.4 | 3.5 | 1.9 | 12 | 12 | 13 | 1.2 |

Les dosages y compris ceux des adjuvants sont exprimés en (kg/m³).

(L)*= C + FS + F

Tableau 2.4 : Exemple de formulation des BAP fabriqués en France. [12]

| CONSTITUANTS | FORMULATIONS (kg/m ³) | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | BAP 1 | BAP 2 | BAP 3 | BAP 4 |
| Ciment CPA 52.5 | 350 | 452 | 372 | 430 |
| Sable 0/5 | 860 | 544 | 891 | 750 |
| Gravillon 5/12 | 790 | 290 | 306 | 860 |
| Gravillon 12/20 | / | 554 | 585 | |
| Fumée de silice | / | 36 | 30 | 15 |
| Filler calcaire | 140 | / | / | / |
| Superplastifiant | 8 | 10 | 16 | 10 |
| Eau totale | 200 | 180 | 169 | 175 |
| f _{c28} (MPa) | 37 | 57.3 | 64.8 | 65 |

II.10. Fabrication des BAP

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 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. [26]

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.

Le temps de malaxage et l'ordre d'introduction des adjuvants sont importants. Dans le cas où l'agent de viscosité à base de polymères anioniques est introduit indépendamment du superplastifiant, il est préférable qu'il le soit après ce dernier, il peut en effet s'adsorber sur les particules de ciment et avoir moins d'interaction avec l'eau.

II.11. Transport et mise en place des BAP

Les BAP peuvent être transportés par les moyens conventionnels à condition que leur étanchéité soit assurée.

Ils peuvent également être transportés du malaxeur jusqu'aux moules par pompage.

Les bétons autoplaçants peuvent être mis en place dans les moules par différentes méthodes :

- ☞ **La première méthode** : Traditionnelle et commune aux bétons ordinaires, 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. 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. [26]

- ☞ **La deuxième méthode** : Permet d'éviter la chute du béton. Elle repose sur l'utilisation d'un tube plongeur, dont la partie basse du coffrage est immergée dans le béton frais.

- ☞ **La 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.

Les précautions permettant d'assurer une bonne étanchéité des moules qui sont les mêmes que celles pratiquées actuellement pour les bétons fluides ordinaires.

La pâte des BAP est très cohésive et limite les pertes de laitance.

L'intensité de la poussée des BAP sur les parois est un sujet qui fait encore l'objet de controverses.

CONCLUSION

- Parmi les propriétés les plus connues des BAP ; une fluidité très élevée, une résistance à la ségrégation ainsi qu'à la compression et une capacité à combler intégralement l'espace entre les barres d'armatures de manière à renoncer à toute forme de compactage après le coulage du béton frais. L'aptitude à la déformation, la résistance à la ségrégation et la résistance à la compression dépendent des composants intervenant dans le béton et de sa formulation.
- Celle ci est obtenue grâce à une optimisation spécifique, composée pour l'essentiel d'une teneur en liants suffisante, d'une composition des granulats équilibrée avec une teneur en fines accrues et d'un superplastifiant approprié.
- La fluidité élevée de ce béton est obtenue par l'adjonction d'un superplastifiant et d'un ajout minéral qui sera l'objectif de notre travail ainsi un nouvel ajout sera utilisé qui est le déchet de brique broyée ; l'étude de ce nouveau type de béton (BAP) possédant des propriétés rhéologiques très intéressantes avec un ajout tel que la brique broyée fera l'objet de notre travail qu'on verra à la partie expérimentale.

L'adjonction d'un entraîneur d'air peut également avoir une influence positive sur la ségrégation et stabiliser le béton. L'emploi excessif d'agents épaississants à base de cellulose méthylique ou de poudre peut toutefois entraver la fluidité. Il est de ce fait indispensable de déterminer un équilibre optimal entre la fluidité et la ségrégation dans le cadre d'essais préliminaires.

- Outre la formulation adéquate, il convient d'accorder une attention toute particulière à la fabrication, à la mise en œuvre du béton frais et à la technique de coffrage.

III.1 Caractérisation des matériaux

III.1.2 Granulats

III.1.1.1 Sable

Le sable utilisé provient de la carrière de concassage d'AKBOU-Taharacht de granulométrie 0/3.

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

Pour les deux paramètres, les valeurs optimales sont respectivement :

- Équivalent de sable : > 70 (NF P 18-598)
- Un module de finesse : $1.8 < M_f < 3.2$ (NF P 18-304)

a- Module de finesse (NF P 18-304)

Le caractère plus au moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse MF. Ce dernier correspond au 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 mm.

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

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + floculant (H_2).

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

$$ES = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

c- Masse volumique :

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac et apparent du sable pour déterminer le squelette granulaire du béton.

III.1.1.2 Gravier

Nous avons utilisé des granulats provenant d'un gisement de calcaire de la carrière d'ADRAR OUFERNOU.

Un essai Los Angeles a été effectué sur le gravier de la fraction 8/16 et 4/6.3, on a trouvé respectivement $LA = 22.72$, $LA=33.92$ ce qui nous permet de qualifier ces granulats de faibles à médiocres (page n°74).

a- Essai Los Angeles : (NF P 18-573)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par choc et à l'usure par frottement.

Il s'effectue 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 308 g dans un tambour ;

Sept (07) boulets pour la classe (4-6.3) et 11 boulets pour la classe 10-16;

Après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant **P** au tamis de 1.6 mm.

b- Masse volumique :

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac et apparent de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

III.1.3 Ajouts

L'utilisation du déchet de brique comme ajout dans ce nouveau type de béton a pour but d'atteindre les 240 kg de particules fines pour un mètre cube de béton exigé par le cahier des charges pour une telle formulation ce qui donne un dosage qui avoisine $C/A = 1,50$ [16], aussi pour avoir une réactivité pouzzolanique permettant d'augmenter la résistance à la compression, un but économique ainsi qu'environnemental.

La fumée de silice sera utilisée aussi pour caractériser le béton et permettre d'établir une comparaison paramétrique très riche.

III.1.3.1 Le déchet de brique broyé

Le déchet de brique a été récupéré d'une briqueterie à Bejaïa puis broyé jusqu'à une fraction inférieure à 80 μm et analysé chimiquement.

Les différents oxydes constitutifs de ce déchet utilisé sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n° 3.1 : Composition chimique du déchet de brique [32]

| Composition chimique en % | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|------|-----------------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | S | FeS ₂ |
| 48,09 | 16,85 | 5,64 | 10,24 | 1,51 | 0,15 | 0,28 |
| P.F | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Cl- | F | SO ₃ total |
| 13,82 | 1,85 | 0,76 | 0,1 | 0,116 | 0,1 | 0,49 |

III.1.3.2 La fumée de silice

La fumée de silice utilisée est fournie par la société Granitex-NP de Oued Smar, Alger, importée de la Norvège.

Les différents oxydes constitutifs de la fumée de silice utilisée sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n° 3.2 : Résultat de l'analyse chimique de la fumée de silice [25].

| Composition chimique en % | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ |
| 92.1 | 0.25 | 0.79 | 0.17 | 0.96 | 0.36 |

III.1.4 Ciment

Le ciment utilisé est le CPJ CEM II / A 42.5 NA 442 fabriqué par la société de ciments ACC.

L'analyse chimique de ce ciment donne les résultats suivants :

Tableau n° 3.3 : Composition chimique et minéralogique du ciment.

| Composition chimique (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|-------------------|------------------|--------|-------------------|-------|------------------|
| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | T.100C | MnO | CI | TiO ₂ |
| 66,4 | 23,2 | 5,6 | 3,7 | 1,6 | 2,10 | 0,36 | 0,41 | 0,60 | 0,15 | 0,011 | 0,29 |
| Composition minéralogique (%) | | | | | | | | | | | |
| C ₃ S | | | C ₂ S | | | C ₃ A | | | C ₄ AF | | |
| 51.02411 | | | 28.03341 | | | 8,58184 | | | 11,25984 | | |

Finesse du ciment

- La masse spécifique $\rho = 3.1 \text{ gr/cm}^3$
- Les temps de prise :
- Début de prise DP = 193 mn \Rightarrow Essai Vicat, voir page n°76.
- Fin de prise FP = 309 mn.

III.1.5 L'eau de gâchage

Elle est nécessaire pour l'hydratation du ciment et pour obtenir l'ouvrabilité du béton.

Elle doit être propre. Cependant, si elle facilite la mise en œuvre du béton, l'excès d'eau augmente la porosité du béton et par conséquent altère les résistances mécaniques et, plus grave encore ; la durabilité.

III.1.6 Adjuvant (Superplastifiant) :

- Description

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société **Granitex-NP** et commercialisé sous le nom de « **MEDAPLAST SP 40** », il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très hautes qualités et de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

- Dosage

Son utilisation dépend du type de béton utilisé et des effets recherchés.

Sa plage de dosage est fixée par la fiche technique de 0,6 à 2,5% soit 0,5 à 2 litres par 100 Kg de ciment.

- Mode d'emploi

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage mais seulement après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

- Caractéristiques

- 🌿 Forme Liquide
- 🌿 Couleur Marron
- 🌿 Extrait sec 40 %
- 🌿 Densité $1.22 \pm 0,01$
- 🌿 PH 8.20
- 🌿 Teneur en chlore $< 1\text{g/l}$

Tableau n°3.4: Dosage du superplastifiant pour chaque type de béton

| Type de béton | Dosage en (L / 100 kg de ciment) |
|-----------------|----------------------------------|
| Béton ordinaire | 01 |
| BAP1(FS) | 06 |
| BAP2 (DBB) | 06 |

La norme EN 934-2 indique que le dosage en superplastifiants doit être $\leq 05\%$ du poids de ciment, (pour les bétons ordinaires) ;

III.2 Méthodes d'essais

III.2.1 Essais sur granulats

III.2.1.1 Essai d'équivalent de sable : (NF P 18-598)

a- But de l'essai

Cet essai est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, il consiste à séparer les particules fines des gros éléments.

Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci. Ceci dit, la présence d'éléments fins argileux diminue l'adhérence Liant/Granulats.

b- Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/3 mm du sable, qui consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée, remplie par une solution floculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_2) et du sédiment + floculant (H_1).

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

$$ES = (H_2 / H_1) \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

c- Equipement utilisés

- ✚ Eprouvettes en plexiglas avec deux (02) traits repères et leurs bouchons;
- ✚ Entonnoir pour introduire le sable ;
- ✚ Grande bouteille de cinq (05) litres pour la solution lavante portant un typhon sortant de sa base ;
- ✚ Tube laveur métallique plongeant.
- ✚ Machine agitatrice ou agitation manuelle.
- ✚ Piston taré à masse coulissante de un (01) Kg pour la mesure de ES.
- ✚ Règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable.

d- Conduite de l'essai

On utilisera trois (03) éprouvettes et on fera la moyenne des trois résultats.

On remplit les éprouvettes avec de la solution lavante jusqu'au premier trait ;

Verser la quantité de sable voulue en veillant à éliminer les bulles d'air, laisser reposer dix (10) minutes ;

Boucher les éprouvettes et les agiter ;

Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur, le sortir lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer vingt (20) minutes ;

Mesurer à vue d'œil les hauteurs H_1 et H_2 ;

La méthode de mesure au piston est plus juste, c'est la raison pour la quelle on prendra cette dernière ;

Descendre lentement le piston taré dans le liquide, l'immobiliser au contact du sable puis mesurer H'_2 ;

Aucune vibration des éprouvettes n'est tolérée.

e- Résultats obtenus :

Tableau n°3.5: ES du sable lavé 0/3 mm.

| N° d'essai | Masse de l'échantillon (gr) | H_1 | H_2 | H'_2 | ESV (%) | ES (%) |
|---------------------------|-----------------------------|-------|-------|--------|---------|--------|
| I | 130 | 10,3 | 9 | 8,8 | 87,38 | 85,43 |
| II | 130 | 10,1 | 8,7 | 8,5 | 86,14 | 84,15 |
| III | 130 | 10,6 | 9,1 | 8,4 | 85,85 | 79,24 |
| Es moyen = 82,94 % | | | | | | |

f- Interprétation des résultats

Le cahier des charges des travaux publics exige, pour les bétons courants, un $ES \geq 70 \%$. D'après l'ES du sable lavé, qui est de 82,94 %, il est supérieur au pourcentage exigé (70%).

III.2.1.2 Module de finesse

$$M_f = (0.165 + 15.96 + 43.635 + 64.5125 + 81.2055 + 91.5855) / 100$$

$$= 297.0635 / 100$$

$$= 2.97$$

Notre sable est grossier comparativement à la norme **NF P 18-541**

III.2.1.3 Masses volumiques : (NF P 18-554 et NF P 18-555)

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac, et apparent du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

a- Masse volumique spécifique (absolue)

C'est la masse du matériau par unité de volume exprimée en grammes/cm³.

(Cette masse volumique n'intègre que les grains de l'agrégat donc sans les vides compris entre ces grains).

La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, seule la différence étant que la densité n'a pas d'unité.

1. Principe de l'essai

En partant d'une masse d'agrégat **P** et en la plongeant dans un volume d'eau **V₁**, on obtiendra sa masse volumique absolue par la division de cette masse par la différence des volume **V₁ - V₂**.

$$\rho_s = P / V_1 - V_2 \dots\dots\dots (7)$$

Avec :

ρ_s : masse volumique spécifique (absolue) ;

P : masse du matériau étudié (échantillon sec) ;

V₁ : volume d'eau avant introduction de la masse d'agrégats ;

V₂ : volume d'eau après introduction de la masse d'agrégats.

2. Matériels utilisés

- ⊕ Une éprouvette graduée ;
- ⊕ Une balance.

3. Conduite de l'essai

La procédure est la suivante :

- ⊕ Remplir une éprouvette avec un volume d'eau **V₁** et en noter sa valeur ;
- ⊕ Peser un échantillon sec de granulats **P** ;
- ⊕ Introduire l'échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air ;
- ⊕ Repérer la valeur du nouveau volume **V₂** et la noter ;
- ⊕ Effectuer les calculs.

4. Résultats obtenus :

Tableau n°3.6 : Masse volumique spécifique (absolue) du sable lavé

| Fraction (mm) | ρ_s moyenne (g/cm ³) |
|---------------|---------------------------------------|
| 0/3 | 2.5 |

Tableau n°3.7 : Masse volumique spécifique (absolue) des graviers 3/8 et 8/16

| Gravier | ρ_s moyenne (g/cm ³) |
|---------|---------------------------------------|
| 3/8 | 2,5 |
| 8/16 | 2,54 |

Tableau n°3.8 : Masse volumique spécifique (absolues) des ajouts minéraux

| L'ajout minéral | ρ_s moyenne (g/cm ³) |
|------------------------|---------------------------------------|
| Fumée de Silice | 2.2 |
| Déchet de Brique Broyé | 2.51 |

N.B

Pour des raisons d'exactitude des résultants, les deux ajouts minéraux seront soumis à l'essai au pycnomètre pour déduire leurs masses volumiques.

b- Masse volumique apparente

1. Définition

C'est la masse du matériau par unité de volume exprimée en Grammes/Cm³, cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains.

$$\rho_{ap} = (P - P_T) / V_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Avec :

ρ_{ap} : masse volumique apparente ;

P_T : poids du récipient rempli d'eau ;

P : poids du récipient rempli d'eau et du matériau étudié ;

V_1 : volume d'eau.

2. Matériels utilisés

- Une éprouvette graduée ;
- Une balance ;
- Une règle pour arasement du récipient ;

3. Conduite de l'essai

- a- Remplir un récipient (éprouvette graduée) d'un volume d'eau V_1 ;
- b- Peser le récipient (rempli d'eau) et déterminer le poids P_t ;
- c- Remplir le récipient avec le matériau dont on veut déterminer le poids volumique en procédant comme suit :
- d- Prendre le matériau dans les deux mains formant un entonnoir, laisser tomber d'une hauteur d'environ dix (10) cm, ni trop lentement, ni trop vite au centre du récipient jusqu'à ce qu'il déborde puis abraser à la règle ;
- e- Peser le récipient plein P ;
- f- Déterminer le poids volumique qui est égal à $(P - P_t) / V_1$.

4. Résultats obtenus :

Tableau n°3.9 : Masse volumique apparente des graviers (3/8 mm et 8/16 mm)

| Gravier | ρ_{ap} (g/cm ³) |
|---------|----------------------------------|
| 3/8 | 1.740 |
| 8/16 | 1.760 |

Tableau n°3.10 : Masse volumique apparente du sable 0/3 mm

| Fraction (mm) | ρ_{ap} (g/cm ³) |
|---------------|----------------------------------|
| 0/3 | 1.731 |

Vu son inutilité pour la formulation de béton, La masse volumique apparente des deux ajouts minéraux ne sera pas calculée.

III.2.1.4 Essai Los Angeles : (NF P 18-573)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par choc et à l'usure par frottement. 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 308 g dans un tambour ;

7 boulets pour la classe (4-6.3) et 11 boulets pour la classe 10-16; après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant **P** au tamis de 1.6 mm.

Les granulats sont qualifiés comme suit :

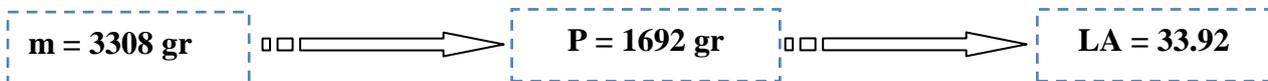
- $LA < 15$ très bon ;
- $15 \leq LA < 20$ bon à moyen ;
- $20 \leq LA < 30$ moyen à faible ;
- $LA \geq 30$ médiocre.

1/ La fraction 4-6.3

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = (P \times 100) / 5000 \quad \dots\dots\dots(9)$$

Avec : $P = 5000 - m$, (m : c'est la masse du refus lavé et séché après 24 heures dans l'étuve) ;



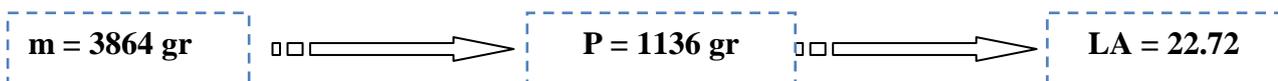
On a pris cinq (05) Kg de la fraction 4/6.3 (classe 3/8) du gravier lavé, avec 7 boules, pour 500 tours équivalents à 15 mn de temps, et le résultat a été le suivant : $LA = 33.92$, alors les granulats sont médiocres.

2/La fraction 10-25

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = (P \times 100) / 5000$$

Avec : $P = 5000 - m$, (m : c'est la masse du refus lavé et séché après 24 heures dans l'étuve) ;



$LA = 22.72$ les granulats sont moyens à faibles

Le tableau ci-après présente les propriétés physiques des granulats utilisés pour la confection des BAP :

Tableau n°3.11 : Propriétés des granulats

| | <i>Sable 0/3</i> | <i>Gravillon 3/8</i> | <i>Gravier 8/16</i> |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Equivalent de sable | 82.94% | / | / |
| Module de finesse | 2.97 | / | / |
| Coefficient LA | / | 33.92 | 22.72 |
| Densité absolue | 2.5 g/cm ³ | 2.5 g/cm ³ | 2.54 g/cm ³ |
| Densité apparente | 1.731 g/cm ³ | 1.740 g/cm ³ | 1.760 g/cm ³ |

III.2.2 Essais sur ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 NA 442 fabriqué par la société ACC, contenant 65 à 79% de clinker et de max 35 % de cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice, laitiers

III.2.2.1 Début et fin de prise (Aiguille de Vicat) : (EN 196-3)

a- Objectif de l'essai

L'objectif est de déterminer les temps de début et de fin de prise du ciment ;

b- Principe de l'essai

Il consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment en mesurant la profondeur d'enfoncement de l'aiguille de l'appareil dans la pâte ;

c- Equipements utilisés:

- Un appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre. La partie mobile de l'appareil a une masse de 300 g.
- Un moule tronconique de 40 mm de hauteur avec une plaque en verre servant comme support au moule ;
- Une truelle ;
- Une balance ;
- Un chronomètre.

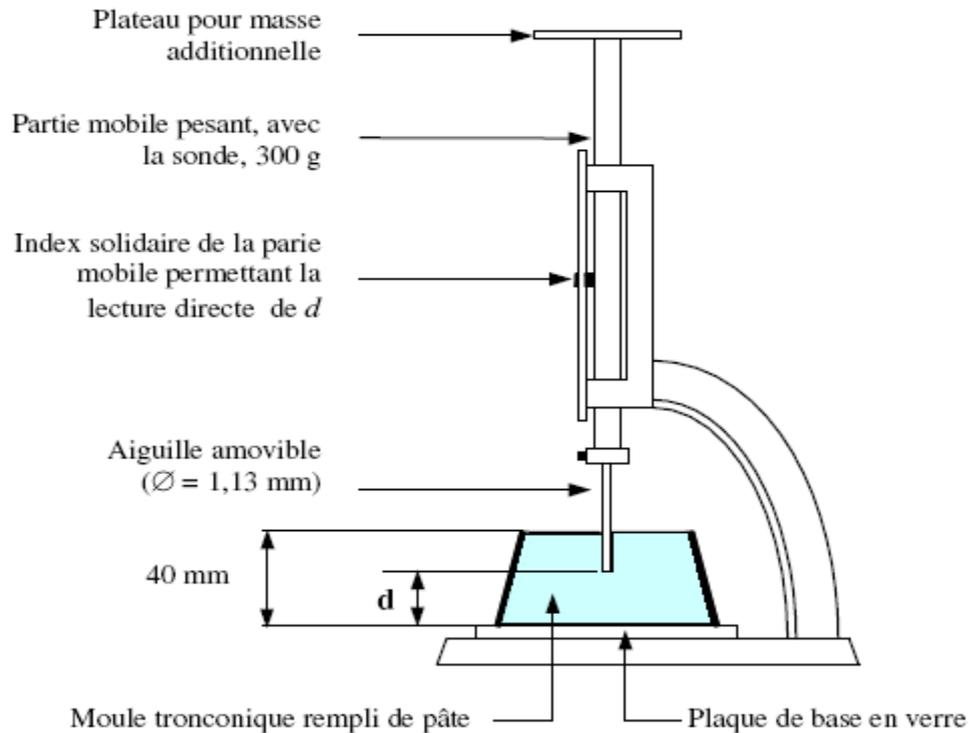


Figure n°3.1 : Appareil de Vicat

d- Conduite de l'essai

On confectionne une gâchée de pâte de consistance normalisée ; on introduit 400 gr de ciment et 25 à 35 % d'eau, et la conserver aux conditions normales.

Le temps (0) est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment.

Une fois malaxée, la pâte est introduite dans le moule tronconique de l'appareil de Vicat, on amène l'aiguille à la surface de l'échantillon puis on relâche l'aiguille sans vitesse initiale.

Après 30 secondes d'attente, on mesure la distance (**d**) séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base puis note l'heure.

On répète l'opération à intervalles de temps espacés et à chaque essai de pénétration, l'aiguille doit être remontée et nettoyée.

« - On dit que le début de prise est atteint quand, sous l'effet de la charge de 300 gr, l'aiguille s'arrête à une distance (**d**) du fond du moule telle que :

$$\mathbf{d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm.}}$$

- Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm ».

Température de la salle 17 °C, avec E/C = 0.25.

a- Résultats obtenus

Tableau n°3.12 : Temps de début et fin de prise.

| Temps de début de prise (mn) | Temps de fin de prise (mn) |
|------------------------------|----------------------------|
| 193 | 309 |

III.2.2.2 Stabilité du ciment (essai le CHATELIER) : (NF P 15-432) et (EN 196-3)

1-Objectif de l'essai

Il s'agit d'apprécier l'augmentation du volume des moules de ciment qui serait susceptible de se provoquer au cours de la réaction d'hydratation.

2-Principe de l'essai

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

3-Equipements utilisés

- ⊕ Un malaxeur normalisé ;
- ⊕ Plaque en verre 50x50 mm, jeu de 2 pièces ;
- ⊕ Deux (02) moules à aiguille (en laiton élastique), Ø intérieur 30x30 mm, avec 02 repères de 150 mm de long, chromées, ils sont fendus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation du volume de la pâte ;
- ⊕ Bouilloire Le Chatelier (Bain d'eau muni d'un moyen de chauffage dans le quel il est possible d'immerger les éprouvettes et de porter la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 02$ à 100°C en $30\text{ mn} \pm 05\text{mn}$).



Figure n°3.2 : Bouilloire Le Chatelier.



Figure n°3.3 : Moules à aiguille.

- a- Confectionner une pâte de consistance normalisée qui sera introduite dans deux moules ;
- b- Après remplissage ils sont conservés 24h ;
- c- Au bout de ce temps, il convient de mesurer à $\pm 0.5\text{mm}$ près l'écartement entre les pointes des aiguilles ;
- d- Le moule est alors entreposé dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à ébullition en $30\text{mn} \pm 0.5\text{mm}$, ce bain sera maintenu à la température d'ébullition pendant $03\text{h} \pm 0.5\text{mm}$.

La stabilité est calculée par la formule suivante :

$$ST = (C - A) \pm 0.5 \text{ mm}$$

Les résultats obtenus au laboratoire sont les suivant :

Tableau n° 3.13: Résultats de la stabilité

| N° du moule | Mesure n°01 (mm) : A | Mesure n°02 (mm) : B | Mesure n°03 (mm) : C |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 4,0 | 2,0 | 4,5 |
| 2 | 4,5 | 3,0 | 6,5 |

-**Mesure A** : Ecartement après 24 H de conservation à 20°C et 98% HR.

-**Mesure B** : après 3H de conservation dans un bain d'eau maintenu en ébullition.

-**Mesure C** : après refroidissement jusqu'à 20°C .

Selon la norme **EN 197**, l'expansion ne doit pas dépasser **10mm**, pour tous les ciments et les classes de ciments.

Calcul de la stabilité

On prend la moyenne des deux (02) résultats ;

$$\checkmark \text{ Stabilité (01)} = (C_1 - A_1) = (4,5 - 4) = 0,5 \pm 0,5 \text{ mm}$$

$$\checkmark \text{ Stabilité (02)} = (C_2 - A_2) = (6,5 - 4,5) = 2 \pm 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Stabilité du ciment} = 1,25 \pm 0,5 \text{ mm}$$

Interprétation

On a obtenu une stabilité de $1,25 \pm 0,5 \text{ mm}$ qui est inférieure à 10 mm ce qui nous laisse à dire que notre ciment est à une stabilité très acceptable.

III.3 Formulation du béton et essais préliminaires

III.3.1 Composition du béton ordinaire

Afin d'obtenir une composition du béton qui développe des bonnes caractéristiques rhéologiques (ouvrabilité, maniabilité, résistance à la ségrégation) à l'état frais, et les meilleures caractéristiques à l'état durci (résistance à la compression et à la traction).

Nous avons opté pour une teneur en ciment de 400 kg/m^3 , avec un rapport E/C = 0.5 ;

L'optimisation du squelette granulaire permet de satisfaire au maximum les conditions à priori contradictoires telles qu'une bonne ouvrabilité à l'état frais et des caractéristiques mécaniques à l'état durci acceptables.

Ce squelette granulaire a été optimisé, de manière théorique (méthode Dreux-Gorisse), car le béton ordinaire ne sera pas confectionné.

III.3.1.1 Méthode Dreux Gorisse

Cette méthode consiste à optimiser le squelette granulaire à partir d'une courbe granulaire de référence, cette dernière est définie par les trois points suivants :

$P_1 (0,0)$; $P_2 (D_{\max}, 100\%)$ et un point de brisure P_3 dont les coordonnées sont :

$$P_3 \begin{cases} X = \frac{D_{\max}}{2} = \frac{16}{2} = 8 \text{ mm} \\ Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s = 50 - \sqrt{16} - 2 + 2.82 = 50 - 4 - 2 + 2.82 = 46.82\% \end{cases}$$

Où K terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de la vibration et de la forme du granulat (roulé ou concassé)

D'après la courbe de référence obtenue sur la figure 5.1, on peut tirer les pourcentages en volume absolu de chaque classe de granulats.

1. L'analyse granulométrique : P18-553

Est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc.).

L'analyse granulométrique se fait d'après la norme **P18-553**

Le poids de l'échantillon P soumis à l'analyse granulométrique doit être supérieur ou égal à $(0,2xD)$ ou D désigne le diamètre en mm du plus gros élément.

2. Résultats de l'analyse granulométrique

Tableau 3.14 Analyse granulométrique de la fraction du sable : 0/5 ; P = 2 Kg

| Tamis (Ouverture en mm) | Refus | | | Tamisat ; passant (%) | |
|-------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Masse (Kg) | Masse cumulé e (Kg) | Refus cumulés (%) | Masse (Kg) | Tamisats cumulés (%) |
| 5 | 3.3 | 3.3 | 0.165 | 1996.7 | 99.83 |
| 2.5 | 315.9 | 319.2 | 15.965 | 1680.8 | 84.04 |
| 1.25 | 553.5 | 872.7 | 43.635 | 1127.3 | 56.365 |
| 0.63 | 417.55 | 1290.25 | 64.5125 | 709.75 | 35.48 |
| 0.315 | 333.86 | 1624.11 | 81.2 | 375.89 | 18.79 |
| 0.16 | 207.6 | 1831.71 | 91.58 | 168.3 | 8.4145 |
| 0.08 | 138.21 | 1969.92 | 98.5 | 47.5 | 2.374 |

Tableau 3.15 : Analyse granulométrique de la fraction du gravier 3/8 ; P = 3 Kg

| Tamis (Ouverture en mm) | Refus | | | Tamisat ; passant (%) | |
|-------------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Masse (Kg) | Masse cumulé e (Kg) | Refus cumulés (%) | Masse (Kg) | Tamisats cumulés (%) |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 3000 | 100 |
| 6.3 | 300 | 300 | 10 | 2700 | 90 |
| 5 | 810 | 1110 | 37 | 1890 | 63 |
| 2.5 | 1860 | 2970 | 99 | 30 | 1 |
| 1.25 | 15 | 2985 | 99.5 | 15 | 0.5 |
| 0.63 | 3 | 2988 | 99.6 | 12 | 0.4 |

Tableau 3.16 Analyse granulométrique de la fraction du gravier 8/15 ; P = 4 Kg

| Tamis (Ouverture en mm) | Refus | | | Tamisat ; passant (%) | |
|-------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Masse (Kg) | Masse cumulée (Kg) | Refus cumulés (%) | Masse (Kg) | Tamisats cumulés (%) |
| 16 | 460 | 460 | 11.5 | 3540 | 88.5 |
| 14 | 3130 | 3590 | 89.75 | 410 | 10.25 |
| 10 | 492 | 4000 | 100 | 20 | 0 |

Figure 3.4 : Analyse granulométrique des granulats

Tableau 3.17 : Pourcentage du squelette granulaire (méthode Dreux-Gorisse)

| | Sable 0/3 | Gravillon 3/8 | Gravier 8/16 |
|------------------------------|-----------|---------------|-----------------|
| Pourcentage en volume absolu | 37 | 16.5 | 46.5 |

Figure 3.5 : Courbe de référence du béton ordinaire

III.3.1.2 Formulation préliminaire

✓ On a dans un mètre cube de béton le volume absolu des constituants comme

suit : $\text{Gravier (G)} + \text{Sable (S)} + \text{Ciment (C)} + \text{Air occlus (A)} = \gamma \times 1000 \text{ l}$

✓ On suppose que le volume de l'air occlus $\text{Air occlus (A)} = 10 \text{ l/m}^3$

✓ Nous fixons le dosage en ciment à 400 kg/m^3 ($\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$) et le rapport E/C à 0.5. Donc on aura $E = 200 \text{ kg/m}^3$

γ étant le coefficient de compacité tiré du tableau $\gamma = 0.82 - 0.01 - 0.01 = 0.80$

$$(G+S) = 0.80 \times 1000 - (400/3.1) - 10 = 660.967 \text{ l/m}^3$$

Tableau 3.18: Composition préliminaire du béton ordinaire

| | Sable 0/3 | Gravillon 3/8 | Gravier |
|---|-----------|---------------|---------|
| Volume absolu du granulat (l/m ³) | 244.56 | 109.06 | 307.35 |
| Masse des granulats (kg/m ³) | 611.4 | 272.65 | 780.67 |

On remarque que cette méthode ne tient pas en compte la forme et la nature de surface des fractions de graviers, et on constate aussi que sa courbe granulaire est continue, malgré que les bétons à granularité discontinue puissent être plus compacts que les bétons à granularité continue.

III.3.1.3 Méthode expérimentale

L'optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale consiste à chercher le rapport Gravier/Sable, qui développe les meilleures caractéristiques que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Le principe de cette méthode expérimentale consiste à rechercher la composition optimale avec un rapport E/C = 0.5 et une teneur en ciment de l'ordre de 400 kg/m^3 (CPA 42.5R), et qui permet de minimiser le volume de la pâte de ciment, tout en remplaçant soit une quantité de sable par une quantité de gravier de la fraction suivante (gravier 3/8) ou de remplacer une quantité de gravier de la fraction 3/8 par une quantité de gravier de la fraction 8/16 et ainsi de suite.

Tableau 3.19 : Composition volumique et massique finale du béton ordinaire

| | Sable 0/3 | Gravillon | Gravier 8/16 | Ciment | Eau | E/C |
|----------------------------|-----------|-----------|--------------|--------|-----|-----|
| Volume (l/m ³) | 270 | 130 | 260 | 129 | 200 | 0.5 |
| Masse (kg/m ³) | 675 | 325 | 660.4 | 400 | 200 | 0.5 |

III.3.2 Composition du BAP

III.3.2.1 Principes de formulation

Les deux principales propriétés des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces deux propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire; l'obtention de l'une faisant souvent au détriment de l'autre. Pour réaliser un BAP, il faut obtenir une suspension fluide suffisamment dense de manière à éviter le tassement des plus gros constituants.

À résistance équivalente les BAP ne se différencient des bétons ordinaires que par une quantité supérieure de pâte, regroupant le ciment et les particules fines, par l'introduction d'un agent de viscosité et par l'utilisation d'un faible volume de gravillon. Dans les BAP, le volume de pâte (ciment, additions, eau efficace et air) est généralement compris entre 330 et 400 l/m³.

Leur formulation requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des BAP doivent permettre d'assurer :

- la mobilité des matériaux en milieu non confiné (appréhendée par l'essai d'étalement).
- la stabilité, c'est à dire la résistance à la ségrégation et au ressuage (appréhendée par l'essai de stabilité au tamis).

Les BAP ont une grande capacité de remplissage en zone confinée car leur fluidité et leur résistance à la ségrégation sont telles que le phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle est évité.

Ce dernier dépend des propriétés et de la proportion de la pâte qui sont directement liées aux caractéristiques du liant et à la quantité d'eau libre, c'est-à-dire à la quantité d'eau non retenue par les différents constituants.

Si le béton contient une forte quantité d'eau libre, une partie des gravillons se sépare facilement du mélange et les forces de collisions et de friction augmentent jusqu'à la formation de voûtes ce qui accentue la ségrégation des constituants.

III.3.2.2 Essais préliminaires

Les essais préliminaires effectués sur mortier ont pour but d'évaluer le rôle de l'ajout minéral dans le béton, de déterminer son dosage optimal et son utilité vis-à-vis la fluidité.

Rappelons que les bétons autoplaçants ont besoin d'un ajout minéral pour arriver à produire une réaction pouzzolanique et une fluidité assez satisfaisante tout en évitant les risques de retrait majeur.

Le déchet de brique broyé comme ajout dans les BAP provoquera t-il une réaction pouzzolanique, contribuera t-il à la fluidité du béton et à éviter les risques de ségrégation ? Ces essais nous le diront bien, avec beaucoup d'appréciation.

Pour cela on a pris des échantillons de :

1500g de Sable+1000 g de ciment+E/C=0.4+2% de SP40+ (L'ajout).

Pour la fumée de silice on a pris un dosage de 08% par rapport au poids du ciment c'est un dosage reconnu optimal selon **P Aitchin**.

Pour ce qui est de la brique broyée on déterminera son dosage optimal qui nous permettra de formuler le béton d'où les résultats suivants :

Tableau 3.20 : Résultats de compression et de traction à 28 jours d'âge

| | 0 % | 5 % | 10 % | 15 % |
|-------------|--------|--------|--------|-------|
| Flexion | 7.386 | 6.81 | 7.48 | 7.59 |
| Compression | 37.765 | 43.825 | 42.675 | 41.19 |

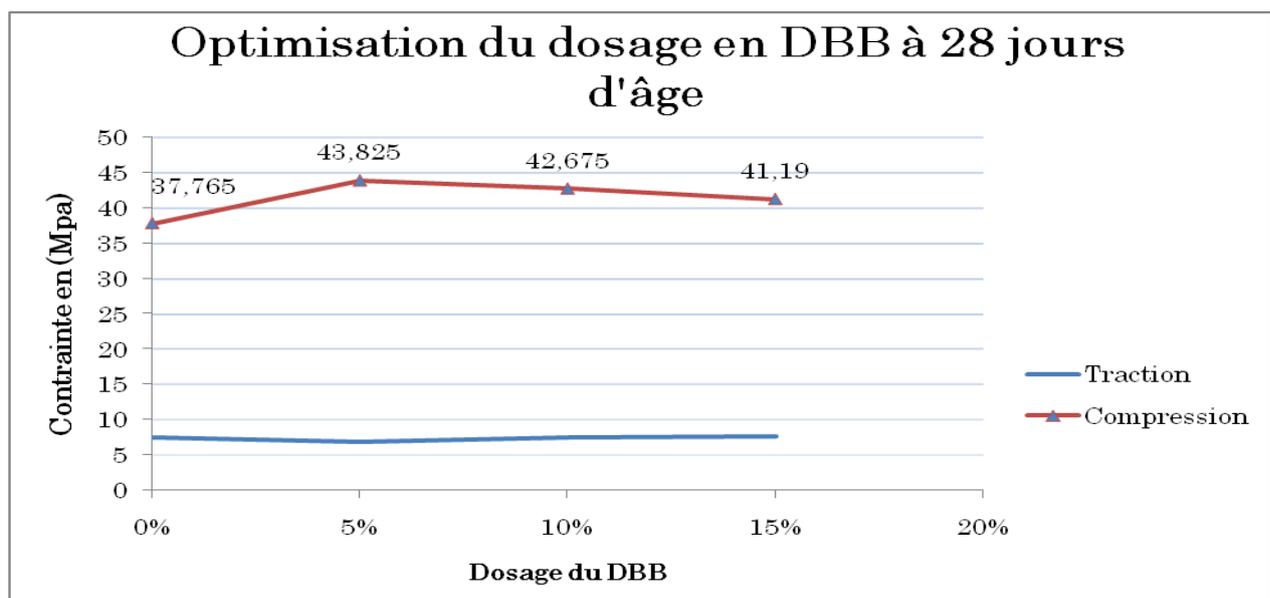


Figure 3.6 : Optimisation du dosage de l'ajout à 28 jours d'âge

Tableau 3.21 : Résultats de compression et de traction à 90 jours d'âge

| | 0 % | 5 % | 10 % | 15 % |
|-------------|--------|-------|-------|-------|
| Flexion | 6.9675 | 6.67 | 6.33 | 6.69 |
| Compression | 41.27 | 47.23 | 46.61 | 45.56 |

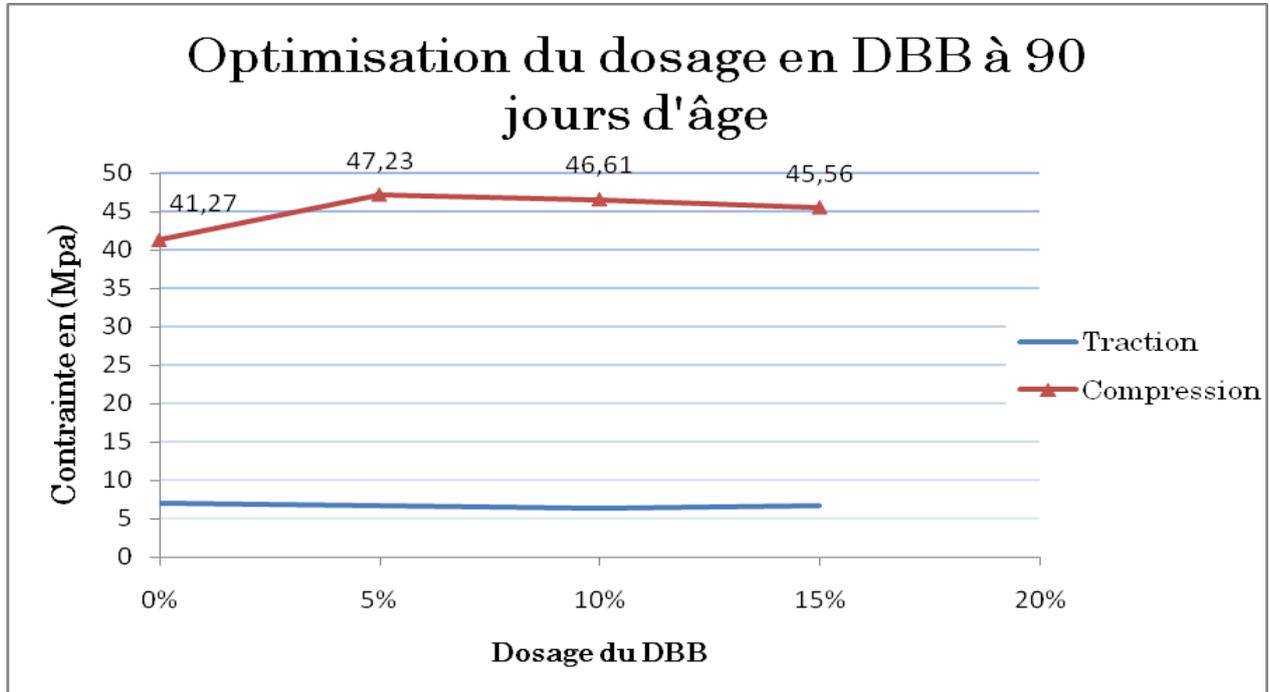


Figure 3.7: Optimisation du dosage de l'ajout à 90 jours d'âge

III.3.2.3 Interprétations

Pour formuler notre béton ainsi que pour caractériser ce nouvel ajout minéral nous avons fait des essais de compression et de traction à différents dosages 0, 5, 10 et 15%.

Les résultats obtenus nous montrent clairement que l'optimum est à 5% seulement à 10% c'est presque la même valeur mais on a opté pour 5% pour diminuer le risque de ségrégation qui est une propriété très recherchée des bétons autoplaçants, la résistance à la compression quand à elle est bonne car la résistance avec ajout est plus élevée que celle sans ajout d'où la forte certitude de la réactivité pouzzolanique et l'indice de pouzzolanité I_p est calculé comme suit : $I_p = \frac{\text{Résistance avec ajout}}{\text{Résistance sans ajout}} = 47.23/41.27 = 1.14$ [5]

Cet indice de pouzzolanité nous renseigne sur le taux des CSH formés qui caractérisent la résistance à la compression.

Tableau 3.22 : Indice de pouzzolanité pour différents dosages sur mortier

| Dosage en DBB | 0 % | 5 % | 10 % | 15% |
|---------------|-----|------|-------|--------|
| Ip (28 jours) | 1 | 1,16 | 1,13 | 1,09 |
| Ip (90 jours) | 1 | 1,14 | 1,129 | 1,1039 |

III.3.2.4 Formulation préliminaire du BAP

On a : Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Air occlus (A) = 1000 l

On fixe le dosage en ciment à 450 kg/m³ et on prend : E/C = 0.5 ⇒ E = 225 kg et:

A = 10 l/m³

La masse spécifique du ciment $\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$ donc on peut tirer le volume du sable et du gravier comme suit :

$$(G + S) = 1000 - 225 - (450/3.1) - 10 \approx 620 \text{ l/m}^3$$

La composition d'un béton autoplaçant nécessite un poids de particules fins d'environ 700 kg/m³, un rapport G/S variant entre 0.8 et 1.05, des granulats de diamètre maximal de 16 mm.

Un rapport G/S = 0.95 sera pris pour calculer les proportions volumiques du sable et du gravier.

Donc on aura :

$$\begin{cases} (G+S) = 620 \text{ l/m}^3 \\ G/S = 0.95 \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

D'après la formule (11) on a G % = 48.7% et S % = 51.3%, d'où : G = 302 l/m³ et S = 318 l/m³

L'utilisation du superplastifiant SP40 à raison de 7.75 % par rapport au poids de ciment permet de réduire la quantité d'eau de 11%, donc on aura une diminution du rapport E/C de 0.5 à 0.44, tout en gardant les mêmes proportions de gravier, sable et ciment.

Tableau 3.23 : Formulation préliminaire du béton autoplaçant

| Constituants | Sable 0/3 | Gravier 3/16 | Ciment | Eau | E/C | Superplastifiant |
|----------------------------|-----------|--------------|--------|-----|------|------------------|
| Volume (l/m ³) | 318 | 302 | 145.2 | 200 | 0.44 | 11.25 |
| Masse (kg/m ³) | 795 | / | 450 | 200 | 0.44 | 13.5 |

III.3.2.5 Orientation technique pour la formulation

Pour la formulation du béton autoplaçant on se basera sur les paramètres de bases suivants :

G/S = 0.8 à 1.05 D'après P.Aitchin [27]

S/P = 0.67 à 0.8

(Fines <80 microns) >700 Kg/m³

Vpâte = 330 à 400 l/ m³

E/C<0.45

E/L = 0.3 à 0.45

1/3 de 8/16 et 2/3 de 3/8 après calcul on aura [17]

100.7 l/m³ de 8/16 255.7 Kg/m³

201.5 l/m³ de 3/8 503.75 Kg/m³

D'où la composition finale du béton autoplaçant avec comme ajout la fumée de silice

Tableau 3.24: Formulation finale du béton autoplaçant avec fumée de silice

| | 0/3 | 3/8 | 8/16 | Ciment | Eau | E/C | Ajout | Adjuvant |
|---------------------------------|-----|-------|-------|--------|-----|------|-------|----------|
| Volume (l/m³) | 318 | 201.5 | 100.7 | 145.2 | 200 | 0.44 | 11.62 | 11.25 |
| Masse (kg/m³) | 795 | 503.7 | 255.7 | 450 | 200 | 0.44 | 25.6 | 13.5 |

La composition finale du béton autoplaçant avec comme ajout la brique broyée

Tableau 3.25: Formulation finale du béton autoplaçant avec déchet de brique

| | 0/3 | 3/8 | 8/16 | Ciment | Eau | E/C | Ajout | Adjuvant |
|---------------------------------|-----|-------|-------|--------|-----|------|-------|----------|
| Volume (l/m³) | 318 | 201.5 | 100.7 | 145.2 | 200 | 0.44 | 7.3 | 12.5 |
| Masse (kg/m³) | 795 | 503.7 | 255.7 | 450 | 200 | 0.44 | 22.5 | 15 |

La composition finale du béton autoplaçant sans ajout

Tableau 3.26: Formulation finale du béton autoplaçant sans ajout

| | 0/3 | 3/8 | 8/16 | Ciment | Eau | E/C | Adjuvant |
|---------------------------------|-----|-------|-------|--------|-----|------|----------|
| Volume (l/m³) | 318 | 201.5 | 100.7 | 145.2 | 200 | 0.44 | 12.5 |
| Masse (kg/m³) | 795 | 503.7 | 255.7 | 450 | 200 | 0.44 | 15 |

III.3.2.6 Récapitulation technique de la formulation

La réduction de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte s'accompagne d'une augmentation du volume du mortier et de la pâte, et par conséquent la teneur en matière cimentaire.

Cette augmentation de la teneur en matière cimentaire conduit à l'élévation de la température du béton dû à la chaleur d'hydratation, on a donc rajouté une partie d'ajout minéral (déchet de brique) au ciment pour pallier l'inconvénient de présence d'une importante teneur en matière cimentaire dans le béton.

Ces résultats semblent être comparables avec ceux trouvés par K.H.KHAYAT [17], qui a montré que l'augmentation du volume de mortier, contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité et que l'effet de la variation du rapport volumique sable/pâte de 0.8 à 0.67 semble être plus efficace pour l'amélioration de la fluidité dans le cas des faibles teneurs en gros granulats, par contre cet effet est très réduit si l'on travaille avec une teneur en gros granulats élevée.

Une partie d'eau introduite dans un béton sert à combler les vides entre les grains du squelette granulaire et du liant, seule la partie restante est susceptible de donner au béton sa maniabilité.

Ainsi, l'augmentation de la compacité du squelette granulaire conduit à mettre moins d'eau pour une ouvrabilité donnée du béton ou à améliorer l'ouvrabilité pour une teneur en eau donnée.

On sait que la quantité d'eau qui correspond un rapport $E/C = 0.35$, représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour hydrater l'ensemble des grains de ciment, ce qui signifie qu'une quantité importante de ciment reste anhydre dans un BAP HP même à long terme.

On peut dire que le ciment joue un rôle granulaire comme granulats inerte ultrafin en plus de sa fonction liante.

A savoir aussi que :

| | |
|--------------|-------------------|
| $G/S = 0.95$ | Rapport volumique |
| $S/P = 0.8$ | Rapport volumique |
| $E/C = 0.44$ | Rapport massique |
| $E/L = 0.41$ | Rapport massique |

Pâte = $C+E+ajout+adjuvant +air$ en (l/m^3).

$L=C+Ajout+air$ en (Kg/m^3)

III.4 Essais d'études et caractérisation à l'état frais

Les essais d'étude sont les essais qui permettent de vérifier, en laboratoire les quantités des bétons notamment leur maniabilité et leur résistance.

La gâchée exécutée dans le laboratoire pour ces essais doit être telle qu'elle permette d'obtenir un volume de béton compacté excédent celui des éprouvettes d'au moins 25%.

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant : gros éléments, sable, ajouts, ciment et eau+adjuvant.

L'eau de gâchage doit être rajoutée après un malaxage à sec de l'ordre de 01 mn, le malaxage est alors poursuivi pendant 02 mn.

Le respect du temps de malaxage empêche l'apparition des gros granulats à la surface.

Lorsque plusieurs gâchées ont lieu à la suite l'une après l'autre, le plus économique est de ne pas rincer ni sécher le malaxeur, et de profiter de la gâchée précédente pour graisser la suivante, à condition que les composants soient de la même nature d'une gâchée à une autre.

Une fois la formulation est élaborée après tant d'essais préliminaires, le béton peut être lancé et se sont ses caractéristiques à l'état frais qui nous intéressent le plus.

III.4.1 Essai de stabilité au tamis NBN-EN 12350-1 : 1999.

III.4.1.2 But

L'essai de stabilité au tamis vise à qualifier et évaluer les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation et de ressuage en calculant le poids de la laitance passé au tamis par la formule donnée ci après, après deux 2 minutes.

III.4.1.3 Appareillage

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

III.4.1.4 Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton représentatif ;

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. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, 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_{fond}
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes de malaxage.
- 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.

$$P_{\text{laitance}}(\%) = \frac{\text{Poids de la laitance passée (kg)}}{4,8 \pm 0,2} \times 100 \dots\dots\dots (12)$$

La calcul du pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon conduit à classer le béton autoplaçant de la façon suivante :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}}(\%) \leq 15\%$ Stabilité très satisfaisante.
- $15\% \leq P_{\text{laitance}}(\%) \leq 30\%$ Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}}(\%) > 30\%$ Stabilité très mauvaise (béton inutilisable).

III.4.1.5 Résultats obtenus

Tableau 3.27 : Résistance à la ségrégation

| | Poids de la laitance passée (Kg) | P _{laitance} (%) |
|----------|----------------------------------|---------------------------|
| BAP FS | 0.24 | 4.8 |
| BAP DBB | 0.706 | 14.12 |
| BAP (0%) | 0.398 | 7.96 |



Figure 3.8 : Essai de stabilité au tamis

III.4.1.6 Interprétation

Le béton autoplaçant avec comme ajout le déchet de brique manifeste très sensiblement une satisfaction vis-à-vis le risque de ségrégation cela est dû en les caractéristiques de cette poudre.

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

L'utilisation d'un agent colloïdal, permet d'obtenir un béton plus visqueux et plus stable. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle. Elle permet de conserver une répartition homogène des différents constituants. L'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

Cette ségrégation est due principalement à la diminution du volume de pâte par rapport à celui du sable.

On remarque que la stabilité de la pâte fraîche contenant des fumées de silices est accrue considérablement et que le ressuage est réduit d'une façon importante.

III.4.2 Essai du contrôle du volume d'air entraîné (NF P 18-353)

III.4.2.1 Essai à l'aéromètre

a- Objectif

Il s'agit d'évaluer la quantité d'air occlus de manière à vérifier que le minimum prévu par la norme (NF P 18-353) en cas de gel est bien atteint.

b- Principe de l'essai

On applique une pression donnée à un volume connu de béton, l'air occlus étant seul à diminuer de volume sous l'effet de cette pression.

c- Equipement nécessaire

- Un aéromètre à béton d'une capacité égale au moins à cinq (05) litres ;

Des moyens de mise en place en béton : tige de piquage et aiguille vibrante de 25 mm de diamètre ou (table vibrante) pour le béton ordinaire.

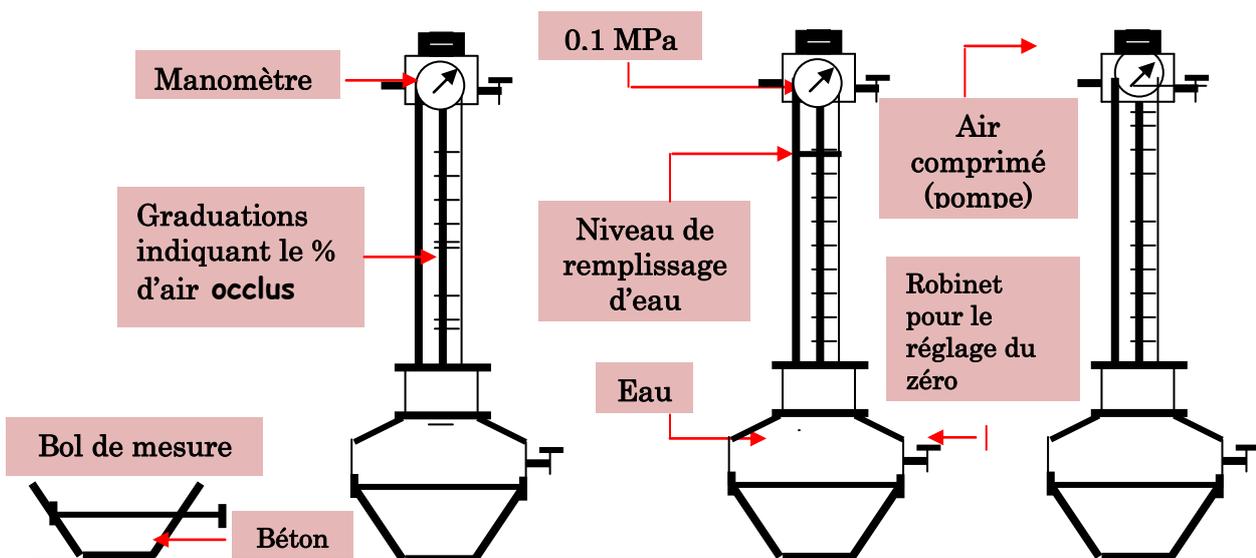


Figure 3.9 : Mesure du % d'air occlus à l'aéromètre à béton.

d- Conduite de l'essai

- Le béton est mis en place dans le bol de mesure de l'aéromètre à béton conformément aux prescriptions de la norme (NF P 18-353) : par piquage si l'affaissement mesuré au cône d'Abrams est supérieur ou égal à 10 cm : sinon par vibrations ;

- La surface supérieure ayant été convenablement arasée, la partie supérieure de l'aéromètre est alors bridée sur le bol de mesure ;

- On remplit d'eau la partie supérieure de l'appareil jusqu'au dessus du niveau zéro (0,00) qui sera réglé en ouvrant le robinet inférieur ;

- On applique alors une pression de 0,1 MPa. Le niveau atteint par l'eau sous l'effet de cette pression indique sur l'échelle graduée le pourcentage d'air occlus.

La lecture est répétée à deux autres reprises (on réajuste le niveau d'eau s'il y a lieu). L'essai est répété une deuxième fois sur un deuxième échantillon de la même gâchée. Le pourcentage d'air retenu est la moyenne arithmétique des lectures effectuées, six (06) lectures effectuées.

Lorsque le pourcentage d'air est très élevé, il peut être nécessaire d'appliquer une pression inférieure à 0,1 MPa, car sinon l'eau descend en dessous de la zone de mesure. La norme indique alors la correction à apporter à la lecture.

e- Résultats obtenus

Les résultats obtenus au laboratoire sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 3.28 : Volume d'air occlus dans les différents bétons.

| Composition du béton avec : | Volume d'air occlus en (%) |
|-----------------------------|----------------------------|
| BAP FS | 0,92 |
| BAP DBB | 0,81 |
| BAP (0%) | 0,94 |

Remarque

Au cour de l'expérience au laboratoire et après avoir coulé le béton dans les moules cylindriques on a remarqué les phénomènes suivants :

- 1- Un dégagement excessif de bulles d'air des deux types de BAP ;
- 2- Remontée d'une quantité d'eau dans les éprouvettes;

III.4.2.2. Interprétation

- Concernant les BAP ils contiennent un volume d'air (0,92% pour BAP FS, 0,81% pour BAP DBB) inférieur à la valeur théorique moyenne du volume des vides entrant dans la composition du béton qui est : $V = 10 \text{ dm}^3/\text{m}^3$, ($V = 1 \%$).

On a projeté pour un volume des vides de 1% et on a trouvé des valeurs proches à celles de la pratique ce qui prouve la fiabilité des essais réalisés.

- La remontée des bulles d'air prouve que le BAP se place lui même et évacue l'air occlus lors de sa mise en œuvre.

- La remontée d'eau du BAP DBB, ceci peut s'expliquer par sa densité qui est plus considérable qu'à celle des deux autres bétons car la masse volumique de l'ajout DBB est supérieure à celle de la FS, par conséquent le BAP DBB est plus compact grâce au DBB qui occupe tous les pores et les vides du béton.

Cette remontée est liée au tassement, sous l'effet du poids du DBB.

Le phénomène de la remontée et le dégagement d'eau est appelé ressuage ou exsudation.

III.4.3 Essai de consistance [30]

Objectif

Le problème est de quantifier cette maniabilité (ouvrabilité) qui est une quantité évolutive dans le temps du béton avant prise.

C'est le but des essais de consistance qui classent les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme, plastique, très plastique, fluide.

III.4.3.1 Mesure de l'affaissement (Cône d'ABRAMS) (NF P 18-451)

Cet essai est utilisé pour caractériser l'ouvrabilité du béton confectionné.

Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement.

III.4.3.1.1 Conduite de l'essai

Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 300 mm de hauteur placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut. Le cône est rempli de béton en trois couches d'égal volume.

Chacune des couches est compactée avec vingt cinq (25) coups de tige métallique normalisée de 16 mm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie pour le béton ordinaire (pour les BAP aucun moyen de compactage n'est utilisé).

Une fois le cône est rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de Va – et – Vient.

Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse ; des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettant de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse.

La différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée **L'AFFAISSEMENT** ; il est mesuré à cinq (05) mm près.

La mesure s'effectue sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

Pour éviter que l'affaissement soit fonction du frottement qui pourrait s'exercer entre les parois du moule et le béton, l'intérieur du moule de même que la surface sur laquelle il est posé doivent être humidifiés avec de l'eau avant chaque essai.

De plus, juste avant de relever le cône, le béton qui a débordé autour de la base du moule doit être enlevé.

III.4.3.1.2 Equipement nécessaire

L'appareillage est schématisé sur la figure n°6.3, et se compose de quatre 04 éléments :

- Un moule tronconique sans fond de 300 mm de hauteur, de 200 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 100 mm de diamètre en sa partie supérieure ;
- Une plaque d'appui ;
- Une tige de piquage (Pour un béton ordinaire) ;
- Un portique de mesure.



Figure 3.10: Cône d'ABRAMS

III.4.3.1.3 Classes d'affaissement

La norme **ENV 206** définit quatre 04 classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur la figure n°6.4, sur cette figure les rectangles en blanc représentent la variation possible d'affaissement correspondant à la classe considérée.

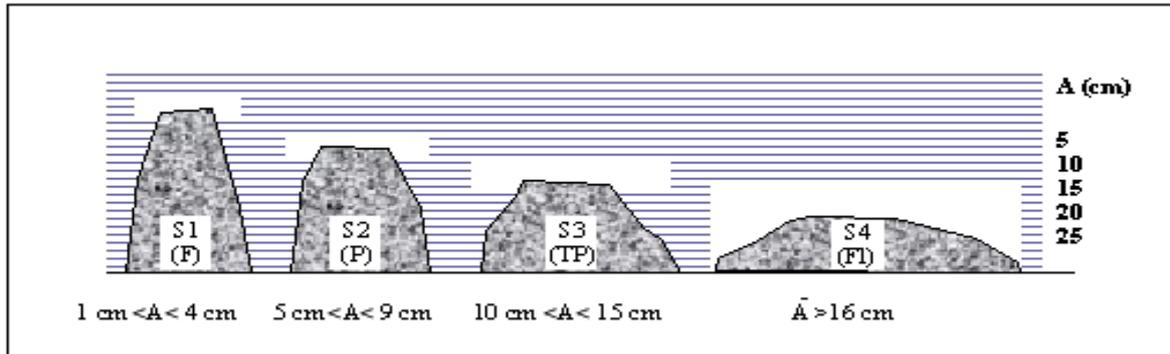


Figure 3.11: Classes d'affaissement.

Les classes sont notées S1, S2, S3 et S4 et appelées classe d'affaissement.

S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en Anglais **Slump Test**.

La norme **NF P 18-305** définit les mêmes classes d'affaissement mais les note : F, P, TP et FL (ferme, plastique, très plastique et fluide).

III.4.3.1.4 Les résultats obtenus

Tableau 3.29 : Résultats d'affaissement.

| Type de béton | Affaissement (cm) |
|---------------|-------------------|
| BAP FS | 24 |
| BAP DBB | 25 |
| BAP (0%) | 22 |

III.4.3.1.5 Limites de l'essai d'affaissement

Grâce aux superplastifiants, on peut réaliser aujourd'hui des bétons très fluides dont l'affaissement au cône dépasse les 25 cm. Le cône ne permet pas de caractériser de manière satisfaisante de telles consistances.

Dans ce cas il serait préférable d'utiliser l'essai d'étalement.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 540 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.

D'autre part, l'affaissement ne dit pas tout. Supposons deux bétons dont la fluidité serait obtenue par un dosage en eau important et pour le second par un dosage élevé de superplastifiant.

Ces deux 02 bétons peuvent présenter un même affaissement de 25 cm au cône comme représenté sur la figure n° 6.5 ; mais le premier présentera une forte ségrégabilité, alors que le second grâce à son faible dosage en eau gardera sa cohésion tout en ayant une grande fluidité.

On pourra dire de ce béton qu'il présente une très bonne maniabilité ; ce qui ne sera pas le cas du premier qui ne pourra pas être mis en place correctement.

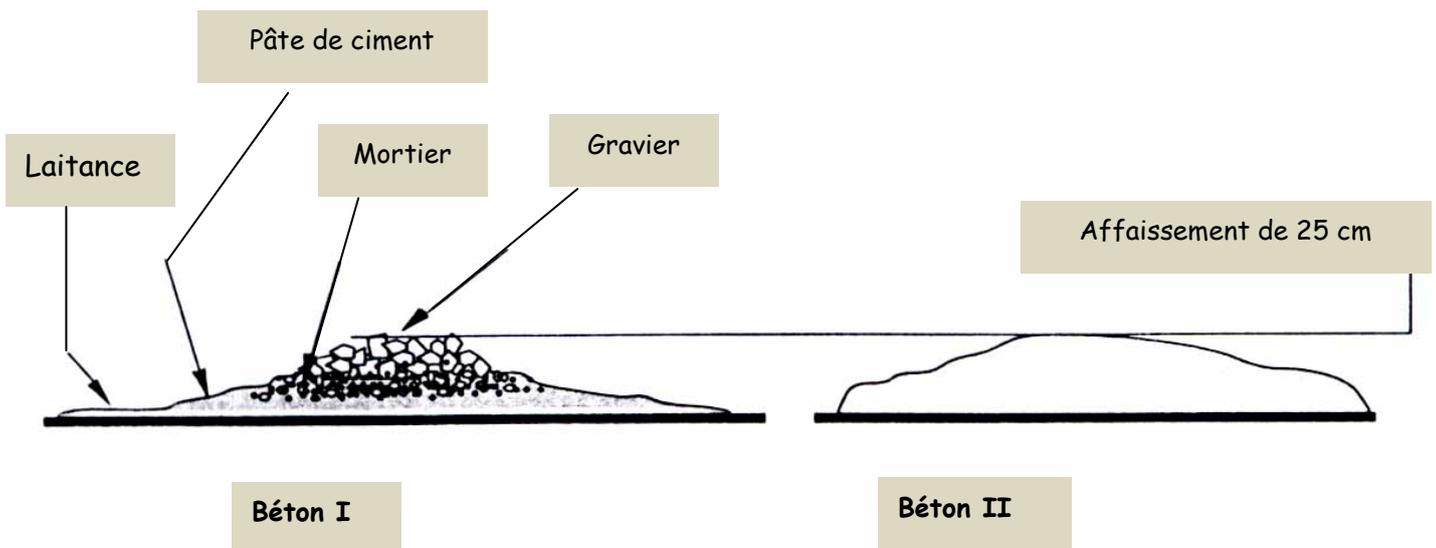


Figure 3.12: Exemple d'un même affaissement ne signifiant pas la même maniabilité [30].

Béton I : Béton non adjuvanté; l'affaissement n'a pu être obtenu que par un dosage en eau excessive : il y a ségrégation.

Béton II : Béton adjuvanté par un superplastifiant : l'affaissement n'est pas obtenu au détriment de la cohésion.

Tableau 3.30 : Variation de l'ouvrabilité et de la résistance en fonction des facteurs de composition du béton [11].

| Facteurs de composition du béton | Pour une bonne ouvrabilité | Pour une bonne résistance |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Finesse du sable | Plutôt fin | Plutôt grossier |
| Rapport G/S | A diminuer | A augmenter |
| Dosage en eau | A augmenter | A diminuer |
| Granularité | Continue préférable | Discontinue préférable |
| Dimension Max, des granulats | Plutôt petite | Plutôt forte |

III.4.3.2 Mesure de l'étalement

Cet essai est utilisé pour caractériser la fluidité du béton, il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton formée après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement.

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à choc. À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.

Dans le cas du cône d'Abrams l'étalement est noté Slump flow et il est appelé Flow table dans l'essai au cône DIN.

La valeur du Slump flow d'un BAP est comprise entre 540 et 700 mm

III.4.3.2.1 Vitesse d'écoulement

On mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante.

La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6.25 à 2.5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement T_{50} variant entre 4 à 10 secondes.

III.4.3.2.1 Résultats obtenus

Tableau n°3.31 : Résultats d'étalement

| Type de béton | Etalement (cm) |
|---------------|----------------|
| BAP FS | 85 |
| BAP DBB | 80 |
| BAP (0%) | 74 |

Le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant ainsi qu'avec la diminution du rapport S/P et le volume de gravier de la fraction 8/16.

Le béton avec comme ajout le déchet de brique contribue en l'amélioration de la fluidité du béton nettement à un point où il avoisine presque la valeur de celle avec comme ajout la fumée de silice, cela nous aide énormément pour apprécier ce béton et dire que le déchet de brique aide à avoir une fluidité assez exemplaire.

III.4.4 Confection des éprouvettes

La confection du béton consiste à verser dans l'ordre, dans un malaxeur de capacité de 0.15 m³ les fractions de graviers, de ciment et la fraction de sable. On mélange l'ensemble à sec pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange.

On introduit en suite la première moitié de l'eau de gâchage accompagnée de la moitié de la quantité du superplastifiant ; on continue à malaxer pendant une minute. Ensuite, on introduit la deuxième moitié d'eau accompagnée par la quantité de superplastifiant restante et on malaxe une dernière fois pendant deux minutes.

Juste après l'arrêt du malaxage, on mesure l'affaissement ainsi que le volume d'air entraîné dans le béton.

On déverse en suite sans vibration bien sûr, le béton frais dans des éprouvettes métalliques dont les parois ont été déjà humidifiées par une huile de décoffrage.

III.4.4.1 Dimensions des moules (NF P 18-400) [30]

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques, dont les moules ont des caractéristiques définies par la norme (NF P 18-400).

Les moules les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques.

Leurs dimensions sont indiquées ci-dessous elles doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats « D » entrant dans la composition du béton.

Tableau n° 3.32 : Cylindres utilisés en fonction du diamètre maximal des granulats.

| Format | Dimensions (mm) | | Section (cm ²) par un plan | | D (mm) des granulats |
|-----------------|-----------------|---------|--|----------|-------------------------|
| | Diamètre | Hauteur | Orthogonal | Diamètre | |
| Cylindre 11 x22 | 112.8 | 220 | 100 | 248 | ≤ 16 |
| Cylindre 16 x32 | 159.6 | 320 | 200 | 511 | ≤ 40 |
| Cylindre 25 x50 | 252.5 | 500 | 500 | 1262 | ≤ 80 |

Dans notre travail, on a utilisé des moules cylindriques de format (16x32), car les moules de format (11x22) ne sont pas disponibles au niveau du laboratoire de l'université.

Après remplissage des moules de béton, les trois BAP ont été confectionnés sans aucun moyen de vibration.

III.4.4.2 Démoulage et conservation des éprouvettes

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°C jusqu'à l'échéance de l'essai.

L'hydratation du ciment se produit lors du malaxage du béton et ne s'achève jamais.

III.4.4.3 Surfaçage des éprouvettes (NF P 18-416)

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

Le surfaçage se fait avec du ciment Prompt à l'aide d'un équerre, il s'agit du dernier essai fait 24 heures avant l'écrasement.



Figure 3.13 :
Equerre de surfaçage



Figure 3.14 :
Eprouvette 16x32

III.5 Essais d'études et caractérisation à l'état durci

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en oeuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en oeuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

III.5.1 Essais destructifs :

III.5.1.1 Essai de compression : (NF P 18-406)

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm², à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = P / S \dots\dots\dots (13)$$

Avec :

- σ : Contrainte de rupture (MPa) ;
- P : Charge de rupture (MN);
- S : Section de l'éprouvette (2 × 10⁻²) m².

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

a- Résultats de la compression :

Des essais à la compression ont été effectués au 28^{ième} jour au niveau du laboratoire de béton de la faculté.

Les résultats obtenus sont indiqués sur les tableaux suivants :

Tableau 3.33 : Résistances à la compression au 28^{ième} jour.

| Type de béton | Masse moyenne d'éprouvettes à t=0 | Masse moyenne d'éprouvettes à t= 28 jours | $f_{C 28}$ moyenne (Mpa) |
|-----------------|-----------------------------------|---|--------------------------|
| BAP FS | 15,2746 | 15,38 | 28.6 |
| BAP DBB | 15,0686 | 15,12 | 22.6 |
| BAP (0%) | 15,138 | 15,1483 | 18.4 |

Tableau 3.34 : Résistances à la compression au 90^{ième} jour.

| Type de béton | Masse moyenne d'éprouvettes à t=0 | Masse moyenne d'éprouvettes à t= 90 jours | $f_{C 28}$ moyenne (Mpa) |
|-----------------|-----------------------------------|---|--------------------------|
| BAP FS | 14,914 | 15,0573 | 41,4 |
| BAP DBB | 15,3313 | 15,4273 | 38 |
| BAP (0%) | 15,2086 | 15,3193 | 34 |

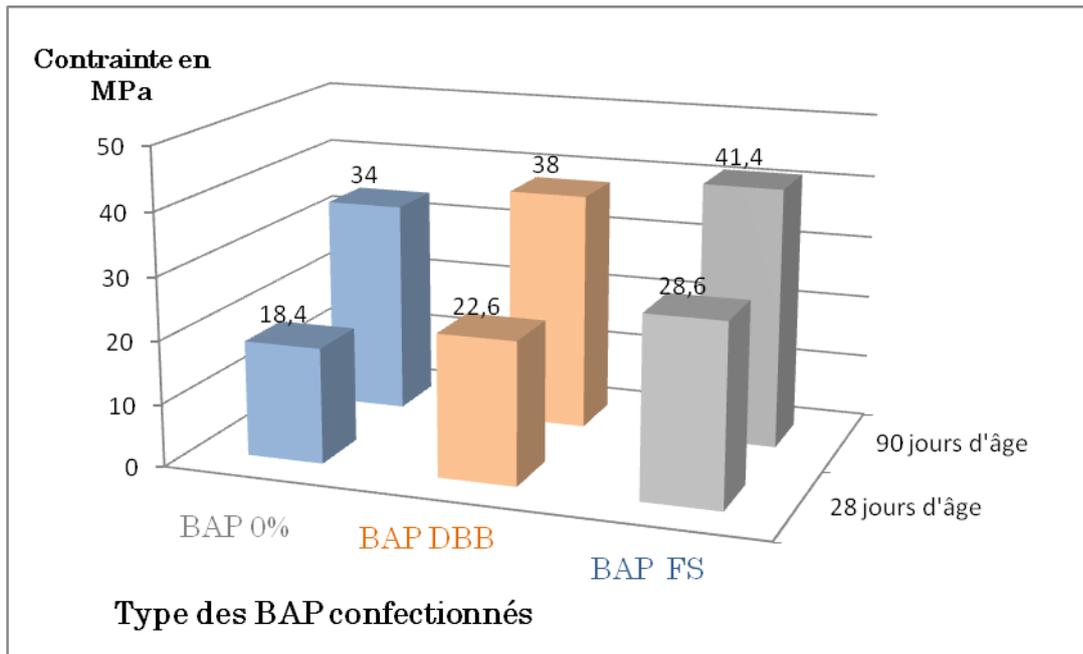


Figure 3.15 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps des trois types de bétons confectionnés.

Interprétation

La contribution de la poudre du déchet de brique broyée en le gain de la résistance à la compression est très remarquablement appréciable de ce fait, il y a lieu de dire que la réactivité pouzzolanique est effective du point de vue contribution et réaction, aussi pertinente soit elle un travail de substitution vis-à-vis cet ajout par rapport au ciment serait un plus, une expérience et un riche potentiel pour son utilisation dans le domaine industriel (formulation).

Si on prend en considération la contribution de la fumée de silice dans la cinétique de processus d'hydratation du ciment, grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment.

Cette réaction pouzzolanique permet de créer les silicates de calcium hydraté C-S-H d'une part et de réduire la taille des pores capillaires d'autre part.

La bonne compacité des BAP est assurée essentiellement par la forte réduction de la quantité d'eau de gâchage et l'utilisation conjointe de la fumée de silice ou du déchet de brique comme ajouts minéraux et du superplastifiant, ce qui permet

de disperser les grains de ciment et les particules de d'ajouts minéraux, ces dernières permettent de remplir les micros pores capillaires qui existe dans un empilement de grains de ciment d'une part, et jouent un rôle pouzzolanique très important pendant le processus de durcissent du béton d'autre part.

On calcule l'indice de pouzzolanité à 90 jours correspondant aux trois types de bétons :

$$I_p (\text{BAP FS}) = 41.4/34 = 1.217$$

$$I_p (\text{BAP DBB}) = 38/34 = 1.118$$

$$I_p (\text{BAP 0\%}) = 34/34 = 1$$

On voit bien que le gain en résistances à la compression, se fait sentir plus fort pour le BAP FS car la fumée de silice manifeste une réactivité pouzzolanique très forte par le fait de la formation des silicates de calcium hydratés.

Le déchet de brique quand à lui contribue aussi en la formation des CSH très nettement, mais pas autant que la fumée de silice (Compte tenu de l'indice de pouzzolanité).

L'indice de pouzzolanité nous renseigne sur le taux des CSH formés. Il est d'autant plus grand que les CSH sont fortement formés ce qui implique que les résistances à la compression sont élevées.

La transformation des ajouts avec l'hydroxyde de calcium formé lors de l'hydratation des phases de clinker Alite et Bélite, participent nettement à la résistance à la compression.

Grâce à leur finesse, le déchet de brique et la fumée de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H.

L'indice de pouzzolanicité

L'indice de pouzzolanicité a été calculé à base de la formule suivante ;

$$I_p = \frac{\text{Résistance à la compression avec ajout}}{\text{Résistance à la compression avec ajout}} \quad [5]$$

Tableau 3.35 : Indice de réactivité pouzzolanique des BAP confectionnés

| Type de BAP | BAP 0% | BAP DBB | BAP FS |
|------------------|--------|---------|--------|
| I_p (28 jours) | 1 | 1,228 | 1,554 |
| I_p (90 jours) | 1 | 1,118 | 1,217 |

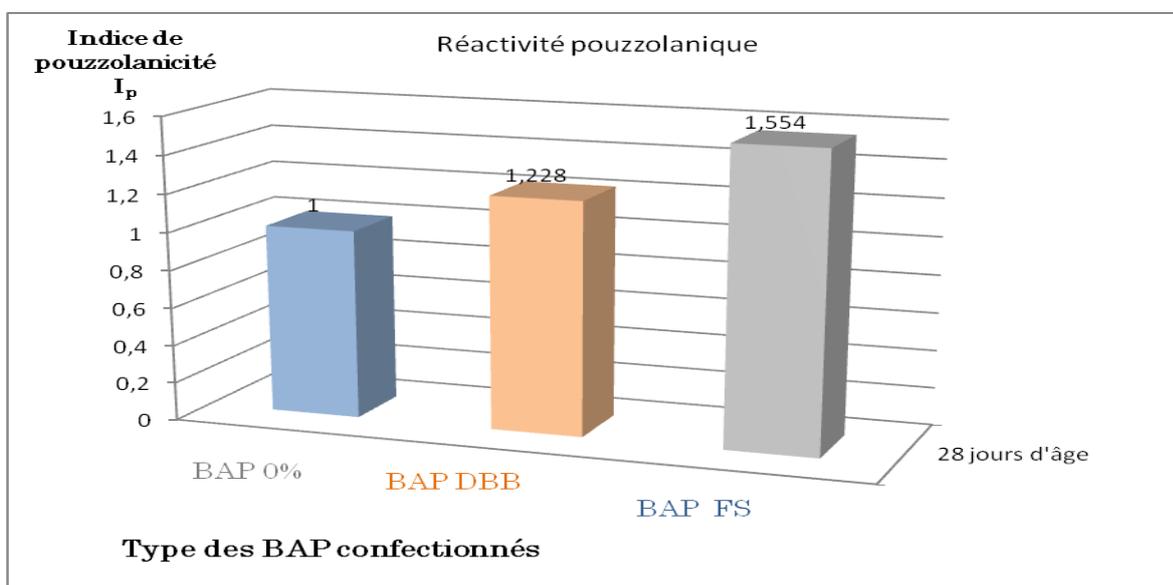


Figure 3.16 : Indice de réactivité pouzzolanique à 28 jours d'âge

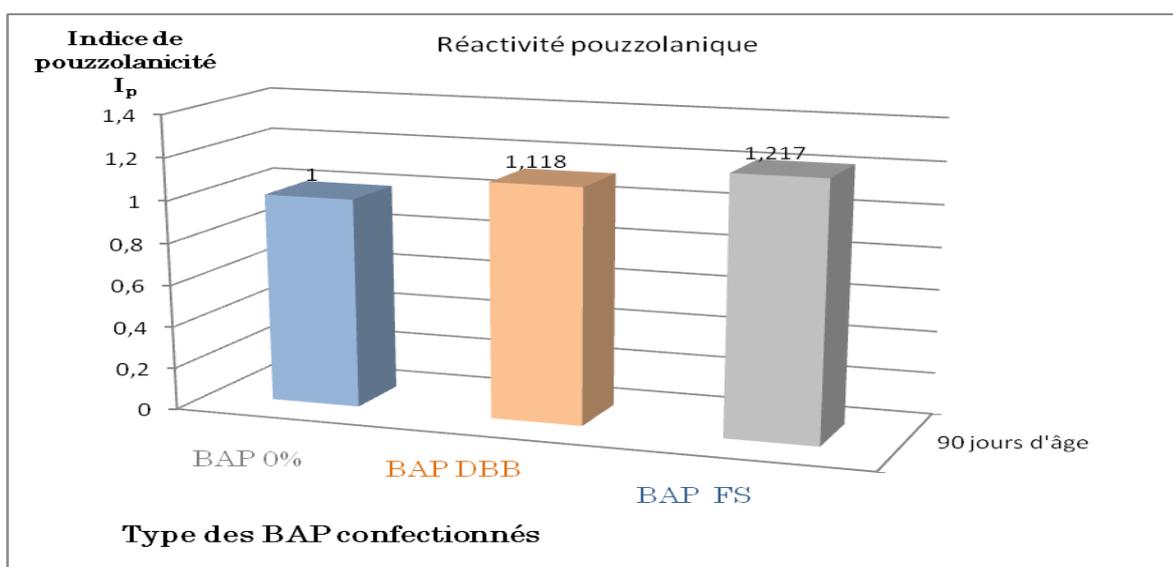


Figure 3.17 : Indice de réactivité pouzzolanique à 90 jours d'âge

Interprétations

L'indice de pouzzolanité est d'autant plus croissant que le taux de CSH formé est grand, cependant à 28 jours il y a un gain de résistance à la compression assez conséquent mais pas tout à fait définitif.

Au delà de 28 jours, la résistance à la compression continue à croître mais relativement faible c'est la raison pour la quelle l'indice de pouzzolanité à 90 jours est légèrement inférieur qu'à celui à 28 jours.

La fumée de silice qui elle est connue par son apport positif sur le gain de résistance à la compression et du fait sa forte contribution à la réactivité pouzzolanique, est clairement potentielle compte tenu de sa disposition en silice amorphe de l'ordre de 92 à 95 %.

Le déchet de brique broyé, en revanche a nettement contribué en ce gain de résistance à la compression mais en la réactivité pouzzolanique aussi, malgré sa faible composition en silice amorphe qui est de l'ordre de 48%.

Des bétons maniables ainsi que performants avec ajout le déchet de brique ont été obtenus à des résistances relativement semblables à celles avec fumée de silice d'où la forte certitude de la contribution du déchet de brique en la réactivité pouzzolanique.

III.5.2 Essais non destructifs

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants : les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peut être différent, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons,...

III.5.2.1 Auscultation sonore ou dynamique (Ultrason) : (NF P 18-418)

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, donc la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique d'un béton.

Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette (16×32) cm^2 âgée de 28 ou de 90 jours.



Figure 3.18 : Appareil ultra sonique.

A partir du temps de propagation des ondes soniques à travers la masse de béton, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = (L / T) \times 10^6 \dots\dots\dots (14)$$

Avec :

V : La vitesse de propagation des ondes en (m/s) ;

L : La distance entre les deux sondes en m (pour l'éprouvette testée L = 0.32 m) ;

T : Le temps de propagation des ondes (μ s).

A partir de cet essai, on peut calculer le module d'élasticité dynamique E_{dyn} .

Donc la méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrages. De nombreux facteurs influent sur les résultats :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et donc l'emploi d'une substance de contact est indispensable (graisse de paraffine),
- Le parcours doit être préférablement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton,
- La vitesse de propagation est sensible à la maturité du béton (état d'avancement de l'hydratation, eau occluse, ...). Cependant, la vitesse des impulsions est peu sensible à la température.
- La présence d'armatures dans le béton perturbe la vitesse de propagation. Il est donc souhaitable et voire indispensable de choisir un parcours d'ondes le moins influencé possible par la présence d'armatures,

☞ Applications et limites

C'est une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée aussi bien dans le cadre d'un suivi de production qu'en contrôle sur ouvrages. Lorsque de grands écarts de vitesse de propagation sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré. Une vitesse élevée de propagation indique généralement un béton de bonne qualité. Des études réalisées par la RILEM ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression a pour forme :

$$R_C = a. e^{(b.V)} \dots\dots\dots (15)$$

Avec : R_C : résistance à la compression, (a, b) coefficients et (v) la vitesse de propagation.

Tableau 3.36: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation.

| Qualité | Vitesse de propagation (m/s) |
|---------------|------------------------------|
| Excellente | Supérieur à 4000 |
| Bonne | 3200 – 4000 |
| Douteuse | 2500 – 3200 |
| Mauvaise | 1700 – 2500 |
| Très mauvaise | Inférieure à 1700 |

En première approximation, pour des granulats siliceux de qualité courante (Dmax = 16 mm) et pour un béton de résistance inférieure à 30 MPa, on peut considérer que :
 a = 0,08177, b = 0,00147.

$$R_C = 0,08177 \cdot e^{(0,00147 \cdot V)} \dots\dots\dots (16)$$

V : vitesse de propagation (m/s)
 Rc : résistance à la compression en (Mpa).

Une corrélation a été établie entre la vitesse de propagation et le module d'élasticité instantané (**E_{dyn}**) du béton :

$$E_{dyn} = \frac{(1+\nu).(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho V_m^2 \dots\dots\dots (17)$$

- L : longueur de l'éprouvette ;
- E_{dyn} : Module d'élasticité dynamique ;
- ν: Coefficient de poisson (on prend :ν = 0.2 pour le BR et 0.22 pour le BAP) ; [1]
- ρ: Masse volumique du béton ;
- V_m : vitesse moyenne de propagation.

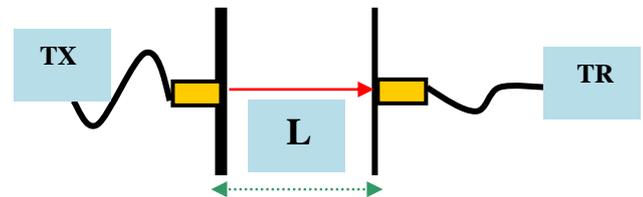


Figure3.19 : Mesure en transparence

a- Mesures en transparence :

Cette méthode permet :

- De mettre en évidence des défauts d'homogénéité ;
- D'estimer E_{dyn} et la résistance à la compression.

b-Mesures en surface :

(S) Ondes de surfaces

(P) Ondes profondes réfléchies.

(TX) Emetteur, (TR) Récepteur.

Cette méthode permet de :

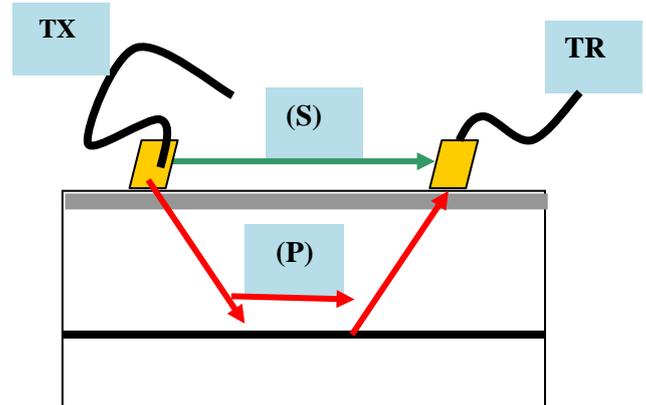


Figure 3.20 : Mesure en surface

- + Déterminer la présence de fissures de masse et éventuellement leur profondeur,
- + Mettre en évidence une couche superficielle de moindre qualité (gel, feu, ...),
- + Mettre en évidence une mauvaise reprise de bétonnage (sous certaines réserves).

☞ Relation entre la vitesse du son et la résistance en compression [17]

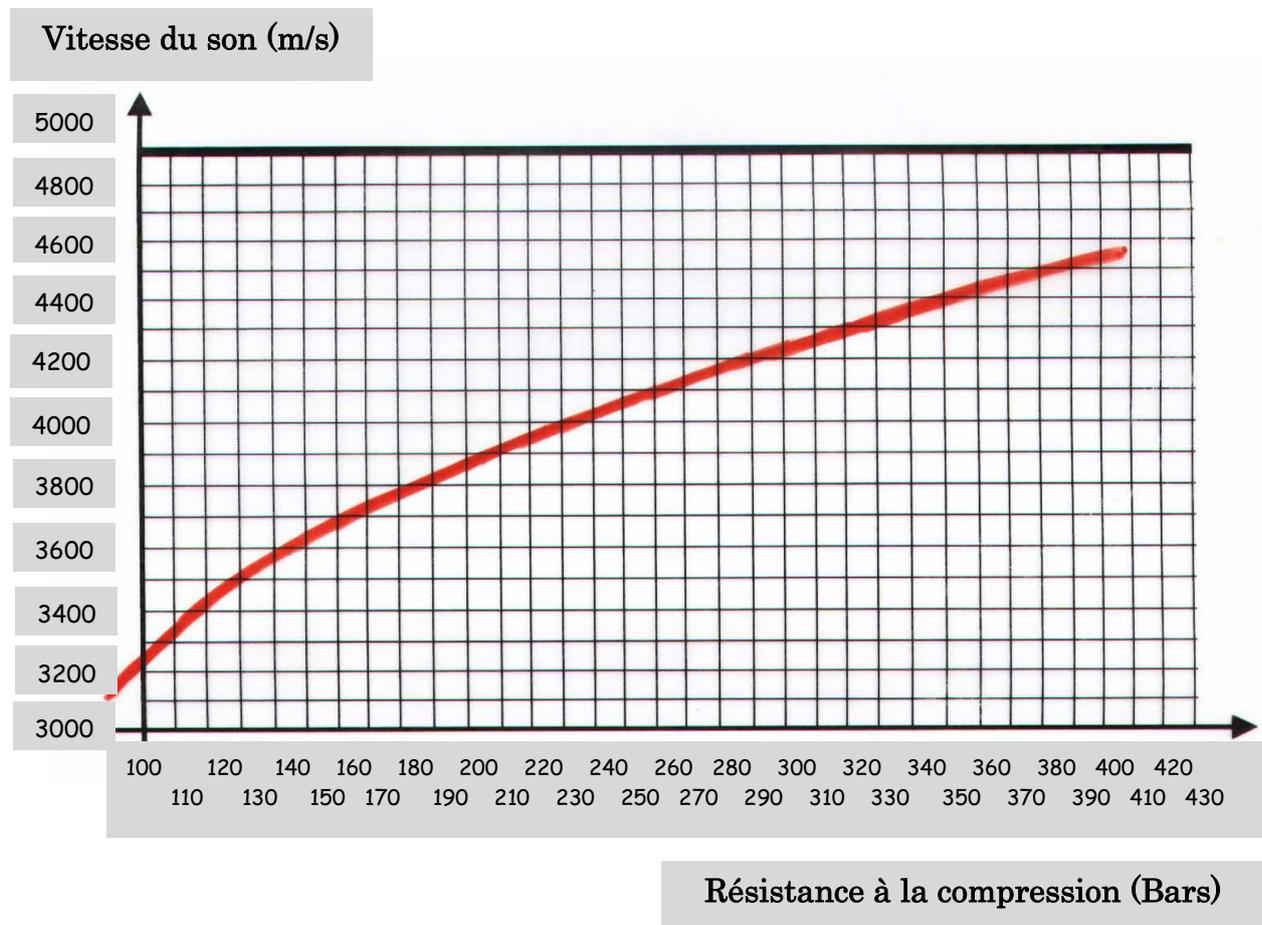


Figure 3.21 : Courbe RILEM

c- Les résultats obtenus :

Tableau 3.37 : Résultats des essais à l'ultrason au 28^{ième} jour.

| Type de béton | T : Temps en (μ s), de propagation des ondes | V : Vitesse moyenne de propagation (m/s) | R_C moyenne (MPa) |
|-----------------|---|---|---------------------------------------|
| BAP FS | 79.7 | 4015 | 29.91 |
| BAP DBB | 82.9 | 3860 | 23.29 |
| BAP (0%) | 85.3 | 3750 | 20.26 |

On a utilisé la courbe RILEM pour tirer les résultats, car les résistances de nos bétons dépassent les 30 Mpa.

Tableau 3.38 : Résultats des essais à l'ultrason au 90^{ième} jour.

| Type de béton | T : Temps en (μ /s), de propagation des ondes | V : Vitesse moyenne de propagation (m/s) | R_C moyenne (MPa) |
|-----------------|--|---|---------------------------------------|
| BAP FS | 69,25 | 4621 | 42.4 |
| BAP DBB | 69.93 | 4576 | 40,12 |
| BAP (0%) | 72.59 | 4408 | 36,10 |

Bien sûr, les résultats à l'ultra son, ont toujours été supérieurs à ceux à l'écrasement, c'est la raison pour la quelle, lors d'un contrôle ou une expertise, l'ultra son est toujours utilisé, car au dessous de sa valeur le béton est inacceptable. Les résultats obtenus confirment les résultats déjà obtenus à l'aide des essais destructifs.

III.5.2.2 Le retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

III.5. 2.2.1 Le retrait plastique

Il affecte le béton au très jeune âge (pendant la prise initiale). Il est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe.

III.5.2.2.2 Le retrait endogène

On nomme retrait endogène la contraction volumique de la pâte de ciment sans échange d'humidité avec le milieu extérieur en conditions isothermes.

C'est la conséquence macroscopique du retrait chimique, contraction égale à la différence de volume entre les hydrates et les réactifs, eau et ciment.

En conséquence, lorsque son retrait est gêné, le béton est soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration potentielle.

Le béton est donc un matériau qui a une tendance naturelle à la fissuration.

III.5. 2.2.3 Le retrait de séchage

Il est provoquée par une réorganisation de l'eau il survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton, il représente la forme la plus courante et la plus visible du retrait.

La cause principale du retrait de séchage est *l'assèchement* progressif de la pâte de ciment. Quand on abaisse graduellement le taux d'humidité on observe que certaines catégories de pores s'assèchent en premier.

Dès que l'humidité est inférieure à 100 %, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper, cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait

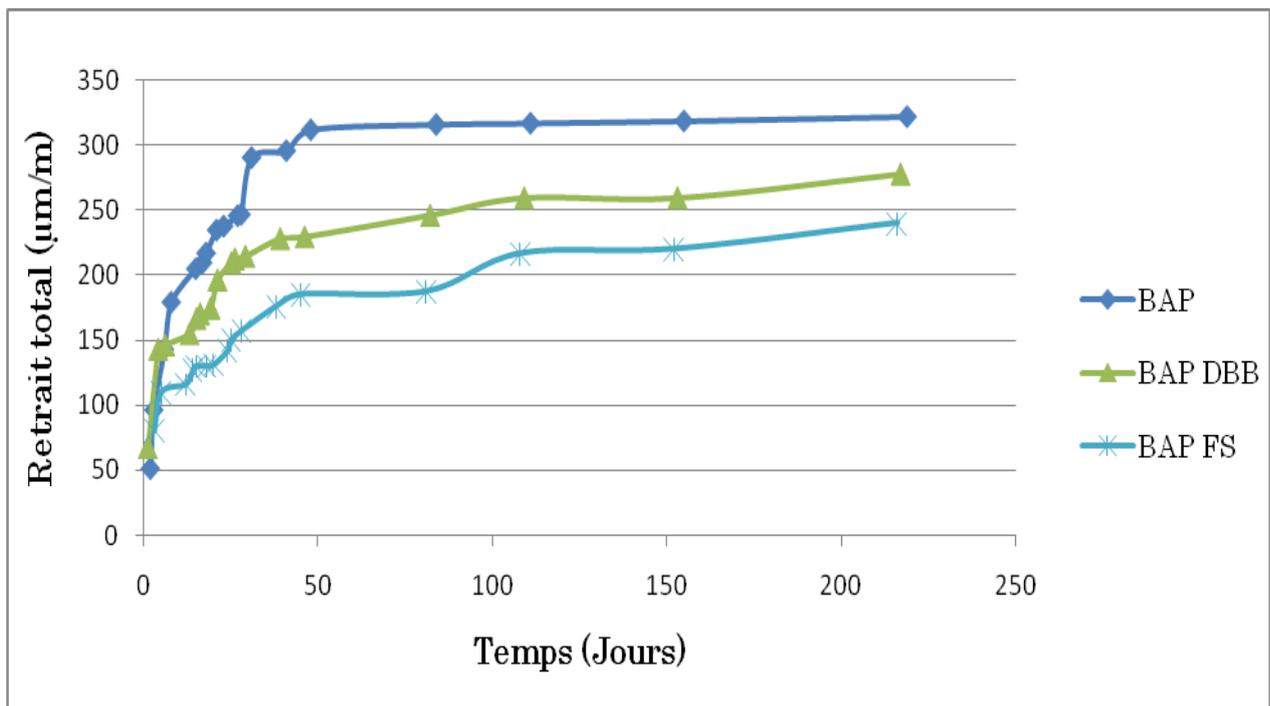


Figure 3.22 : Evolution du retrait total des trois types de BAP

Interprétation

Il est relativement complexe pour un essai tel que le retrait de déterminer la valeur réelle du retrait car l'éprouvette doit rester immobile et fixe durant toute la période d'essais pour pouvoir obtenir une valeur juste et fortement appréciable.

Ceci dit le retrait du BAP DBB est légèrement plus élevé que celui du BAP FS, on apprécie vraiment le déchet de brique comme ajout dans les bétons autoplçants vis-à-vis le retrait ; il avoisine presque la valeur obtenue avec celle du BAP FS, ceci dit cette nouvelle poudre est relativement satisfaisante cela est due en les caractéristiques chimiques de cette poudre qui rentre directement dans le processus d'hydratation d'une part, et par le durcissement rapide du BAP FS d'autre part.

Ceci est interprété par l'importance de la quantité d'eau qui s'évapore lors de l'hydratation de ciment.

Avant l'hydratation du ciment, il n'y a pas de CSH formés, lors de l'hydratation le taux CSH prend effet et se forme.

Les C-S-H qui sont un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée.

Il s'agit vraisemblablement du retrait endogène qui se manifeste le plus car il y a plus de CSH formés après la prise du ciment et donc une diminution du poids de la pâte liante et plus de contraction volumique.

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton.

Toute possibilité d'expansion ou de retrait peut conduire à des complications, extérieurement à cause d'interactions structurales avec d'autres éléments, ou intérieurement lorsque le béton est armé.

Tableau 3.39 : Conséquences du retrait

| Causes et constatation | Remèdes |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Le retrait avant prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. -Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse. | <p>Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure. |
| <p>Après la prise, se produit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur. | <p>Il faut éviter de sur-doser en ciment.</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> - Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage. | <p>Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).</p> |

Durant son mûrissement, le BAP doit faire l'objet d'une cure soignée.

En effet l'absence de ressuage qui constitue normalement un apport d'eau à la surface libre du béton rend cette dernière sensible à l'évaporation d'eau ; d'où une minutieuse attention à tous les facteurs qui peuvent apporter une nuisance au béton par un retrait majeur.

III.6 Notification économique et avantageuse

Il est véritablement difficile d'établir une étude économique comparative entre les différents types de bétons autoplaçants formulés avec les mêmes matériaux, car on doit prendre en compte non seulement la fourniture des produits utilisés dans la formulations de ces bétons, mais aussi les procédés et les conditions de la mise en place de ces produits ainsi que l'influence de ces conditions sur la santé et le rendement des travailleurs d'une part, et le coût de la main d'œuvre et l'énergie fournie d'autre part.

En réalité, le prix de revient d'un mètre cube de béton autoplaçant est excessivement moins coûteux que celui du béton ordinaire si on prend en considération le coût de la mise en place du béton et la qualité du produit à l'état durci. Parmi les avantages qui remplacent la différence des prix d'un 1 m³ de BAP par rapport à celui d'un béton ordinaire on cite les suivants :

- ✧ Élimination de la nuisance sonore due à la vibration du béton ;
- ✧ Élimination des frais dus à l'énergie fournie lors de la vibration du béton ;
- ✧ Augmentation de la cadence de travail due à la facilité de la mise en place du béton ;
- ✧ Obtention d'un béton de qualité avec un aspect final agréable.

En plus de ses avantages, le déchet de brique constitue une large positive contribution du point de vue économique, environnemental ainsi que pouzzolanique ; buts recherchés et heureusement atteints.

Reste à venir le plus riche et le plus important dans d'éventuelles recherches qui est bien : la caractérisation toujours des BAP avec un travail de **substitution**.

III.7 Recommandations

Grâce à ce programme de recherche, nous avons démontré qu'il était possible de fabriquer des bétons autoplaçants ayant de bonnes caractéristiques rhéologiques ainsi que mécaniques avec comme ajout la brique broyée et afin de compléter cette recherche, nous suggérons les recommandations pratiques suivantes qui permettront de basculer vers une recherche plus approfondie concernant certains aspects techniques des bétons autoplaçants :

1. Développement des bétons autoplaçants avec comme ajout le déchet de brique broyé et même avec d'autres ajouts minéraux.
2. Valorisation du déchet de brique et mise en vente de cet abondant déchet.
3. Utilisation d'un superplastifiant réducteur d'eau de haute qualité afin de diminuer le rapport E/L au dessous de 0.32.
4. Confectionner des bétons autoplaçants selon les exigences techniques pour maîtriser le coût du produit.
5. L'utilisation d'un adjuvant retardateur de prise pour retarder l'ouvrabilité des BAP dans le cas d'un transport du béton ou bétonnage en temps chaud.
6. Étudier l'effet de la nature de ciment sur la maniabilité et le temps de prise des bétons autoplaçants.
7. Développement des bétons autoplaçants à très hautes performances.
8. Etudier l'influence de la teneur en ajout minéral sur la maniabilité et la stabilité des bétons frais.

Le béton autoplaçant est une technique appelée à se développer sous réserve de prise en compte d'un certain nombre d'exigences :

- ✓ Une réorganisation des méthodes de chantiers (cadences, matériels).
- ✓ Une maîtrise des coûts globaux (matériaux, mise en œuvre, productivité, maintenance,...)
- ✓ Amélioration de la qualité des coffrages.
- ✓ Industrialisation des procédés de fabrication des bétons autoplaçants.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons relativement récents et leur application n'a pas encore été généralisée dans le monde de la construction, sauf dans certains pays développés comme la France, le Canada et le Japon qui sont considérés comme les innovateurs de ce nouveau matériau.

Les exigences auxquelles doit satisfaire un béton autoplaçant par rapport à un béton ordinaire sont sensiblement plus élevées pour ce qui concerne la qualité des composants du béton et du coffrage, la nature et la fréquence de contrôle du béton frais ainsi que la formation du personnel. Les différents facteurs sont:

- ✦ Lors du Design, il convient de veiller à avoir une teneur en liants suffisante, une composition équilibrée des granulats avec une teneur accrue en fines et à utiliser un superplastifiant approprié.
- ✦ Une substitution partielle du ciment par des cendres volantes ou des fumées de silice améliore le pouvoir de cohésion interne du mélange de béton frais, augmente sa résistance et sa durabilité.
- ✦ L'humidité de surface des granulats doit être déterminée régulièrement afin de pouvoir exclure toute influence négative sur le rapport E/C.
- ✦ On obtient un effet fluidifiant optimal du superplastifiant lorsque celui-ci n'est incorporé au mélange de béton qu'après y avoir ajouté la totalité de l'eau.

Conclusion générale

Les bétons auto-plaçants (BAP) constituent la dernière évolution en date des bétons utilisés pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil.

Leur très grande fluidité à l'état frais leur procure de multiples avantages en termes de facilité de mise en œuvre et d'impact socio-économique, avec une réduction significative de la pénibilité du travail des ouvriers en charge du bétonnage et une suppression du bruit généré par les habituels appareils de vibration utilisés pour compacter les bétons de fluidité ordinaire.

En termes de qualité de béton mise en œuvre (résistance, durabilité, esthétique), leur potentiel est également supérieur à celui des bétons classiques qui est fortement dépendant du savoir-faire du personnel d'exécution.

C'est d'ailleurs pour résoudre des problèmes de qualité de mise en œuvre que les BAP ont été développés au Japon, à la fin des années 1980.

Le fait d'introduire des ajouts issus de l'argile qui sont récupérés (presque gratuits), et donc plus bénéfique pour l'environnement (écologiques), nous a donné des bétons plus maniables et donc plus faciles à remplir les coffrages sans avoir recours à la vibration et donc moins d'énergie à consommer, moins de main d'œuvre et un gain de temps pour la réalisation plus considérable.

L'introduction du déchet de brique comme ajout dans les bétons autoplaçants est une voie de valorisation très intéressante en effet pour obtenir un produit plus réactif possible vis-à-vis la pouzzolanicité.

Le travail effectué ne constitue qu'une petite proportion de tous ce qui peut se faire comme essais au niveau du laboratoire de béton.

Il est toujours recommandé et conseillé d'entreprendre d'autres essais avec d'autres matériaux recyclés afin d'aboutir à d'autres résultats.

Leur rhéologie délicate demande une optimisation du dosage en superplastifiant ainsi qu'une mise en place rigoureuse.

Cependant, peu d'études ont été réalisées sur les matériaux utilisés.

L'objectif premier de notre travail était de formuler un béton avec un ajout minéral qui est le déchet de brique, en prenant particulièrement en compte les effets induits sur l'étalement et la résistance en compression.

Dans un premier temps, un intérêt tout particulier a été porté sur l'évolution des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons selon la nature de l'ajout minéral utilisé et son dosage.

Une autre perspective pourrait être l'étude de la **substitution** de ce déchet par rapport au poids du ciment.

La réalisation et la mise en place de ce matériau sont donc très compliquées car il faut ajouter des constituants et valider trois fois plus d'essais qu'une formule de béton dite « ordinaire » afin d'obtenir les caractéristiques exigeantes du cahier des charges.

Le choix du type de béton de l'étude s'est porté sur les BAP qui permettent une incorporation conséquente d'additions minérales.

En effet, cette nouvelle génération de matériaux se caractérise par un volume de pâte supérieur à celui d'un béton vibré de même classe de résistance.

Ce surplus de pâte s'explique par la substitution partielle des gravillons par des fines, afin d'assurer les propriétés spécifiques à l'état frais. Les BAP se distinguent ainsi des bétons vibrés par leur capacité à s'écouler sous leur propre poids, quelque soit le type de confinement, tout en restant homogènes pendant et après leur mise en place (absence de ségrégation dynamique et statique).

La variation de volume des matériaux peut être un des phénomènes les plus importants à considérer lors du design et de la construction cependant, la meilleure manière de les accommoder est d'avoir une connaissance plus grande des facteurs responsables de tels comportements.

Le développement d'un mélange de béton performant est, en soi, un sujet de recherche et développement complet, cependant, le BAP est un béton très professionnel qui n'est pas facile à formuler. Il nécessite un contrôle rigoureux et important à la production comme lors de la mise en œuvre.

Ça sera l'aboutissement de tout le travail réalisé pendant ma thèse de magister avec tous les points qui me paraissaient réellement les plus importants et les étapes nécessaires à respecter pour pouvoir réussir une bonne formule de béton autoplaçant.

Références bibliographiques

- [1] ADAM M. NEVILLE (Propriétés des Bétons) traduit par le CRIB centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Sherbrooke-Laval.
- [2] A.T-HAMOU, « *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons* » Université de SHERBROOKE, Québec, CANADA, Janvier 1995.
- [3] Abib Zinnedine, Caractérisation des bétons autoplaçants. Thèse de Magister USTHB, Alger.
- [4] AWAD, K., AL YAFI, A. R. (1995) “*Self compacting and self levelling properties of high performance concrete with triple blended bindre in UAE*” Supplementary Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas.
- [5] African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp. 92 – 100. ACTIVITE POUZZOLANIQUE DES DECHETS DE BRIQUES ET TUILES CUITES, Chinje melo, U. et Billong, N.
- [6] CEBTP, « *Bétons autoplaçants*, rapport 98 004/98 006 » 1995, EYROLLES.
- [7] Dossier technique « Les bétons autoplaçants », Christophe CHUCHE, MBT France.
- [8] Dossier technique de *la société GRANITEX-NP*, BP 85, 16270 Oued Smar Alger.
- [9] Fiche technique du *ciment CPJ 42,5R*
- [10] Fiche technique de la fumée de silice établie par SIKA.
- [11] George Dreux, Jean FESTA, « *NOUVEAU GUIDE DU BETON* » 8^{ème} Édition ; Revue.
- [12] GILLES Escadrilles, Responsable pédagogique, CARMEUSE France, « *Formation continue actualisante* » – 17 et 18 Octobre 2001 ; Publication.
- [13] H.H. STEINOUR, The reactions and thermochemistry of cement hydratation at ordinary temperature, Proc. 3rd Int. Symp. on the Chemisrty of Cement, pp. 261-89 (London, 1952).
- [14] HAYAKAWA , M., MATSUOKA,Y., YOKOTA, K. (1995).” *Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan*” ACI SP 154, Las Vegas.

- [15] IZUMI, I., YONEZAWA, T., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) “*Placing 10 000 m³ super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary*” Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, d’après;
- [16] Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER Les Bétons, Bases et données pour leur formulation, Association technique de l’industrie des liants hydrauliques, édition Eyrolles.
- [17] K.H.KHAYAT, « *Colloques sur les bétons autonivelants* » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1^{er} Novembre 1996 ;
- [18] KHAYAT, K. H. , GUIZANI, Z. (1994) “*Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete*” soumis à l’ACI Materials Journal.
- [19] Kamel H. KHAYAT, « *Technologie avancée du béton* » GCI711 Université de Sherbrooke, octobre 1995.
- [20] MANAI, K (1995), « *Étude de l’effet d’ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants* » Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke ;
- [21] Michel Cliche, ing, CIMENTS CANADA LAFARGE, LES CIMENTS PORTLAND, Revue hebdomadaire.
- [22] OKAMURA. H. , OZAWA , K. (1994), “*Self compactable high performance concrete in Japan*” ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand,
- [23] OZAWA, K, MAEKAWA, K., OKAMURA, H. (1992, “*Development of high performance concrete*” *Journal of the Faculty of Engineering*, Vol XLI, N°3, University of Tokyo, Japan.
- [24] OKAMURA, H. , OZAWA, K. (1994) “*Self compactable high performance concrete in Japan*” ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand.
- [25] P. Claude AITCIN, « *Liant hydraulique*, GCI 710 » Université de SHERBROOKE Canada ; Revue universitaire.
- [26] Projet national de recherche CERIB, « *béton autoplaçant BAP* », France, Octobre 2001 ;
- [27] Pierre Claude AITCIN, « *La compatibilité ciment/superplastifiant* » ATILH., Paris, Publication du 8 Mars 1996 ;

- [28] Philippe Turcry. (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants Influence de la formulation. Thèse doctorale, université de Nantes.
- [29] R.H BOGUE and W. LERCH, Hydratation of portland cement compounds, Industrial and Engineering Chemistry, **26**, No. 8, pp. 837-47 (Easton, Pa., 1934).
- [30] R. DUPAIN, R. LANCHON, J.C.Saint, ARROMAN, « Granulats, sols, ciments bétons, *Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire* » Édition CASTEILLA, PARIS, Mai 1995.
- [31] YURUGI, M., SAKATA, M., IWAI, M., SAKAI, G. (1989) “*Mix proportion for highly workable concrete*”;
- [32] Belaid Kamel, Analyse chimique de la brique, tirée de son Projet de Fin d’Etude.