

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie des Matériaux

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**
Filière: Génie des Matériaux
Option: MCD, MCQ 14

Thème

**Etude des propriétés physico-mécaniques et thermiques
des bétons autoplaçants (BAP) à base de fillers de
déchets de briques réfractaires (HTA)**

Présenté par :

✓ **Laichaoui Billal**
✓ **Boucetta Rafik Amazigh**

Promoteur : M^r Saidi

Année Universitaire: 2015/2016

Remerciements

Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur M^r SAIDI qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique et pratique de notre projet de fin d'étude.

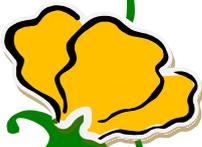
Nous tenons à remercier sincèrement M^r le directeur de laboratoire national d'habitat et de construction pour nous avoir acceptés d'effectuer le stage pratique au sein de ce laboratoire, qui n'a épargné aucun effort pour que notre stage se déroule dans de meilleures conditions, et la confiance qu'il nous a témoigné. Et bien sûr sans oublier toute l'équipe de laboratoire Béton pour leurs aides.

Il nous est particulièrement agréable de témoigner notre reconnaissance au chef de département laboratoire béton, ainsi qu'au chef de service du même laboratoire, pour leurs aides et leurs conseils instructifs et précieux

Nous tenons à exprimer notre vives reconnaissances aux ingénieurs du département béton ainsi tous les techniciens.

Nous profitons l'occasion à remercier aussi tous nos enseignants dès la première année primaire jusqu'à la cinquième année universitaire.

Enfin, que toutes celles et tous ceux de près ou de loin qui nous ont généreusement offert leurs aides à l'élaboration de ce travail.



Dédicace

*Nous dédions ce travail en
premier lieu à nos chères
familles (BOUCETTA et
LAICHAOUI, et à tout (es)
nos ami(e)s sans exception.*

*BOUCETTA RAFIK AMAZIGH
ET
LAICHAOUI BILLEL*

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I généralité sur les bétons

I.1.Introduction.....	4
I.2.Définition du béton	
I.3.constituants de béton.....	4
I.3.1 Le ciment.....	4
I.3.2 Les granulats	11
I.3.3 Les adjuvants.....	16
I.3.4 L'Eau.....	19
I.4 Formulation de béton.....	20

Chapitre II bétons autoplaçants

II. 1. Introduction.....	23
II.2.Définition.....	23
II.3 Domaine d'utilisation des BAP.....	24
II.4 Concept du béton autoplaçant.....	24
II.5 Les avantages des béton autoplaçant	25
II.6 Types des bétons autoplaçant	26
II. 7 Constituants d'un BAP	27
II.7.1 Le ciment	27
II.7.2 Les granulats	27
II.7.3 L'eau de gâchage	27
II.7.4 Les ajouts	27
II.7.5 Les adjuvants	28
II.8 Caractérisation du béton à l'état frais	31
II.8.1Essai d'étalement.....	31
II.8.2 Essai de boîte en L	31
II.8.3 Essai de stabilité au tamis	32
II.8.4 Essai d'étalement modifié	32
II.8.5 Essai d'entonnoir	33
II.9 Caractérisation des BAP à l'état durci	34
II.9.1 Résistance des BAP	34
II.9.2 Retrait (état frais, état durci)	34

Sommaire

II.10 Les techniques de formulation des BAP.....	35
II.10.1 Méthode Japonaise.....	36
II.10.2 Méthode Suédoise.....	37
II.10.3 Méthode Française.....	37
II.10.4 Autres méthodes.....	38
II. 11. Propriétés principales du béton frais.....	38
II.11.1 Capacité de remplissage.....	38
II.11.2 Résistance à la ségrégation.....	38
II.11.3 Le ressuage.....	39
II.12. Fabrication, transport et mise en place des BAP.....	40

Chapitre III béton réfractaire

III.1 Introduction.....	42
III.2 Les bétons réfractaires.....	42
III.2.1 Généralités.....	42
III.2.2 Définition de Béton réfractaire.....	43
III.2.3 Calcification du béton réfractaire.....	44
III.3 Les briques réfractaires.....	44
III.3.1 Applications.....	44
III.3.2 Déchet de brique réfractaire.....	45
III.3.3 Le principe de fabrication des briques réfractaires.....	45
III.3.4 Réfractaires silico-alumineux.....	45
III.3.5 Brique réfractaire à base de bauxite.....	46
III.3.5 Réfractaires de magnésie.....	49
III.4 Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à HT.....	49
III.4.1 Effet de la température sur la pâte de ciment.....	50
III.4.2 Effet de la température sur les granulats.....	50
III.4.3 Dégradation de l'interface pâte granulats à haute température.....	51
III.4.5 Phénomène d'éclatement de béton.....	51
III.5 Caractérisation thermomécanique des bétons réfractaires.....	52
III.5.1 Evolution microstructurale de béton réfractaire.....	53
III.5.2 Propriétés thermomécaniques de béton réfractaire.....	54
III.5.3 Comportement mécanique de béton réfractaire.....	54

Sommaire

Chapitre IV étude expérimentale

IV Introduction	57
IV.1 Caractéristiques des constituants	58
IV.1.1Ciment	58
IV.1.2 Eau de gâchage	59
IV.1.3 Granulats	60
IV.1.4 L'ajout	65
IV.1.5 Les adjuvants	67
IV.1.6 Etude rhéologique.....	68
IV.2 Formulation de la composition des bétons	76
IV.2.1Calcul de la composition du BAP selon la méthode Japonaise.....	76
IV.2.2 Formulation de BAP à base de déchet de brique réfractaire et de Sika Tempo 544	76
IV.2.3 Optimisation de la composition du BAP	76
IV.2.4 Détermination de volumes des granulats.....	77
IV.3 Caractéristiques des bétons	81
IV.3.1 A l'état frais.....	81
IV.3.2 Conservation des éprouvettes	85
IV.3.3 Essai à l'état durci	86
IV.4 traitement thermique des différentes BAP	88
IV.4.1 Méthodologie de travail.....	88
IV.4.3 Analyse par diffractométrie des rayons X.....	90
Conclusion générale	94
Annexes	97

Liste des tableaux

<i>Liste des tableaux</i>	<i>pages</i>
Tableau I.1 : Limite des classes et sous classes de résistances.	10
Tableau I.2 : la classification du ciment portland selon la composition	11
Tableau I.3 : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement,	18
Tableau I.4 : Adjuvants normalisés modifiant certaines propriétés particulières	19
Tableau III.1 Compositions de la bauxite calcinée	47
Tableau III.2 : la composition chimique des briques HTA	47
Tableau III.4 : les Propriétés physiques des briques HTA.	48
Tableau III.5 modifications physico-chimiques dans le béton à haute température.	49
Tableau IV.1 : Composition minéralogique des ciments	58
Tableau IV.2 : Composition chimique de ciment	59
Tableau IV.4 : Caractéristique de sable (0/4).	59
Tableau IV.3 : Essais physiques du ciment	60
Tableau IV.5 : Analyse granulométrique du sable (0/4)	60
Tableau IV.6 : Caractéristiques du sable (0/1)	61
Tableau IV.7 : Analyse granulométrique du sable (0/1)	61
Tableau IV.8 : Caractéristique du gravier (3/8)	62
Tableau IV.9 : Analyse granulométrique du gravier (3/8)	62
Tableau IV.10 : Caractéristique du gravier (8/15)	63
Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du gravier (8/15)	63
Tableau IV.12 : Coefficient d'aplatissement (8/15)	64
Tableau IV.13 : analyse chimique de DBR avant son utilisation dans le four	66
Tableau IV.14 : caractéristiques physiques de DBR avant l'utilisation dans le four	66
Tableau IV.15 : les caractéristiques physiques de déchet de brique réfractaire.	67
Tableau IV.16 : Composition des pâtes de ciment.	69
Tableau IV.17 : 1 ^{ere} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 10% de DBR	79
Tableau IV.18 : 2 ^{eme} composition du BAP à base de Tempo 544 (béton témoin)	79
Tableau IV.19 : 3 ^{eme} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 20% de DBR	80
Tableau IV.20 : 4 ^{eme} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 30% DBR	80

Liste des tableaux

Tableau IV.21 : 5 ^{eme} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 40% de DBR	80
Tableau IV.22 : Essais sur béton témoin à base de TEMPO 544	81
Tableau IV. 23 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 10% de DBR	82
Tableau IV.24 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 20% de DBR	82
Tableau IV.25 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 30% de brique	82
Tableau IV.26 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 40% de brique	82
Tableau IV.27 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai d'étalement	83
Tableau IV.28 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai de boîte en L	84
Tableau IV.29 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai de stabilité au tamis	84
Tableau IV.30 : Résistances mécaniques du Béton témoin à base de Tempo 544	86
Tableau IV.31 : Résistances mécaniques du BAP1	86
Tableau IV.32 : Résistances mécaniques du BAP2	86
Tableau IV.33 : Résistances mécaniques du BAP 3	87
Tableau IV 34 : Résistances mécaniques du BAP 4	87

Liste des figures

<i>Liste des figures</i>	<i>Pages</i>
Figure I.1 : fabrication du ciment	8
Figure I.2 : granulats roulés	13
Figure I.3 : granulats concassés	13
Figure I.4 : Essai d'équivalent de sable.	14
Figure I.5 : le module de finesse des sables	15
Figure II.1 : structure d'un réservoir au béton autoplacant.	24
Figure II.2 : composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP et a l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP. 25	25
Figure II.3 : types des BAP (Dosage en adjuvant en fonction du dosage en liant) 26	26
Figure II.4 : granulats rouler 27	27
Figure II.5 : granulats concassées 27	27
Figure II.6 : Ajouts cimentaires. de gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné.	28
Figure II.7 : les effets des superplastifiants sur la pâte de ciment.	30
Figure II.8 : essai d'étalement au con d'abrams.	31
Figure II.9 : Essai de la boîte en L.	32
Figure II.10 : Essai de la stabilité au tamis.	32
Figure II.11 : Essai d'étalement modifié.	34
Figure II.12 : l'essai d'entonnoir.	34
Figure II.13 : Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton.	39
Figure III.1 : Schéma de la fabrication des Briques.	45
Figure III.2 : Microstructure d'un réfractaire à haute teneur en alumine à la loupe binoculaire.	48
Figure III.3 : les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).	51
Figure III.4 : les modes de conversion de l'aluminate de calcium en fonction de la température.	53

Liste des figures

Figure IV.1 : Courbes granulométriques des différents granulats	65
Figure IV.1 : La brique KRONEX 85	65
Figure IV.3 : viscosimètre VT 550	69
Figure IV.4 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544)	70
Figure IV.5 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544)	70
Figure IV.6 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 10% DBR)	71
Figure IV.7 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 10% DBR)	71
Figure IV.8 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 20% DBR)	72
Figure IV.9 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 20% DBR)	72
Figure IV.10 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 30% DBR)	73
Figure IV.11: Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 30% DBR)	73
Figure IV.12 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 40% DBR)	74
Figure IV.13 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 40% DBR)	74
Figure IV.14 : Essai d'étalement	81
Figure IV.15 : Essai de boîte en L	81
Figure IV. 16 : Essai de stabilité au tamis	83
Figure IV.17 : Etalement (cône d'abrams)	83
Figure IV.18 : Ecoulement (boîte en L).	85
Figure IV.19 : Conservation des éprouvettes dans le bassin.	86
Figure IV.20 : Essai de la résistance à la compression	86
Figure IV.21 : Résistance à la compression des BAP à base de déchet de brique réfractaire	87

Liste des figures

Figure III.22 : Résistance à la traction par fendage des BAP à base de déchet de brique réfractaire.	87
Figure IV.23 : Four de laboratoire 1200°C	89
Figure IV.24 : Le cycle thermique subi par les éprouvettes	89
Figure IV.25 : Echantillon béton témoin ayant subi un traitement thermique à 500°C (éclatement)	90
Figure IV.26 : Echantillon BAP4 (40%DBR) ayant subi un traitement thermique à 1000°C.	91
Figure VI.27 : Spectre de diffraction d'un échantillon BAP4 sans avoir subi le traitement thermique à 1000°C.	91
Figure VI.28 : Spectre de diffraction d'un échantillon BAP4 ayant subi le traitement thermique à 1000°C.	92

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de la formulation et de la recherche des propriétés mécaniques et thermiques des bétons autoplaçants (BAP) confectionnés à base de déchet de brique réfractaire de l'industrie de ciment. Ce déchet est de haute teneur en alumine, finement broyé et incorporé comme filler.

Des essais mécaniques en compression et en traction par fendage ont été effectués afin de comparer les résultats par rapport au béton témoin.

Pour examiner les performances de notre béton à haute température nous avons introduit deux échantillon, un de béton témoin et l'autre de béton autoplaçant (BAP4) dans un four de laboratoire, et en les soumis à un cycle de chauffage allant jusqu'à 1000°C et en le comparent entre eux. Des analyses de diffraction de rayon x, sont alors faites pour l'échantillon (BAB4) avant et après chauffage afin d'identifier les nouvelles phases cristallines formées.

La valorisation et l'utilisation des déchets de briques réfractaires comme ajouts dans le béton autoplaçant peuvent contribuer à améliorer leurs caractéristiques notamment à des températures élevées, (une résistance mécanique à 72.61 MPA, et une résistance thermique qui dépasse les 1000°C à un dosage de 40% de brique réfractaire de la masse du ciment).

Mots-clés : béton autoplaçant – formulation - essais mécaniques - résistance thermique - brique réfractaire.

Abstract

The Works presented in this thesis focuses on the formulation and research of mechanical and thermal properties of self-compacting concrete (SCC) made from cement industry waste. The waste is considered: the refractory brick of high alumina waste and finely ground.

Mechanical testing in compression and in tension by splitting has been performed and that in the compare to control concrete specimens.

To examine the performance of our concrete at high temperatures we have introduced two sample a concrete witness and the other of self-compacting concrete (BAP4) in a laboratory oven, and the subjected to a heating cycle up to 1000 ° C and in the compare between them. X - ray diffraction analyse **XRD** are then made to the sample (SCC4) before and after heating, to identify new formed crystal phases.

The valuation and use refractory brick waste as additions to the self-compacting concrete can contribute to improve their characteristics, particularly at elevated temperatures, (Mechanical strength to 72.61 MPa and a thermal resistance which exceeds 1000 ° C at a dosage of 40% of refractory brick of the mass of cement).

Keywords : self compacting concrete - formulation - mechanical tests - thermal resistance - refractory brick

Introduction Générale

Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Ce dernier doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. Dans ce but, plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années : les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons fibrés à ultra haute performance (BFUHP), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants (BAP).

Cependant, la tendance actuelle des industriels du béton penche de plus en plus vers l'utilisation des bétons autoplaçants. Ces bétons ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre. Ce sont des bétons très spéciaux, ils sont très fluides, très déformables, homogènes et stables. Ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes. Ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter des qualités comparables à celles des bétons vibrés classiques ou supérieures.

Des nombreuses études actuelles ont pour objectif de trouver la bonne formulation des BAP, obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dont l'excès peut entraîner la ségrégation. Cette dernière peut être évitée par l'ajout d'un agent de viscosité et l'introduction d'un volume de fines nettement supérieur à celui d'un béton ordinaire.

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés particulières sont évaluées par différents tests d'étalement, de stabilité et de ressuage.

La formulation des bétons autoplaçants se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante de volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants), de manière à améliorer la fluidité du béton en évitant l'effet de voûte entre les gros granulats. Les adjuvants peuvent être des superplastifiants hauts réducteurs d'eau et des agents colloïdaux. Les superplastifiants augmentent la maniabilité du béton, leur dosage est limité pour éviter les risques de ségrégation et de ressuage.

Notre étude a pour but d'améliorer les propriétés thermo mécaniques par l'incorporation de déchets de brique réfractaire finement broyé dans la formulation des BAP.

Le travail présenté dans ce mémoire a deux objectifs principaux :

- Amélioration des propriétés physicomécaniques des bétons autoplaçants élaborés à base des fines de déchet de brique réfractaires.
- Caractérisation thermomécaniques et analyse microstructurale des différents BAP.

Pour cela, notre travail réalisé au cours de la préparation de ce mémoire est présenté en deux grandes parties :

. **La première partie** de ce travail est consacrée à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et des définitions sur les bétons ordinaires, sur les bétons autoplaçants et les bétons réfractaires.

. **La seconde partie** consacrée à l'étude pratique, elle comporte :

- Les caractéristiques des différents matériaux utilisés.
- formulation de béton autoplaçant.
- propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci.
- l'étude de l'effet de la température sur les propriétés mécaniques et chimiques des différents BAP.

. **Enfin**, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats obtenus dans cette étude.

I.1.Introduction

Aujourd'hui, le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé, Environ quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toutes natures, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière off shore.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

I.2.Définition du béton

Le béton est un matériau hétérogène constitué par un mélange des matériaux inertes appelés « granulats » (sables, graviers etc....), de ciment et d'eau. Ils sont très utilisés dans la construction. Les granulats et sables ont des comportements généralement stables dans le temps, par conséquent c'est la pâte de ciment qui va dépendre le comportement d'un béton [1].

I.3.constituants de béton

I.3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau [2].

Le ciment c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.

I.3.1.1 Constituants de ciment

Les ciments courant ont pour constituant principal le clinker, Le clinker est finement broyé pour donner un ciment. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, gros cylindres chargés de boulets d'acier et mis en rotation. Lors de cette étape, le gypse (3 à 5%),

indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment [3].

Au clinker Portland peuvent être ajoutés un ou plusieurs des ingrédients suivants : (du, calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle, des fumés de silice...), dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.

➤ **Le clinker portland**

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituant principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présente sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- 1- Silicate tricalcique : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou (C3S).
- 2- Silicate bi calcique : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou (C2S).
- 3- Aluminate tricalcique : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou (C3A).
- 4- Alumino-ferrite tétra calcique : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou (C4AF) [4].

➤ **Laitier de haut-fourneau**

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique dont la composition chimique est de : l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de la silice entre 25 et 35%, de l'alumine entre 12 et 30% ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux de clinker.

➤ **Pouzzolane naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origines volcaniques, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer.

➤ Cendres volantes

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques, elles peuvent être :

- Siliceuse, constituées de silice réactive (40 à 50%) et d'alumine (20 à 30%).
- Ou calcique, avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5%.

➤ Calcaire

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.

I.3.1.2 Fabrication des ciments [5].

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %. Les différentes étapes de la fabrication sont décrites ci-après.

▪ **Extraction et concassage**

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs situés généralement sur les lieux mêmes de l'extraction, en éléments d'une dimension maximale de 150 mm.

▪ **Préparation de la matière première**

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin (proche du rapport 80 % de calcaire et 20 % d'argile), le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

➤ La voie sèche

La matière première est préparée sous forme de poudre. Le pré homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité.

À la sortie du hall de pré homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeur sècheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation.

➤ **La voie humide**

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide. La pâte obtenue est filtrée au travers des tamis, la partie la plus grossière retourne dans le broyeur et la partie fine stockée dans un bassin.

La pâte qui contient de l'ordre de 30 à 35% d'eau, est ensuite pompée depuis le bassin et injectée dans un four très long (qui peut atteindre 220 m). Dans ce four, la pâte va avancer à contre courant des gaz provenant de la combustion de charbon, et aujourd'hui des déchets provenant d'autres industries.

Au fur et à mesure de son avancement dans le four, la pâte va se transformer en clinker, qui va être trempé dans le refroidisseur, avant d'être stocké en silo [6].

▪ **Cuisson du cru**

Quelle que soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

➤ **Un échangeur de chaleur**

Comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds circulant à contre courant, en sortant de ce four, et se décarbonate en partie. Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (pré calcination). La poudre est ainsi portée à une température comprise entre 800 °C et 1000 °C.

➤ **Un four horizontal rotatif cylindrique en acier**

(Avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium.

▪ **Broyage du clinker**

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Les autres types de ciment sont obtenus en

ajoutant d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice ou encore des fillers.

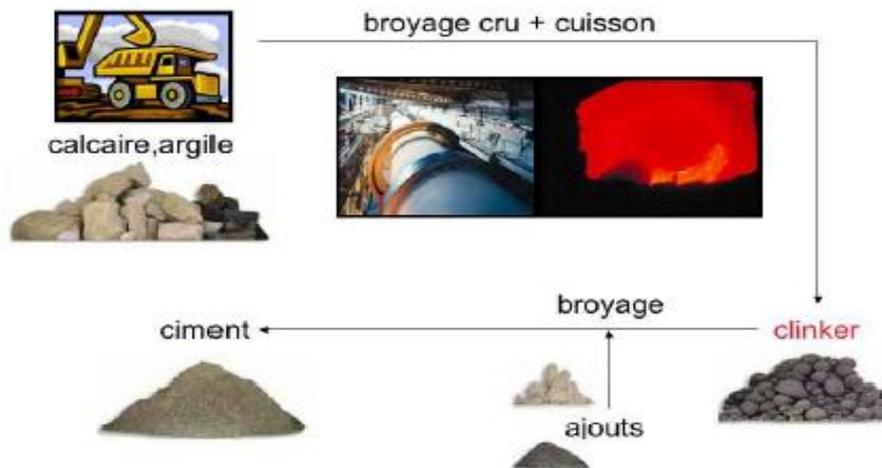


Figure I.1 : fabrication du ciment

I.3.1.3 Prise et durcissement du ciment

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Le ciment Portland contient quatre constituants principaux C3S, C2S, C3A et C4AF.

Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise ». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures. Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives :

- **Phase dormante**

La pâte de ciment (ciment + eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à plusieurs heures suivant la nature du ciment et la température). En fait, dès le malaxage, les premières réactions se produisent, mais elles sont ralenties par la présence du gypse.

- **Début et fin de prise**

Après une à deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité : c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de

chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

▪ **Durcissement**

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

I.3.1.4 Principales caractéristiques

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte

I.3.1.4.1 Caractéristiques de la poudre

- **La surface spécifique** : (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .
- **La masse volumique apparente** représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.
- **La masse volumique absolue** représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

I.3.1.4.2 Caractéristiques mesurées sur pâte

- **Le début de prise** est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300 g – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme NF EN 196-3. Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.
- **L'expansion** se mesure suivant un essai normalisé (norme NF EN 196-3) et grâce aux aiguilles de Le Chatelier. Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas être supérieure à 10 mm sur pâte pure pour tous les ciments (conformément à la norme NF EN 197-1).

- Les résistances mécaniques mesurées sur éprouvettes de mortier normal, caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la limite inférieure de résistance en compression à 28 jours.

I.3.1.5 Les principales catégories de ciment

I.3.1.5.1 Classification des ciments en fonction de leur résistance

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression, exprimées en MPA à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Classe de ciment	Résistance à la compression [MPa]		
	Au jeune âge	28 jours	
	2 jours	Min	Max
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	/

Tableau I.1 : Limite des classes et sous classes de résistances.

Les classes « R » rapides, présentent au jeune âge des caractéristiques plus élevées et trouve leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication.

I.3.1.5.2 Classification des ciments en fonction de leur composition

Selon la nature des ajouts, autre que le gypse, lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciment.

Désignation	Type de ciment	Teneur en clinker	Teneur (%) de l'un des constituants suivants : laitier-pouzzolane- cendre - calcaires – schistes - fumée de silice	Matière secondaire
CPA – CEMI	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ - CEMII/A	Ciment Portland composé	80 à 94 %	✓ 6 à 20 % de l'un quelconque de constituant	0 à 5 %
CPJ - CEMII/B		65 à 79 %	✓ 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
CHF-CEMIII/A	Ciment haute fourneaux	35 à 65 %	✓ 36 à 65 % de laitier de haut fourneau	0 à 5%
CHF-CEMIII/B		20 à 34 %	✓ 66 à 80 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CHF-CEMIII/C		5 à 19 %	✓ 81 à 95 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEMIV/A	Ciment de haut fourneau	65 à 90 %	✓ 10 à 35 % de pouzzolane, cendre siliceuse ou fumée de silice. Ces derniers étant limités à 10 %	0 à 5 %
CPZ- CEMIV/B		45 à 64 %	✓ 36 à 55 % comme ci-dessus	
CLC- CEMV/A	Ciment au laitier et à la cendre	40 à 64 %	✓ 17 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30 % de cendre siliceuse ou pouzzolane	0 à 5%
CLC- CEMV/B		20 à 39 %	✓ 31 à 50 % comme ci-dessus	

Tableau I.2 : Classification du ciment portland selon la composition [4].

I.3.2 Les granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : fillers, sablons, sables, graviers, gravillons, ballast, enrochements.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés), ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont : **les fillers, les sables, les gravillons, les graviers [5].**

I.3.2.1 Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

I.3.2.2 Caractéristique des granulats

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats. Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

I.3.2.2.1 Caractéristique physique

- **Masse volumique** On appelle **masse volumique** d'un matériau: la masse de l'unité de volume.

➤ **Masse volumique apparente**

La masse volumique apparent ρ est la masse par unité de volume du matériau (gravier – sable) en tenant compte des vides présents dans ou entre les grains. Unité : t/m^3 , kg/dm^3 , g/cm^3 .

➤ **Masse volumique absolue**

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

I.3.2.2 Caractéristiques dimensionnelles

Les granulats sont caractérisés par les dimensions et la forme de leurs grains.

▪ Dimension

La granularité est la distribution par dimension des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est la méthode d'essai pour déterminer la granularité. Cette opération consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à maille carrée (0.16 – 0.31 – 0.63 – 2.5 – 5 – 8 -10 – 20 – 40 ...) et peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la courbe granulométrique.

▪ Forme

La forme des granulats a une incidence directe sur la maniabilité de béton. La forme la plus souhaitable est celle proche de sphère, alors que la forme plate est mauvaise, elle demande une quantité d'eau élevée et donc des défauts.

Voici deux types de granulats (Roulés et concassés) selon la forme :



Figure I.2 : granulats roulés



Figure I.3 : granulats concassés

La forme des granulats est définie par l'épaisseur **E** et la grosseur **G** (l'ouverture des mailles) et la longueur **L**.

La mesure du coefficient d'aplatissement (**CA**) caractérise la forme des granulats. Le **CA** s'obtient en faisant une double analyse granulométrique par voie sèche, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées
- une série de tamis (grille) à fentes parallèles de largeurs normalisées.

$$CA = \frac{\text{(Somme des passants aux grilles à fentes parallèles)}}{\text{(Somme des refus aux tamis correspondants à mailles carrées)}} \times 100$$

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles.

I.3.2.2.3 Propriétés des granulats fins (sable) :

- **Propreté du sable** (*teneur en fines argileuses*) :

La propreté du sable est déterminée par l'essai d'équivalent de sable (ES), cet essai est en général utilisé pour les sables destinés au béton.

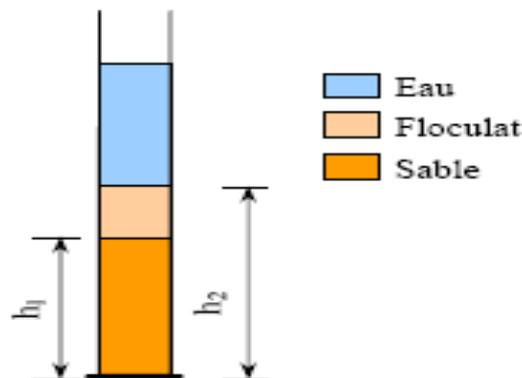


Figure I.4 : Essai d'équivalent de sable.

Le but de cet essai est de mettre en suspension les fines (*particules <0.063 mm soit 63 μm*) puis de les laisser se déposer au fond d'un tube transparent. La proportion de fines par rapport au reste de l'échantillon est alors mesurée puis calculée par la formule

$$E_s = (H_1 / H_2) \times 100$$

Où

H1: hauteur du sable propre.

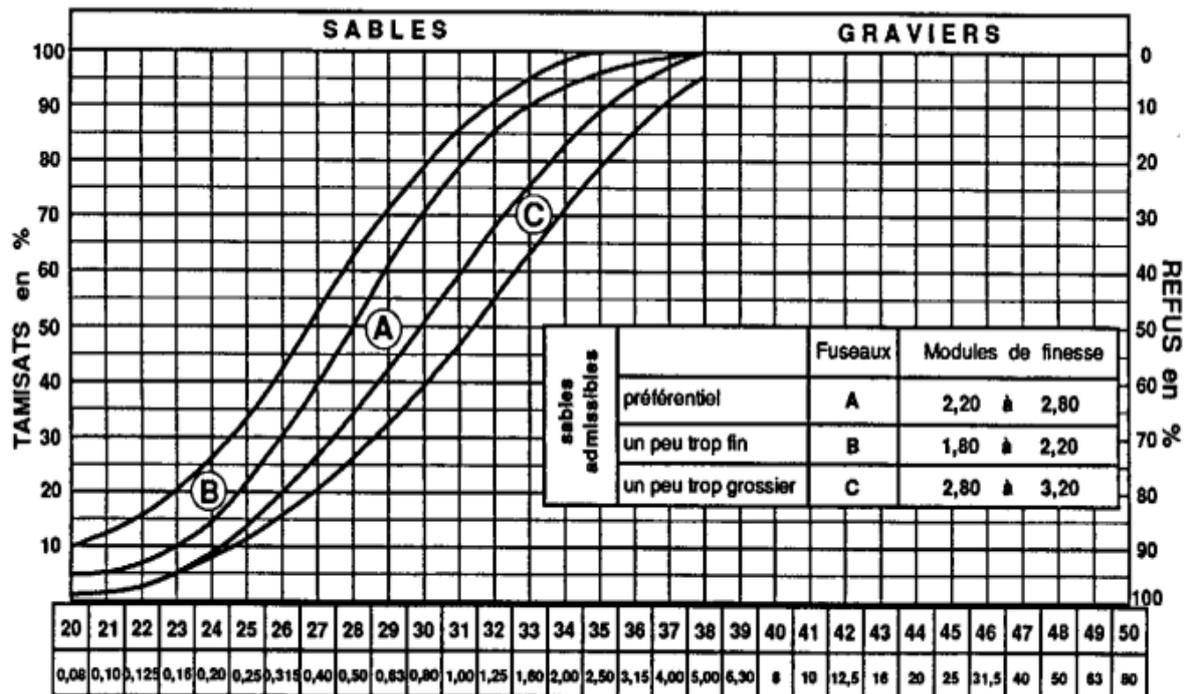
H2: hauteur totale du sable [5].

- **Module de finesse**

C'est la somme de pourcentages des refus cumulés pour les tamis de modules: 23, 26, 29, 32, 35, 38.

$$M_f = \sum R_e \% / 100$$

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 [7].



Fuseau des sables admissibles

Figure I.5 : le module de finesse des sables [7].

- A= préférentiel, Module de finesse de 2,20 à 2,80 (La mise en œuvre facile et la résistance élevée) ;
- B= trop fin, Module de finesse de 1,80 à 2,20 (augmentation de dosage en eau alors la mise en œuvre facile mais la résistance du béton chute) ;
- C= trop grossier, Module de finesse de 2,80 à 3,20 (manque ouvrabilité donc la mise en œuvre est difficile, une bonne résistance mécanique et risque de ségrégation limité)

I.3.2.2.4 Caractéristiques mécaniques

Essais d'identification pour déterminer les paramètres de comportement mécanique (résistance à la fragmentation, résistance à l'usure et friabilité) :

▪ Los Anglos

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevée [5].

- **Micro Deval**

- **Résistance à l'usure des gravillons**

La résistance à l'usure des granulats est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient MDe est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons est élevée [4].

- **Essai de friabilité**

Essai de friabilité est le seul essai mécanique s'appliquant aux sables. C'est un essai micro Deval sur 500 g de sable, la charge de billes étant différente de celle utilisée pour l'essai sur gravillons. Après 15 minutes de rotation de la Jarre, on récupère le passant au tamis de 50 μ m P.

FS : est d'autant plus élevé que le sable est plus friable [8].

I.3.3 Les adjuvants

I.3.3.1 définition

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement : les solubilités, les vitesses de dissolution, l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique.

D'après la norme NF P18 103, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieur à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de leurs propriétés à l'état frais ou durci.

Les adjuvants se présentent le plus souvent sous forme liquide, cependant quelques-uns sont livrés en poudre et exceptionnellement en pâte ou liquide très visqueux. [9].

I.3.3.2 Classification des adjuvants

- **Les fluidifiants (réducteur d'eau)**

Ces produits jouent un double rôle, ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C constant (fixé pour une résistance souhaitées). Ils

permettent aussi, dans certain cas de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton.

Dans la première cas , l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des béton de même classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme ,béton plastique , béton très plastique , jusqu'à au béton auto plaçant .

▪ **Les retardateurs de prise**

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton et les mortiers.

En général, les retardateurs freinent la diffusion de la chaux libérée par l'hydratation du ciment et retardent de ce fait la cristallisation. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures. Les résistances mécaniques sont en général augmentées par rapport au témoin. Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage [4].

▪ **Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement**

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, les mortiers ou les coulis. L'accélérateur du durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons, des mortiers ou des coulis. Bien souvent ces deux fonctions sont liées et l'on retrouve l'une d'elle comme effet secondaire de l'autre.

Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau... etc. [5].

	Accélérateur de prise	Accélérateur de durcissement	Retardateur de Prise
dosage	1 à 3%	0.2 à 3%	0.1 à 0.5%
introduction	Dans l'eau de gâchage		
Effets sur les résistances initiales (après 28 jours)	Accélération très variable suivant : le dosage, le ciment et la température		Retrait très variable suivant le dosage, ciment et température
Effet sur les résistances initiales (avant 3 jours)	Augmentées à 1 ou 2 jours	Augmentées	Diminuées à 1 ou 2 jours
Effet sur les résistances finales (après 28 jours)	Légèrement diminuées	Inchangées ou légèrement diminuées	Légèrement diminuées
Effet sur secondaire favorables	/	/	Amélioration de la maniabilité avec possibilité de réduction d'eau
Autres effets	Possibilité d'une légère augmentation du retrait		

Tableau I.3 : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement [5].

▪ Les entraîneurs d'air

Ils ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, le mortier ou le coulis, de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse. Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanol amine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

Il permet de permettre d'entraîner, à l'intérieure du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci, ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action de gel et dégel, ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendie.

▪ Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer l'absorption capillaire des bétons, des mortiers ou des coulis durcis. Cette diminution de l'absorption capillaire procure une bonne étanchéité au béton. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants.

Ils sont utilisés pour les bétons d'ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau...) et les mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).

/	Entraîneurs d'air	Hydrofuge de masse
Dosage	0.01 à 0.1 %	1 à 3 %
Résistance aux cycles gel/dégel	Emploi obligatoire. Bonne amélioration.	/
Résistances aux agressions atmosphériques, CO₂, atmosphère maritime.....	Effets variables	Amélioration de la résistance grâce à la diminution de la perméabilité à l'air.
Résistances aux agents chimiques agressifs (eaux séléniteuse, eaux sulfatées)	Amélioration possible	Amélioration grâce à la diminution de la perméabilité du béton.
Effets secondaires favorables	Amélioration du parement	/

Tableau I.4: Adjuvants normalisés modifiant certaines propriétés particulières.

I.3.4 L'Eau

L'eau ajoutée lors du malaxage du béton est généralement appelée eau de gâchage. Mais l'eau de gâchage n'est en fait pas seulement l'eau ajoutée, Il faut donc, lors de la fabrication du béton, distinguer entre les sortes d'eau suivantes:

L'eau de gâchage est le total de la quantité d'eau active lors de la fabrication du béton. Elle se compose de l'eau se trouvant à la surface des granulats, de l'eau contenue dans les adjuvants et ajouts, ainsi que de l'eau ajoutée. Lors du calcul du rapport eau/ciment d'un béton, il faut utiliser la quantité d'eau de gâchage. Celle-ci se situe en général entre 120 et 200 l/m³, selon le béton [10].

Avec E/C couramment utilisé de 0.5 on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre [17].

La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) du mélange.

L'eau nécessaire à l'hydratation du ciment elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier (effet lubrifiant).

La qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, Pour convenir à la confection de béton, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles.

Toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton.

I.4 Formulation de béton

Les méthodes proposées sont nombreuses, elles aboutissent à des dosages « volumétrique » ou de préférence « pondéraux » le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac. On citera [4]:

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode d'ABRAMS.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de DREUX GORISSE....

Méthode de BOLOMEY

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique, la formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d}/D$$

Avec :

P: pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

D: diamètre du plus gros grain.

A: varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

Méthode d'ABRAMS

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour un mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Cette règle de mélange d'ABRAMS permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse pour obtenir un module choisi pour le mélange.

Méthode de FAURY

Faury a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacun de ces deux catégories. On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites. L'abscisse du point de rencontre des deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée y est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

- Le paramètre A choisit dans un tableau et D est exprimée en dimension passoire.
- B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.
- R est le rayon moyen du moule.

Méthode Dreux Gorisse

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau. Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants :

- Dosage en ciment.
- Plasticité.
- Intensité du serrage.
- Module de finesse de sable...

Cette courbe de référence permet de doser les proportions en volume absolue, des différents granulats dont on dispose. Enfin la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondérale pour le béton désiré. Il s'agit ensuite d'exécuter quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule la correction expérimentale nécessaires.

II. 1. Introduction

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

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

La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine, bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leur propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise. En témoignage la diversité des études menées afin d'appréhender le comportement des BAP.

II.2.Définition

Les bétons autoplaçants dits BAP, sont des bétons très fluides en écoulement, homogènes et stables, et se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions. Un béton autoplaçant permet de remplir des coffrages dont la complexité de forme ou la densité en ferrailage n'est pas réalisé dans le cas d'un béton ordinaire. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés à l'état frais bien déterminées à savoir la fluidité (étalement au cône d'Abrams), la capacité de remplissage (boite en L) et la résistance à la ségrégation (stabilité au tamis).

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

- 1- les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible à la fin d'essai : auréole de Laitance ou amoncellement de gros granulats au centre).
- 2- le taux de passage à la boite en L doit être supérieur à 0,8.

3- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée [12].

II.3 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour les quelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- densités de ferrailage importantes ;
- formes et géométries complexes : voiles, courbes, ...
- voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ...
- voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures
- exigences architecturales et qualité de parement particulière.



Figure II.1: structure d'un réservoir en béton autoplaçant

II.4 Concept du béton autoplaçant

Les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

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

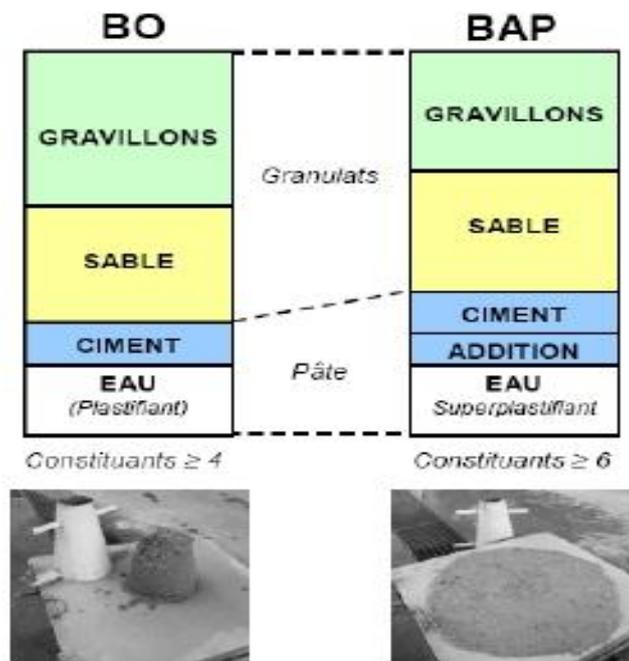


Figure II.2 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP et aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, d'ailleurs à l'arrivée des super plastifiants de type polycarboxylates, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP [13].

II.5 Avantages et inconvénients de béton autoplaçant

- rendements améliorés et exécution plus rapide
- réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- liberté accrue des formes de coffrage
- facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante

- remplissage de parties difficilement accessibles.
- Une économie de main d'œuvre, et un meilleur enrobage des armatures.
- Une diminution des risques de fissuration.

- Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants). modifications des outils de fabrication (outils de mise en place)

II.6 Types des bétons autoplaçants

Les types des BAP et leur formulation peuvent varier considérablement d'un pays à un autre. Cela, en raison d'une part des caractéristiques des matériaux disponibles régionalement et d'autre part, en raison d'une de la « philosophie » prévalant sur le plan national. On fait généralement la distinction entre deux types fondamentaux de BAP : le type à fort dosage en liant et le type avec stabilisateur.

Le type à fort dosage en liant est caractérisé par une teneur élevée en éléments fins et un dosage en liant (ciment et additions) supérieur à 500 kg /m³, ce type de BAP est moins sensible aux éventuelles variations de production que le type stabilisateur, qui est caractérisé par une teneur en liant plus faible, à partir de 400 kg/m³.

Pour ce dernier, il est indispensable d'ajouter au mélange un stabilisateur chimique afin d'augmenter sa viscosité et d'améliorer ainsi sa stabilité envers la ségrégation. Pour la composition du BAP en suisse, on recourt généralement à un type intermédiaire, situé plus près du type avec stabilisateur.

Quelque soit le type de BAP, il convient de tenir compte également de l'apport des granulats en éléments fins pour l'évaluation de la totale en fines.

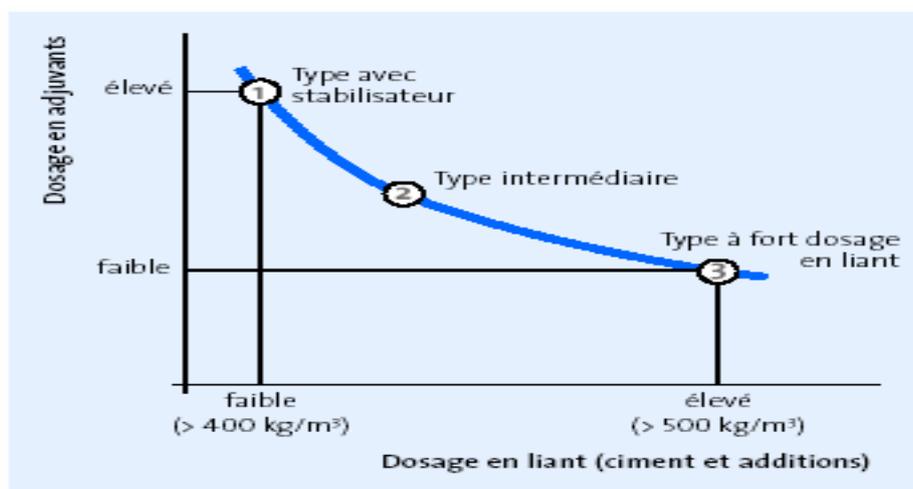


Figure II.3 : types des BAP
(Dosage en adjuvant en fonction du dosage en liant)

II. 7 Constituants d'un BAP

II.7.1 Le ciment

En principe tous les ciments conformes à la norme SN EN 197-1 conviennent pour la fabrication des bétons autoplaçants (BAP).

Les exigences particulières de fluidité du BAP imposent un dosage en pâte du ciment très élevé, raison pour laquelle ce béton comprend en général aussi des additions minérales, la plupart du temps, il s'agit de cendres volantes ou la fumées de silice ou de farines inertes de quartz ou de calcaires [14].

II.7.2 Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés (**figures II.4 et II.5**), le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés [15].

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm, 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 G/S est de l'ordre 1.



Figure II.4 : granulats roulés



Figure II.5 : granulats concassés

II.7.3 L'eau de gâchage

Toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton autoplaçant.

Avec E/C couramment utilisé de 0.5 on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifier par l'emploi

croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci [16].

II.7.4 Les ajouts

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton autoplaçant, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières.



Figure II.6 : Différents ajouts cimentaires.

Avec: 1: cendre volante classe C, 2: métakaolin, 3: fumée de silice, 4: cendre volante classe F, 5: laitier, 6: schiste calciné.

Les additions minérales améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'additions, elles améliorent aussi la granulométrie du squelette dans le béton autoplaçant en remplissant les vides entre les grains grâce à leurs petites tailles.

Ce sont des matériaux finement divisés, qui possèdent souvent une finesse comparable à celle du ciment, parmi lesquelles nous citons les fillers de calcaire, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau, les déchets des briques réfractaires finement broyés, qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation du béton [17].

▪ Avantages économiques et environnementaux

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie. L'incorporation des additions minérales à la formulation des bétons, comme substituant du ciment (poudre plus chère), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentaire dans l'atmosphère.

II.7.5 Les adjuvants

Afin d'obtenir la très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant, on utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, à base de polycarboxylates.

Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C [18].

II.7.5.1 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques. Des fluidifiants identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate qui, ajoutés à des faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gachage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration [19].

▪ Classification des super plastifiants

La norme NF P18 103 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale (rhéologie, teneur en air, prise et durcissement). On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants [20].

- Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants, réducteurs d'eau plastifiants, superplastifiants (anciennement fluidifiants).
- Ceux qui modifient la prise et le durcissement, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise.
- Ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneur d'air, hydrofuges de masse colorants...etc.

▪ Principe des superplastifiants

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la

proportion d'eau libre est importante.

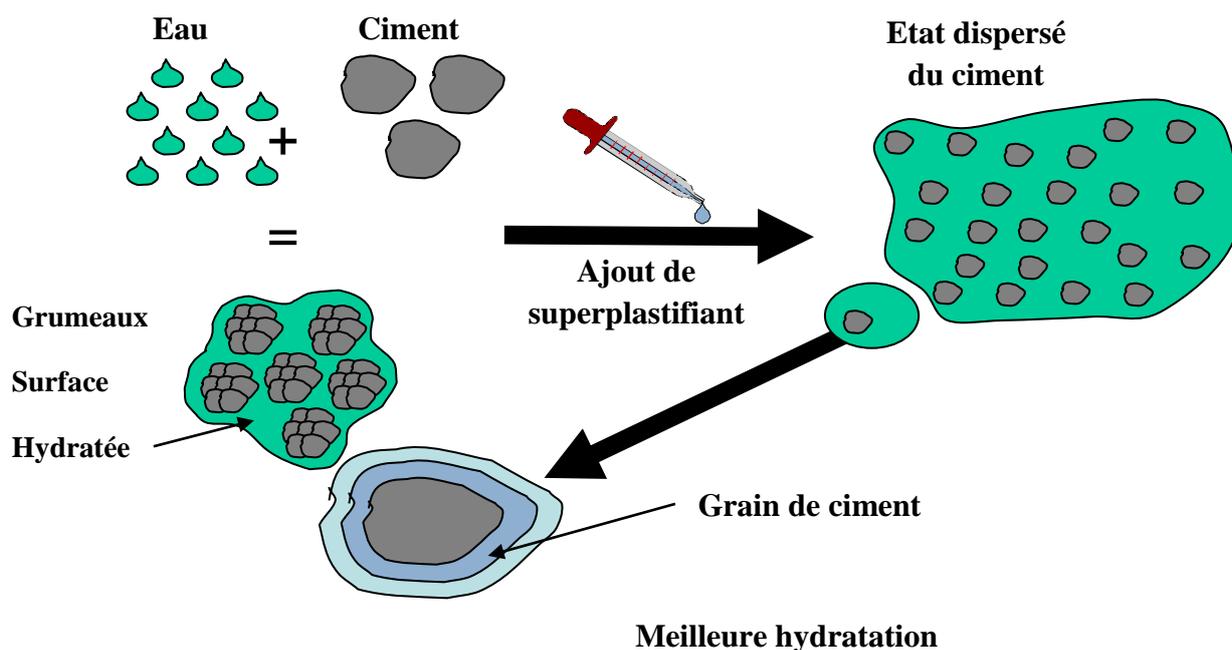


Figure II.7 : Les effets du superplastifiant sur la pâte de ciment

II.7.5.2 L'agent colloïdal ou de viscosité

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi 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 estimé à environ une heure.

II.8 Caractérisation du béton à l'état frais

II.8.1 Essai d'étalement

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**figure II.8**). Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité des matériaux, une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a eu lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton, une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP [19].

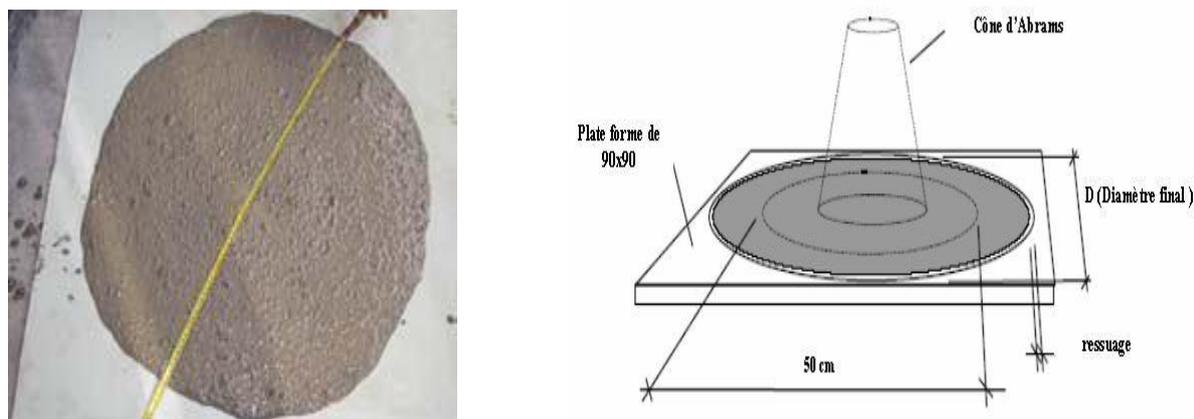


Figure II.8 : Essai d'étalement au cône d'Abrams

II.8.2 Essai de boîte en L

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir la partie verticale d'une boîte avec le BAP, puis en levant une trappe, et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure, ferrailage complexe ou simple). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$

qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP [21].

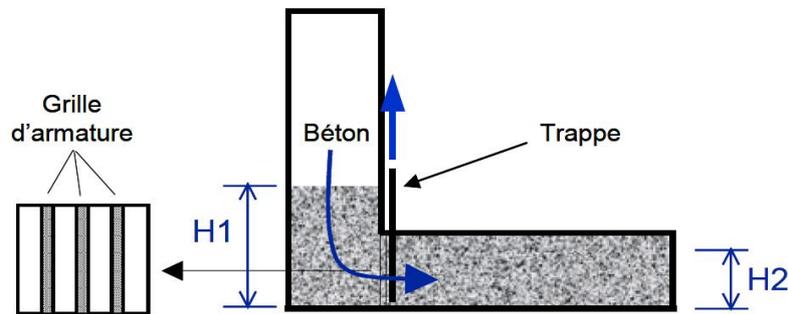


Figure II.9 : Essai de la boîte en L

II.8.3 Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité du béton (2 litres ou 4,8 kg) sur un tamis de maille 5mm avec une hauteur du chute de 50cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversée le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10% et 20%.

$$P_i = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \times 100$$

La mesure de pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0 % < π (laitance) < 15 % : stabilité satisfaisante,
- 15 % < π (laitance) < 30 % : stabilité critique,
- π (laitance) > 30 % : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, Béton inutilisable) [21].



Figure II.10 : Essai de la stabilité au tamis

II.8.4 Essai d'étalement modifié

Le test au J-ring a pour but de considérer le comportement du béton face au blocage dans les armatures selon la déformabilité du BAP suivant un écoulement pareil à celui rencontré avec l'étalement au cône d'Abrams. Le nombre d'armatures peut être modifié selon l'essai souhaité. Le comportement au blocage du béton est quantifié par le diamètre d'étalement S_j et le coefficient StJ qui est la différence des hauteurs moyennes du béton entre la surface du béton dans le cône formé et celle du béton qui se trouve à l'extérieur des armatures du J-ring [22].

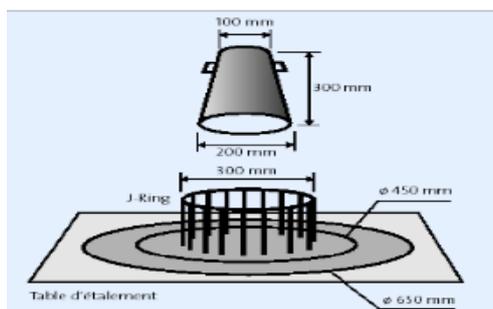


Figure II.11 : Essai d'étalement modifié

II.8.5 Essai d'entonnoir

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la **figure II.12** est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP [23].

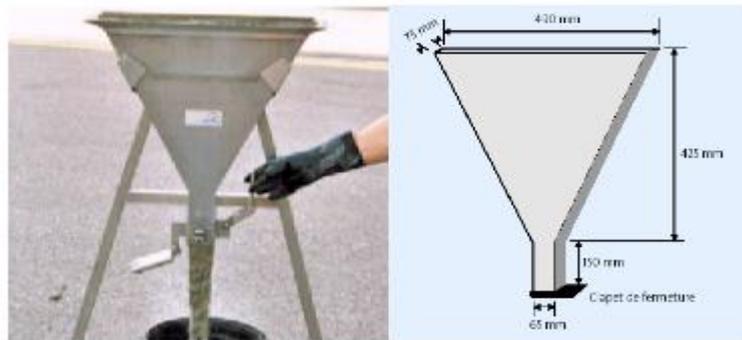


Figure II.12 : Essai d'entonnoir

II.9 Caractérisation des BAP à l'état durci

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

II.9.1 Résistance des BAP

Domone a fait une synthèse des principaux travaux qui concernent l'étude des principales propriétés des BAP durci. A partir de l'analyse de plus 70 études, il conclut que

- Le rapport entre la résistance à la traction et à la compressions des BAP est a priori similaire à celui des bétons vibrés.
- La résistance à la compression, particulièrement, au jeune âge des BAP est meilleure que celle des bétons vibrés. Ceci est principalement du à l'addition des ajouts minérales dans la formulation des BAP qui provoquent une augmentation du degré d'hydratation des bétons ainsi qu'à l'introduction des superplastifiants.
- Le module élastique des BAP diffère peu de celui des bétons vibrés si le rapport G/S est similaire et est inférieur à 1. Si le rapport G/S est plus élevé pour les BV que les BAP.

II.9.2 Retrait (état frais, état durci)

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

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

dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur. Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire.

II.10 Les techniques de formulation des BAP :

La formulation d'un BAP est beaucoup plus complexe que celle d'un béton ordinaire car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : **la fluidité** et **la stabilité**. Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations des bétons autoplaçants. L'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.

Les bétons autoplaçants 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 en matière de maniabilité et de stabilité.

Toutefois, L'utilisation de ces bétons ne se répand que lentement à travers le monde, Le problème de la formulation des bétons s'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe des super plastifiants et des agents colloïdal d'une part et des additions minérales d'autre part [18].

- 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 certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux Gorisse.

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.

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain – sont basés sur les adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du super plastifiant dans le concept du BAP [24].

II.10.1 Méthode Japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le sur coût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants [24].

❖ Dosage des gravillons

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14 [24].

❖ Dosage du sable

Le volume du sable est posé à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires [24].

❖ Dosage du liant

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance [28].

❖ Dosage de l'eau et du super plastifiant

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [24].

II.10.2 Méthode Suédoise

Proposée par [Petersson et al, 1996]. La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [24].

II.10.3 Méthode Française

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

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

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effets de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10⁴ La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [25].

II.10.4 Autres méthodes

- ❖ **Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.**
- ❖ **Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.**
- ❖ **Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.**
- ❖ **Méthode basée sur un plan d'expérience [24].**

II. 11. Propriétés principales du béton frais

II.11.1 Capacité de remplissage

S'il y a blocage des granulats et formation de voûtes au droit des armatures, le remplissage du coffrage ne se fera pas correctement. Les essais que nous venons de présenter permettent de s'assurer que l'écoulement se fait correctement, mais ils donnent peu d'informations sur le comportement du matériau après le passage à travers les armatures. Le ferrailage d'un coffrage est bien souvent plus complexe que celui utilisé dans les essais et n'est pas unidirectionnel [25].

II.11.2 Résistance à la ségrégation

Pour des valeurs d'affaissement plus élevées au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : c'est la ségrégation

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La Figure **II.9**, montre la relation entre les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

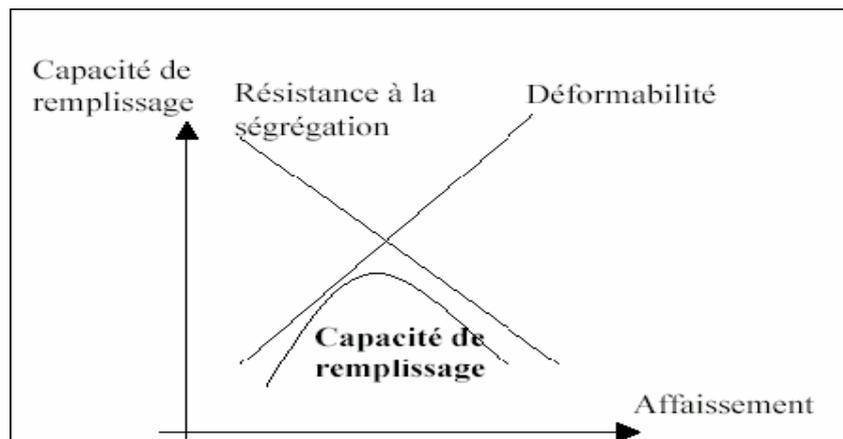


Figure II.13 : Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton [Ozawa et al, 1991]

Le même auteur a montré que la déformabilité du béton était uniquement en fonction de l'eau libre, eau non retenue, chimiquement ou physiquement, par les particules fines (ciment ou ajouts minéraux) ou le sable.

La résistance à la ségrégation dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du mortier (ou de la pâte de ciment) et du volume des gros granulats [Miura et al, 1993]. En effet, [Umehara et al, 1994] montrent qu'une diminution de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation. L'entraînement des granulats par le mortier est favorisé par les forces de viscosité, une augmentation de la viscosité minimise donc la ségrégation. Le volume des gros granulats ainsi que leur taille maximale jouent un rôle non négligeable dans la résistance à la ségrégation. En effet, les collisions et les frottements intergranulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats dans le béton [Ozawa, 1992] [25].

II.11.3 Le ressuage

Le ressuage est un type spécial de la ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables [26].

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton, selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate, la quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée

II.12. Fabrication, transport et mise en place des BAP

II.12.1. Fabrication des BAP

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier. L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [27].

II.12.2. Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire [28].

II.12.3. Mise en place des BAP

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

- La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.
- La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.
- La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [29].

III.1 Introduction

L'évolution actuelle que connaissent les bétons dans les pays industrialisés et ceux en voie de développement est liée aux meilleures connaissances acquises sur ce matériau grâce aux nombreuses recherches menées à travers le monde. Ces recherches ont prouvé que les bétons en générale, et particulièrement les bétons autoplacants, possèdent des caractéristiques mécaniques intrinsèques très satisfaisantes. Mais ce type de bétons peut présenter un comportement critique à des températures très élevées, qui peut dans certaines conditions, se traduire par l'écaillage et l'éclatement du béton.

Pour ce qui concerne les bétons réfractaires, ils sont de plus en plus utilisés dans les industries du feu, tendant à remplacer les réfractaires façonnés. Ils sont donc destinés à des applications à haute température, pouvant atteindre 1500°C. Aux basses températures, leur comportement mécanique est assez similaire à celui des bétons du génie civil, de type élastique endommageable. Aux hautes températures, ce comportement évolue vers un comportement élasto-viscoplastique. L'histoire thermique et le niveau de température ont ainsi une importance majeure sur le comportement thermomécanique de ces matériaux. Dans certaines applications, les sollicitations appliquées sur les bétons réfractaires sont particulièrement sévères : chocs thermiques, forts gradients thermiques, chocs mécaniques à haute température.

III.2 Les bétons réfractaires

III.2.1 Généralités

Selon la définition de la norme AFNOR (NF B 40-001) « tout matériau (autre que métaux et alliages) est considéré comme réfractaire dès l'instant où sa résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C minimum ». En d'autres termes, le matériau doit conserver ses propriétés physiques et ne doit ni se ramollir, ni s'affaisser sous son propre poids avant la température de 1500°C. Et souvent les réfractaires ils ont :

- une bonne résistance aux chocs thermiques
- une faible conductivité thermique
- une bonne résistance à la corrosion (aciéries, four de verrerie...) et à l'érosion (centrales LFC...) à hautes températures.

Les matériaux réfractaires peuvent être divisés en deux grandes familles :

– **Les matériaux façonnés** qui sont livrés sous forme de briques, tuiles et pièces de forme. Leur consolidation a lieu par frittage (ou cuisson), par réaction chimique ou par solidification chimique.

– **Les matériaux non façonnés** (ou monolithiques) Sont livrés en vrac pour être moulés ou appliqués sur place comme les bétons réfractaires.

Les matériaux réfractaires, façonnés ou non, sont essentiellement utilisés dans les « industries du feu » : fonderie, fabrication des métaux non-ferreux, du ciment, du verre et des céramiques. Ils sont également présents dans des domaines comme la pétrochimie, la chimie, l'industrie de l'incinération des déchets et la production d'énergie [30].

Nous parlerons par la suite principalement des matériaux réfractaires non façonnés et plus particulièrement des bétons réfractaires car ce sont les matériaux qui nous intéressent dans notre étude.

III.2.2 Définition de Béton réfractaire

Béton pouvant résister à des températures très élevées (jusqu'à 1800 °C). Sa formulation fait appel à des ciments et à des granulats réfractaires. Il est utilisé par exemple pour réaliser des parois intérieures de fours ou des cheminées [31].

Les bétons réfractaires appartiennent à la classe des matériaux non-façonnés et sont principalement issus d'un mélange de granulats réfractaires et d'une matrice cimentaire (ciment, additifs et ultrafines). Les granulats sont en général constitués par un ou plusieurs minéraux, essentiellement des oxydes, qui confèrent son caractère principal (caractère réfractaire et propriétés complémentaires) au produit fini. La matrice cimentaire est un agent de liaison qui permet d'assurer en permanence la cohésion de l'ensemble des constituants. La nature du liant permet de distinguer deux principales familles de bétons réfractaires :

- **Les bétons à liants chimiques** : c'est le cas des bétons constitués d'un liant à base de phosphore, utilisés pour de bonnes résistances mécaniques à haute température surtout dans le cas de produits d'alumine pure, ou des bétons constitués d'un liant à base de chrome.

- **Les bétons à liants hydrauliques** : soit à base de ciment alumineux, de type ciment fondu (teneur en Al_2O_3 comprise entre 40% massique et 42% massique), soit à base de ciment réfractaire alumineux (teneur en Al_2O_3 supérieure à 60% massique) qui, après cuisson, se comportent comme un matériau réfractaire façonné cuit.

Cette dernière famille constitue la majorité des bétons réfractaires monolithiques dont les mécanismes de prise sont basés sur l'hydratation d'un ciment. Les ciments les plus

couramment utilisés dans l'industrie réfractaire sont des ciments silico-alumineux-calciques à haute teneur en alumine [32].

III.2.3 Calcification des bétons réfractaires

Les bétons réfractaires peuvent également se différencier par leur teneur en ciment :

- a. **les bétons classiques** ont une teneur en ciment comprise entre 15 et 25% massique.
- b. **les bétons à basse teneur en ciment contiennent** de 4 à 10% massique de ciment.
- c. **les bétons à ultra-basse teneur en ciment** ont un taux de ciment inférieur à 2% massique.

III.3 Les briques réfractaires

Les briques sont des produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, c'est l'un des plus anciens matériaux de construction. Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. Il semble que ce mot soit magique et permette de réaliser toutes sortes de performances calorifiques. Mais de quoi s'agit-il exactement? La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, elle sera composée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans différentes proportions. En plus de résister à la chaleur, la brique réfractaire a également la capacité de restituer la chaleur. C'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire [33].

III.3.1 Applications

La brique réfractaire est utilisée principalement pour les constructions destinées à résister à une source de chaleur directe ou indirecte [33]:

➤ **Usage domestique**

- feux ouverts.
- barbecues.
- cheminées décoratives, etc.

➤ **Usage industriel**

- zones de calcination de fours à ciment.
- partie basse de cyclones des préchauffeurs.
- revêtement intérieur de hauts - fourneaux, etc.

III.3.2 Déchet de brique réfractaire

Les déchets de briques sont des matériaux inertes ou résidus qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec les quelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction (cimenteries).

III.3.3 Le principe de fabrication des briques réfractaires

Les briques réfractaires sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000 °C. Par combinaison chimique à partir de 700 °C, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques. En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous [33].

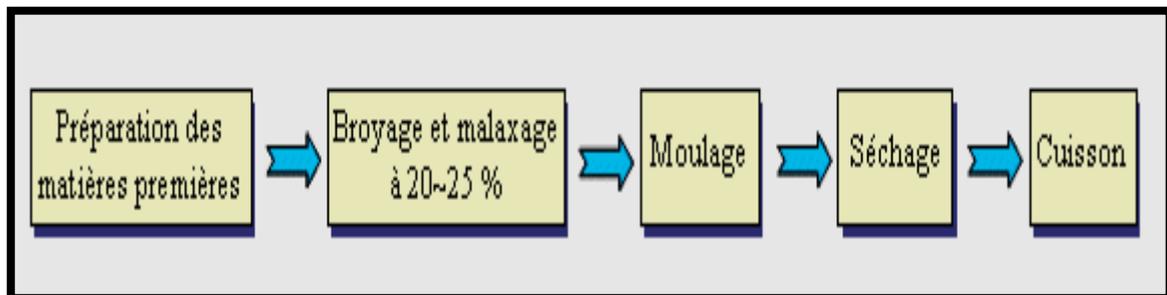


Figure III.1: Schéma de la fabrication des Briques.

Remarque

Les briques sont obtenues soit Par filage (passage de l'argile dans la filière), ou bien Par pressage (compression de la pâte dans un moule).

III.3.4 Réfractaires silico-alumineux

Selon la norme AFNOR, Les réfractaires silico-alumineux sont des produits à base d'argile réfractaire (la teneur en alumine élevée), la norme ISO/1109 les classe dans la catégorie silico-argileux façonnées denses [34], la fabrication de ces réfractaires se fait en deux voies possibles voie sèche et voie humide.

III.3.4.1 Propriétés des réfractaires silico-alumineux

Elles dépendent de la voie utilisée pour la fabrication.

- **Voie sèche:** la résistance à la compression varie entre 250 et 450 Kg/Cm², la porosité est comprise entre 16 et 28%.
- **Voie humide:** la résistance à la compression varie entre 100 et 300 Kg/Cm², la porosité est comprise entre 26 et 28%.

III.3.4.2 Caractérisation des réfractaires silico alumineux

Les performances des réfractaires dépendent de leurs propriétés thermiques (conductivité, expansion thermique) et mécaniques (rigidité, ténacité,...) qui vont influencer sur la résistance aux chocs thermiques et aux différentes sollicitations mécaniques, ainsi que les propriétés physiques (densité, mouillabilité,...) et chimiques qui vont déterminer la résistance à la corrosion.

III.3.5 Brique réfractaire à base de bauxite

III.3.5.1 La bauxite

C'est un minerai rouge à forte teneur en alumine hydraté, a été découverte par Berthier en 1821. Les gisements les plus importants actuellement exploités pour la production de réfractaires sont répartis dans trois pays: la France (Guyane), la Chine et le Brésil. Ce minerai est constitué essentiellement de trois hydroxydes d'aluminium: la gibbsite ($7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), la bohémite ($7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et la diaspore ($\text{AlO}(\text{OH})$). Les impuretés les plus communes sont la kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), le quartz (SiO_2), l'anastase (TiO_2), l'hématite (Fe_2O_3) et la goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). En sortie de mine, l'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer pour la production de l'aluminium. Le minerai siliceux et pauvre en fer, couramment appelé «bauxite blanche», est utilisé comme matière première pour les réfractaires du système alumine - silice. Ce matériau est calciné à haute température ($>1400^\circ\text{C}$) pour déshydrater le produit et le consolider par frittage. La composition et la minéralogie moyenne obtenues suivant les gisements sont présentées dans le tableau suivant [34].

Oxydes	Guyane		Brésil	Chine
	A	B		
Al ₂ O ₃	88	82	85.5	86
SiO ₂	7.0	13.5	10.0	7.0
Fe ₂ O ₃	1.5	1.3	2.0	1.5
TiO ₂	3.0	2.7	2.5	4.1
Minéralogique				
Corindon (α -Al ₂ O ₃)	70	55	45	75
Mullite (3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂)	15	20	25	6
Phase vitreuse	20	25	27	17
Tiéélite (Al ₂ O ₃ -TiO ₂)	≤ 4	≤ 4	≤ 3	6
Propriété physique				
Porosité ouverte des grains (%)	14	12	12	15 – 18
Densité apparente	3.1	2.9	3.1	2.9

Tableau III.1 : Compositions de la bauxite calcinée suivant les sites d'extraction du minerai.

III.3.5.2 Les briques haute teneur en Alumine (HTA) à base de bauxite

Le tableau III.2 présente les compositions de ces différentes briques selon leurs références commerciales (B80PCU, B85PCU, VL85PT) toutes basées sur un mélange de bauxites naturelles de Chine et de Guyane [35].

III.3.5.2.1 Caractéristiques des briques HTA.

➤ Composition chimique

	B80PCU	B85PCU	VL85PT
Alumine Al ₂ O ₃ (%)	77.7	84	84
Silice SiO ₂ (%)	13.5	8	9
Fer Fe ₂ O ₃ (%)	2.2	1.7	1.6
Phosphate P ₂ O ₅ (%)	2.1	2.7	1.5
Titane TiO ₂ (%)	2.6	2.5	3.5
Chaux CaO (%)	0.3	?	?
Magnésie MgO (%)	0.15	?	?

Tableau III.2 : la composition chimique des briques HTA

➤ Propriétés physiques

	Porosité ouverte %		Densité apparente	
	Produit crû	Produit cuit	Produit crû	Produit cuit
B80PCU	16	21.4-25	2.85	2.66
B85PCU	17.4	19.7	-	-
VL85PT	14.4	15	2.92	2.84

Tableau III.4 : les Propriétés physiques des briques HTA.

III.3.5.2.2 Microstructure des briques HTA

La microstructure de ces briques est macroscopiquement la même : des agrégats millimétriques de bauxite constitués des phases suivantes : corindon, mullite, berlinite, verre, associés à une liaison constituée d'argile kaolinitique, de fines de bauxites et de phosphate (acide phosphorique ou phosphate d'alumine). Cette microstructure relativement grossière, présentée sur la figure. En effet, ces différentes nuances présentent à la température ambiante une porosité connectée élevée, allant de 14.4 à 25%.

La matrice de ce réfractaire à haute teneur en alumine a une granulométrie inférieure à 100µm, elle est composée de:

- 15% de fines d'argile réfractaire de
- 5 % de bauxite de Guyane dont la composition minéralogique est la gibbsite, de granulométrie inférieure à 90 µm.
- 15% d'alumine ultrafine, calcinée et rebroyée de très haute pureté ($Al_2O_3 > 99,3\%$) et de granulométrie moyenne 6 µm. [36]

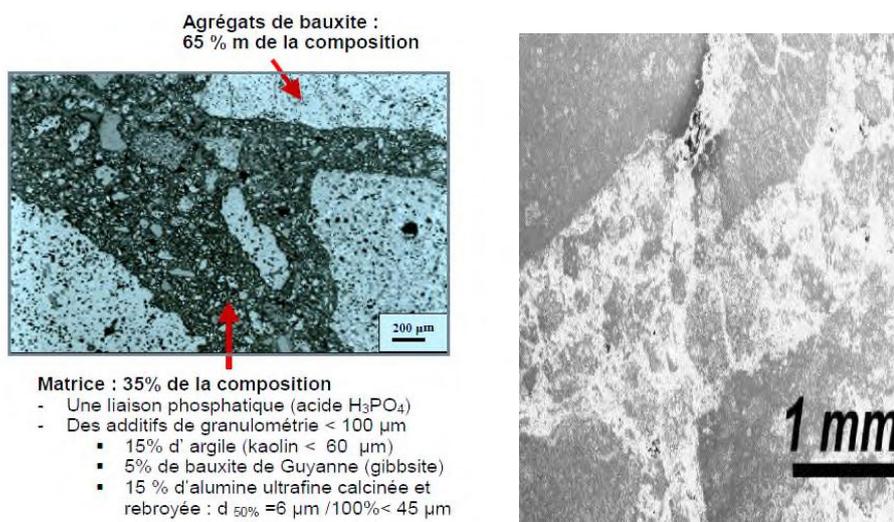


Figure III.2 : Microstructure d'un réfractaire à haute teneur en alumine à la loupe binoculaire

III.3.5 Réfractaires de magnésie

➤ **Classement chimique:** les magnésies (zone chaude des fours de cimenterie ...), les réfractaires de haute teneur en alumine sont neutres (ou amphotères), les siliceux sont acides (fabrication de produits organiques, cheminées,...) [36].

- **Magnésie:** produit basique.
- **Application:** en sidérurgie, four cimentaires.
- **Principaux minéraux:**
- **Foresterie:** $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{MgO}$
- **Enstentite:** $\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$
- **Giobertite:** $\text{MgO} \cdot \text{CO}_2$
- **Olivine et serpentine**
- **Matières premières:** magnésite et dolomie contenant des impuretés (fer, silice, composés de Ca ...) qui sont en grande partie éliminées par traitement chimique et thermique. Cuisson des briques formant un cristal de MgO appelé périclase.

III.4 Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à HT

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le Tableau suivant :

Entre 30 et 105 °C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
Entre 130 et 170 °C:	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C :	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C:	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C :	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β - C_2S . C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques
Entre 700 et 900 °C :	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
A dessus de 1300-1400 °C :	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment

Tableau III.5 : modifications physico-chimiques dans le béton à haute température.

III.4.1 Effet de la température sur la pâte de ciment

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes comme nous l'avons déjà dit. Entre 30 et 120 °C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer, Cependant la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable.

Ensuite à partir de 180 °C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium β C₂S, β CS et en eau tandis que se forme l'hydroxyde de calcium CH qui donne l'oxyde de calcium Ca(OH)₂.

A l'aide de la diffraction aux rayons X, ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200 et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases β C₂S et C₃S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de Ca(OH)₂. Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation, est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel de CSH lors du processus de déshydratation [37].

III.4.2 Effet de la température sur les granulats

A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurelles du matériau.

La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C [Hara-1973]. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C. Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. La Figure III.1 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).

Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C. Une autre transformation cristalline est présente entre 500 et 650 °C. A ces températures, le quartz- α se transforme en quartz- β sans changement de masse en revanche cette transformation est accompagnée d'une dilatation significative de l'ordre de 1 à 1,4 %. Dans le cas des granulats calcaires, la décarbonatation (CaCO₃ → CaO+CO₂) se

produit entre 600 et 900°C. En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 44%. Ceci cause la fissuration et l'endommagement des structures en béton [37].

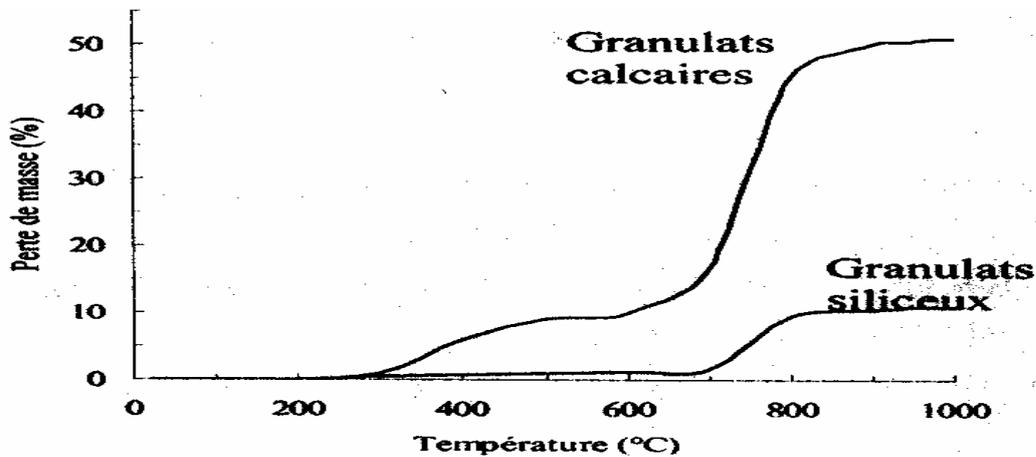


Figure III.3 : les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).

III.4.3 Dégradation de l'interface pâte granulats à haute température

Dans les bétons, l'interface pâte-granat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence des fines réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre cette zone est moins riche en gel de CSH.

A haute température cette partie, appelée aussi l'auréole de transition, se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par *Diederichs et al [Died-1992]* ; en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats.

III.4.5 Phénomène d'éclatement de béton

Lors d'incendie ou d'essais de la résistance thermique des matériaux, il a été fréquemment observé des désordres importants appelés éclatement, en effet, les échantillons

de bétons ou des structures en béton ont présentée des éclats et ont été détruits suite un bruit sourd comme une explosion.

L'éclatement est la résultante de processus thermique, hydraulique et mécanique couplés et concurrents, impliquant un grand nombre de paramètres, tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure. De ce fait, le comportement à l'éclatement présente un caractère aléatoire.

Mais il faut distinguer le phénomène d'écaillage et d'éclatement. Un écaillage est la rupture de la surface d'un élément en béton soumis à une augmentation de la température ce phénomène ce produit à des températures comprises entre 250 et 400 °C et pour la vitesse de chauffage pouvant être très faibles 1°C/min. ce phénomène est provoqué suite a deux principales raisons :

- Un effet de gradient thermique appelé processus thermomécanique.
- Formation de gradient de pression de vapeur d'eau dans le réseau poreux appelé processus thermo hydrique.

Par contre un éclatement est le soudaine désintégration de l'élément de structure en béton qui s'accompagne d'une libération d'une grande quantité d'énergie en projetant des morceaux de béton a grande vitesse dans toutes le directions [37].

III.5 Caractérisation thermomécanique des bétons réfractaires

Dans les bétons réfractaires, la phase liante assure la tenue mécanique du matériau. En effet, c'est lors de la recristallisation de la phase CA que se forme une liaison chimique forte qui permet d'assurer la liaison entre les granulats et donc la cohésion entre la matrice et les granulats. De ce fait, les propriétés mécaniques du matériau sont intimement liées aux comportements de la matrice cimentaire. Pour ces raisons, de nombreuses études ont été menées sur les évolutions structurales de la phase CA lors de son hydratation puis de sa déshydratation, lorsqu'elle est soumise à une élévation de température. Ces changements de structure sont connus sous le nom de phénomènes de conversion [32].

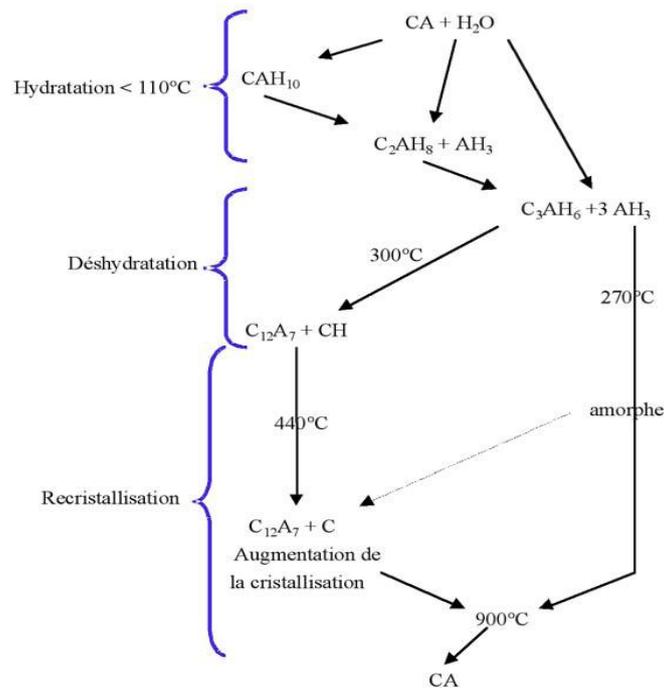


Figure III.4 les modes de conversion de l'aluminat de calcium en fonction de la température

III.5.1 Evolution microstructurale de béton réfractaire

La conversion est un phénomène relativement lent et irréversible qui se produit lors de la première chauffe et qui n'opère complètement que si le chauffage est progressif.

La Figure III.4 représente les modes de conversion de l'aluminat de calcium en fonction de la température. La description de ce phénomène peut être décomposée en plusieurs étapes : [38]

– **Hydratation** : La phase anhydre CA, sous forme de poudre, est hydratée par ajout d'eau. Elle se dissout pour former des aluminates de calcium hydratés et des hydrates d'aluminium. Ces derniers se trouvent sous forme de gel d'alumine amorphe ou bien de gibbsite cristalline. Lors de l'hydratation du CA, trois sortes d'hydrates peuvent se former. Cependant, seul l'hydrate C₃AH₆ est stable à température ambiante. Les deux autres, CAH₁₀ et C₂AH₈, sont métastables et tendent à se transformer en C₃AH₆. La cinétique de transformation est intimement liée à la température.

En effet, lors d'un étuvage à 110°C pendant 24 heures, les phases hydratées présentes sont C₃AH₆ et AH₃.

– **Déshydratation** Au-delà de 110°C, l'eau combinée avec les aluminates de calcium va s'évaporer. Ensuite entre 200°C et 400°C, l'eau de constitution commence à disparaître, conduisant à la formation du C12A7, de l'alumine amorphe et de la chaux hydratée.

– **Recristallisation** A partir de 440°C, la chaux hydratée va se transformer en chaux libre et réagir avec l'alumine libre pour former de nouveau du C12A7. Vers 900°C, les particules de C12A7 vont se combiner avec l'alumine restante pour donner le mono aluminat de calcium (CA). Celui-ci va réagir à son tour avec l'alumine aux alentours de 1000°C pour former du CA2. Pour des températures proches de 1400°C, le CA2 va réagir avec l'alumine libre pour former du CA6 [38].

III.5.2 Propriétés thermomécaniques de béton réfractaire

Pour le béton, on ne considère souvent que l'évolution de ses propriétés mécaniques soit similaire à celle de son liant (ciment + fines). D'ailleurs, dans la plupart des travaux, la perte de résistance mécanique et la diminution du module élastique sont directement reliées à la destruction du réseau d'hydrates cristallins du ciment, qui n'assure plus son rôle de cohésion. On a également une augmentation de la porosité totale de la pâte de ciment et de l'interface pâte-granulats qui rend le matériau moins résistant mécaniquement pour le béton non traité thermiquement. Après traitement thermique, l'effet est accentué par la dilatation des grains opposée au retrait de la matrice.

A plus haute température, le béton retrouve sa résistance mécanique, voire une résistance bien supérieure, grâce à la formation d'une liaison céramique, dans la pâte de ciment mais aussi à l'interface entre le liant et les granulats [39].

III.5.3 Comportement mécanique de béton réfractaire

Les bétons peuvent être considérés comme des matériaux composites composés d'une matrice cimentaire et d'agrégats de tailles différentes pouvant aller jusqu'à plusieurs mm.

Dans le cas des bétons de génie civil, la résistance mécanique est assurée par les liaisons hydrates du ciment. Pour les réfractaires la liaison hydrate ne sert qu'à la mise en forme avant cuisson, la résistance mécanique finale étant assurée par les liaisons céramiques créées après cuisson à haute température.

Comportement général

Le comportement général des réfractaires peut se décomposer en trois points essentiels :

- fragilité et endommagement à faible température.
- comportement dissymétrique en traction et en compression.
- phénomènes visco-élasto-plastiques à haute température.

A faible température, les bétons réfractaires, ou les bétons en général, présentent un comportement quasi-fragile et endommageable par fissuration, contrairement aux calculs de structures du Génie Civil où le béton est considéré comme parfaitement fragile. En conséquence, comme pour les céramiques, leur résistance en traction est environ 10 fois plus faible que celles en compression. Le comportement est dissymétrique en traction et en compression compte tenu de la sollicitation différente des fissures (mode d'ouverture ou de fermeture).

A plus haute température, la présence de phases vitreuses, transitoires ou non, engendre un comportement visco-élasto-plastique, rendant le matériau moins fragile et pouvant supporter des déformations remarquables [39].

Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons le travail pratique effectué au niveau de laboratoire nationale d'habitat et de construction de la zone industrielle de Oued Smmar (LNHC). Cette étude contribue à la compréhension du comportement de béton autoplaçant aux sollicitations mécaniques (traction par fendage, compression) d'une part et, d'autre part est le plus important, suivre les évolutions des comportements thermiques, depuis la température ambiante jusqu'à haute température, du ce béton autoplaçant à base de déchets de brique réfractaire.

Le but de notre étude consiste à la valorisation des déchets de briques réfractaires de haute teneur en alumine concassés et finement broyés avec des proportions différentes sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du BAP.

Pour cela, nous avons adopté la méthodologie ci-dessous :

A. La première partie

La caractérisation des différents matériaux utilisés :

- ✓ Le Ciment.
- ✓ Les granulats.
- ✓ L'eau de gâchage.
- ✓ Déchet de briques réfractaires.
- ✓ Superplastifiant.

B. La deuxième partie

La préparation des différentes formulations par l'élaboration de deux types d'éprouvettes, cylindrique (11/22) et l'autre (16/32).

C. La troisième partie

Caractérisation physico-mécaniques des différentes formulations :

- ✓ à l'état frais : étalement, boîte en L, stabilité au tamis.
- ✓ à l'état durci : les résistances mécanique.

D. La quatrième partie

Elle est consacrée aux traitements thermiques des meilleures formulations sur le plan mécanique afin de suivre les évolutions microstructurales de ces bétons, pour une éventuelle valorisation de ce déchet de briques réfractaires dans les bétons autoplaçants.

IV.1 Caractéristiques des constituants

Dans cette partie, nous avons axé notre travail sur la caractérisation des différents constituants entrant dans la composition des BAP. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats des études. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant des BAP.

Les matériaux utilisés sont des matériaux locaux et naturels. Et tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux.

IV.1.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composée CPJ-CEM II, de classe 42,5 provenant de LAFARGE d'Alger.

➤ Composition minéralogique des ciments

Phase	Eléments	Teneur (%)
Clinker	C3S	55
	C2S	21
	C3A	08
	C4AF	10
	CaO libre	01
Régulateur de prise	Gypse	05

Tableau IV.1 : Composition minéralogique du ciment

❖ **Composition chimique**

Eléments	Pourcentage (%)
CaO	62.78
SiO ₂	18.88
Al ₂ O ₃	4.65
Fe ₂ O ₃	3.2
SO ₃	2.41
Na ₂ O	0.10
K ₂ O	0.64
MgO	2.42
CaO	0.94
Cl ⁻	0.029
PAF	4.60
Insolubles	1.29

Tableau IV.2 : Composition chimique du ciment

❖ **Caractéristiques physiques**

		Résultats
Consistance normale (%)	Quantité d'eau	27.8
temps de prise (mn)	Début	180
	Fin	255
Masse volumique absolue du ciment (g/cm ³)		3.12
Surface spécifique Blaine (SSB) (cm ² /g)		3100.96

Tableau IV.3 : Essais physiques de ciment

IV.1.2 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de notre béton est une eau de robinet de la ville d'Oued Smar.

IV.1.3 Granulats

IV.1.3.1Sable (0/4)

Le sable utilisé dans notre béton est un sable moyen concassé (0/4) de la carrière « khemis Meliana ».

❖ Propriétés physiques de sable

Caractéristiques	Unités	Résultats
Masse volumique apparente	g /cm ³	1.6
Masse volumique absolue	g /cm ³	2.22
Coefficient d'absorption	%	15
E.S.P	%	92.54

Tableau IV.4 : Caractéristiques de sable (0/4).

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

Prise d'essai : 1000g.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisas (%)
5	11.3	0.565	99.43
4	92.2	4.61	95.39
2.50	489.5	24.47	75.53
1.25	952.3	47.615	52.38
0.63	1254.4	62.72	37.28
0,315	1505.3	75.65	24.35
0,16	1863	93.15	6.85
0,08	1980	99	1
FT	1998	99.9	0.1

Tableau IV.5 : Analyse granulométrique du sable (0/4)

$$Mf = \sum \text{refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.5, 2.5, 5/100$$

$$Mf = 3.04$$

Observation : le sable (0/4) à un module de finesse 3.04, alors une correction par un sable de Boussaâda est obligatoire pour avoir une bonne qualité de ce béton non seulement à l'état frais, mais aussi à l'état durci.

IV.1.3.2 Sable Boussaâda

Le sable utilisé dans notre béton est un sable (0/1) de la région de Boussaâda.

❖ Propriétés physiques de sable (0/1)

Caractéristiques	Unités	Résultats
Masse volumique apparente	g /cm ³	1.52
Masse volumique absolue	g /cm ³	2.5
Coefficient d'absorption	%	20
E.S.P	%	66.87

Tableau IV.6 : Caractéristiques du sable (0/1)

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

❖ Prise d'essais : 1000g.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisas (%)
1.25	0,00	0,00	100
0.63	0,00	0,00	100
0,315	360	36	64
0,16	940	94	6
Ft	1000	100	0

Tableau IV.7 : Analyse granulométrique du sable (0/1)

$$Mf = \sum \text{refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.5, 2.5, 5/100$$

$$Mf = 1.3$$

Remarque :

- Le module de finesse de sable de Boussaâda est de 1.3, donc est un bon correcteur de sable.

- Les pourcentages obtenus après la correction de sable de khemis Meliana par le sable de Boussaâda sont : **68 %** de sable (0/4) et **32 %** de sable (0/1).

IV.1.3.3 Gravier (3/8)

Le gravier utilisé dans notre béton est un gravier concassé qui provient de la carrière de keddara.

❖ Propriétés physiques

Caractéristiques	Unités	Résultats
Masse volumique apparente	g /cm ³	1.43
Masse volumique absolue	g /cm ³	2.66
Coefficient Los Angeles	%	25.04
Coefficient Micro Deval sèche	%	5
Coefficient Micro Deval humide	%	14.04
Coefficient d'absorption	%	0.66

Tableau IV.8 : Caractéristiques du gravier (3/8)

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

Prise d'essai : 2000g

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamises (%)
10	00	00	100
8	8	0.4	99.6
6,3	225	11.25	88.75
5	1091	54.55	45.45
2,5	1918.7	95.93	4.07
1.25	1997	99.85	0.15

Tableau IV.9 : Analyse granulométrique du gravier (3/8)

IV.1.3.4 Gravier (8/15)

Le gravier utilisé dans notre béton est un gravier concassé qui provient de la carrière de keddara.

❖ Propriétés physiques

Caractéristiques	Unités	Résultats
Masse volumique apparente	g /cm ³	1.43
Masse volumique absolue	g /cm ³	2.69
Coefficient Los Angelos	%	25.04
Coefficient Micro Deval sèche	%	5
Coefficient Micro Deval humide	%	14.04
Coefficient d'absorption	%	1.67

Tableau IV.10 : Caractéristiques du gravier (8/15)

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

Prise d'essai : 3000g.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisas (%)
16	53.7	1.79	98.21
12,5	483.	16.10	83.9
10	1168.9	38.96	61.04
8	2069.2	68.97	31.03
6,3	2689.2	89.64	10.36
5	2882.4	96.08	3.92
4	2947.9	98.26	1.74
2.5	2996	99.86	0.14

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du gravier (8/15)

❖ Coefficient d'aplatissement (8/15)

Prise d'essai = 3000g.

Tamisages sur tamis		Tamisage sur grille	
Classes granulaires d/D (mm)	Mgi (g)	Classes des grilles (mm)	Mei (g)
16/20	23.3	8	11.2
12.5/16	393	6.3	69.2
10/12.5	655.8	5	76.6
8/10	797.8	4	91.3
6.3/8	738	3.15	86
M = \sum Mgi = 2607.9		M = \sum Mei = 334.6	

Tableau IV.12 : Coefficient d'aplatissement (8/15)

$$\text{Coefficient d'aplatissement} = (\sum Mgi / \sum Mei) \times 100$$

$$CA = 12.83\%$$

Observation : Selon la norme NF P18-561 suivie dans cet essai, concernant le coefficient d'aplatissement du gravier utilisé dans la confection de notre béton, les résultats obtenus montrent que le gravier est conforme et il peut être utilisé sans conséquences.

Courbes granulométriques des granulats

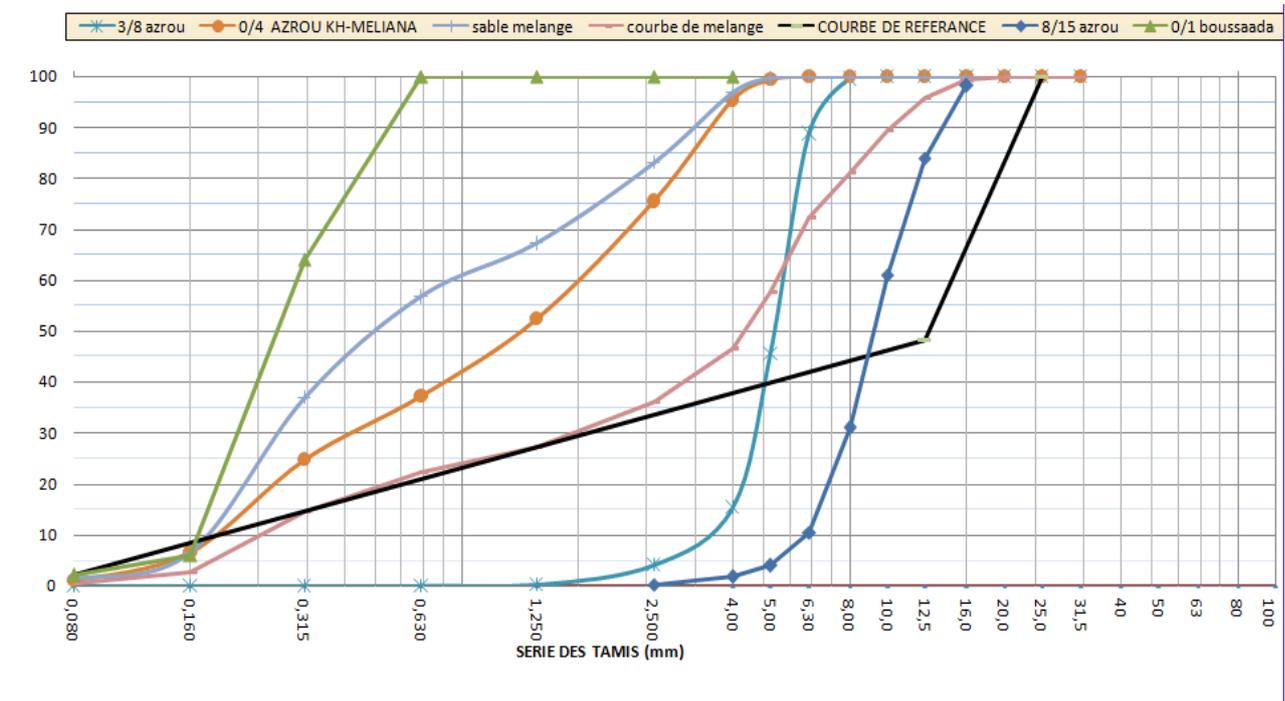


Figure IV.1 : Courbes granulométriques des différents granulats

Les classes granulaires telles que les sables 0/1- 0/4 et graviers 3/8 - 8/15, montrent que les granulats sont à granulométrie continue.

IV1.4 L'ajout

Dans ce travail, l'addition utilisée est le déchet de brique réfractaire bien broyé provient de la cimenterie de Sour-El-Ghouzlane.

IV1.4.1 Les briques réfractaires

La brique KRONEX 85 est fabriquée à base de bauxite (haute teneur en alumine), elle est utilisée dans la zone de cuisson du four de la cimenterie de Sour-El-Ghouzlane.



Figure IV.1 La brique KRONEX 85.

❖ **Caractéristiques chimiques de la brique avant l'utilisation dans le four**

Composition chimique	Valeur (%)
Al ₂ O ₃	80-85
Fe ₂ O ₃	1.5
SiO ₂	10-12

Tableau IV.13 : Analyse chimique de BR avant l'utilisation dans le four

❖ **Caractéristiques physiques de la brique avant l'utilisation dans le four**

Caractéristiques physiques	Valeur
densité. [g/cm ³]	2.75 - 2.90
Porosité ouverte [%]	17-19
Résistance à l'écrasement à froid [N/mm ²]	85
Résistance à l'affaissement sous charge à chaud Ta [°C]	1500
Coefficient de Conductibilité thermique [W/m .K]	2.3 à 300°C 2.2 à 700°C 2.1 à 1000°C
Dilatation thermique linéaire [%]	0.3 à 400 °C 0.5 à 800°C 0.9 à 1200 °C
Résistance aux chocs thermiques 950°C/air.	80

Tableau IV.14 : caractéristiques physiques de BR avant l'utilisation dans le four

IV1.4.2 Les déchets de briques réfractaires

Afin de valoriser les déchets de briques réfractaires, qui ont une durée de vie bien déterminée et qui ont subi des dégradations de leurs propriétés pendant leurs utilisations, ces déchets sont incorporés comme un ajout cimentaire pour la réalisation d'un béton autoplaçant réfractaire et d'améliorer leurs propriétés physico-mécaniques et thermiques.

La préparation des déchets se fait par concassage puis un broyage pendant une heure enfin un tamisage dans un tamis de 80µm.

❖ Les caractéristiques physiques du déchet de la brique réfractaire

Les caractéristiques des briques réfractaires	valeurs
La masse volumique apparente [g/cm ³]	1.64
La masse volumique absolue [g/cm ³]	3.05
L'absorption d'eau Ab(%)	4.05
Couleur	grise

Tableau IV.15 : les caractéristiques physiques de déchet de brique réfractaire.

IV1.5 Les adjuvants

On a utilisé un superplastifiants. SIKA. Viscocrete Tempo 544 : est un Superplastifiant Haut réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi, et béton autoplaçant Conforme à la norme NFEN 934-2.

IV1.5.1Présentation

SIKA Viscocrete tempo 544 est un Superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés.

IV1.5.2 Domaine d'application

- SIKA Viscocrete tempo 544 permet la fabrication de Bétons plastiques à autoplaçants transporté sur de longues distances et pompés.
- dans les bétons autoplaçants SIKA Viscocrete tempo 544 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- Béton avec des granulats concassés (même avec un taux d'absorption très élevé).

IV1.5.3 Caractères générales

SIKA Viscocrete tempo 544 est un Superplastifiants puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h30)
- Robustesse à la ségrégation
- Qualité de parement.

IV1.5.4Caractéristiques

- Forme Liquide
- Couleur Marron

- PH 5±1
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en ions Cl⁻ ≤ 0,1 %
- Teneur en Na₂O Eq. ≤ 1 %
- Extrait sec. 32 ± 1,2 %

IV1.5.5 Dosage

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 3 % du poids de liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,6 à 1,5% du poids du ciment ou liant.

IV1.5.6 Mode d'emploi

SIKA Viscocrete tempo 544 est ajouté soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

IV.1.6 Etude rhéologique

Cette partie est consacrée à l'étude rhéologique des pâtes cimentaires, a pour objectif de mettre en évidence et de comprendre l'influence du type de liant et le dosage de superplastifiant sur les propriétés rhéologiques de ces dernières.

Le point de saturation est le dosage ou le superplastifiant n'a plus d'effet sur les propriétés rhéologiques du coulis, de la pâte de ciment ou du béton.

On varie le dosage en superplastifiant jusqu' à ce que la coulis aura un comportement presque newtonien, c'est à dire, une viscosité plastique constante en fonction du gradient de vitesse.

Dans notre étude, on a déterminé les points de saturation de la pâte cimentaire avec superplastifiant (Tempo 544). L'essai de la rhéologie a été réalisé au laboratoire de rhéologie de l'unité de recherche UR-MPE. À l'aide d'un VISCOSIMETRE VT550.

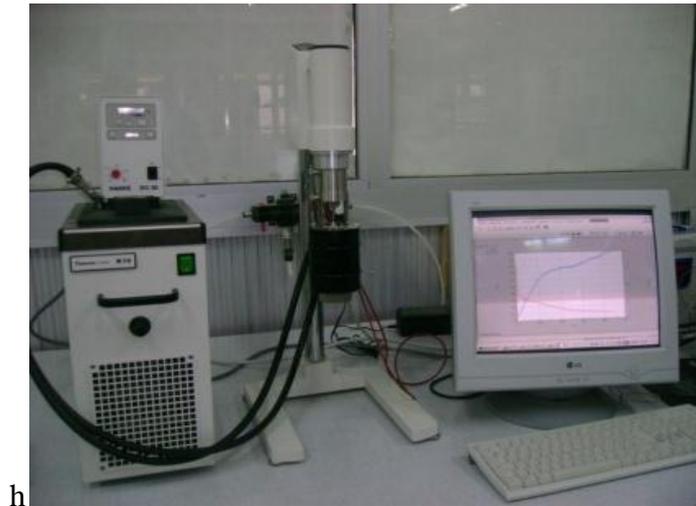


Figure IV.3 : viscosimètre VT 550

IV.1.6.1 La composition des pâtes utilisées

On fixe la quantité du ciment et ainsi que celle de l'eau, et on fait varier le pourcentage de déchet de brique réfractaire (10 %, 20%, 30%, 40%) et le dosage de superplastifiant d'une valeur de 0.5 jusqu'à 3%, de telle sorte qu'on ne dépasse pas l'intervalle indiqué dans la fiche technique.

La composition de ces différentes pâtes est donnée dans les tableaux suivants :

Désignation	Mélange 1 Témoin	Mélange 2 10 %BR	Mélange 3 20%BR	Mélange 4 30% BR	Mélange 5 40% BR
Eau (ml)	40	44	48	52	56
Ciment (g)	100	100	100	100	100
Déchet de brique (g)	00	10	20	30	40
Superplastifiants (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Tableau IV.16 : Compositions des pâtes de ciment.

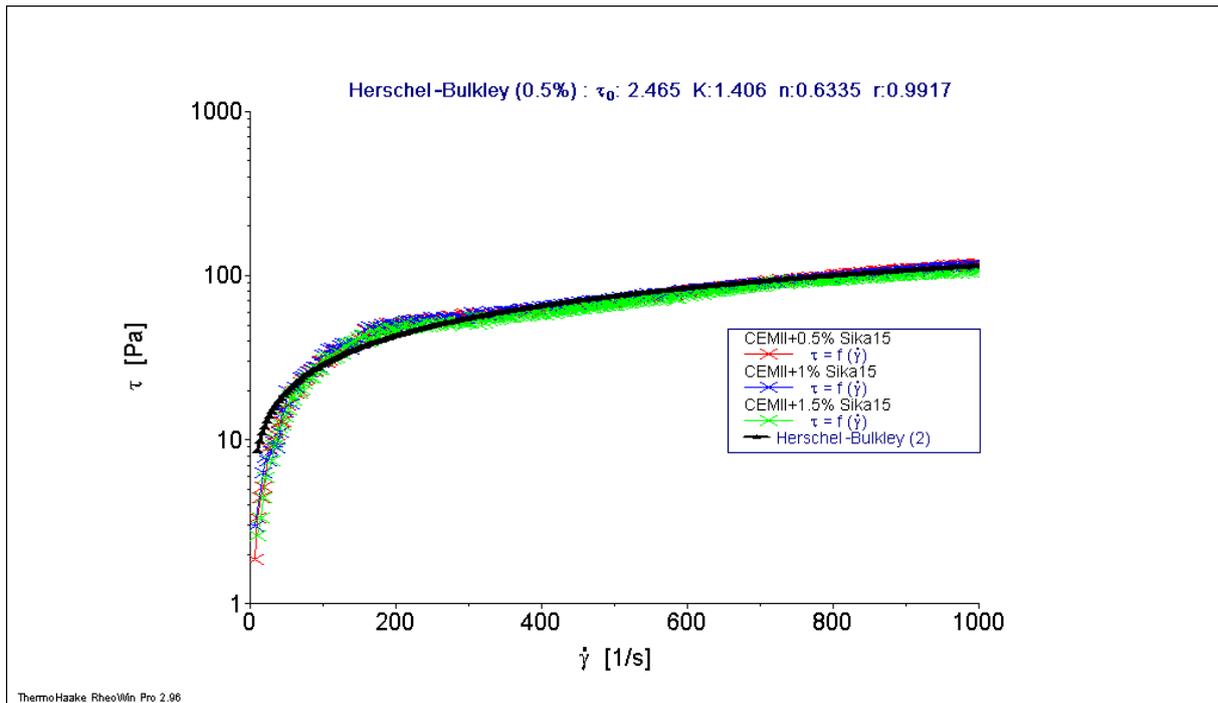


Figure IV.4 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544)

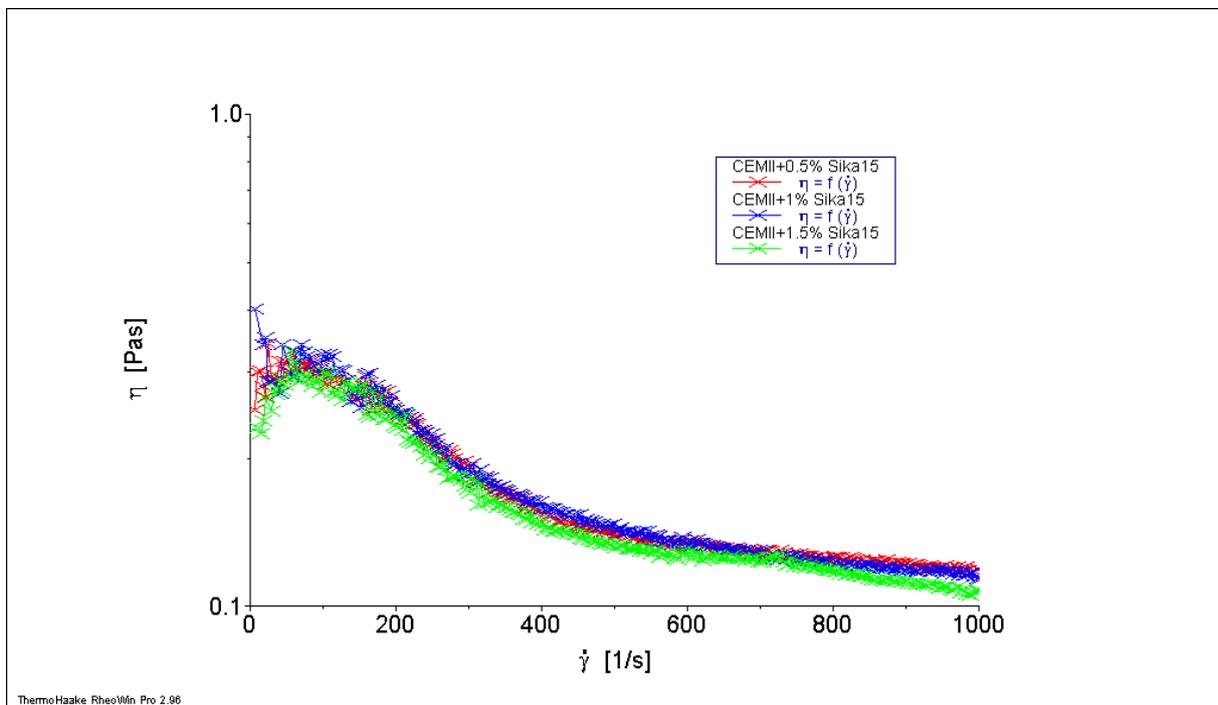


Figure IV.5 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544)

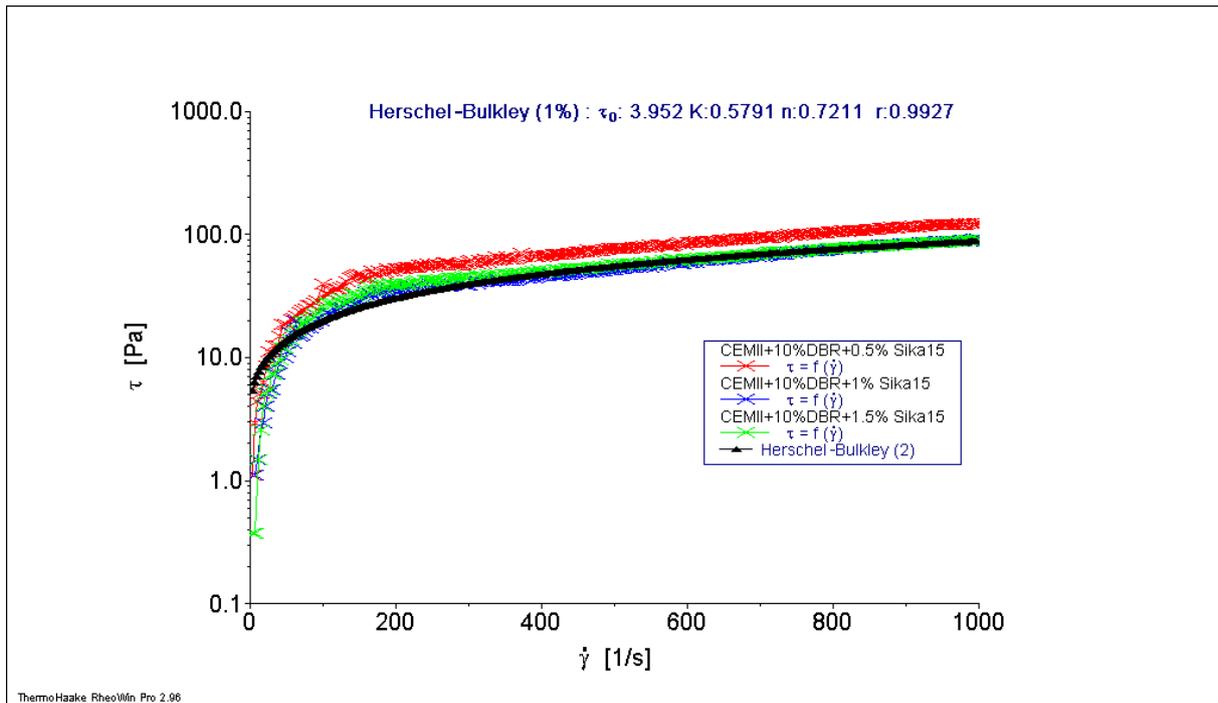


Figure IV.6 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 10% DBR)

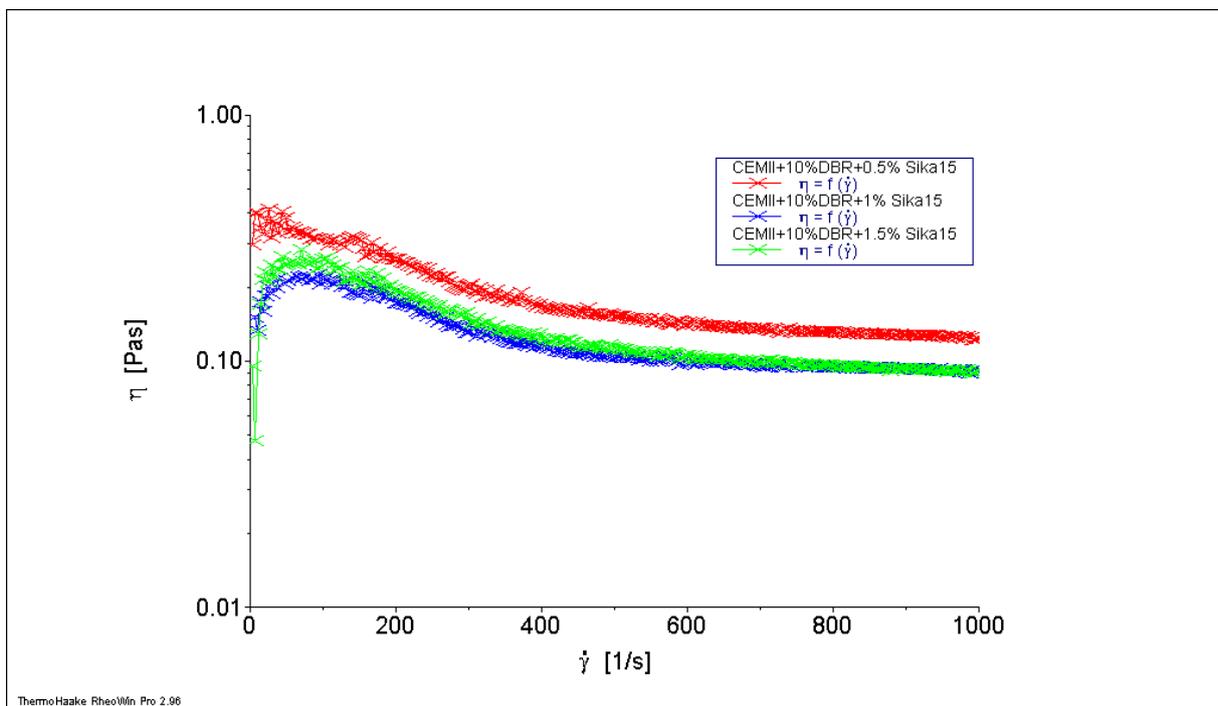


Figure IV.7 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 10% DBR)

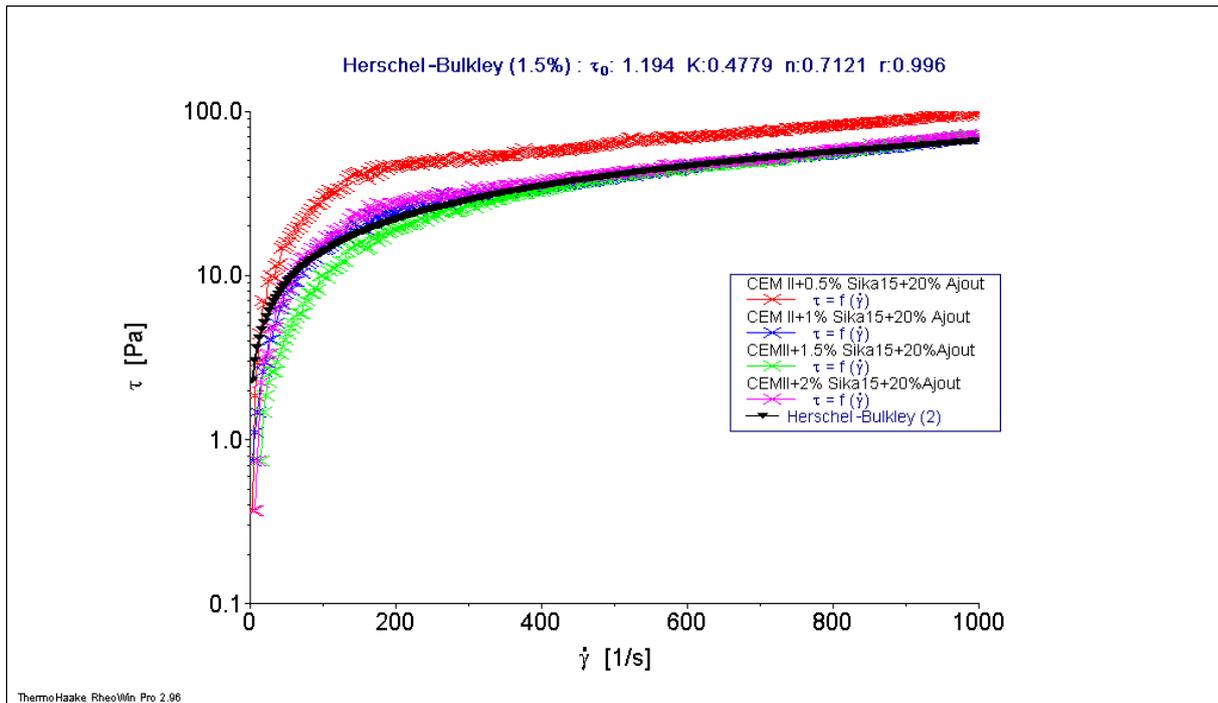


Figure IV.8 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 20% DBR)

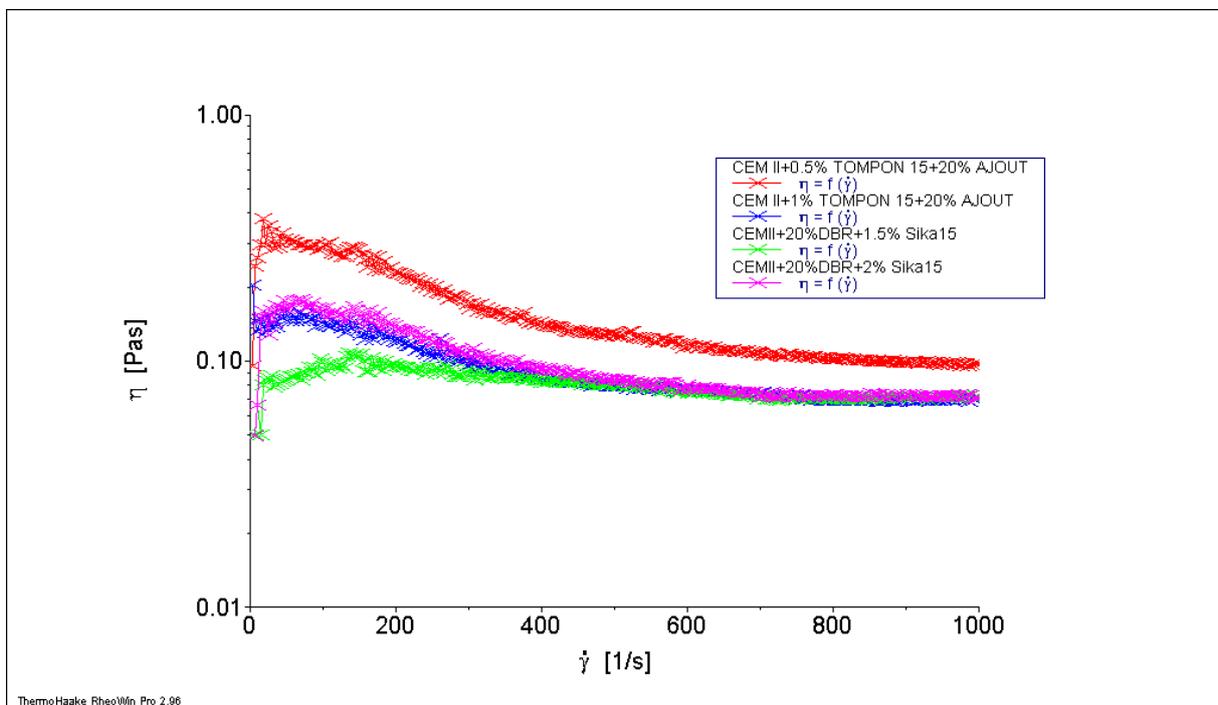


Figure IV.9 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 20% DBR)

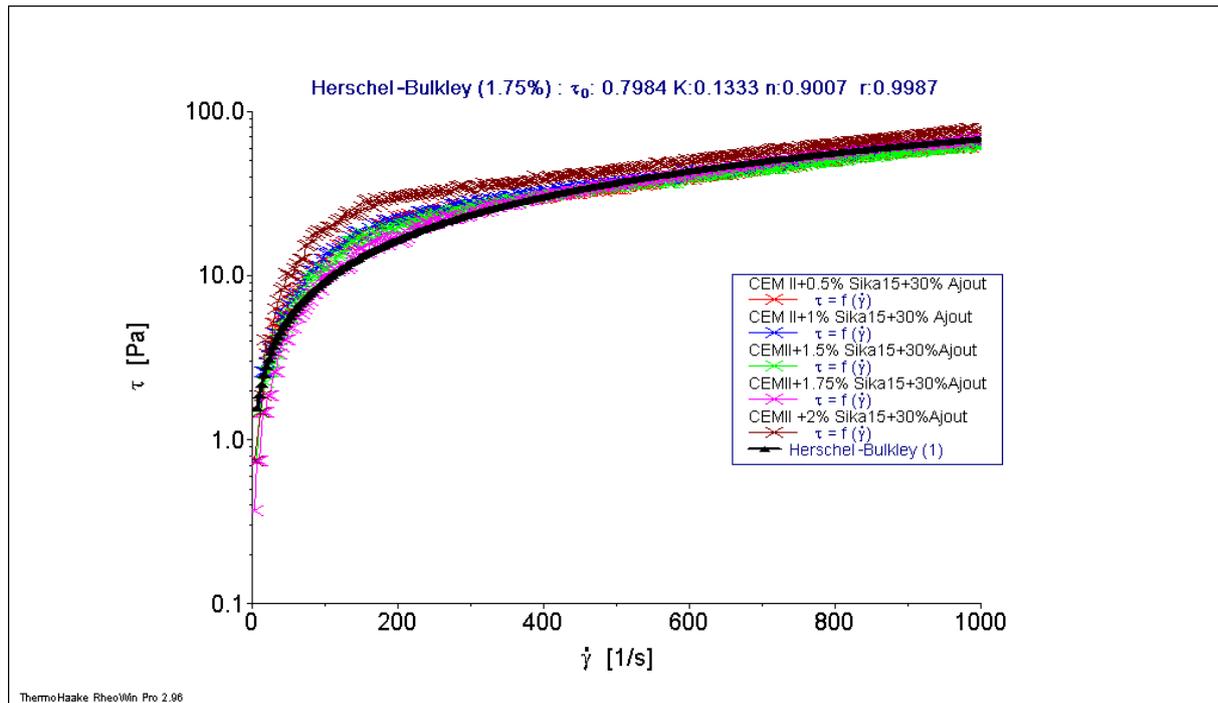


Figure IV.10 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 30% DBR)

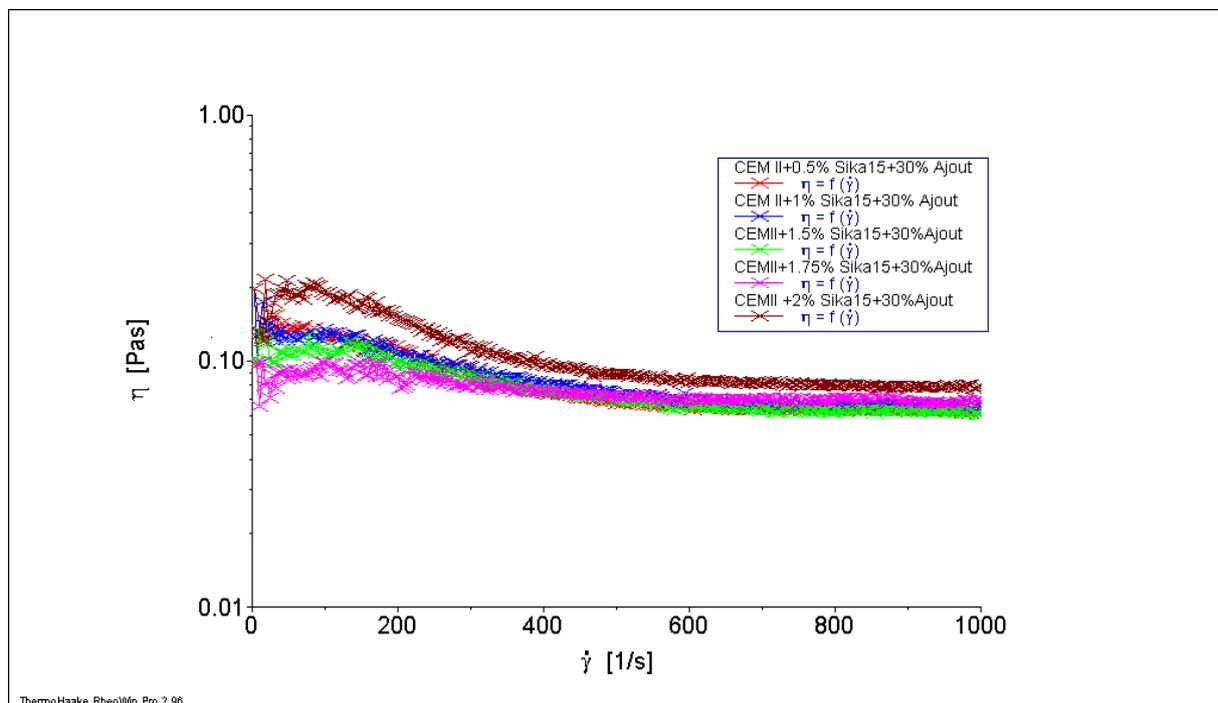


Figure IV.11 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 30% DBR)

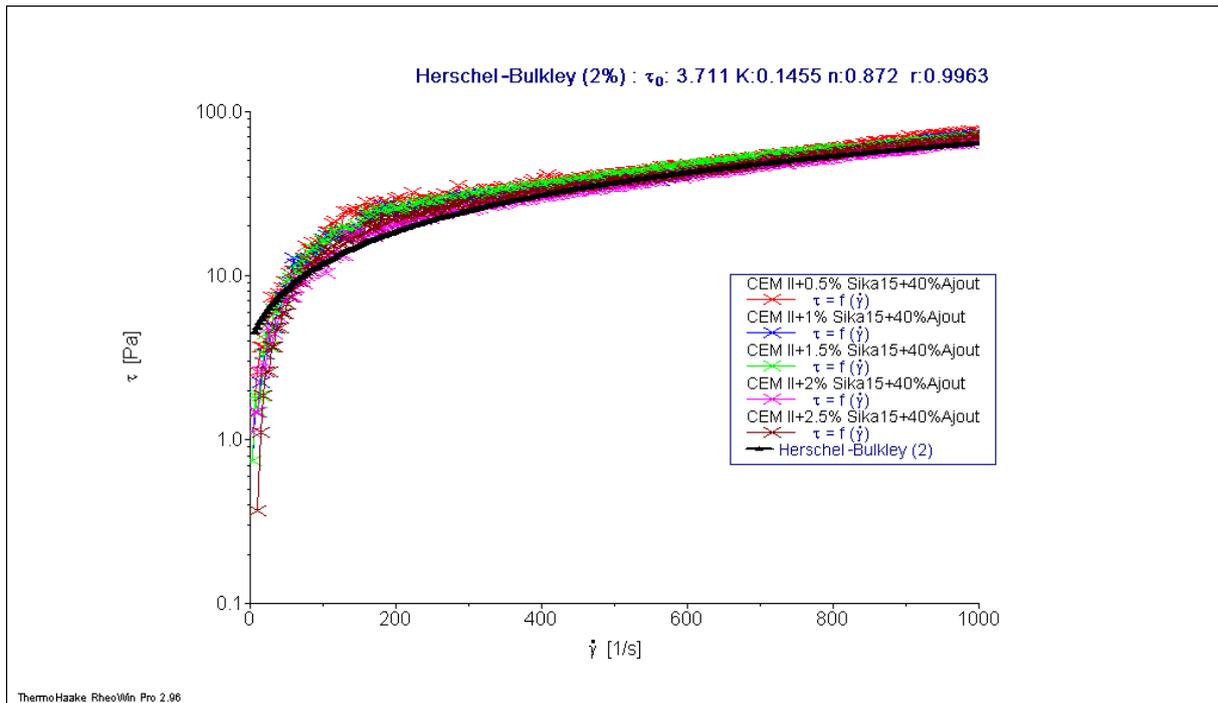


Figure IV.12 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 40% DBR)

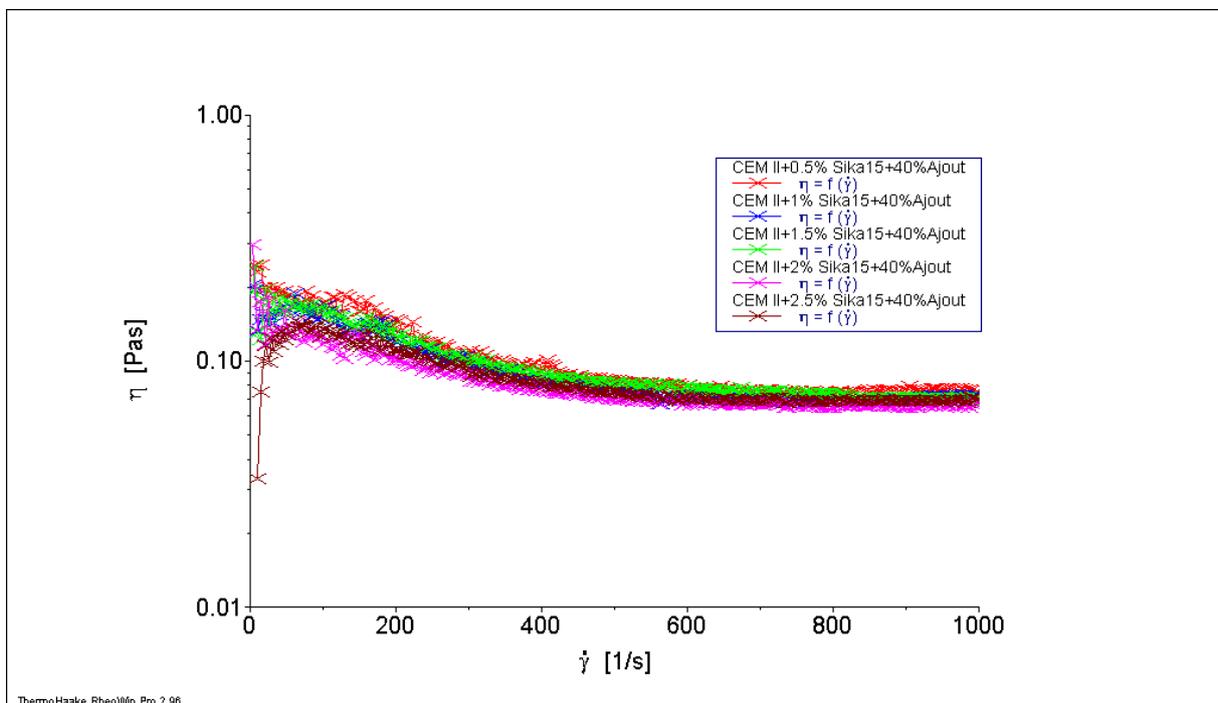


Figure IV.13 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement (SP ; SIKA Viscocrete tempo 544 + 40% DBR)

Interprétation

Pour les bétons autoplacants à base de déchet de brique réfractaire et plus le pourcentage du superplastifiant (TEMPO 544) fait augmenter la contrainte de cisaillement et, la viscosité de la pâte diminue, c'est-à-dire plus l'écoulement sera plus facile et rapproche de l'écoulement Newtonien, jusqu'au point de saturation (0.5 pour béton témoin et 1%, 1.5%, 1.75%, 2% pour les bétons BAP1, BAP2, BAP3, BAP4 respectivement) au-delà duquel le superplastifiant n'influe plus sur l'écoulement. Et cela peut s'expliquer par l'effet dispersant du TEMPO 544 qui s'adsorbe sur les surfaces des grains du ciment et par la suite neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain du ciment.

Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules. Il résulte une dispersion des grains du ciment les uns aux autres. Cette dispersion des grains du ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la fluidité de la pâte du ciment en évitant l'agglomération.

- On remarque que plus le pourcentage de déchet de brique réfractaire augmente plus la viscosité et le seuil de cisaillement augmente, et ceci est dû à la finesse élevée de ce déchet de brique ($4500 \text{ cm}^2/\text{g}$), on prend en compte aussi que dans nos échantillons nous avons ajouté les quantités de déchet de brique au ciment, avec un rapport E/C fixe (0.4).

Donc le déchet de brique réfractaire va absorber une grande quantité d'eau, ce qui va augmenter la viscosité ainsi que le seuil de cisaillement. Alors on peut dire que le déchet de brique réfractaire n'a aucun effet dispersant sur notre béton par contre il a un effet majeur pour l'assurance d'un béton très compact, ce qui nécessite l'augmentation du pourcentage de superplastifiant lors de l'augmentation de pourcentage de l'ajout cimentaire finement broyer.

La viscosité de la pâte se stabilise à une concentration du superplastifiant. On peut donner une explication pour cette stabilité par la dispersion totale des grains du ciment. Ce pourcentage de superplastifiant (s'appelle le dosage critique, au-delà duquel toute addition de l'adjuvant n'améliore plus la rhéologie de la pâte du ciment).

Ce dosage particulier est appelé dosage au point de saturation. Passé ce taux, on voit très rapidement se développer de la ségrégation, du ressuage et un retard de durcissement.

IV.2 Formulation de la composition des bétons

Dans notre formulation on a opté pour une méthode qui est « la méthode japonaise » cette dernière est utilisée afin de calculer la quantité de chaque constituant.

Pour cela nous avons réalisés 5 formulations différentes dans le but de valoriser ce déchet utilisé comme filler.

IV.2.1 Calcul de la composition du BAP selon la méthode Japonaise

Les recommandations pour chaque constituant sont données ci-dessous :

- Volume de graviers est limité en prenant le rapport G/S proche de 1
- La masse de ciment : MC = 300 à 450 Kg/m³ de béton.
- La masse de déchets de brique réfractaire : 10%, 20%, 30%, 40% de la masse du ciment
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation

IV.2.2 Formulation de BAP à base de déchet de brique réfractaire et de Sika Tempo 544.

❖ Les données de base

On a choisi :

- ✓ G/S = 1
- ✓ On fixe le rapport E/ L à 0,4
- ✓ On prend 10% de déchet de la brique réfractaire par rapport au poids de liant (C+F).
- ✓ On prend le dosage de superplastifiants est le dosage de point de saturation
- ✓ Pour ViscocreteTEMPO 544: 1%, par rapport au poids de liant (C+F).

IV.2.3 Optimisation de la composition du BAP

- MC = 400 Kg/m³
 - F = 40 Kg/m³
 - G/S = 1
 - E/L = 0,4
- $$E / (C + F) = 0.4 \longrightarrow E = 0.4 \times (400 + 40)$$

E = 176 l/m³

- **La masse de Sp est de 1% du poids de liant**

$$L = 440 \text{ Kg}$$

$$SP = 0.01 * (400 + 40) = 4.4 \text{ Kg/m}^3$$

L'extrait sec des superplastifiants Tempo 544 est de 32%

Donc la quantité d'eau provient de superplastifiants est de $0.68 * 4.4 = 2,992 \text{ l}$

D'où la quantité d'eau utilisée pour 1 m^3 est de $173,0079 \text{ l/m}^3$

Volume de SP est :

$$V = m / Mv$$

$$V_{Sp} = 4.11 \text{ L/m}^3$$

- **Volume de la pâte (VP): on le détermine**

$$VP = VC + VF + VE + VSp$$

$$VP = 128.20 + 13.1 + 173.21 + 4.11 = 319 \text{ l/m}^3$$

$$VP = 319 \text{ l/m}^3$$

IV.2.4 Détermination des volumes des granulats (Sables et Gravier)

On a :

Volume de la pâte, $VP = 319 \text{ l/m}^3$ → Volume des granulats secs, $VG = 68 \text{ l/m}^3$

On détermine le volume des sables

$$G + S = 681 \text{ l/m}^3$$

$$G = 681 - S$$

$$G/S = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} G = 681 - S \\ G/S = 1 \end{array} \right\} S = 681 / 2 = 340.5 \text{ l/m}^3$$

$$VS = 340.5 \text{ l/m}^3$$

On détermine le volume des graviers

$$G = 681 - 340.5 = 340.5 \text{ l/m}^3$$

$$VG = 340.5 \text{ l/m}^3$$

IV.2.4.1 Les volumes de chaque granulat pour 1m³

Pour les sables

MF souhaité = 2.5

MF s (0/4) = 3.04

MFs (0/1) = 1.3

Sable 0/4 S = $\frac{MF\text{ souhaité} - MFs(0/1)}{MFs(0/4) - MF(0/1)}$

S = 0.68

Sable (0/4) : 68%

Sable (0/1) : 32%

$$V_s(0/4) = 231,54 \text{ l/m}^3$$

$$V_s(0/1) = 108.96 \text{ l/m}^3$$

➤ Pour les graviers

On prend la moitié pour chaque gravier :

$$VG_{3/8} = \frac{1}{2} G = 170.25 \text{ l/m}^3$$

$$VG_{3/8} = 170.25 \text{ l/m}^3$$

$$VG_{8/15} = \frac{1}{2} G = 170.25 \text{ l/m}^3$$

$$VG_{8/15} = 170.25 \text{ l/m}^3$$

IV.2.4.2 Les masses de chaque granulat

➤ Pour les sables

$$M_s(0/4) = 514.01 \text{ kg /m}^3$$

$$M_s(0/1) = 272.4 \text{ kg /m}^3$$

➤ Pour les graviers

$$MG_{3/8} = \frac{1}{2} G = 452,86 \text{ Kg/m}^3$$

$$MG_{3/8} = 452.86 \text{ Kg/m}^3$$

$$MG_{8/15} = \frac{1}{2} G = 457.97 \text{ Kg/m}^3$$

$$MG_{8/15} = 457.97 \text{ Kg/m}^3$$

- **Remarque**

Pour les autres formulations avec le superplastifiant SIKA Viscocrete TEMPO 544, et la variation des pourcentages de déchet de brique réfractaire 20%,30%,40% et 0% pour le béton témoin, on doit calculer le volume de la pâte, car chaque formulation à un dosage spécifique de superplastifiant et aussi un pourcentage spécifique de déchet de brique.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux ci-dessous:

Constituants	Quantité	Unités
Ciment	400	kg/m ³
Déchet de brique	40	kg/m ³
Sable grossier	514.01	kg/m ³
Sable fin	272.4	kg/m ³
Gravier 3/8	452.86	kg/m ³
Gravier 8/15	457.97	kg/m ³
Superplastifiant	4.11	l/m ³
Eau	173.21	l/m ³

Tableau IV.17 1^{ère} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 10% de déchet de brique.

Constituants	Quantité	Unités
Ciment	400	kg/m ³
Déchet de brique	/	kg/m ³
Sable grossier	536.46	kg/m ³
Sable fin	284.17	kg/m ³
Gravier 3/8	472.44	kg/m ³
Gravier 8/15	477.77	kg/m ³
Superplastifiant	1.869	l/m ³
Eau	158.64	l/m ³

Tableau IV.18 2^{ème} composition du BAP à base de Tempo 544 (béton témoin).

Constituants	Quantité	Unités
Ciment	400	kg/m ³
Déchet de brique	80	kg/m ³
Sable grossier	491.30	kg/m ³
Sable fin	260.35	kg/m ³
Gravier 3/8	432.86	kg/m ³
Gravier 8/15	437.74	kg/m ³
Superplastifiant	4.52	l/m ³
Eau	188.92	l/m ³

Tableau IV.19 : 3^{ème} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 20% de déchet de brique.

Constituants	Quantité	Unités
Ciment	400	kg/m ³
Déchet de brique	120	kg/m ³
Sable grossier	469.48	kg/m ³
Sable fin	248.8	kg/m ³
Gravier 3/8	413.63	kg/m ³
Gravier 8/15	418.29	kg/m ³
Superplastifiant	5.68.	l/m ³
Eau	204,13	l/m ³

Tableau IV.20 : 4^{ème} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 30% de déchet de brique

Constituants	Quantité	Unités
Ciment	400	kg/m ³
Déchet de brique	120	kg/m ³
Sable grossier	491.30	kg/m ³
Sable fin	260.35	kg/m ³
Gravier 3/8	432.86	kg/m ³
Gravier 8/15	437.74	kg/m ³
Superplastifiant	6.54	l/m ³
Eau	219.55	l/m ³

Tableau IV.21 : 5^{ème} Composition du BAP à base de Tempo 544 et 40% de déchet de brique

IV.3 Caractéristiques des bétons :

IV.3.1 A l'état frais :



Figure IV.14 : Essai d'étalement



Figure IV.15 : Essai de boîte en L



Figure IV. 16 : Essai de stabilité au tamis

Essais	Résultats	Unités
Etalement au cône d'Abrams	61	Cm
Boîte en L : H2/H1	0.73	/
Stabilité au tamis	4.1	%

Tableau IV.22 : Essais sur béton témoin à base de TEMPO 544:

Essais	Résultats	Unités
Etalement au cône d'Abrams	67	Cm
Boite en L : H2/H1	0.88	/
Stabilité au tamis	6.4	%

Tableau IV. 23 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 10% de brique réfractaire.

Essais	Résultats	Unités
Etalement au cône d'Abrams	70	Cm
Boite en L : H2/H1	0.91	/
Stabilité au tamis	7.4	%

Tableau IV.24 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 20% de brique réfractaire.

Essais	Résultats	Unités
Etalement au cône d'Abrams	72	Cm
Boite en L : H2/H1	0.95	/
Stabilité au tamis	8.6	%

Tableau IV.25 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 30% de brique réfractaire.

Essais	Résultats	Unités
Etalement au cône d'Abrams	74	Cm
Boite en L : H2/H1	0.97	/
Stabilité au tamis	9.9	%

Tableau IV.26 : Essais sur béton à base de TEMPO 544 et 40% de brique réfractaire

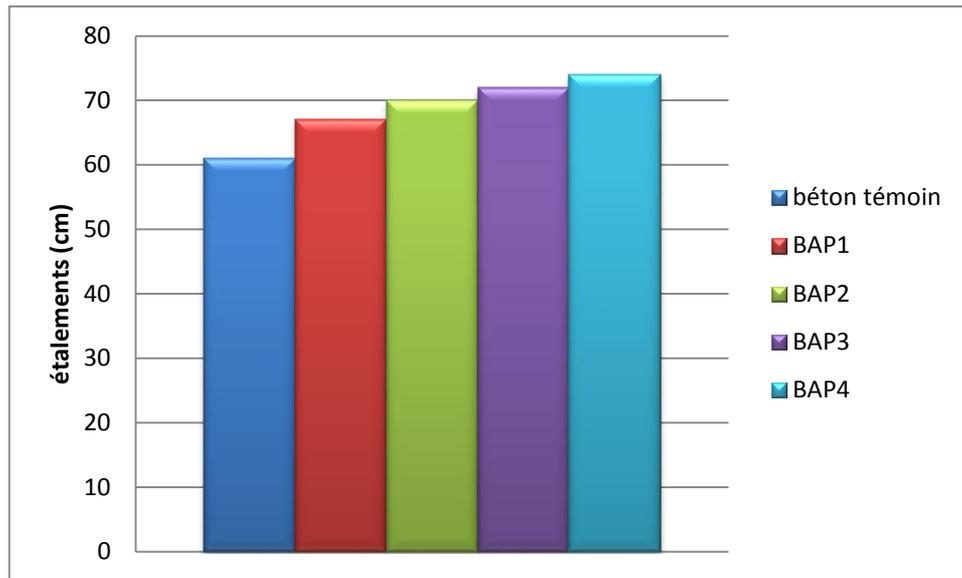


Figure IV.17 Etalement (cône d'abrams)

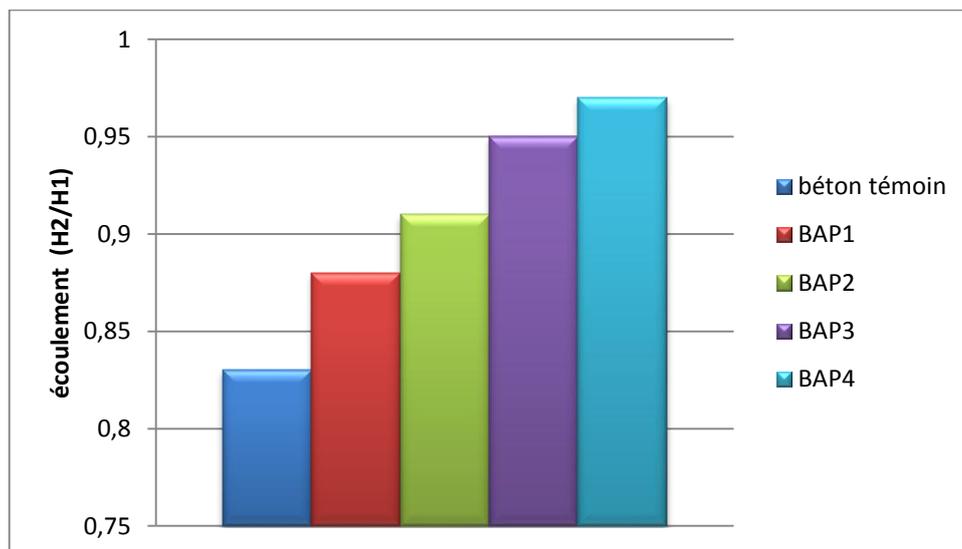


Figure IV.18 Ecoulement (boîte en L).

➤ Exigence prescrites par L'AFGC pour les essais a l'état frais

CLASSE	ETALEMENT en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	750à 850

Tableau IV.27 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai d'étalement.

CLASSE	TAUX DE REMPLISSAGE
PL1	≥ 0.80 avec 2 armateurs
PL2	≥ 0.80 avec 3 armateurs

Tableau IV.28 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai de boite en L (L Box).

	POURCENTAGE DE LAITENCE
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Tableau IV.29 : Exigence prescrites par L'AFGC pour l'essai de stabilité au tamis.

Interprétation

D'après les résultats des essais sur béton frais, tels que la boite en L, l'étalement et la stabilité au tamis, on constate que :

- **Étalement**

Les différents BAP respectent l'intervalle recommandé pour l'essai d'étalement qui est compris entre 60 et 75 cm.

L'étalement des différentes compositions de BAP augmente par rapport aux dosages de déchets de brique réfractaire, et l'effet de superplastifiant.

- **Boite en L**

La boite en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Les valeurs obtenues par les essais de boite en L pour les compositions de BAP sont toutes supérieures à 80 % par rapport au béton témoin (73%), donc on peut dire que les valeurs pour les BAP sont conformes.

- **Stabilité au tamis**

L'essai de stabilité au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique, descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère. De plus par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire, soit dans les 15 minutes après le gâchage.

Tous nos bétons ont présentés une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP, soit inférieure à 15% pour tous les BAP validés.

Pour toutes les compositions des BAP, une laitance $P < 15\%$, stabilité satisfaisante, béton homogène et stable.

- Les bétons autoplaçants formulés par la méthode japonaise à base de TEMPO 544 donnent de bons résultats à l'état frais conformes aux exigences prescrites par l'AFGC. Ces excellentes propriétés sont dues à l'efficacité de TEMPO 544 qui facilite la défloculation et la dispersion des grains du ciment par les forces de répulsion qui sont directement liées à l'adsorption de ce dernier à la surface des particules en évitant l'agglomération.

IV.3.2 Conservation des éprouvettes

On entend par la cure du béton, tout procédé susceptible de maintenir une humidité et une température favorable à l'hydratation du ciment, durant une période bien définie (7j, 28j). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telle que la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression, ...ainsi Il faut murir un béton pour deux raison essentielles : pour hydrater le plus possible de grains de ciment, pour minimiser le retrait ainsi que la fissuration. Les fissures sont préjudiciables à la durabilité des ouvrages en bétons parce qu'elles peuvent faciliter la pénétration d'agents agressifs



Figure IV.19 : Conservation des éprouvettes dans le bassin.

IV.3.3 Essai à l'état durci

- Résistances mécaniques



Figure IV.20 : Essai de la résistance à la compression

Ages	7 jours	28jours
Compression (MPa)	28.59	39.23
Traction par fendage (MPa)	/	2.80

Tableau IV.30 : Résistances mécaniques du Béton témoin à base de Tempo 544

Ages	7 jours	28jours
Compression (MPa)	41.26	56.46
Traction par fendage (MPa)	/	3.54

Tableau IV.31 : Résistances mécaniques du BAP à base de Tempo 544 et 10% de brique réfractaire.

Ages	7 jours	28jours
Compression (MPa)	43.11	62.41
Traction par fendage (MPa)	/	3.75

Tableau IV.32 : Résistances mécaniques du BAP à base de Tempo 544 et 20% de brique réfractaire.

Ages	7 jours	28jours
Compression (MPa)	45.87	64.56
Traction par fendage (MPa)	/	4.01

Tableau IV.33 : Résistances mécaniques du BAP à base de Tempo 544 et 30% de brique réfractaire.

Ages	7 jours	28jours
Compression (MPa)	48.35	72.61
Traction par fendage (MPa)	/	4.18

Tableau IV.34 : Résistances mécaniques du BAP à base de Tempo 544 et 40% de brique réfractaire

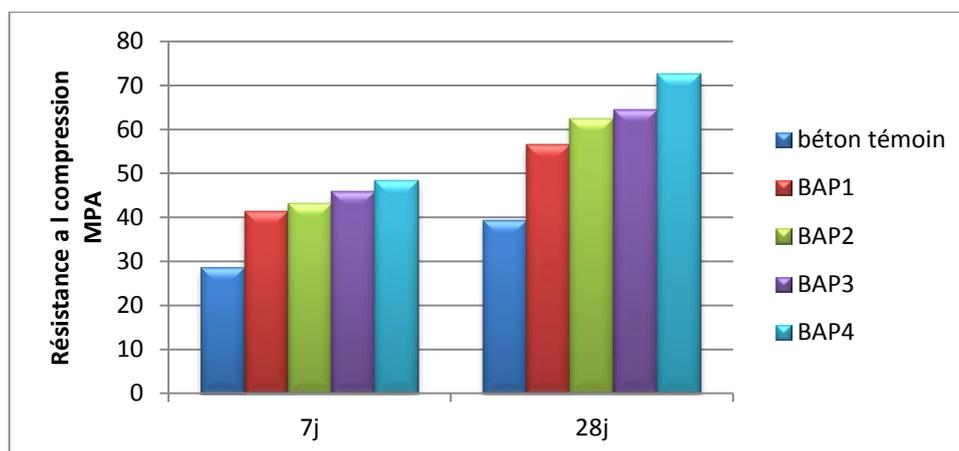


Figure IV.21 : Résistances à la compression des BAP à base de déchet de brique réfractaire

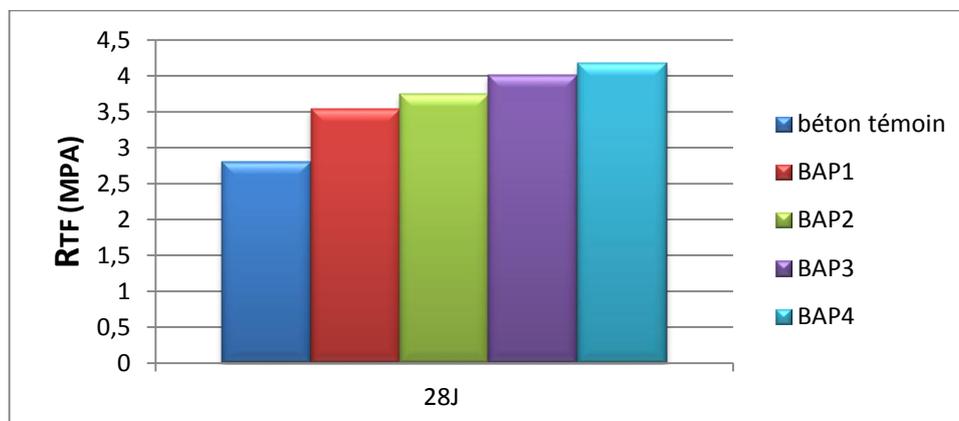


Figure III.22 : Résistance à la traction par fendage des BAP à base de déchet de brique réfractaire.

Interprétation des résultats

On remarque que les différents BAP à base de déchet de brique réfractaire ont des résistances mécaniques plus élevées par rapport au béton témoin.

Les figures **IV.21** et **IV.22** présentent l'évolution des résistances mécaniques à la compression et la traction par fendage des différents BAP ainsi que le béton témoin.

D'après les histogrammes, on constate une augmentation des résistances mécaniques, cette croissance est due en premier lieu au faible rapport (E/C). C'est-à-dire un faible rapport conduit à une faible porosité donc une grande compacité et par conséquent une résistance mécanique élevée.

Non seulement le rapport (E/C) joue un rôle important sur la variation des résistances mécaniques mais aussi les fines particules de déchet de brique réfractaire ont un effet physique, qui comblent les vides dans la matrice et donnent une bonne compacité.

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que l'ajout de déchet de brique réfractaire à haute teneur en alumine (HTA) influe positivement sur le comportement mécanique des bétons autoplaçants, donc il peut être valorisé sur le plan mécanique.

IV.4 Traitement thermique des différentes BAP

Afin de mieux comprendre qu'elle pourrait être l'influence de ces déchets de briques réfractaires sur le comportement thermique des BAP, on a réalisé des essais thermiques en introduisant le béton témoin et le BAP4 (béton ayant donné de bons résultats sur le plan mécanique), afin d'évaluer le comportement de ces bétons vis-à-vis de l'effet thermique. Une analyse par diffraction des rayons x a été effectuée, dans le but de mieux interpréter les résultats obtenus.

IV.4.1 Méthodologie de travail

- On retire les éprouvettes du bassin après conservation dans l'eau pendant 28 jours. (température 20°C).
- Sécher les échantillons avec un chiffon humide puis étuver à une température 100°C à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- on a utilisé des fragments du béton autoplaçant dans le four afin de diminuer le risque d'endommagement du four on cas d'un éclatement brusque.
- Ensuite les échantillons sont soumis à une haute température dans un four.
 - ✓ jusqu'à 600 °C pour béton témoin (0% de brique réfractaire).

- ✓ jusqu'à 1000°C pour BAP4 (40% de brique réfractaire) avec le profile thermique ci-dessous :



Figure IV.23 : Four de laboratoire

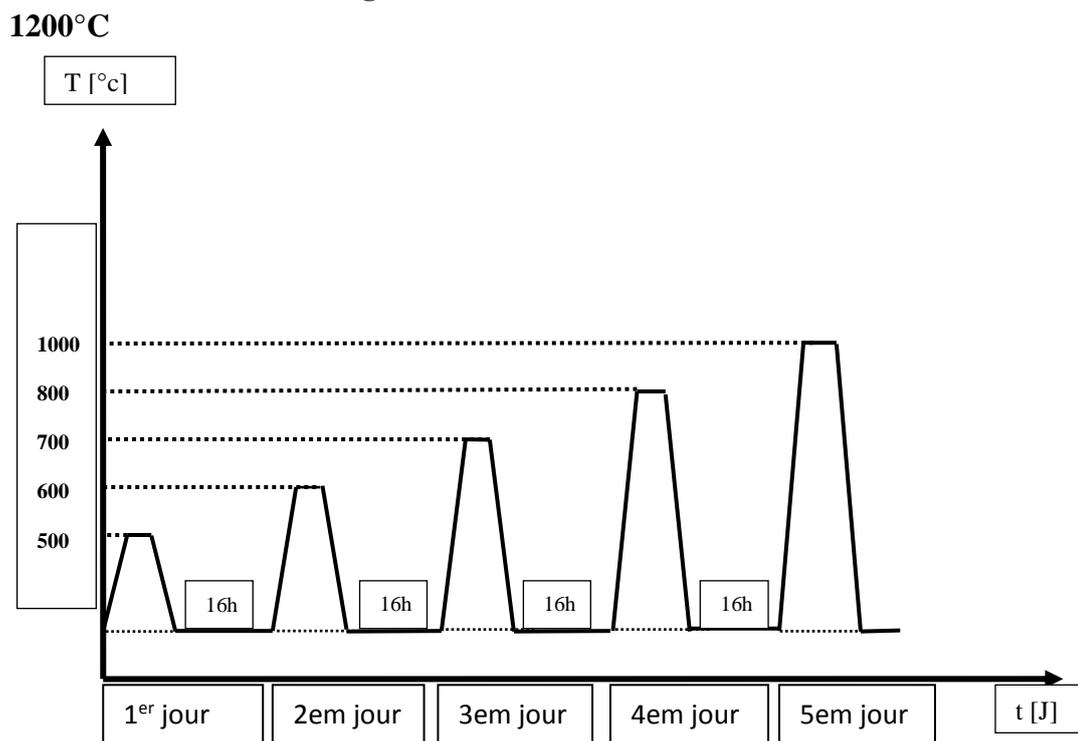


Figure IV.24 : Le cycle thermique subi par les éprouvettes

IV.4.2 Comportement thermique des bétons traités

- le béton témoin ne présente pas de résistance thermique à haute température, et il a subi une détérioration à 500°C (un éclatement) comme le montre la figure IV.25 :



Figure IV.25 : Échantillon béton témoin ayant subi un traitement thermique à 500°C (éclatement)

- le béton autoplaçant à 40% de déchet de brique réfractaire (BAP4) a une bonne stabilité thermique par rapport au béton témoin, il a pu résister même en arrivant à une température de 1000°C comme le montre la figure **IV.26** :



Figure IV.26 : Echantillon BAP4 (40%DBR) ayant subi un traitement thermique a 1000°c

IV.4.3 Analyse par diffractométrie des rayons X

Des analyses par diffraction en rayons X ont été effectuées afin d'identifier les nouvelles phases cristallines formées après chauffage.

Les analyses des spectres de diffraction des échantillons de béton autoplaçant à 40% de déchet de brique réfractaire (BAP4) prélevé avant et après traitement thermique sont présentées dans les figures **VI.27 et VI.28** :

Interprétation des analyses par diffractométrie des rayons X

L'analyse minéralogique qualitative par diffractométrie des rayons X d'échantillons prélevé de béton autolaçant à 40 % de déchet de brique réfractaire a permis de relever les points suivants :

- 1- Après chauffage, l'apparition d'un grand pic de quartz qui résiste à des températures allant jusqu'à 1600°C.
- 2- Transformation de la calcite en aragonite, ce composé appartient à la famille des carbonates de formule CaCO_3 qui a un système cristallin typique (orthorhombique), ce composé aussi est très probablement le résultat de la transformation des granulats calcaires à des hautes températures.

Conclusion générale

Contrairement aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides en écoulement qui se mettent en place, sous l'effet de leur propre poids, sans vibrations internes ou externes. Cependant les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux, et de construire des éléments à géométries complexes ou fortement ferraillés et également de réduire les nuisances sonores et la pénibilité du travail qu'ils nécessitent.

Notre travail pratique nous a permis d'étudier l'influence de l'ajout filler de déchet de brique réfractaire et le superplastifiant (TEMPO 544) sur la formulation, les propriétés rhéologiques, mécaniques et thermiques des BAP.

On peut dire que :

L'utilisation de la méthode JAPONAISE pour la formulation des BAP s'est avérée très efficace pour l'obtention de bonnes propriétés rhéologiques (écoulement) et mécaniques avec des constituants locaux.

L'incorporation du superplastifiant TEMPO 544 permet l'obtention d'excellentes propriétés rhéologiques ainsi que l'obtention des résistances mécaniques importantes à jeune âge avec un rapport (E/L) faible (0.4).

L'emploi de déchet de brique réfractaire (ajout cimentaire) dans les BAP a permis également d'améliorer les résistances du béton, grâce à sa grande finesse qui contribue à une grande compacité.

Les résistances mécaniques du BAP varient en fonction de la densité du déchet de brique réfractaire. Donc plus ce dernier est dense, plus les performances mécaniques du BAP augmentent.

Les déchets de briques réfractaires finement broyées conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, conduites de fumées, sols d'usines sidérurgiques, parties de fours,...

En général, il est possible d'exploiter les bétons à base de déchets de briques réfractaires HTA dépassant la température de 1000°C.

Cette étude a plusieurs objectifs :

- 1- Economique : amélioration des performances des bétons avec une diminution du dosage en quantité du clinker.
- 2- Ecologique : recyclage de déchets de briques réfractaires et diminution de la quantité de CO₂ dégagée dans l'atmosphère.
- 3- Technico-mécanique : amélioration des propriétés physico-mécaniques et thermiques de ces bétons.

Pour compléter cette étude, il est recommandé de faire une analyse ATD-ATG à une température allant jusqu'à 1500 C° avec une vitesse lente de 5 C°/Min afin de faire apparaître les différentes transitions endothermiques et exothermiques qui peuvent être mises en jeu.

1. Essais sur ciment

1.1 Mesure de la surface spécifique Blaine « EN 196-6 / NF P 15-476 »

▪ Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement broyée. Cette finesse est une caractéristique importante, lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique, c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre, l'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

▪ Principe de l'essai

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre. La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est longue. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à racine t.

▪ Equipement nécessaire

- Un appareil appelé Perméabilimètre de Blaine.
- Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester
- Un manomètre constitué d'un tube en verre de forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère ;
- La cellule est équipée d'une grille dans sa partie inférieure ;
- Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini ;
- Une balance précise à 0.2 s après ;
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule ;
- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée ;
- Un thermomètre précis à 0.1 °C près pour mesurer température de l'air



Figure 1.1 : Perméabilimètre de Blaine.

▪ **Conduite de l'essai selon NF EN 196- 6**

- Afin de déterminer la SSB la masse spécifique doit être déterminée eu préalable.
- Calculer la masse à peser (m) du lit du ciment :

$$m = \rho (1-e) v$$

D'où :

- ρ : étant la masse spécifique préalablement déterminée.
 - V : étant le volume cellulaire.
 - e : étant la porosité du ciment ($e= 0,5$).
- Etuver l'échantillon à une température comprise entre 80 et 100°C, puis le refroidir dans un dessiccateur jusqu'à la température ambiante.
- Agiter l'échantillon dans un pilulier fermé pour l'homogénéisation de ce dernier.
 - Préparer la cellule en disposant le disque métallique perforé sur l'épaule de cette dernière.
 - Placer un deuxième disque de papier filtre sur le ciment.
 - Insérer le piston plongeur jusqu'au contact avec le papier filtre, le presser jusqu'à ce que la face intérieure de son épaulement soit en contact avec la cellule.
 - Retirer le piston lentement.
 - Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet de manomètre après l'avoir préalablement graissé.
 - En ouvrant le robinet d'arrêt et de la poire, aspirer le liquide manométrique jusqu'au repère supérieure, fermer le robinet d'arrêt.
 - Chronométrer le temps nécessaire au liquide pour passer du deuxième au troisième repère.

- Enregistrer deux temps pour le même lit.
- Répéter un deuxième essai pour le même échantillon.

La SSB est calculée par la formule suivante :

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3 T}}{P(1-e)\sqrt{\eta}}$$

D'où :

- K : est la constante de l'appareil $K= 19,830$
- e : est la porosité de la couche tassée $e=0,5$ (en moyenne).
- P : est la masse volumique absolue du ciment.
- t : est le temps en secondes.
- μ : est la viscosité de l'air. $\mu = 0,0001798$.
- La surface Blaine des ciments varie de 3100 à 6000 cm^2/g .

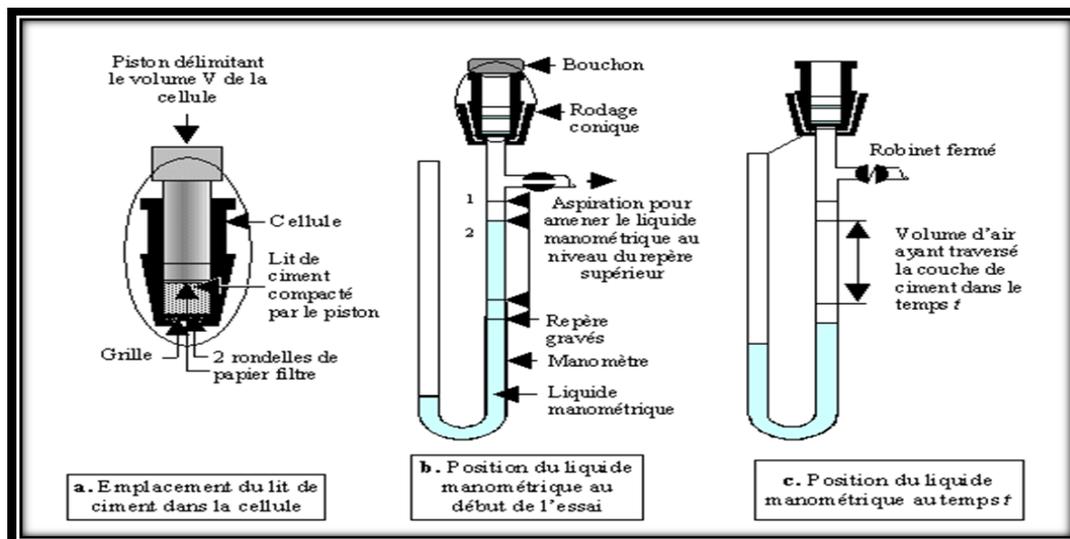


Figure 1.2 : La surface spécifique de Blain.

1.2 Masse volumique

On utilise un pycnomètre afin de travailler à volume constant. Le liquide utilisé est non réactif avec le ciment : toluène, cyclohexane

La masse volumique des ciments varie de 2,85 à 3,21 g/cm^3

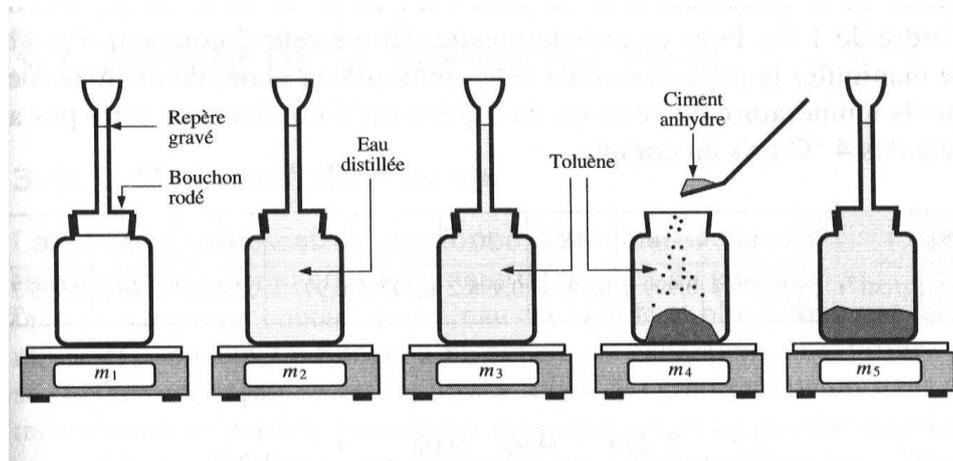


Figure 1.3 : Détermination de la masse volumique de ciment.

1.3 Mesure de la consistance normale (NF EN196-3)

▪ Définition

La consistance normale est la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention d'une pâte normale, elle est déterminée avec l'appareil de VICAT.

On dit que la pâte est normale si l'épaisseur de la pâte restant entre l'extrémité inférieure de la sonde et le fond du moule quand celle-ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids est de 6 ± 1 mm.

▪ Mode opératoire

- Peser 500g de ciment.
- Verser la quantité nécessaire d'eau dans le récipient du malaxeur et mettre en marche avec une faible vitesse.
- Verser peu à peu le ciment, la durée de cette opération doit être égale à 30 secs.
- Malaxer le mélange pendant 2 minutes avec la vitesse rapide.
- Après le malaxage, remplir immédiatement le moule tronconique et araser la surface avec une plaque métallique.
- Mettre le moule tronconique sous l'appareil de Vicat

Et laisser descendre la sonde jusqu'à ce qu'elle soit en contact

Avec la pâte, en suite a bondonner la, sous vitesse initial.

Si l'épaisseur de la pâte restant entre l'extrémité inférieure

De la sonde et le fond du moule, quand celle-ci a cessé de s'enfoncer

Sous son propre poids et de 5 à 7mm, on dit que notre pâte est normale,

Si non on répète la mesure on change la quantité d'eau.

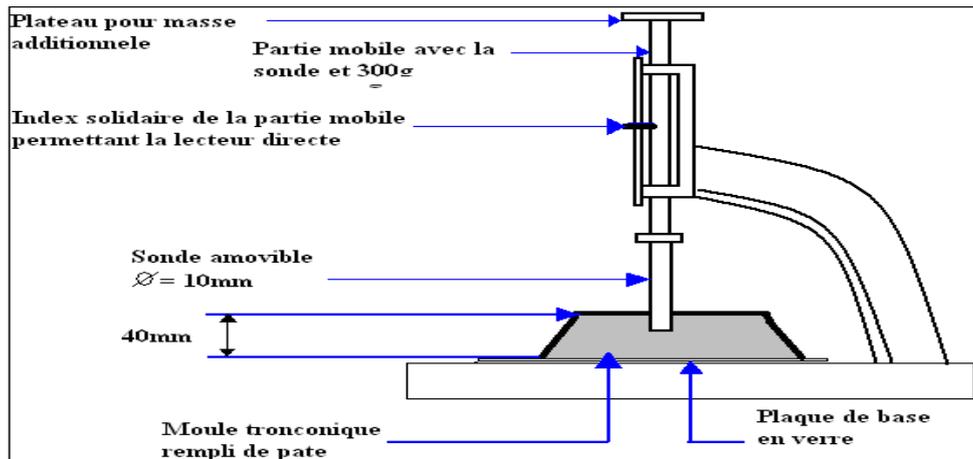


Figure 1.4 : Détermination de la consistance normale du ciment.

1.4 Temps de prise (EN 196-3 / NF P 15-473)

▪ La prise

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité, c'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

- ✓ **Début de prise** : c'est le temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre pas jusqu'au fond du moule de 1mm près.
- ✓ **Fin de prise** : c'est le temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille s'enfonce dans la pâte de 1mm près.

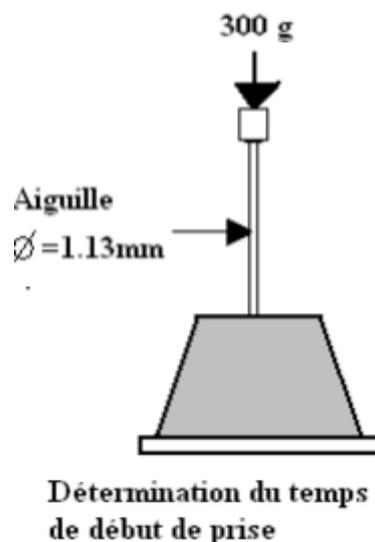


Figure 1.5 : Déterminations du temps de prise

2. Essais sur granulats

2.1 La masse volumique NF EN 1097-3(Avril.1998)-NF EN 1097-6

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue deux types :

- La masse volumique absolue.
- La masse volumique apparente.

▪ Masse volumique apparente

La mesure de la masse volumique apparente consiste à verser le matériau pulvérulent à l'état sec en le disposant sans tasser par couches horizontales, dans un récipient de volume connu. L'excès est à raser, à l'aide d'une règle, la masse volumique apparente est alors donnée par la formule suivante :

▪ Mode opératoire

1. Peser le récipient vide M_0
2. Verser granulat au travers de l'entonnoir jusqu'à refus
3. Araser et peser M_1
4. La masse de granulat est $M_1 - M_0$

$$M_{vapp} = \frac{M}{V} ; g / cm^3$$



Figure 2.1 : Détermination de M_v apparente

Avec :

M : masse de l'échantillon est $M_1 - M_0$ en g.

V : volume de récipient en cm^3 .

▪ Masse volumique absolue

La méthode utilisée est celle du densimètre de Le Chatelier, qui consiste à :

- le densimètre jusqu'au niveau «0» avec du benzène.
- Remplir Y verser une masse (M) de 64 g de l'échantillon.
- Lire directement le volume absolu, (V_{abs}).

La masse volumique absolue sera donnée par :

$$M_{\text{vabs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}}; \text{g} / \text{cm}^3$$

2.2 L'analyse granulométrique (NF P 18-560 Sep -1990)

▪ Le but de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers, à noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

▪ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



Figure 2.2 Colonne de tamis.

- Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes :

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

Tableau 2.1 : Dimensions nominales des tamis.

- **Module de finesse** (Norme NF P 18 – 304)

Le module de finesse d'un sable est égal au 1 / 100e 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.

- **Mesure du coefficient d'absorption des granulats** (NF P 18-555)

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

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

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} 100$$

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.

M_a : masse de l'échantillon imbibé.

2.3 Equivalent de sable

- **Principe de l'essai**

L'essai est fait sur un « sable », on utilise que la fonction des granulats qui traverse le tamis de 5mm. Laver l'échantillon, dans des conditions normalisées, et laisser repasser. Après le temps prescrit, mesurer figure 03 :

- La hauteur h_1 sable propre + éléments fins.
- La hauteur h_2 sable propre seulement. Par définition, l'équivalent de sable est :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100.$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) et ES (équivalent de sable au piston).

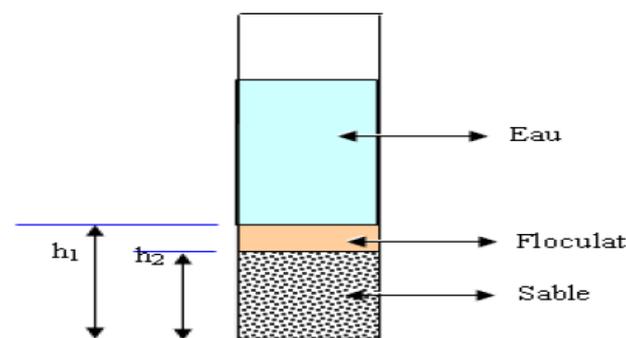


Figure 2.3 : Essais équivalents de sable.

▪ Produits utilisés pour le lavage du sable lors de l'essai

Composition (pour 1L solution) :

- 111 ± 1g de chlorure de calcium.
- 480 ± 5g de glycérine.
- 12 à 13g de solution aqueuse de formaldéhyde.

▪ Solution lavant

Verser 125 cm³ de solution dans un récipient, et compléter à 5L avec de l'eau. Avec de l'eau totale, cette solution ne peut être conservée plus de 2 à 4 semaines.

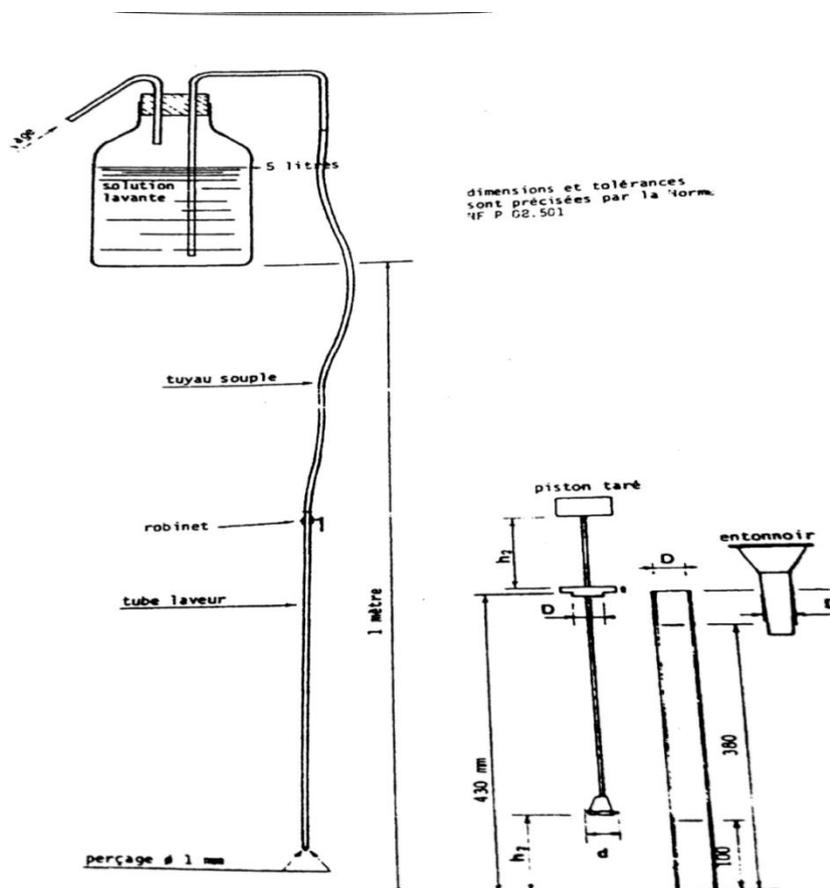


Figure 2.4 : les composants de l'essai équivalent du sable

▪ Mode opératoire

Le matériel et le sable tamisé sont supposés préparés :

- Solution lavant dans une bonbonne de 5l à 1m au-dessus du font éprouvettes.
- Dispositif si phonique amorcé, et relié au tube laveur.
- Deux éprouvettes propres (on prendra la moyenne de deux résultats).

L'ensemble du processus est schématisé (figure 04).

1- Emplir les éprouvettes jusqu'au 1^{er} trait.

2- Verser la quantité de sable voulue.

3- Eliminer les bulles d'air (frapper contre la paume de la main). Laisser reposer 10mn.

4- Boucher les éprouvette, et les agiter : mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal, 20cm d'amplitude, 90 allers et retour en 30s. Cette agitation est confiée à une machine, qui peut être électrique (elle s'arrête d'elle-même après 90 cycles) ou manuelle (moins chère, moins lourde, ne nécessitant pas de courant électrique ; un chronomètre permet d'obtenir un mouvement régulier).

5- laver et remplir les éprouvettes, avec le tube laveur.

- Rincer le bouchon, au-dessus de l'éprouvette.
- Faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette.
- Laver le sable, pour cela, descendre et remonter lentement le tube laveur, que l'on tourne entre les doigts, dans la masse du sable ; on fait ainsi remonter les particules fines.
- Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.

6- laissé reposer 20mn. Eviter toute vibration. Tolérance faible : $\pm 10s$; car la hauteur du floculat dépend de la durée du repos.

7- Mesurer a vue h_1 et $2h'$

La mesure de $2h'$ n'est pas toujours aisée. ESV, qui en résulte, est donc entaché d'incertitude. Ce qui conduit à faire la mesure plus précise suivante :

8- descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser au contact du sable. Mesurer. $2h'$

9- noter la température.

- Bien entendu, ces opérations sont identiques pour les deux éprouvettes.

Précision des mesures.

- h_1, h_2 , le millimètre le plus proche $2h'$.
- Température : le degré le plus proche.

2.4 Mesurer le coefficient d'aplatissement des granulats Norme NF P18-561

▪ But de l'essai

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser un

béton très compact, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

▪ **Appareillage**

Une série de tamis normalisés à mailles.

Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées.

▪ **Mode opératoire**

1. Tamiser l'échantillon sur un tamis de 4 mm ;
2. Peser la masse du refus M0 en g ;
3. Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis ci-dessous ;
4. Noter les poids des refus de chaque classe granulaire Mg en g ;
5. Procéder au tamisage de chaque classe granulaire sur la grille correspondante ci-dessous et noter les tamisât Me en g ;

Le coefficient d'aplatissement A est donné par : $A(\%) = \frac{\sum Me}{M} \cdot 100$

2.5 Essai de los Angeles

▪ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'élément inférieur à 1.6mm produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machines los Angeles. La granularité de matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires

4-6.3mm, 6.3-10mm, 10-25mm, 16-31mm, 25-50mm, la granularité du matériau tel qu'il sera mise en œuvre. La classe 10-25mm contient 60% de 10-16mm, la classe 16-31mm contient 60% de 16-25mm, et la classe 25-50mm contient 60% de 25-40mm.

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieur à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par $100 \frac{M-m}{M}$

Cette quantité est appelée le coefficient los Angeles de matériau (**LA**).

▪ **Préparation de l'échantillon**

- Tamier l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante.
- La masse de l'échantillon pour l'essai sera de $5000g \pm 5g$.

▪ **Mode opératoire**

Introduire avec précaution la charge de boulet correspondant à la classe granulaire choisie puis l'échantillon pour l'essai.

- Faire effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière 30 à 33 tr/min.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- Laver le refus au tamis de 1.6mm, égoutter et sécher à 105C° jusqu'à une masse constante.
- Peser ce refus une fois sécher, soit m1 le résultat de la peser.

▪ **Expression des résultats**

Le coefficient Los Angeles (LA) est par définition le rapport : $\frac{m}{5000} \times 100$

Ou :

$$m = 5000 - m1.$$

m est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm en gramme.



Figure 2.5 : Essai de los Angeles.

2.6 Essai Micro Deval

▪ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à introduire un échantillon en présence d'une charge abrasive dans des cylindres en rotation pour mesurer à la fin l'usure des granulats ou la friabilité des sables.

▪ **Préparation de l'échantillon**

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des trois classes granulaires types.

Pour effectuer un essai sec ou un essai en présence de l'eau :

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera de 500g ± 2g.

▪ **Mode opératoire**

- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive puis les 500 g de matériau préparé. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 – 6.3	2000 ± 5g
6.3 – 10	4000 ± 5g
10 – 14	5000 ± 5g

Pour effectuer un essai en présence d'eau on ajoutera 2.5litre.

- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant 2 heures ou 12000 tr ou pendant 15 minutes pour les sables.
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement l'intérieur de cylindre.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- Sécher le refus à 1.6mm à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près ; soit m_0 le résultat de la pesée.

▪ **Expression des résultats**

Le coefficient Micro Deval est par définition le rapport :

$$\frac{m}{500} \times 100$$

Où :

$m = 500 - m_0$: est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm.

On a donc : le coefficient Micro Deval (MDE) = $\frac{500-m_0}{500} \times 100$.



Figure 2.6 : Essai micro deval.

3. Essais rhéologiques sur béton frais

3.1 Essai d'étalement (cône d'Abrams)

- **But de l'essai**

L'essai d'étalement au cône permet de mesurer la consistance d'un béton.

- **Appareillage**

- **Table d'étalement**

Table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900mm de côté, qui est destiné à recevoir le béton. Le plateau de la table d'étalement doit être recouvert d'une plaque en acier inoxydable, d'une épaisseur minimale de 2mm, non attaquable par la pâte de ciment. Le plateau doit être conçu de façon à éviter toute déformation de la plaque en inox. Le centre de la table doit être marqué de deux cercles concentriques centrés de (210 ± 1) mm et de (500 ± 1) mm de diamètre.

- **Cône d'ABRAMS**

Moule en métal non directement attaquable par la pâte de ciment, d'une épaisseur min. de 1,5mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités telles que des protubérances de rivets et sans déformations locales. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :

- Diamètre de la base : (200 ± 2) mm ;
- Diamètre du haut : (100 ± 2) mm ;
- Hauteur : (300 ± 2) mm.

Les deux extrémités sont ouvertes, parallèles, et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du cône. Le moule doit être suffisamment lourd ou muni, à sa partie inférieure, de pattes d'appui afin de le rendre immobile durant le remplissage.

- **Entonnoir** En matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'ABRAMS spécifié ci-dessus.
- **Règle** Graduée de 0 à 900 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.
- **Seau** d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.

- **Mode opératoire**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque ainsi que le cône d'Abrams (éliminer l'eau en excès avec le chiffon humide – il y a lieu de ne plus avoir d'eau libre en surface de la plaque et du moule).
- Placer et centrer le cône d'ABRAMS sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif, conformément à la norme NBN-EN 12350-1
- Le prélèvement est réalisé à l'aide d'un seau directement à la goulotte du mixer. S'il y a lieu d'utiliser une brouette, l'échantillon global doit être réhomogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).
- Equiper la partie supérieure du cône de l'entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, à l'aide du seau, jusqu'à l'arase supérieure du cône
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement. L'enlèvement du moule doit se faire, par une remontée verticale régulière sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion, en maximum 5 s. Maintenir le moule au-dessus du béton minimum.

10 s et à une hauteur (par rapport à la base du moule) de maximum 30 cm.

L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 s.

- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) l'étalement.

3.2 Essai de stabilité au tamis

- **But de l'essai**

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

▪ **Appareillage**

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

▪ **Mode opératoire**

Prélever un échantillon de béton représentatif conformément à la norme NBN-EN 12350-1 : 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 ré-homogénéisé à la main écope avant de constituer l'échantillon réduit (remplissage du seau).

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

Le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.

3.3 Essai de la boîte en L

- **But de l'essai**

Le but de cet essai est de vérifier la capacité du BAP à remplir dans un milieu confiné.

- **Appareillage**

- Boîte en L
- Balance
- Truelle
- Règle

- **Mode opératoire**

1. Préparer un échantillon du béton.
2. Verser le béton dans la partie verticale de la boîte.
3. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, forme 3 barres d'armatures \varnothing 14 mm distance de 39 mm.
4. Mesurer la hauteur atteint aux deux extrémités de la partie horizontale (H1 et H2), afin de qualifier sa capacité de remplissage.
Le rapport H2/H1 devrait être supérieur à 0,80.

4. Essais de caractérisation du BAP à l'état durci

4.1 Essai de la Compression

- **Objectif de l'essai**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

- **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

- **Equipement nécessaire**

1. Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester.

2. Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au soufre, ou disque diamanté.



Figure 3.1 : dispositif pour l'essai de la compression.

4.1 Mesure la résistance à la traction (NF P 18-408)

- **Principe de l'essai**

On procède généralement par essai de fendage sur éprouvette cylindrique conformément à la norme

NF P 18-408. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan (figure). Le calcul permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture.

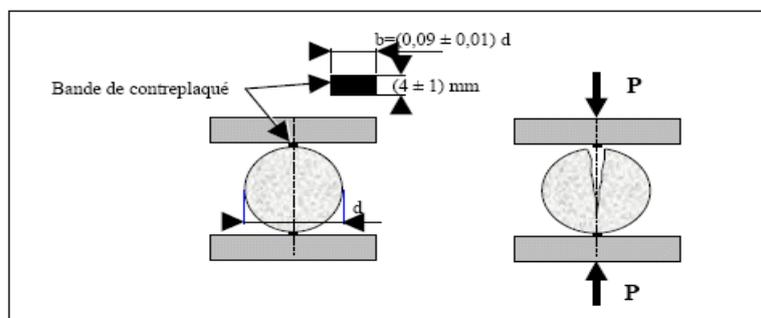


Figure 3.2 : Dispositif pour l'essai de rupture par fendage.

- **Conduite de l'essai**

L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse comme indiqué sur la figure, le contact entre les plateaux et l'éprouvette se faisant par l'intermédiaire des deux bandes de contreplaqué. Le centrage de l'éprouvette doit se faire à 0,5mm près à l'aide d'un gabarit de centrage.

La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 1,94 kN/s \pm 0,39kN/s pour les cylindres 11 \times 22 et 4,01 kN/s \pm 0,80 kN/s pour les cylindres 16 \times 32 (ce qui correspond à un accroissement de la contrainte de traction de 0,05MPa/s avec une

tolérance de +20%). Si **h** est la hauteur de l'éprouvette, **d** son diamètre et **P** la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut :

$$f_t = 0,637 \frac{P}{dh}$$

Dans la relation ci-dessus **f_t** est directement obtenue en MPa si **P** est exprimée en méga newtons (MN), **d** et **h** en mètres (m). Cette contrainte doit être exprimée à 0,1 MPa près.

Références bibliographiques

- [1] BOUKNI Bariza, « contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçant ». Thèse doctorat en science en génie civile option matériaux et structures 2012.
- [2] la Norme NF P 15-301 de 1994.
- [3] Dr. Ir. P. Boeraeve, Cours de Béton armé.
- [4] Dreux. G et Festa. J « nouveau guide du béton et de ses constituants » édition Eyrolles ,1998.
- [5] Collection technique CIM béton, « Les constituants des bétons et des mortiers », fiche technique, Tome 1, Édition septembre 2005.
- [6] Cristophe charron, l'industrie de ciment, Holcim.
- [7] Mr. Z. BENGHAZI : Cours: Technologie des Géo matériaux, chapitre 2 ; les granulats.
- [8] Baron, Jaques et Ramond Sauterey « le béton hydraulique : Connaissances et pratique », Paris ,1995.
- [9] Aouifi Mourad, Mémoire de fin d'étude « Formulation et caractérisation des Propriétés rhéologiques et physico-mécaniques d'un BAP ».
- [10] Hermann, Kurt, L'eau de gâchage ; Bulletin du ciment, 1996.
- [11] Kara - Ali, R, « influence des additions minérale sur le besoin en eau et les résistances mécanique des mélange cimentaire, Thèse doctorat, université Cergy pontoise, décembre 2002.
- [12] Pons Gérard et Proust Erwan. « Etude du comportement différé des bétons autoplaçants : Retrait et Fluage », Rapport Final- juillet 2000 (INSA).
- [13] Bétons autoplaçants, recommandations provisoires Association Française de Génie Civil Juillet 2000.
- [14] Kaci Aissa Redouane et Ait Younes Rafik, Mémoire de fin d'étude « Effet de traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques des BAP », UMBB 2010.
- [15] Belhadj. N " Caractérisation expérimentale des Bétons Autoplaçants en traction directe. Influence des ajouts de déchets de brique, de poudre de marbre et de tuf", mémoire de master en structure, génie civil, 2012.

Références bibliographiques

- [16] ADAM. M. NEVILLE. « Propriétés des bétons ».
- [17] Tabet Nesrine, « contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons Autoplaçants fibrés (BAPF) » Mémoire de fin d'étude ; FSI/UMBB/2012.
- [18] Site Web de groupe holcim, [http:// www. Holcim.com](http://www.Holcim.com).
- [19] Mohamed rissel khelifa, « l'effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants » Thèse doctorat, université de Constantine et l'université d'Orléans génie civil.
- [20] Nebbou Mohammed et Madani Amar ; « influence de la poudre de marbre sur les propriétés du béton » Mémoire de fin d'étude, université de Boumerdes.
- [21] FICHES TECHNIQUES « Les bétons formulation, fabrication et mise en œuvre » CIM Béton centre d'information sur le ciment et ses applications.
- [22] Larrad F « *Structures granulaires et formulations des bétons* » Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, Avril 2000.
- [23] Sandrine BETHMONT « mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [24] Philippe Turcry de l'université de Nantes « Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants influence de la Formulation ». Thèse de doctorat.
- [25] Didier LOOTENS l'Université Pierre et Marie Curie « Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation ». Thèse de Doctorat.
- [26] Josserand L thèse de doctorat en structures et matériaux, « ressuage des bétons hydraulique » école nationale des ponts et chaussées, le 11 octobre 2002.
- [27] Boukni B, "tenue au feu des bétons autoplaçants". Thèse de magister UMC, 2007
- [28] CIM béton, "Les techniques de mise en place du béton évoluent", CSTB magazine, N°109 Novembre 1997.
- [29] Bertin.JF, "Recommandations de mise en œuvre des bétons autoplaçants et des autonivelants", Fédération Française du Bâtiment, SEBTP (Paris), 2003.
- [30] Poirier J, Matériaux réfractaires, in Propriétés et applications des céramiques. 2001, Hermès science. p. 109-140.

Références bibliographiques

- [31] infociment site web <http://www.infociments.fr/glossaire/b/beton-refractaire>.
- [32] Marzagui H, « Etude de deux bétons réfractaires silico-alumineux : microstructures et comportements thermomécaniques en traction et en flexion ». Thèse de doctorat, Université Toulouse 3, Albi 2005.
- [33] Bouali khaled, « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires ». MAGISTER en: Filière: Génie des Matériaux 2013/2014.
- [34] M.J.RIBEIRO, J.A.LABRINCHA, « Properties of sintered mullite and cordierite pressedbodies manufactured using Al-rich anodising sludge », ceramics international 34, 2008.
- [35] Z.P.Bazent and L. Najjar. Nolinear « diffusion in norsaturated concrete materias and structures, 5: 3-20, 1972.
- [36] G. Aliprandi, Matériaux Réfractaires et Céramiques Techniques, éditions Septima Paris, 1979.
- [37] Livre Hisldorf [Hisl-1967]. Livre [Baza-1996]Piasta et al [Pias-1984]Fischer [Fisc-1970]
- [38] Aurélien MAZZONI ; Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire.thèse Doctorat .Université Paul Sabatier, Toulouse 2009.
- [39] Frédéric THUMMEN ; propriétés mécaniques et durée de vie de béton réfractaire ; thèse de doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.