

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



Faculté Des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Génie des Matériaux

Option : Science des Matériaux pour la construction durable(MCD)

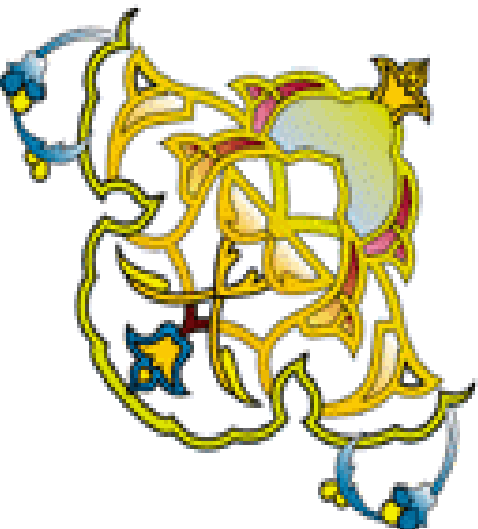
THEME

**Effet de la dimension des grains de la roche volcanique de la région de
TELEMCEN utilisée comme ajout sur les propriétés rhéologique et
Mécanique du béton autoplaçant.**

Réalise par :

- **HEDIR SAMIR**
- **ODNI MOKHTAR**

Encadreur : Mansour S.M



Remerciement

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et je passe les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile.

Nous commençons par remercier le dieu tous puissant, de nous avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.
Nous tenons à remercier vivement notre promoteur M^{me} HAMZA pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité durant l'élaboration de ce travail.

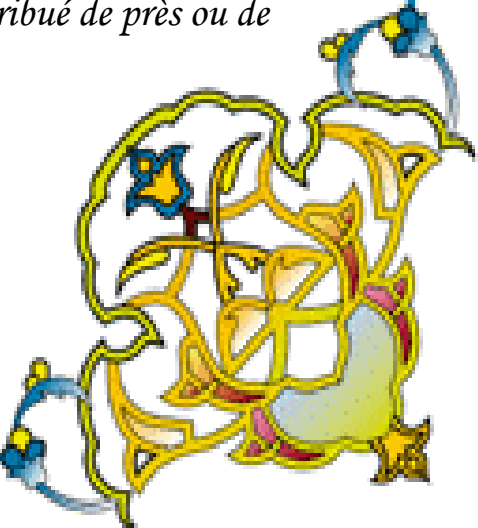
Nous remercions aussi notre chef de département de Matériaux M^r benothmane.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de faculté de science de l'ingénieur(FSI) de Boumerdes qui nous ont accompagnés tout au long de notre formation.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres de « lhcc » pour leur aide pendant la durée du stage, en particulier : AMI RASKI

Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la finalisation de ce travail.

...Samir et Mokhtar



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère Mère et mon très cher Père

*A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes
études*

A ceux qui ont veillé pour mon bien être

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie

A ceux que j'aime et je respecte infiniment

Ainsi qu'à mes chers frères Et mes chères sœurs

*A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé
aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions*

A tous mes camarades du Groupe MCD15

MOKHTAR



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

A mes chers parents, frères et sœurs.

A tout le groupe MCd15.

A mes adorables amis.

A Mon Binôme Mokhtar

*A mes chers amis yazid, saci, dahman, moh, zobir, khaled, Samir.n,
hamza, Malek, ossama, Habib, Badr eldine, abd elrhmane*

A ceux qui cherchent leur nom ici, cette marque d'affection me va droit au cœur : (beaucoup de noms me sont venus à l'esprit en rédigeant ces lignes et la peur d'en oublier un, me poussent à cette écriture implicite).

Samir



Résumé : Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton. Ce sont des bétons très fluides, se mettant en place sans vibration et sans présence d'une main d'œuvre qualifiée. Ces béton intéressent de plus en plus les industriels car ils présentent plusieurs avantages : réduire le cout, construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrailés et offre une solution unique à la créativité architecturale. Ce travail présente une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation rhéologiques et physico-mécanique des bétons autoplaçants à base de la roche naturelle provenant de la région de Tlemcen utilisée comme granulats (sable, gravier) et comme ajout. Six formulations de bétons autoplaçants contenant 50% de sable de la roche ou 50% de gravier de roche, 10%, 15%, 20% d'ajout de roche substitué au ciment ont été élaborées. Les résultats obtenus montrent que le remplacement de 50% de granulats naturels par les granulats à base de la roche de Tlemcen améliore les propriétés rhéologiques (étalement, stabilité au tamis et taux de remplissage), les résistances à la compression et à la flexion des BAP en approchant sans dépasser celle du béton BAP témoin avant 28 jours. Par ailleurs, il s'avère que le taux de 10% de la poudre de la roche substitué au ciment est le plus performant engendrant des propriétés qui dépassent celles du BAP témoin. L'ajout de roche allège le BAP grâce sa densité. De plus, sa finesse ainsi que son taux élevé de silice lui confèrent une activité pouzzolanique importante. Les résultats obtenus sont prometteurs quant à l'utilisation de la roche naturelle en tant que substitution au ciment, ou comme granulats dans le béton BAP pour l'industrie en Algérie. Ceci peut conduire à de nouveaux bétons BAP ayant des propriétés satisfaisantes.

ABSTRACT: the Self-compacting concrete SCC constitute a new advance in concrete construction. They are very fluid, taking place without vibration or a qualified labor. These concrete interest more and more manufacturers, because they have several advantages: reducing the cost, building elements with complex geometry or highly reinforced and offers unique solution for architectural creativity. This work presents an experimental study on the formulation, rheological and physical-mechanical characterization of SCC containing natural rock of TELMCEN region to be used as aggregates (gravels or sand) or as cement substitution. Six reinforced concrete SCC compositions containing 50% sand or 50% gravel of rock and 10%, 15%, 20% of powder rock substituted to cement have been performed. The results obtained in this work show that the replacement of 50% natural aggregates by aggregates based of TELMCEN rock improves rheological properties like as spreading, sieve stability, filling rate and improves the compressive and flexion strength of SCC approaching without exceeding that those of control SCC above 28 days. Moreover it seems that the SCC concrete containing 10% of the rock powder substituted to cement is the most effective, generating properties than exceed of control SCC. Addition of the rock lighters SCC thanks her density. Moreover, its fineness and its high silica content give it an important pozzolanic activity. The obtained results are promising as to the use of natural rock as a cement substitution or as aggregates in concrete SCC for industry in Algeria. This can lead to new BAP concretes having satisfactory properties.

الخلاصة: الخرسانة BAP تمثل تقدما ملموسا في البناء هذه الخرسانة جد مائعة توضع في مكانها بدون اهتزاز من دون حضور يد عاملة مؤهلة هذه الخرسانة مهمة اكثر فاكثرا صناعيا لوجود الكثير من الفوائد لتقليص الكلفة استعمال عناصر هندسية معقدة او احتكاك الحديد هذا العمل يقدم دراسة تجريبية حول التكوين الانسيابية و الفزيائية و الميكانيكية الخرسانة بقاعدة الصخر الطبيعي القادم من تلمسان المستعمل (كرمل حصي وك اضافة تركيبات للخرسانة تملك 50% رمل الصخر و 50% حصي الصخر و 10% 15% 20% اضافة للصخر لتحل محل الاسمنت يتم اختبارها النتائج المحصل عليها تبين ان البديل من 50% granulats الطبيعية ب granulats. بقاعدة صخر تلمسان تحسن الخصائص الانسيابية المقاومات على الضغط وعلى الانثناء ل. BAP تقترب بدون تخطي خرسانة BAP شاهد قبل 28 يوم لخلاف ذلك تملك النسبة 10% من مسحوق الصخرة يعوض من في الاسمنت ويصير اكثر كمال يحدث الخصائص التي تتخطى هذه ل BAP شاهد اضافة الصخر خفيف ل بفضل كثافته كذلك لاكثر finesse النسبة السليسيوم المرتفعة تمنحه نشاط Pozzolanique هامة النتائج المحصل عليها واعدة لهذا استعمال للصخر الطبيعي المعوض للاسمنت و مثل الحصي في خرسانة BAP من اجل الصناعة في الجزائر هذا يمكن يقودنا الى خرسانة جديدة. BAP تملك خصائص ناجحة مقبولة

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	01
CHAPITRE I : LES BETONS AUTOPLAÇANTS	
I.1.INTRODUCTION.....	03
I.2.Definition.....	03
I.3. Les avantage des bétons autoplaçant.....	03
I.4.Classification des BAP.....	04
I.5.concept du béton autoplaçant.....	05
I.6.Domaines d'utilisation privilégiée des BAP.....	06
I.7. Constituant du béton autoplaçant.....	07
I.7.1.Ciment.....	07
I.7.2.Granulâtes.....	08
I.7.3.Sable.....	10
a.Origine des sables.....	10
b.Diffèrent Type de sable.....	10
I.7.4.Eau de gâchage.....	11
a.Le rôle de l'eau.....	12
b.type de l'eau	12
I.7.5. ADJUVANTS	12
I.7.5.1.Classification des adjuvants	12
a.Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton	12
b.Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement.....	13
c.Autres catégories normalisée d'adjuvant.....	13
I.7.5.2.L'utilisation des adjuvants.....	13
I.7.5.3.Les super plastifiants.....	14
I.7.5.4.Différents types de superplastifiant.....	14
a.Les polymélamines sulfonées (PMS).....	14
b.Les Polynaphtalènes sulfonates (PNS).....	14
c.Les lignosulfonates (LS).....	14
d.Les superplastifiants de nouvelle génération.....	15
I.7.5.5.Mode d'action.....	15
I.7.6.Addition minerals.....	16
a.filler calcaires.....	17
b.Les cendres volantes.....	17
c.Laitiers de hauts fourneaux.....	18
d.Fumée de silice.....	18
e.pouzzolanes naturelles.....	18
I.8.Spécificité de la composition de béton autoplaçant.....	18
a.Une quantité de fines importante.....	18
b.Un volume de pâte élevé.....	18
c.Utilisation de superplastifiant.....	18
d.Un faible volume de gravillon.....	19
e.Utilisation éventuel rétenteur.....	19
I.9.Caractérisation des BAP à l'état frais.....	19
I.9.1.Essai d'étalement (Slump Flow).....	19

I.9.2.Essai de boîte en L.....	20
I.9.3.Essai de l'entonnoir	21
I.9.4.Essai de stabilité au tamis.....	22
I.9.5.Essai d'étalement modifié (J-Ring)	23
I.10. Caractérisation de BAP à l'état durci.....	24
I.10.1. Résistance à la compression.....	24
I.10.2. Résistance à la traction.....	24
I.10.3. Module d'élasticité.....	24
I.10.4. Le retrait.....	25
I.10.5. Le fluage.....	25
I.11. Les Approches de formulation Des BAP.....	25
I.11.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	25
I.11.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.....	26
I.11.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	26
I.11.4. Méthode basée sur le mode de compactage.....	27
I.12. Principe et application des approches.....	27
I.12.1. Approche Japonaise.....	27
a. Dosage des gravillons.....	27
b. Dosage du sable.....	28
c. Dosage du liant.....	28
d. Dosage de l'eau et du super plastifiant.....	28
I.12.2.Approche Suédoise.....	28
I.12.3.Approche Française.....	28
I.12.4.Autres méthode	29
CHAPITRE II : LES AJOUTS CIMENTAIRE	
II.1. INTRODUCTION	30
II.2 Definition	31
II.3.Rôle de l'ajout cimentaire	31
II.3.1.Rôle de la granulométrie de l'ajout	31
II.3.2.Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires	31
II.4. Origine et classification	31
II.4.1 Principaux ajouts minéraux inertes	33
II.4.1.1 Le calcaire	33
II.4.1.2 Sable de dune	36

II.4.2 Les ajouts minéraux actifs	37
II.4.2.1 La pouzzolane	37
II.4.2.2 Fumée de silice	38
a. Mécanisme d'action de fumée de silice.....	39
b. influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons.....	40
II.4.2.3. Le laitier de haut fourneau	41
II.4.2.4 Le métakaolin	42
II.5 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	43
II.5.1 Intérêt du point de vue technique	44
II.5.2 Intérêt du point de vue économique	44
II.5.3 Intérêt du point de vue environnemental	44
II.6 Les inconvénients de l'utilisation des ajouts minéraux	44
II.7 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons	44
II.7.1 Amélioration de l'ouvrabilité	44
II.7.2 Chaleur d'hydratation	45
II.7.3 Durabilité	45
II.7.4 Développement des résistances	45
II.7.5 Développement des bétons à haute résistance	46
II.8. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux.....	46
II.8.1. Bénéfices fonctionnel	46
II.8.2 Bénéfices économique	46
II.8.3. Bénéfices écologiques et environnementaux	47

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1 Introduction.....	48
III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés.....	48
III.2.1 Le ciment	48
III.3 Fillers de calcaire	49
III.4 Gravier	50
III.5 Le Sable	52
III.6. Ajout naturel : Roche de Tlemcen.....	55
III.7. Gravier	57
III.8. Sable	58

III.09. L'eau de gâchage	60
III.10 L'adjuvant	60
III.10.1 Domaine d'application	60
III.10.2 Propriétés	60
III.10.3 Caractéristiques	61
III.10.4 Mode d'emploi	61
CHAPITRE IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction	62
IV.2. Formulation du BAP témoin par la méthode japonaise	62
a).Calcul de composition	62
b). donnés de base	62
c).optimisation de la composition du BAP	62
d).Détermination de la masse de chaque constituant	62
e). les masses des sables.....	63
f). Dosage des constituant de BAP pour 01m ³ du béton	64
IV.3.formulation du BAP contenant la roche naturel	64
IV.4. Résultats des essais sur le béton BAP à l'état frais	65
IV.4.1.Etalement du béton BAP.....	66
IV.4.2.mobilité du béton BAP en milieu confiné (Boite en L).....	67
IV.4.3. Stabilité au tamis du béton BAP.....	67
IV.4.4.Masse volumique apparente des BAP à l'état frais	68
IV.5.Résultats des essais sur les BAP à l'état durci	69
IV.5.1.Propriété physique.....	69
IV.5.1.1 Masse volumique apparente des BAP à l'état durci.....	69
IV.5.1.2 La porosité des BAP.....	70
IV.5.1.3.L'absorption des BAP.....	71
IV.6. Propriétés mécaniques des BAP.....	72
IV.6.1 Résistance à la compression des BAP.....	72
IV.6.1 Résistance à la flexion des BAP.....	73
IV.7 Contrôle non destructif par ultrason.....	73
IV.7.1 Vitesse de propagation du son.....	73
IV.7.2. Module d'élasticité dynamique	75
CONCLUSION GENERALE.....	77

Annexe

Références Bibliographiques

Liste des figures

Figure I.1 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	05
Figure I.2 : Choix de la granularité pour un BAP	09
Figure I. 3 : influence de superplastifiant sur le béton	14
Figure I.4 : Différents types de superplastifiant.....	15
Figure I. 5 : Mode d'action des superplastifiants	16
Figure I. 6 : Essai d'étalement au cône d'Abrams	20
Figure I. 7 : Schéma de la boîte en L	21
Figure I. 8 : Essai à l'entonnoir.....	22
Figure I. 9 : Essai au tamis	23
Figure I. 10 : Essai d'étalement modifié	23
Figure II.1 : Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.....	30
Figure II.2 : origine et calcification des ajouts cimentaires.....	32
Figure II.2: fillers calcaires.....	33
Figure II.3 : pozzolane naturelle	38
Figure II.4 : fumée de silice.....	39
Figure II.5 : Laitier de haut fourneau.....	42
Figure II.6: mètaKaolin	42
Figure III.1 : Fillers de calcaire.....	50
Figure III.3 : Roche de Telmcen sous forme de gravier, sable, poudre.....	56
Figure IV.1 : Etalement des différentes BAP.....	66
Figure IV.2 : Taux de remplissage des BAP.....	67
Figure IV.3 : stabilité au tamis des BAP.....	68
Figure IV.4 : masse volumique des BAP frais.....	69
Figure IV.5 : masse volumique apparente des BAP durcis.....	70
Figure IV.6 : porosité des bétons BAP.....	71
Figure IV.7 : Absorption d'eau des BAP.....	71
Figure IV.8 : Evolution de la résistance à la compression des BAP.....	72
Figure IV.9 : Evolution de la résistance à la flexion des BAP.....	73
Figure IV.10 : évolution du module élasticité dynamique.....	76

Liste des tableaux

Tableau III.1 : caractéristiques physiques du ciment	48
Tableau III.2 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment	48
Tableau III.3 : Composition chimique du ciment par fluorescence X.....	49
Tableau III.4 : Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X	49
Tableau III.5 : Analyse chimique du calcaire par fluorescence X.....	50
Tableau III.6 : Propriétés physiques des fillers calcaire.....	50
Tableau III.7 : Caractéristiques physiques du gravier 8/15(CHELGHOUIM).....	51
Tableau III.8 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/15 de (CHELGHOUIM).....	51
Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du gravier G3/8(SETIF).....	51
Tableau III.10 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 3/8(Sétif)	52
Tableau III.11 : Caractéristiques physiques du sable 0/1.25 (BOUSSADA)	52
Tableau III.12 : Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/1.25(BOUSSADA)	52
Tableau III.13 : Caractéristiques physiques du sable de Baghlia (0/4)	53
Tableau III.14 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de Baghlia.....	53
Tableau III.14 : Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé (Baghlia + Boussada).....	54
Tableau III.15. : Analyse chimique de la roche par fluorescence X	56
Tableau III.16. Propriétés physiques de la poudre de la roche	57
Tableau III.17. : Caractéristiques physiques du gravier 8/15(Roche).....	57
Tableau III.18 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 8/15 (Roche)....	57
Tableau III.19. : Caractéristiques physiques du gravier 3/8 (Roche).....	58
Tableau III.20. : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 3/8(ROCHE) lavé.....	58
Tableau III.21. : Caractéristiques physiques du sable grossier.....	58
Tableau III.22. : Analyse granulométrique par tamisage du sable grossier.....	59
Tableau IV.1 : intervalles pour chaque constituant selon la méthode japonaise	62
Tableau IV.2 : Composition pour 1m ³ BAP (témoin)	64

LISTE DE TABLAUX

Tableau IV.3: Composition des BAP contenant la roche naturelle.....	64
Tableau IV.4 : Composition d'1m ³ des différents BAP.....	65
Tableau IV.5: Résultats d'ouvrabilité sur béton frais.....	65
Tableau IV.6 : Résultats d'ultrasons sur les bétons autoplacant	74
Tableau IV.7 : Les intervalles de la vitesse de propagation.....	75

Laboratoire de l'habitat et de la construction de centre LHCC

1. Présentation de l'entreprise

Le laboratoire de l'habitat et de la construction du centre « **L.H.C.C** » est une filiale du groupe laboratoire national de l'habitat et de la construction « **L.N.H.C** », créée suite à sa restructuration.



Le L.H.C.C présente à ce jour une expérience professionnelle de 30 ans dans l'ingénierie géotechnique et de matériaux de la géotechniques des terrassements des fondations et des ouvrages de soutènement grâce à laquelle il s'est rapidement imposée comme un acteur incontournable de la géotechnique, il dispose d'une maitresse globale de toute la chaîne de l'ingénierie géotechnique et de chacun de ses domaines particulière des études à la réalisation des travaux

Le L.H.C.C est composé de 6 unités et 2 entités réparties sur la région centre et emploie un effectif de plus de 400 personnes hautement qualifiées dont 45% d'ingénieurs et techniciens pluridisciplinaire

Le L.H.C.C s'engage en outre à mettre en œuvre tous les moyens techniques et intellectuelles pour mener à bien toutes les études qui lui sont confiées alliant qualité rapidité d'exécution prix compétitif pour établir une prestation claire précise et complète. Ce qui s'est traduit au cours de toutes ses années d'activités par :

- le renouvellement et l'acquisition de nouvel équipement pour satisfaire une qualité de reconnaissance géotechnique
- l'optimisation de rôle de géotechnicien dans l'acte de construire indispensable pour une meilleure appréhension et maîtrise des risques de sol grâce à la banque de données dont il dispose composé de plus de 50000 études et la bonne adéquation entre les moyennes mis en œuvre et le but à atteindre
- l'établissement de programmes de formation très pointus de personnel

2. Domaines d'activités et compétences :

Le LHCC intervient en géotechnique du bâtiment, en géotechniques des infrastructures de transport (études des sols, projets de terrassements, contrôles techniques des travaux), pour la stabilité des pentes les sols compressibles, les fondations des ouvrages d'arts les grands murs de soutènement les ouvrages, Sous-terrains ou pour les risques Naturels (falaises, glissement de terrains, gravités souterraines...)

3. Etudes géotechniques :

Le **LHCC** effectue l'ensemble des études de sol nécessaire à la conception, au dimensionnement et la réalisation des ouvrages géotechniques du BTPH :

- ✓ Bâtiments et ouvrages d'arts
- ✓ Voiries et dallages
- ✓ Infrastructures (bassins, pylônes, grues...)
- ✓ Soutènements et stabilités de pentes
- ✓ Renforcement de sols
- ✓ Tunnel et ouvrages enterres
- ✓ Etudes pathologiques

Pour réaliser ces missions d'études et d'assistance, le **LHCC** dispose des moyens suivants :

Sur site :

- ✓ Sondage et essais in situ
- ✓ géophysiques

Au laboratoire :

- ✓ essais d'identification
- ✓ essais de compactage
- ✓ analyse chimique

4. laboratoire béton et matériaux :

Béton et matériaux :

- ✓ analyse de matériaux
- ✓ contrôle de production de granulats (carrière, gravier, sablière...)
- ✓ analyse granulométrique
- ✓ coefficient d'aplatissement
- ✓ détermination de la masse volumique apparente et absolue
- ✓ essais et vérifications sur mélange de béton de ciment
- ✓ expertises et recommandations
- ✓ essais normalisées sur ciment
- ✓ essais los Anglos, deval simple et micro deval
- ✓ essais de friabilités des sables
- ✓ essais d'affaissement au cône d'Abrahams
- ✓ essais de porosité ou d'absorption sur granulats
- ✓ étude de formulation de béton

Essais sur béton durci :

- ✓ Résistance à la compression sur éprouvettes
- ✓ Essais d'étanchéité sur béton
- ✓ Essais de traction par fendage (essai brésilien).

5. Contrôle des chantiers :

Route :

- ✓ Contrôle des matériaux (classification GTR, comportement mécaniques et physique)
- ✓ Contrôle de compactage (essai à la plaque et dîna plaque, gamma densimètre)
- ✓ Vérification de la fabrication et de mise en œuvre des enrobes (granulométrie, teneur en lient, température)

Essais sur béton durcis :

- ✓ Prélèvement par carottage
- ✓ Auscultation des ouvrages de béton à l'ultra son et au scléromètre
- ✓ Auscultation sonique des pieux

Introduction générale

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation dans pratiquement tous les domaines du génie civil. Actuellement, il est sans doute le plus utilisé pour les avantages économiques et techniques qu'il présente.

Cependant, la tendance actuelle des industriels du béton penche de plus en plus vers l'utilisation des bétons autoplaçants. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo vers les années 1980.

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 BAP permet de remplir des coffrages dont la complexité de forme où la densité en ferrailage n'aurait pu être imaginée dans le cas d'un béton ordinaire. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés à l'état frais conformes aux exigences techniques préconisées à savoir la fluidité (étalement au cône d'Abrams), la capacité de remplissage (boîte en L) et la résistance à la ségrégation (stabilité au tamis). Ceci pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable. Toutefois, Pour assurer la stabilité rhéologique, l'utilisation des additifs organiques (super plastifiants et agent viscosifiant) et minérales (fines) s'avère nécessaire. Néanmoins, les recherches restent toujours d'actualité sur la compréhension du comportement rhéologique et physico-mécanique du béton BAP.

Dans le domaine des travaux de bétonnage, la nécessité pour notre pays d'accélérer le développement des bétons s'avère une priorité, ainsi, l'industrie de la construction est sans doute une des plus grandes consommatrices de ressources naturelles, donc l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des bétons et les questions liées à l'environnement sont les préoccupations fréquentes des études actuelles sur les bétons avec le développement des adjuvants et la disponibilité d'additions actives, l'emploi de béton de haute performance a fortement augmenté durant ces dernières années. L'utilisation des ajouts minéraux dans les bétons comme substitution au ciment a des avantages divers dont les principaux se rapportent au fait que le ciment est le composant le plus coûteux du béton, que sa production exige une grande consommation d'énergie et en même temps libère une grande quantité de dioxyde dans l'atmosphère.

Les matières premières naturelles constituant le béton sont très variées et très répandues en Algérie. De grandes quantités sont extraites chaque année. Par conséquent, l'utilisation de ces

dernières dans la production de nouveaux matériaux cimentaires peut aider à protéger l'environnement. La roche naturelle de la région de Tlemcen peut être utilisée comme granulats ou si finement broyée peut remplacer une partie du ciment et devient un matériau pouzzolanique permettant d'améliorer ainsi les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant. Il est donc intéressant d'exploiter cette source naturelle qui présente des intérêts, à la fois économique et écologique par la diminution de gaz à effet de serre lors de la fabrication du ciment. Mais il faut préciser son importance quand elle est utilisée dans le béton BAP.

L'objectif de ce travail est de valoriser la roche de la région de Tlemcen lorsqu'elle est utilisée comme granulats (sable ou gravier) ou encore comme une substitution au ciment dans l'élaboration du béton autoplaçant. Cela peut aider à résoudre le problème du manque de granulats et en particulier l'utilisation des granulats alluvionnaires. L'effet de cette roche sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du béton BAP est étudié. Pour cela, ce mémoire est divisé en deux grandes parties :

Ce travail est constitué de deux parties ; Une partie Bibliographique et une partie expérimentale.

La première partie est subdivisée en deux chapitres.

- **Chapitre I** est consacré aux connaissances actuelles des propriétés du béton autoplaçant, les matières premières utilisées, les méthodes et concepts de formulation et les caractéristiques des différentes propriétés de ce béton.
- **Chapitre II** concerne la description des ajouts minéraux utilisés comme substitution au béton.

La partie expérimentale est subdivisée en deux chapitres.

- **Chapitre III** est destiné à présenter la caractérisation des matériaux utilisés à savoir les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques (ciment, filler calcaire, superplastifiant, roche de Tlemcen, sable et gravier).
- **Chapitre IV** est consacré à la formulation d'un BAP par la méthode japonaise et le résultat des différents essais ainsi que l'interprétation des résultats et les recommandations qui en découlent.
- Enfin ; une conclusion générale ..

CHAPITRE I : LES BETONS AUTOPLAÇANTS

I.1. Introduction

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

Les bétons autoplaçant se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportion bien précis pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité. Toutefois, L'utilisation de ces béton ne se répand que lentement à travers le monde, car leur formulation est inhabituelle. La formulation des bétons c'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe des superplastifiants et des agents colloïdal d'une part et des additions minérales d'autre part [1].

I.2. Définition

Le béton autoplaçant (dénommé aussi auto compactant) est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1:

Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation. Le BAP et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre. [2].

Le béton auto compactant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes :

- ✓ Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel)
- ✓ désaération du béton pendant son écoulement
- ✓ excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense. Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé [3].

I.3. Les avantages des bétons autoplaçants

- L'absence de vibration et donc de nuisances sonores.
- Des aspects de surface d'une bonne régularité.

- Une diminution de risque de fissuration.
- Un gain de temps sur les bétonnages.
- Une pénibilité fortement réduite pour les maçons.
- Une suppression des risques d'accident liés à la manutention de la benne.
- Une économie de mains d'œuvres et un meilleur enrobage des armatures.
- Une bonne planimétrie du support fini. [4]

I.4. Classification des BAP

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons. A l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages des génies civils, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies des mises en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques. Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales. On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux recommandations pour édictées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories :

- **Catégorie 1 :** il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface.
- **Catégorie 2 :** elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage).
- **Catégorie 3 :** ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrailés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

A chaque catégorie correspondent des spécifications particulières pour le BAP à l'état frais, définies ci-après [5].

I.5. Concept du béton auto plaçant

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons auto compactant ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçant (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. 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.

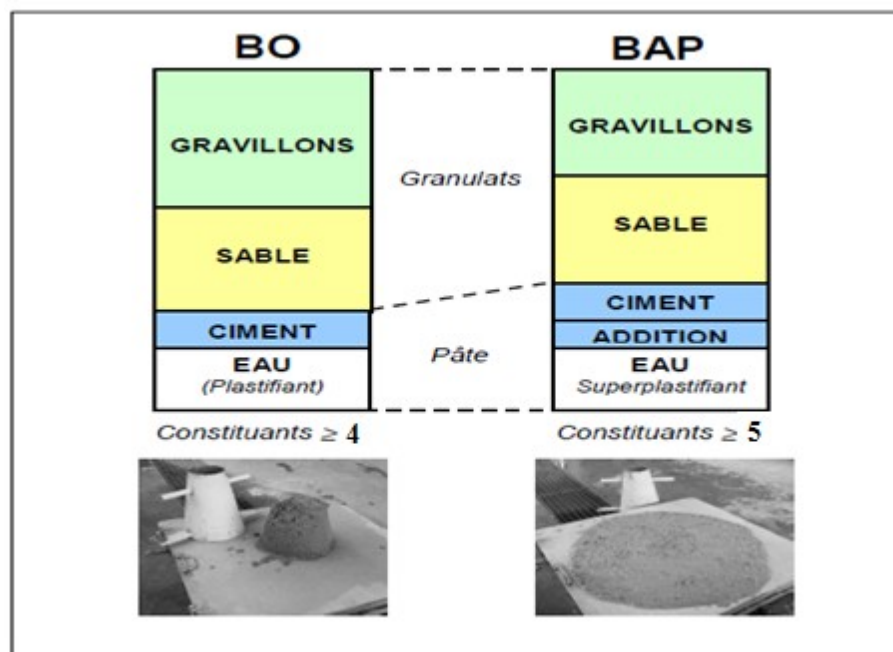


Figure I.1 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [6]

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. 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, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP en France coïncide d'ailleurs à l'arrivée des superplastifiants 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 de souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions. Evidemment, 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 [6].

I.6. Domaines d'utilisation privilégiés 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 de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant:

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration [7].

I.7. Constituant du béton autoplaçant

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat, ainsi que de celle du lien qui les unit. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Pour toute combinaison de matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment. Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton). La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

- Augmentation de la résistance en compression et en flexion.
- Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption.
- Résistance accrue aux agents atmosphériques.
- Amélioration de l'adhésion entre les couches successives et entre le béton et l'armature.
- Réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait.
- Réduction des variations de volume imputables au mouillage et au séchage.

I.7.1 Ciment

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

Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker additionné de gypse (3 à 5 %), et éventuellement pour les ciments composés, d'autres constituants secondaire, tel que, le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer du coke métallurgique, de cendre volantes ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches). [8]

✓ Les différents types de ciment :

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants :

➤ les ciments portlands : CEM I

Ces ciments contiennent au moins 95 % de clinker.

➤ les ciments portlands composés : CEM II

On distingue deux catégories de CEM II :

- les CEM II/A qui contiennent plus de 80 % de clinker et moins de 20 % de constituants secondaires ;
- les CEM II/B dont les valeurs sont respectivement plus de 65 % de clinker et moins de 35 % de constituants secondaires.

➤ **les ciments de hauts fourneaux : CEM III**

Ces ciments sont subdivisés en trois catégories selon leur teneur en laitier : les CEM III/A (de 36 à 65 % de laitier), les CEM III/B (de 66 à 80 % de laitier) et les CEM III/C (de 81 à 95 % de laitier).

Le reste des constituants est du clinker avec éventuellement un filler dans la limite de 5 % de l'ensemble des constituants.

➤ **les ciments pouzzolaniques : CEM IV**

On distingue également deux catégories :

- les CEM IV/A qui contiennent plus de 65 à 90 % de clinker ;
- les CEM IV/B dont la valeur est de 45 à 64 % de clinker.

Le reste des constituants sont des ajouts pouzzolaniques avec éventuellement un filler dans la limite de 5 %. Les ajouts pouzzolaniques peuvent être des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des cendres volantes siliceuses.

➤ **les ciments au laitier et aux cendres : CEM V**

Ils sont subdivisés en deux catégories selon leur teneur en laitier de haut fourneau et de pouzzolanes naturelles ou de cendres volantes siliceuses : les CEM V/A (de 18 à 30 %) et les CEM V/B (de 31 à 50 %) [9].

I.7.2 Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ». Vieil usage tout à fait impropre, en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

Agrégat : Réunion des substances diverses formant un tout non homogène. Le béton, par exemple est un agrégat de gravier, sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agrégation.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précises dans la norme XP P 18 -540 d'octobre 1997 qui remplace les normes P18-101 de décembre 1990 et P18-541 de

mai 1994.

Cette norme regroupe les caractéristiques qui doivent présenter en général les granulats destinés à la confection du béton hydraulique.

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

La catégorie A : correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique R_C est supérieure ou égale à 35 MPa ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant tolérées.

La catégorie B : sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respectent les spécifications imposées aux granulats de catégorie A.

la catégorie C et D : conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulat D, que seuls deux (2) de leurs caractéristiques soient présentées et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton.

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. [10]

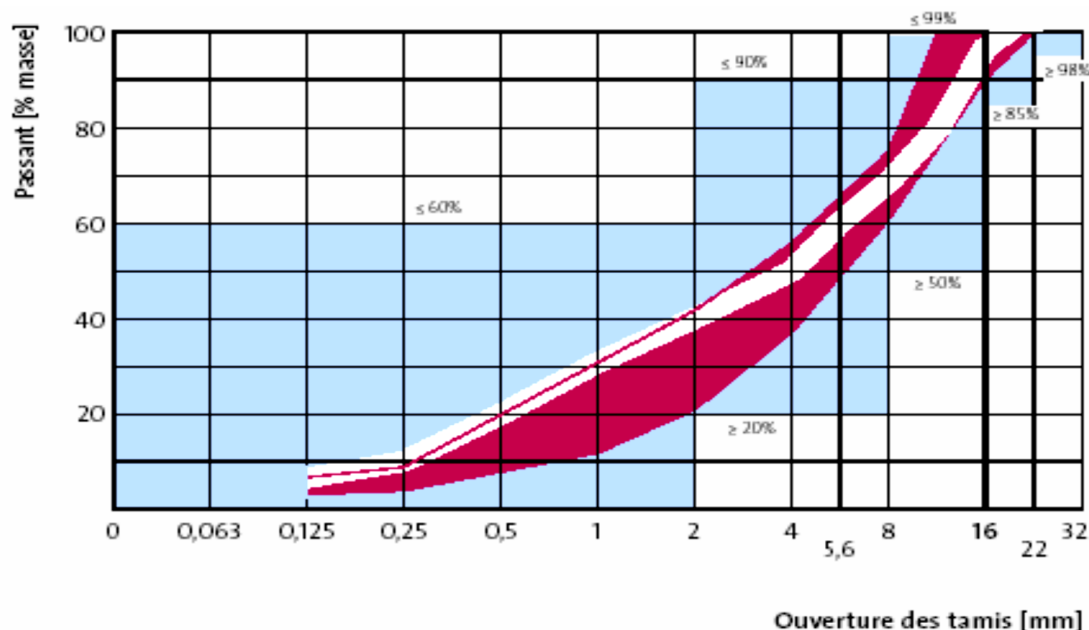


Figure I.2 : Choix de la granularité pour un BAP 0-16 [10]

Remarque :

- ❖ En bleu, valeurs limites absolues selon SN EN 12 620.

- ❖ En rouge, fuseau conseillé Pour béton vibré.
- ❖ Le fuseau optimal pour BAP est indiqué en blanc.

I.7.3 Sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80µm et 05mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à 80µm n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par « Sable » les éléments de dimension 0 à 5mm, non compris les fillers. [10]

a. Origine des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques; Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien [10].

b. Différents types de Sable

➤ Sable d'origine naturelle

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morphologie) au cours des temps géologiques : les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau).

Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de

sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants majoritaires : on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux. [10]

➤ **Sables non alluvionnaires (sable de dune)**

Il s'agit essentiellement de sables anciens, c'est-à-dire de dépôts détritiques déposés à des périodes géologiques variées, à des distances plus ou moins grandes des rivages. En fonction des conditions paléogéographiques, ces dépôts ont été plus ou moins brassés par les courants et recouverts par d'autres formations sédimentaires et se retrouvent actuellement émergés sur des étendues variables et des épaisseurs également très diverses. De façon générale, ces dépôts constituent cependant des gisements beaucoup plus étendus et généralement plus épais que les dépôts alluviaux.

La plupart de ces sables ont actuellement des utilisations soit limitées (essentiellement remblais et couches de forme, parfois granulats pour couche de fondation), soit très spécialisées (sables de verrerie et de fonderie, bétons de type cellulaire). [10]

➤ **Sable d'origine artificielle**

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane); dit aussi sable concassés, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant.

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant. [10]

I.7.4. Eau de gâchage

L'eau est l'un des ingrédients des bétons, on pourrait même dire qu'il est le plus important avec le ciment. En effet, l'eau que l'on introduit dans le béton lors du gâchage accomplit deux fonctions : une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique qu'elle contribue au développement de réaction

dite :hydratation .pour le gâchage du mélange de béton on utilise de l'eau qui ne doit pas contenir des composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment ,les granulats et les autres ,et aussi évité des les particules en suspensions dont la qualité qui pourrait modifier ses qualités originaire. Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher de béton parce qu'elles contiennent dans certains cas un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physique et mécanique (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité de béton) ces impuretés éventuellement contenue dans l'eau de gâchage, soit des composés chimiques qui peuvent être actifs. [11]

a. le rôle de l'eau

l'eau est certainement le constituant des bétons le plus délicat à aborder .En effet, elle agit d'une façon antinomique sur deux propriétés essentielle qui sont :la consistance et la résistance .l'excès d'eau qui ne sera pas liée à hydratation, créera au sein du matériau d'espace vide ou partiellement rempli d'eau qui affectera directement les performances .l'eau est indispensable pour obtenir une bonne consistance ,plus le dosage en eau est important plus l'écoulement du béton est facile ,il s'agit donc de trouver un dosage en eau optimal qui permet de satisfaire aux exigences sur les principales propriétés du béton.[12]

b. type de l'eau

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée .La plus disponible est aussi celle qui sert de référence, c'est l'eau potable distribuée par le réseau de service public, les autres eaux les plus utilisées sont les eaux de pompage en provenance de nappe de cours d'eau ou de réservoir. [12]

I.7.5. Adjuvants

Selon la norme **NF EN 934-2** Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci [13].

I.7.5.1. Classification des adjuvants

a. Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton

- Plastifiants / Réducteurs d'eau ;
- Superplastifiants/ Haut réducteur d'eau ;

- Plastifiant / Réducteurs d'eau / réducteurs d'eau ;
- Superplastifiants/ Haut réducteurs d'eau/ Retardateur de prise ;
- Superplastifiants/ Haut réducteurs d'eau / Accélérateur prise.

b. Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement

- Accélérateurs de prise
- Accélérateurs de durcissement
- Retardateurs de prise.

c. Autres catégories normalisées d'adjuvants

- Hydrofuges de masse
- Entraîneur d'air
- Rétenteurs d'eau.

I.7.5.2. L'utilisation des adjuvants

On utilise les adjuvants sur tout pour :

- Diminuer le cout des constructions en béton.
- Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
- Assure la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.
- Obvier à certaines urgences durant le bétonnage [16].

Il ne faut cependant pas oublier qu'aucun adjuvant, en quelque quantité que ce soit, ne saurait remplacer une bonne technique de bétonnage.

L'efficacité d'un adjuvant dépend de facteurs tels que le type, le dosage en liants, la teneur en eau, la forme, la granulométrie et les proportions des granulats, le temps de malaxage, l'affaissement et les températures du béton.

Dans le cas des **BAP**, les adjuvants les plus utilisés sont les superplastifiants.

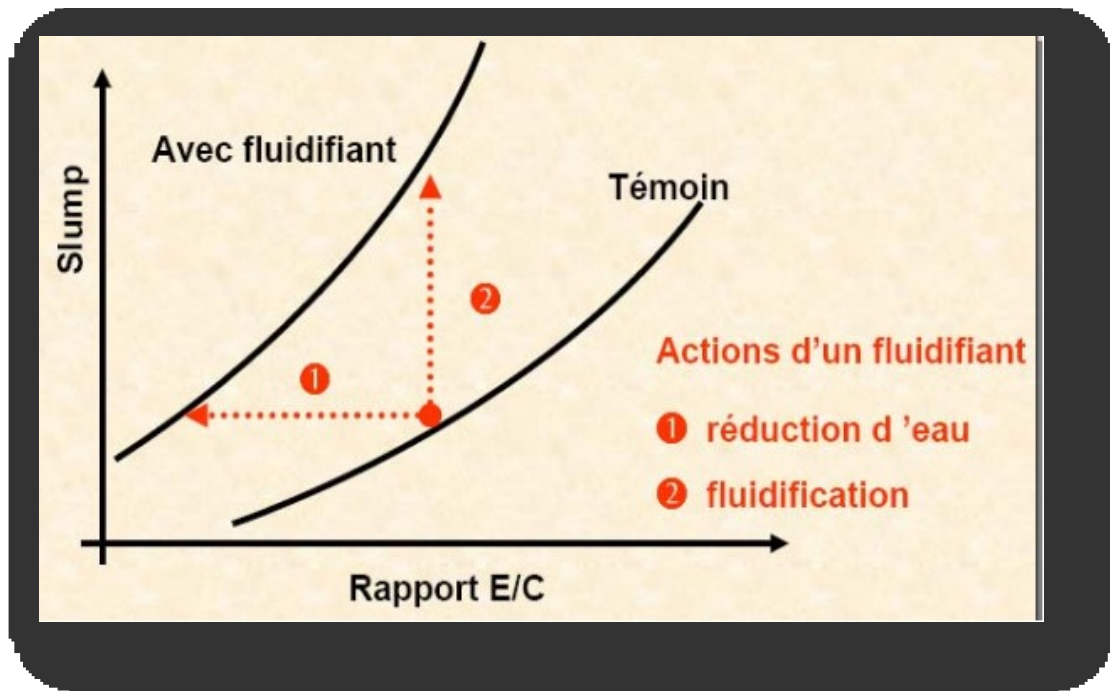


Figure I. 3 : influence de superplastifiant sur le béton [14].

I.7.5.3. Les superplastifiants

Selon la norme NA 744, un superplastifiants est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange [14].

I.7.5.4. Différents types des superplastifiants

a. Les polyméamines sulfonées (PMS)

Appartiennent à la catégorie des superplastifiants/réducteurs d'eau. Ils sont efficaces pour des températures inférieures à 85°C à cause d'une stabilité chimique limitée. Ils ne sont pas entraîneurs d'air. Ils ne posent pas de problème de teinte et sont préférés aux PNS pour des résistances aux jeunes âges [18].

b. Les Poly naphthalènes sulfonates (PNS)

Sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment. Ils sont un peu plus retardateurs que les PMS et sont légèrement entraîneur d'air [14].

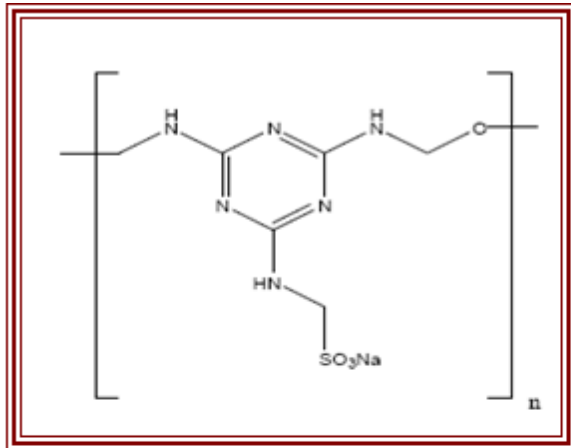
c. Les lignosulfonates (LS)

Sont moins efficaces que les PNS et PMS. Ce sont des produits fabriqués à partir de dérivés de l'industrie de la pâte à papier. Ces produits sont bien souvent impurs : ils contiennent des sucres qui sont responsables de l'effet retardateur. [14]

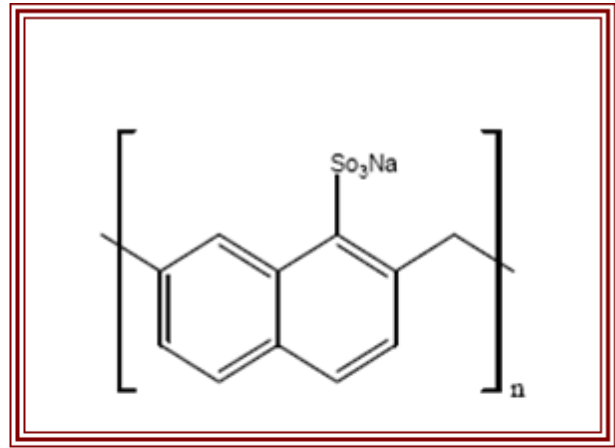
d. Les superplastifiants de nouvelle génération

Sont constitués de polymères à base de polyoxyde d'éthylène. Ce sont les polycarboxylates ou polyacrylates ou encore phosphonates polyoxyde d'éthylène

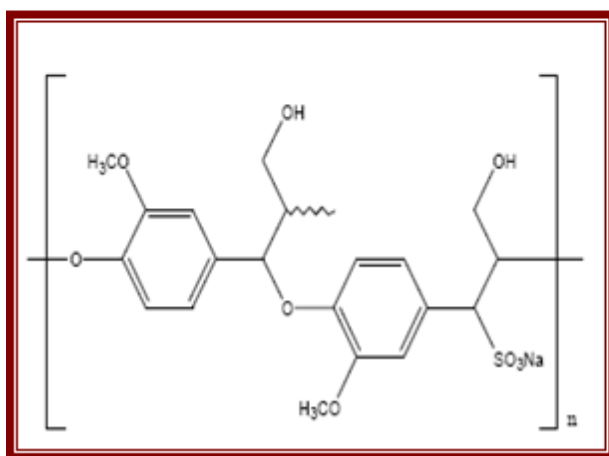
Les superplastifiants les plus utilisés sont les PMS et les PNS. Ce sont des polymères anioniques avec des groupes sulfonates SO_3^- à intervalles réguliers. [14]



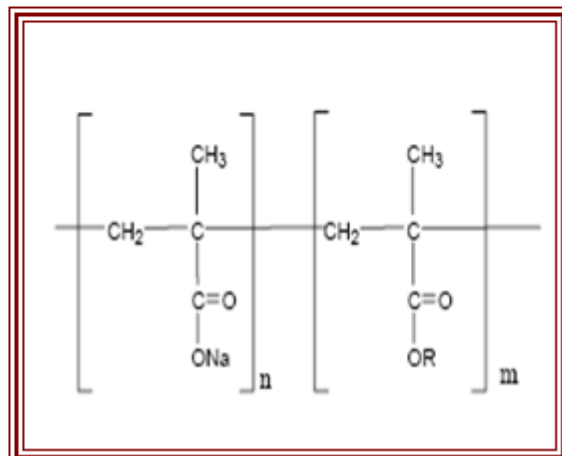
PMS



PNS



LS



Nouvelle génération

Figure I.4 : Différents types de superplastifiants [17]

I.7.5.5. Mode d'action

L'action d'un superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. En se fixant sur les grains de ciment, modifie la nature des charges électriques.

Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un grain de fluidité,

puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton. Dans certains cas, l'ajout du superplastifiant est directement additionné dans toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet. Le superplastifiants est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximum.

Il ne faut pas aussi négliger le temps de murissement d'un béton. Cette étape est aussi importante que la confection du béton lui-même. Nous verrons plus loin les moyens et les méthodes utilisés pour la protection des bétons frais [12].

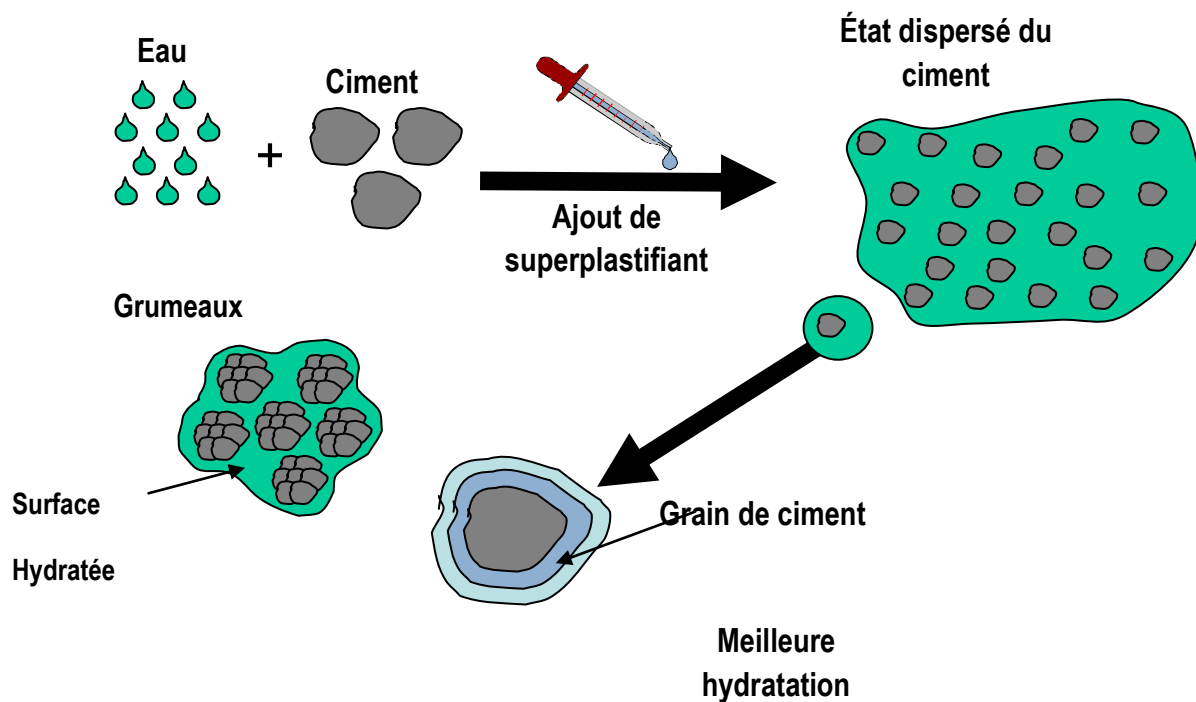


Figure I. 5 : Mode d'action des superplastifiants [12]

I.7.6. Additions minérales

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

a. Fillers calcaire

Les fillers de calcaire sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils se présentent sous forme de poudres non abrasives. La dimension maximale des grains, déterminé conformément à la norme EN933-10 doit être inférieure à 2 mm. Le passant au tamis de 63 μm doit, pour sa part, être supérieur à 70%. Leur surface spécifique est généralement proche de celle du ciment. Les fillers calcaires ne régissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage. Quand ils sont ajoutés aux matériaux cimentaire, ils constituent un lieu de nucléation et de germination pour les hydrates. En France, ces fillers calcaires sont beaucoup utilisés dans la fabrication des ciments composés (CEMII/A OU B-L), mais ils peuvent aussi être directement incorporés lors de la fabrication des bétons, notamment des bétons autoplaçants [18].

➤ Effet des Fillers calcaire

Les fillers confèrent aux bétons autoplaçant les propriétés suivantes agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment.

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire Pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

b. Les cendres volantes

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al Montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur de seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μm). Associées à un super plastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité [18].

c. Laitiers de hauts fourneaux

Comme étant un ajout de gain de matériaux (ciment), le laitier de haut fourneau permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Shi et al Montrent par exemple que les laitiers de haut fourneau absorbent le super plastifiant. IL est donc possible que la demande en super plastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une valeur de seuil.

d. Fumées de silice

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Elles augmentent les valeurs de seuil et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges. Ferraris et al Montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en super plastifiant que ce soit des pâtes de ciment ou des bétons [18].

e. Pouzzolanes naturelles

La pouzzolane est un matériaux siliceux ou aluminosiliceux qui, finement broyée et à température ambiante en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ libéré par l'hydratation du ciment pour former des composés possèdent des propriétés liantes [18].

I.8. Spécificité de la composition des bétons autoplaçant**a. Une quantité de fines importante**

Les compositions des bétons autoplaçant comportent une importante quantité de fines environ de 500 kg/m^3 de diamètre inférieur à $63\mu\text{m}$ pour assurer la maniabilité et limite les risques de ressuage et ségrégation. Les liants utilisés est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du béton.

b. Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau + air occlus +addition) en plus de son caractère liant, est d'écarter les granulats afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis à vis de l'étalement du béton et le remplissage des coffrages [19].

c. Utilisation de superplastifiant

Les propriétés rhéologiques des BAP s'améliorent en ajoutant des superplastifiants. Leur teneur ne doit être trop élevée (dosage proche de celui de la saturation) sous peine

d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis du problème de ségrégation et de ressuage.

d. Un faible volume de gravillon

Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20mm. le rapport gravillon/sable est voisin ($G/S=1$).

e. Utilisation éventuelle rétenteur

Ce sont généralement des dérivés, celluloses, des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse, visqueuse et en conservent une répartition homogène des différents constituants. [18]

I.9. caractérisation des BAP à l'état frais

Plusieurs essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association française de génie civil. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP [20].

I.9.1. Essai d'étalement (Slump Flow)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure I.6). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton [20].

Il est à noter que les recommandations internationales classent les BAP en trois catégories selon la valeur de l'étalement (SF : Slump Flow) et les applications correspondantes [EFNARC 2002]:

- SF1 (550 - 650 millimètres) est approprié pour les structures en béton non renforcées,
- SF2 (660 - 750 millimètres) convient aux applications courantes (murs, colonnes),

- SF3 (760 - 850 millimètres) est employé pour des applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes. [21].



Figure I. 6 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [21]

I.9.2. Essai de boîte en L

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature $\varnothing$ 14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes.

On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini [20].

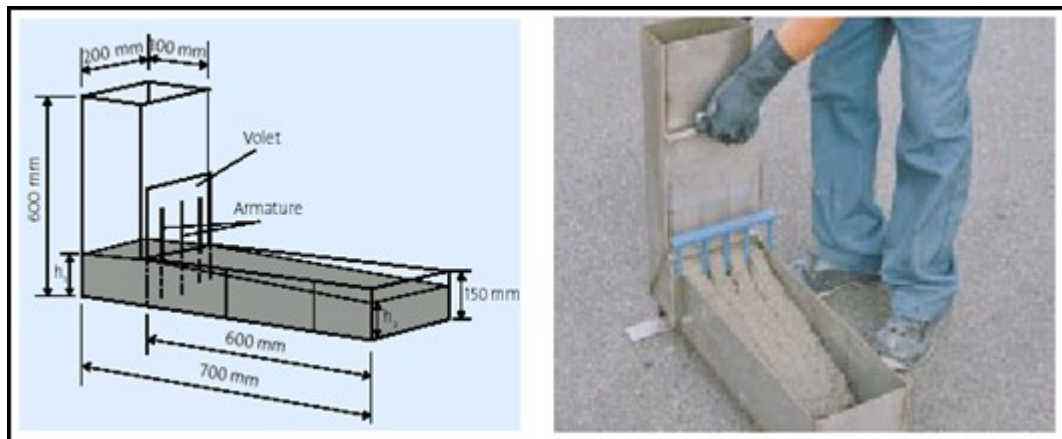


Figure I. 7 : Schéma de la boîte en L [20]

I.9.3. Essai de l'entonnoir

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des BAP.

Un entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert. On mesure le temps (T_v) que met le béton à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide.

Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible. Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du BAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer l'écoulement du béton si, par exemple il y a trop de gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter granulaire élevé.

L'EFNARC [EFNARC 2005] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : $T_v \leq 6$ secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et $9 \leq T_v \leq 25$ pour les autres cas [20].



Figure I. 8 : Essai à l'entonnoir [20]

I.9.4. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçant, il vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [16].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [22] :

- ✓ $0 \% \leq \% \text{ Laitance} \leq 15 \%$: stabilité satisfaisante,
- ✓ $15 \% < \% \text{ Laitance} \leq 30 \%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- ✓ $\% \text{ Laitance} > 30 \%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure I. 9 : Essai au tamis [22]

I.9.5. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié fut développé au japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudée des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur de l'anneau. [21]



Figure I. 10 : Essai d'étalement modifié [21]

I.10. Caractérisation de BAP à l'état durci

La caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci est basée sur les résistances à la compression et à la traction par flexion. Nous constatons que ces valeurs de résistances de béton autoplaçant sont supérieures à celles du béton ordinaire de l'ordre de respectivement 36% et 48% à 28 jours.

I.10.1. Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécanique. L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80 % de celle de référence à 7j et 20 et à 40% à 28 j, ils ont expliqué cette augmentation par le fait que la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. [23].

I.10.2. Résistance à la traction

Gibbs 99 ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence. Par contre, Gibbs 02 ont montré que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons de référence.

En comparant des mélanges de BAP qui ont le même E/C, on trouve que le type et la finesse de la poudre affecte peu la résistance en traction. [23].

I.10.3. Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un comportement différent de relation contrainte-déformation. Si les BAP contiennent une faible quantité de gros granulats et si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de

la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. [23].

I.10.4. Le retrait

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-2005($\mu\text{m}/\text{m}$) que celui des BV. Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif, au moins à long terme, sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées, d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagé d'un retrait sensiblement supérieur dans le cas des BAP. [23].

I.10.5. Le fluage

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors du calcul des structures de bétons.

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi du type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de fluage pour le BAP et pour le BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. [23]

I.11. Approches de formulation des BAP

I.11.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie.

La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son

mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier. [16]

I.11.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Pettersson et Bui. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un Volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al dans une méthode de formulation des bétons de sable. [16]

I.11.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et de Larrard ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton lab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations

différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. Roshavelov a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique. [16]

I.11.4. Méthode basée sur le mode de compactage

L'idée principale de cette méthode consiste à déterminer le compactage maximal du granulat en mesurant sa masse volumique avec différents rapports du sable sur le granulat puis à calculer la quantité de liants (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression du BAP souhaitée. En outre, les pâtes formant le liant (ciment et addition minérale) du mélange doit avoir la même fluidité. Par ailleurs, le dosage du super plastifiant du BAP est déterminé en fixant une valeur cible d'étalement par le biais de mortier avec l'essai d'étalement au cône. [16]

I.12. Principe et application des approches

I.12.1. Approche 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 surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a. 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.

b. Dosage du sable

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

c. Dosage du liant

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3).

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

d. 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. [21]

I.12.2 Approche Suédoise

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. [21]

I.12.3 Approche 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 (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats phase liante sont optimisées.

Une formulation du 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. [21]

I.12.4. Autres méthodes

- Méthode de Nan Su et al. (dénommée méthode chinoise),
- Méthode de Brouwers et Radix (dénommée méthode hollandaise),
- Méthode de Khayat et al. (dénommée méthode canadienne),
- Méthode du mètre cube (dénommée méthode MMC). [24]

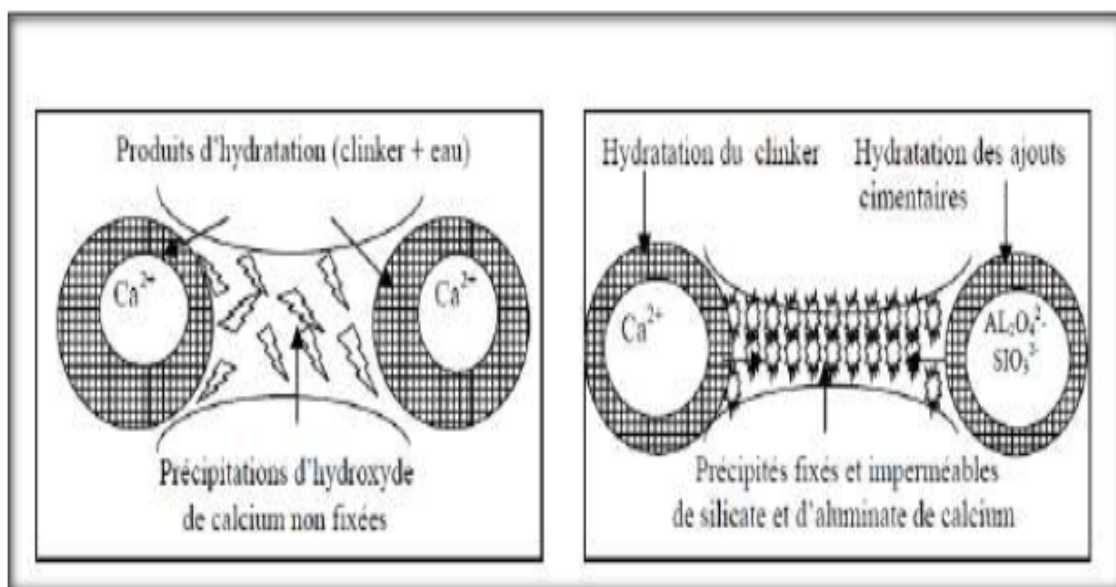
CHAPITRE II : LES AJOUTS CIMENTAIRES

II.1. INTRODUCTION

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures etc....

La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux (**figure II.1**) [25].



(a) Hydratation du ciment sans ajout

(b) Hydratation d'un ciment avec ajout

Figure II.1 : Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.

II.2 Définition

Les ajouts minéraux sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actifs [25].

II.3. Rôle des ajouts cimentaires

II.3.1. Rôle de la granulométrie

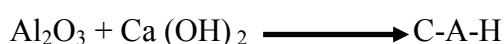
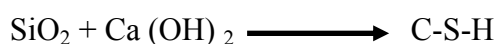
Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [25].

II.3.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux suite à la réaction de l'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissant avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation de la résistance mécanique du matériau. L'idéale est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [25].

Les réactions pozzolaniques sont les suivantes :



II.4. Origine et classification

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

Ajouts minéraux inertes

Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).

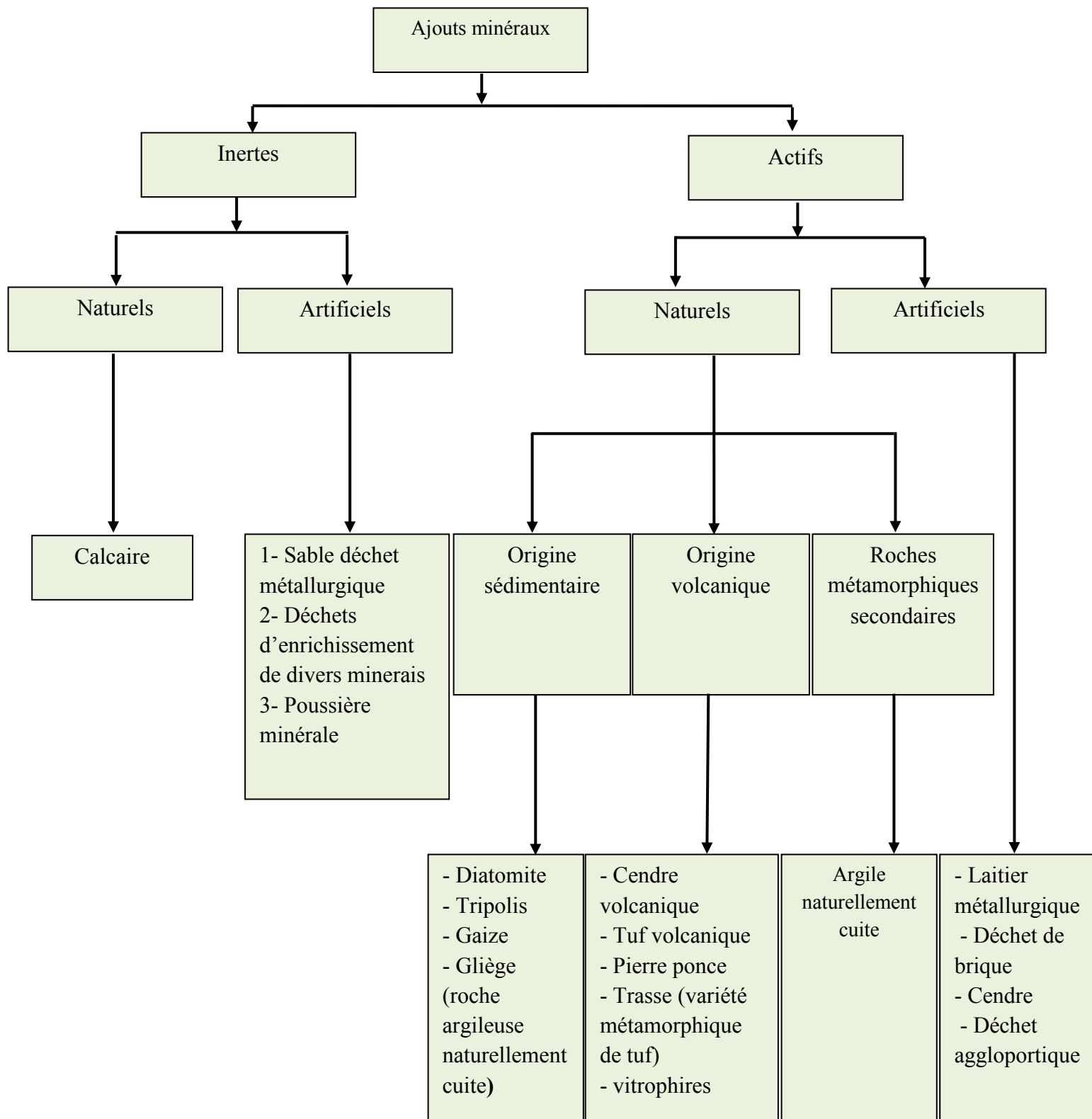


Figure II.2 : origine et calcification des ajouts cimentaires [25].

II.4.1 Principaux ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland, ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés [26].

II.4.1.1 Le calcaire

Dreux G. a défini les fillers comme étant des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte...) naturelles, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de la fissuration...). Les fillers sont dits inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau.

Les normes s'accordent pour définir comme " fines " les éléments passant à travers un tamis de 80µm. On adopte aussi le terme « filler » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80µm. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution [26].



Figure II.2 : fillers calcaires [26].

- **Différents types de calcaire**

Les fillers calcaires sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et contiennent alors des résidus argileux et des matières organiques. Soit obtenus par broyage du matériau cru. Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :

- origine métamorphique, il s'agit des marbres.
- origine sédimentaire.

Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium CaCO_3 (56,03 % de CaO et 43,97 % de CO_2). Le carbonate de calcium existe sous plusieurs formes polymorphiques : calcite, aragonite et vaterite. Le calcaire peut contenir aussi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ou le minéral accessoire qui est la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ [54,27% de CaCO_3 et 45,73% de MgCO_3 ou 30,41% de MgO et 47,72% de CaO]. Le calcaire dolomitique contient un mélange de dolomite et de calcite, tandis que la dolomie ne contient que de la dolomite [26].

• Réactivité du calcaire

Au sujet de la réactivité des fillers calcaires, toutes les études s'accordent sur les points suivants :

- la précipitation de carbonate lors de l'hydratation mise en évidence par de nombreux auteurs.
- la substitution partielle de l'ion sulfate par l'ion carbonate lors de la formation d'étringite. Un nouvel hydrate peut se former et les séquences réactionnelles de l'hydratation ne sont pas modifiées.
- l'interaction entre les silicates calciques et le filler : les principaux résultats ont été obtenus par Ramachandran. Le carbonate de calcium accélère l'hydratation du silicate tricalcique et modifie le rapport Ca/Si des silicates de chaux hydratés (C-S-H). Récemment, Péra et al ont utilisé un filler métamorphique (marbre) contenant 98,6% de CaCO_3 et broyé à une surface spécifique Blaine de $680 \text{ m}^2/\text{kg}$. En étudiant son influence sur le C_3S et le ciment Portland, ils ont obtenu les résultats ci dessous :

La calorimétrie isothermique a montré que dans un C_3S ou un ciment Portland contenant plus de 50% de carbonate de calcium, la quantité de chaleur est plus élevée qu'en absence de CaCO_3 mettant en évidence l'effet accélérateur du CaCO_3 . L'hydratation du C_3S en présence du CaCO_3 produit des hydrates de carbo-silicate de calcium et des bonnes performances mécaniques sont obtenues lorsque les proportions de CaCO_3 sont supérieures à 30%.

Dans la pâte de ciment, le carbonate de calcium modifie les phases alumino-ferrites et produit des hydrates de carbo-silicate et de carbo-aluminate de calcium mais les résistances ne sont pas aussi élevées que dans la pâte de C_3S .

La réflexion s'oriente vers une ou plusieurs activités d'origine physique d'une poudre chimiquement inerte. Il a été montré par calorimétrie que l'hydratation du silicate tricalcique

(C₃S) est plus rapide en présence de fines calcaires. Dans un tel cas, le calcaire n'entre dans aucune réaction chimique, l'accélération de l'hydratation du silicate tricalcique est due à un effet physique dit de «nucléation hétérogène » : les germinations du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite. Cette germination entraîne une précipitation des C-S-H et donc, une précipitation plus rapide de la portlandite Ca(OH)₂. Une explication semblable a été avancée pour l'accélération de l'activité des cendres volantes avant vingt huit jours en présence de fines calcaires. Les réactions entre le ciment et l'eau sont plus rapides en présence de poudre calcaire et donc à chaque instant, il y a davantage d'hydrates formés. Cet effet ne peut expliquer directement une «activité » significative de l'addition.

Néanmoins, il est possible, de l'expliquer d'une façon indirecte. Il faut, en effet, distinguer entre l'avancement des réactions d'hydratation du ciment (phénomène d'ordre chimique), et le développement de résistances (phénomène d'ordre physique). Ce dernier dépend évidemment de la qualité d'hydrates fournis par l'hydratation, mais aussi de la façon dont ces hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons.

En conséquence, la germination au contact de la surface des additions a deux conséquences :

L'accélération de l'hydratation et la modification de l'assemblage des hydrates favorables à la résistance.

Ce deuxième effet expliquerait l'activité des additions même si, par ailleurs, elles peuvent être considérées comme chimiquement inertes.

Contrairement à ce qui se passe avec les silicates tricalciques (C₃S), les additions calcaires peuvent, ne pas être chimiquement inertes quand elles sont en présence du ciment. Il peut y avoir en effet, une réaction chimique entre le carbonate de calcium et l'aluminate tricalcique, donnant un carbo-aluminate de calcium, cette réaction est facile à reproduire au laboratoire où l'on peut synthétiser le carbo-aluminate à partir de ses composants.

Une analyse détaillée, par diffraction aux rayons X, du ciment hydraté en présence d'une poudre calcaire, permet souvent d'observer ce produit parmi les hydrates formés. Toutefois, on peut penser que cette réaction contribue peu, en général, à l'activité des additions calcaires. En effet, quand elle se produit dans les ciments Portland, elle est toujours en concurrence avec une autre réaction très rapide, entre le gypse et le C₃A qui a toujours lieu pour former de

l'étringite. Or le dosage en gypse est soigneusement optimisé pour réguler la prise tout en conservant la résistance normale du ciment [27].

• Rôle du calcaire dans le béton

Ces actions conjuguées avec l'effet des adjuvants organiques, rendent le béton maniable tout en maintenant la cohésion inter-granulaire. Grâce à une meilleure ouvrabilité du béton et à la présence des particules fines qui comblent les vides, l'empilement granulaire est plus compact. Le béton possède de ce fait de meilleures performances mécaniques, sa porosité est diminuée et sa durabilité s'en trouve améliorée.

Aïteïn P-C estime qu'en plus de ce rôle principal, qui est de densifier la matrice de mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuerait à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates.

Ramachandran et Chun-mei, ont observé que l'ajout de (CaCO_3) au (C_3S) accélère l'hydratation du ciment. Les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment au jeune âge.

Damtoft et al ont montré que l'effet synergétique entre le clinker minéralisé (par CaF_2 et SO_3) et le filler très fin, conduit à l'obtention des résistances précoces au jeune âge plus élevées que dans le clinker normal. Ce qui permet leur utilisation par exemple dans l'industrie de précontrainte où les résistances précoces sont requises, sans avoir besoin d'augmenter le dosage en ciment [28].

II.4.1.2 Sable de dune

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter.

L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

II.4.2 Les ajouts minéraux actifs

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs

- **Ajouts minéraux actifs naturels**

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gazes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

- **Ajouts minéraux actifs artificiels**

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs.
- Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles).
- Les cendres des combustibles.
- Les laitiers métallurgiques.
- Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique à quantité élevée.

Les argiles cuites se présentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile à teneur élevé en KAOLINITE (Al_2O_3 , 2SiO_2 , $2\text{H}_2\text{O}$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.

Les laitiers métallurgiques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs. L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.

L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages par rapport aux ajouts inertes.

II.4.2.1 La pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables,

peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [29]. Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments [26].

➤ **Pouzzolane naturelle**

C'est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.



Figure II.3 : pozzolane naturelle [26].

➤ **Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite.

II.4.2.2 Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit du procédé de fusion utilisé dans la production de métaux siliceux et d'alliages ferro-siliceux. La fumée de silice possède une concentration élevée de dioxyde de silicone amorphe et se présente sous forme de très fines particules sphériques.

Elle est souvent appelée micro silice, poussière de cendres volantes riche en silice. Les fumées de silice présentent habituellement les caractéristiques suivantes : teneur en silice comprise entre 85% et 98%; taille moyenne des particules comprise entre 0,1 et 0,2 μ m ; forme sphérique et un grand nombre d'agglomérats élémentaires; structure amorphe. Les fumées de silice sont utilisées à l'état naturel, densifiées, ou sous forme de coulis mélangés à 50% d'eau par unité de poids.

Il ne faut pas oublier qu'on utilise ces ajouts cimentaires de deux manières différentes: comme substitution du ciment, pour réduire la quantité du ciment, en général pour des raisons économiques et, par conséquent, pour réduire la chaleur dégagée lors de l'hydratation et pour minimiser ainsi le risque de fissuration; comme ajout, pour améliorer les propriétés du coulis, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Pour des teneurs en fumée de silice et des rapports E/C faibles, les petites microsphères de la fumée de silice, qui sont 100 fois plus petites que les particules de ciment, déplacent l'eau piégée entre les grains de ciment; donc plus d'eau pour améliorer la maniabilité du mélange.

Les fumées de silice sont très efficaces pour réduire le ressuage et la ségrégation. Les mélanges contenant de la fumée de silice sont plus denses et plus imperméables que les mêmes mélanges sans fumée de silice. En effet, les microsphères de la fumée de silice réagissent avec les cristaux de CH obtenus lors de l'hydratation du ciment, pour former des C-S-H secondaires qui ont une structure plus compacte. La fumée de silice est un produit dont la composition chimique ne varie que rarement ou pas dans une même production donnée [26].



Figure II.4 : fumée de silice

- **Action de la fumée de silice**

- a. **Mécanisme d'action de fumée de silice**

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

- **Effet pouzzolanique**

Grâce à leur finesse, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H, et on peut observer des gains de résistance en

compression à jeune âge (7 jours) contrairement à la pouzzolane naturelle ou artificielle où il faut attendre plus de 28 jours pour observer des gains de résistance en compression.

➤ **Effet physico-chimique**

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compact et imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de 0.1 μm commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins, ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit [30].

➤ **Effet physique**

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

D'après P-C.AITCIN, la fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment. [31].

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

b. influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons

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

➤ **A l'état frais**

L'utilisation des fumées de silice, permet :

- ❖ D'augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons autoplacants [32] ;
- ❖ faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

➤ **A l'état durci**

- ❖ Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton (Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement Imperméables);
- ❖ Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance compression à 28 jours (d'après P.C.AITCIN, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4 kg de ciment) [31].
- ❖ Réduire considérablement la quantité de chaleur d'hydratation qui se développe dans un béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.

II.4.2.3.Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique tableau (I.9), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparés Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé. Ou après avoir été corroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons

- ❖ Broyage poussé;
- ❖ Chaleur (étuvage, autoclavage);
- ❖ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude.



Figure II.5 : Laitier de haut fourneau [26].

II.4.2.4 Le métakaolin

Le métakaolin est une pouzzolane de synthèse et sa première utilisation, antérieure à 1962, concerne le béton de barrage de Jupia Dam au Brésil. L'introduction de matériaux à propriétés pouzzolaniques comme le métakaolin, en remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagée car ces pouzzolanes sont utilisées pour réagir avec la portlandite pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment. La réglementation ASTM 618-71 sur le ciment indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) à température et pression ordinaires pour former un liant. Récemment, le métakaolin a été introduit comme une pouzzolane très active et efficace pour le remplacement partiel du ciment dans le béton. Le métakaolin est un produit à base de silice qui, par réaction avec Ca(OH)_2 , produit un gel de CSH à température ambiante. Le métakaolin contient également de l'alumine qui réagit avec CH pour produire d'autres phases, y compris C_4AH_{13} , C_2ASH_8 et C_3AH_6 .



Figure II.6 : Métakaolin[26].

• Réactivité Hydroxyde de calcium- Métakaolin

La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution- précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium et un matériau pouzzolanique. Diverses études ont été menées sur l'analyse des différents produits de réaction d'un mélange métakaolin, hydroxyde de calcium et eau, les composés majoritairement présents sont la géhlénite hydratée, des aluminates tétracalciques hydratés et des silicates de calcium hydratés. La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + Ca(OH)_2 + eau $\longrightarrow$ Silicates de calcium hydratés, Silico-aluminates de calcium hydratés.

L'ordre de réactivité est directement lié à l'état de désorganisation du réseau cristallin après activation thermique.

• Réactivité ciment-métakaolin

Les mortiers contenant du ciment et du métakaolin sont plus visqueux que des mortiers contenant uniquement du ciment lorsqu'ils sont formulés avec un ratio eau/liant identique. Afin d'obtenir des consistances identiques, il est alors indispensable d'augmenter le dosage en superplastifiant.

L'incorporation de métakaolin dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres du ciment. Elle provoque l'apparition d'une porosité fermée favorable à la résistance mécanique et à la durabilité des matrices cimentaires, due à la formation d'une plus grande quantité de C-S-H et à l'absence de connections des pores.

La consommation de l'hydroxyde de calcium contenu dans le ciment portland par les métakaolins permet également de supprimer le phénomène des efflorescences qui rendent très délicate la coloration des bétons [26].

II.5 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

L'utilisation des ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

II.5.1 Intérêt du point de vue technique

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice).

Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [25].

II.5.2 Intérêt du point de vue économique

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous --produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [25].

II.5.3 Intérêt du point de vue environnemental

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO_2). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO_2 . Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO_2 [25].

II.6 Les inconvénients de l'utilisation des ajouts minéraux

- ❖ Retard de prise;
- ❖ Résistance à la compression à jeune âge plus faible ;
- ❖ Mûrissement plus long;
- ❖ Résistance à l'écaillage controversée ;
- ❖ Le broyage et le transport plus cher.

II.7 Effets des ajouts sur les propriétés des bétons

II.7.1 Amélioration de l'ouvrabilité

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le Ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres

volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 % [25].

II.7.2 Chaleur d'hydratation

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

II.7.3 Durabilité

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH.

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'étringite expansive. Les conditions pour que cette réaction se passe sont : La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C_3A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout [25].

II.7.4 Développement des résistances

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajout, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H [25].

II.7.5 Développement des bétons à haute résistance

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [25].

II.8. Bénéfices de l'utilisation des ajouts minéraux

Les ajouts cimentaires sont des matériaux que l'on mélange au ciment portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les ajouts cimentaires typiques sont les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice. L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [33].

II.8.1 Bénéfices fonctionnels

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.
- Modification de la nature et de la texture des hydrates formés.
- Prise et durcissement pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau [33].

II.8.2 Bénéfices économiques

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation.

- Comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible [33].

II.8.3 Bénéfices écologiques et environnementaux

- diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière
- élimination des sous-produits de la nature.

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique. De ce fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂. En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO₂ par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO₂ causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO₂. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment [33].

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1 Introduction

Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais physico-mécaniques réalisés sur les matériaux utilisés pour l'élaboration du béton (Graviers, Sables, Ciment, Eau de gâchage, Calcaire, ajout) et les différents essais réalisés sur le béton à l'état frais (essais d'étalement au cône d'Abrams, la boîte en L, stabilité au tamis et la masse volumique) et durci tel que les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B 42.5, provenant de la cimenterie de M'silla. Le ciment MATINE c'est un ciment gris de haute résistance initiale et finale est qui contient 15 % de fillers calcaire conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94. Ses caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques sont montrées dans les tableaux III.1, III.2, III.3 et III.4.

Tableau III .1 : caractéristiques physiques du ciment :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Consistance normale	27.2	(%)
Début de prise	170	(min)
Fine de prise	230	(min)
SSB	3857	(cm ² /g)
Masse spécifique	3.10	(g/cm ³)

Les valeurs des résultats obtenus sont compatibles avec les exigences de normes correspondantes.

Tableau III.2 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment.

Propriétés	âge (j)		
	2 jours	7jours	28jours
Résistance à la compression (Mpa)	21.45	38.27	48.65
Résistance à la flexion (Mpa)	4.34	6.12	8.18

Tableau III.3 : Composition chimique du ciment par fluorescence X.

Oxydes	Teneur (%)
SiO ₂	16.96
Al ₂ O ₃	4.68
Fe ₂ O ₃	2.98
CaO	60.19
MgO	1.84
K ₂ O	0.61
Na ₂ O	0.093
SO ₃	1.65
Chlorures	0.017
Insoluble	1.14
Paf	9.87

Tableau III.4 : Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X.

PHASE	ELEMENTS	TENEUR (%)
Clinker	C ₃ S	52
	C ₂ S	15
	C ₃ A	03
	C ₄ AF	12
	CaO libre	01
Régulateur de prise	Gypse	04
Ajouts	Calcaire	13

III.3 Fillers de calcaire :

C'est un calcaire issu du gisement d'EL-KHAROUB qui occupe la partie du sud massif ou settas au sud-est de Constantine. Le calcaire d'origine biochimique néritique est caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée (Figure III.1).

Les caractéristiques chimiques et physiques des fillers calcaires sont données dans les tableaux III.5 et III.6.



Figure III.1 : Fillers de calcaire

Tableau III.5 : Analyse chimique du calcaire par fluorescence X

Oxydes	Teneur (%)
SiO ₂	4.83
Al ₂ O ₃	1.04
Fe ₂ O ₃	0.37
CaO	51.73
MgO	0.46
K ₂ O	0.14
Na ₂ O	0.08
SO ₃	0.08
TiO ₂	0.03
P ₂ O ₅	0.05
Paf	41.17

Tableau III.6 : Propriétés physiques des fillers calcaire

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.66 (g/cm ³)
Finesse –Blaine	7230 (g/cm ³)

III.4 Gravier

Les graviers utilisés dans cette étude, sont le gravier 8/15 de la région CHELGHOUM et le gravier 3/8 de SETIF. Leurs caractéristiques sont données dans les tableaux III.7, III.8, III.9 et III.10.

**** Gravier G_{8/15} de (CHELGHOUM)**

Tableau III.7 : Caractéristiques physiques du gravier 8/15(CHELGHOUM)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,66	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,42	g/cm ³
Teneur en eau	0.40	%
Los Angeles	24.3	%
Micro Deval	26.8	%
Absorption	0,60	%
Porosité	1.62	%

Tableau III.8 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/15 de (CHELGHOUM) :

Echantillon : gravier 8/15(CHELGHOUM)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	TamisâtCumulés (%)
20	00	00	100
16	250,7	0,85	99,14
14	829,2	27,64	72,36
12.5	1344,7	44,82	55,17
10	2195,7	73,19	26,81
8	2786,6	92,82	7,11
6.30	2968,5	98,95	1,05
5	2977	99,23	0,76
Fond de tamis	2987,1	99,57	0,43

**** Gravier: G_{3/8} de (SETIF):**

Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du gravier G3/8(SETIF)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,63	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,42	g/cm ³
Teneur en eau	0.40	%
Los Angeles	24.3	%
Micro Deval	26.8	%
Absorption	0,64	%
Porosité	1.74	%

Tableau III.10 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 3/8(Sétif) :

Echantillon : gravier 3/8(Sétif)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	TamisâtCumulés(%)
10	0	0	100
8	22,5	1,12	98,87
6,30	450,2	22,5	77,49
5	1206,2	60,3	39,69
4	1688,6	84,43	15,57
3,15	1909,2	95,46	4,54
2,5	1976	98,8	1,2
Fond de tamis	1994	99,7	0,3

III.5 Le Sable

Les sables utilisés sont le sable roulé grossier de la région de BAGHLIA et le sable fin de BOUSSAADA. Après traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et d'analyse granulométrique (Tableaux III.11, 12, 13 et III.14).

Tableau III.11 : Caractéristiques physiques du sable 0/1.25 (BOUSSADA) :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,61	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,31	g/cm ³
Teneur en eau	4.75	%
ESV	69,10	%
ESP	60,97	%
Absorption	0.96	%
Porosité	2.46	%
La teneur en bleu	0.90	%

Tableau III.12 : Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/1.25(BOUSSADA) :

Echantillon : sable fin (Boussada)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Refuscumulés (%)	tamisât cumulés(%)
2	00	00	100
1,25	2	0,2	99,8
0,63	16,1	1,61	98,39

0,315	315,3	31,53	68,47
0,16	860,2	86,02	13,98
0,08	953,3	95,33	4,47
Fon de tamis	982,4	98,24	1,76
Module de finesse(M_f)	1,19		

Tableau III.13 : Caractéristiques physiques du sable de Baghlia (0/4)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,66	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,53	g/cm ³
Teneur en eau	3.85	%
ESV	71,97	%
ESP	69,75	%
Absorption	0,95	%
Porosité	2.36	%
La teneur en bleu	0.95	%

Tableau III.14 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de Baghlia

Echantillon : sable roulé			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
8	00	00	100
6,3	76.5	3.82	96.18
5	139.5	6.97	93.03
4	242.8	12.14	87.86
2,5	562.3	28.11	71.89
1,25	1027.6	51.38	48.62
0,63	1482.5	74.12	25.88
0,315	1768.5	88.42	11.58
0,16	1937.4	96.87	3.13
0,08	1961.4	99.04	0.93
Fon de tamis	1986.2	99.31	0.69
Module de finesse (M_f)	3,45		

Remarque :

On remarque que le sable de BAGHLIA a un module de finesse très élevé (3.31), donc il faut faire une correction par le sable fin de BOUSSAADA pour avoir un module de finesse $2,2 \leq MF \leq 2,8$.

Correction du sable de Baghlia:

Le module de finesse désiré est $M_{fx} = 2.5$ ($M_{f1}=3.31$ et $M_{f2}=1.19$)

Le % de Sable gros = $[(M_{fx}-M_{f2}) / (M_{f1}-M_{f2})] \times 100$

Donc : Le % de Sable gros = $[(2.5-1.19)/(3.31-1.19)] \times 100 = 61.80\%$

Le % de Sable fin = $[(M_{f1}-M_{fx}) / (M_{f1}-M_{f2})] \times 100$

Donc : Le % de sable fin = $[(3.31-2.5)/(3.31-1.19)] \times 100 = 38.20\%$

M_{fx} : module de finesse désiré.

M_{f1} : module de finesse de sable grossier.

M_{f2} : module de finesse de sable fin.

Tableau III.14 : Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé (Baghlia + Boussada)

Echantillon : sable corrigé (Baghlia+Bousaada)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât Cumulés (%)
08	00	00	100
6,3	52.6	2.63	97.37
5	109.6	5.48	94.52
4	166.3	8.31	91.68
2,5	330.2	16.51	83.49
1,25	561.7	28.08	71.92
0,63	769.4	38.47	61.53
0,315	992.5	49.62	50.38
0,16	1837.7	91.88	8.12
0,08	1953.7	97.68	2.31
Fon de tamis	1992.2	99.61	0.32
Module de finesse (M_f)		2.3	

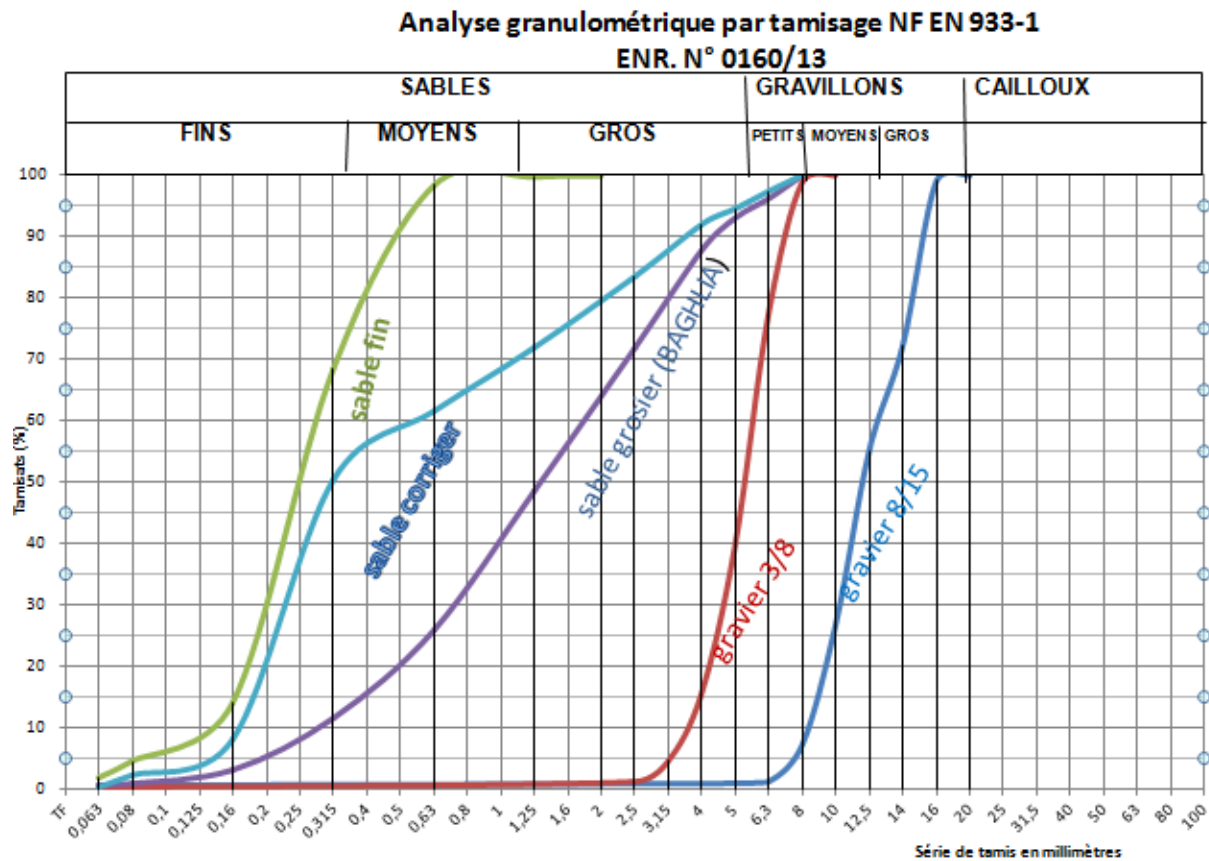


Figure III.2 Courbes granulométriques des granulats naturels

III.6. Ajout naturel : Roche de Tlemcen

Le type d'ajout utilisé dans ce travail est une roche naturelle siliceuse de la région de Tlemcen. Elle est d'origine volcanique extraite sous forme de morceaux de roche de diamètre variant de 10 à 20 cm, de couleur grise, elle a l'aspect d'un verre et elle se fragmente en petites sphères comme montrée sur la figure III.3.

La roche de la région de Tlemcen a été exploitée dans ce travail pour être utilisée à différentes dimensions comme un matériau cimentaire (comme une substitution au ciment), comme un sable, et comme gravier. Les Propriétés physiques et la composition chimique de la poudre de la roche sont présentées dans les tableaux III.15 et III.16.



Figure III.3 : Roche de Telmcen sous forme de gravier, sable, poudre.

L'analyse chimique de la poudre de la roche de la région de Tlemcen montre qu'elle est contient des taux de silice et d'alumine très élevés par rapport à ceux du ciment.

Tableau III.15. : Analyse chimique de la roche par fluorescence X

	Teneur (%)
SiO ₂	64.44
Al ₂ O ₃	14.94
Fe ₂ O ₃	1.51
CaO	5.79
MgO	1.33
K ₂ O	3.40
Na ₂ O	1.87
SO ₃	0.88
Cl	0.41

Rb ₂ O ₃	0.60
P ₂ O ₅	0.091
Pbo	0.010
MnO	0.17

Tableau III.16. Propriétés physiques de la poudre de la roche:

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.378(g/cm ³)
SSB	5400(g/cm ³)

III.7.Gravier :

La roche de Tlemcen est utilisée comme un gravier pour remplacer une partie du gravier naturel.

**** Gravier : G_{8/15}**

Tableau III.17. : Caractéristiques physiques du gravier 8/15(Roche)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,46	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,43	g/cm ³
Teneur en eau	0.35	%
Los Angeles	27.2	%
Micro Deval	29.3	%
Absorption	0,67	%
Porosité	1.73	%

Tableau III.18 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 8/15 (Roche)

Echantillon : gravier 8/15 (ROCHE)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât Cumulés (%)
16	00	00	100
14	34,6	1,15	98,84
12.5	350,6	11,68	88,31
10	1792,8	59,76	40,24
8	2719	90,63	9,36
6.30	2856,1	95,20	4,79
5	2925,5	97,51	2,48
4	2975,2	99,17	0,82
Fon de tamis	2995,7	99,85	0,14

****Graver: G_{3/8} (Roche):**

Tableau III.19. : Caractéristiques physiques du gravier 3/8 (Roche)

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,44	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,41	g/cm ³
Teneur en eau	0.35	%
Los Angeles	27.2	%
Micro Deval	29.3	%
Absorption	0,66	%
Porosité	1.73	%

Tableau III.20. : Analyse granulométrique par tamisage du gravier lavé 3/8(ROCHE) lavé :

Echantillon : gravier 3/8(ROCHE)			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât Cumulés (%)
10	00	00	100
8	158,7	7,93	92,06
6,30	758,3	37,91	62,08
5	1233,5	61,67	38,32
4	1547,1	77,35	22,64
3,15	1892,6	94,63	5,37
2,5	1944,5	97,22	2,77
Fon de tamis	1966,8	98,34	1,66

III.8.Sable :

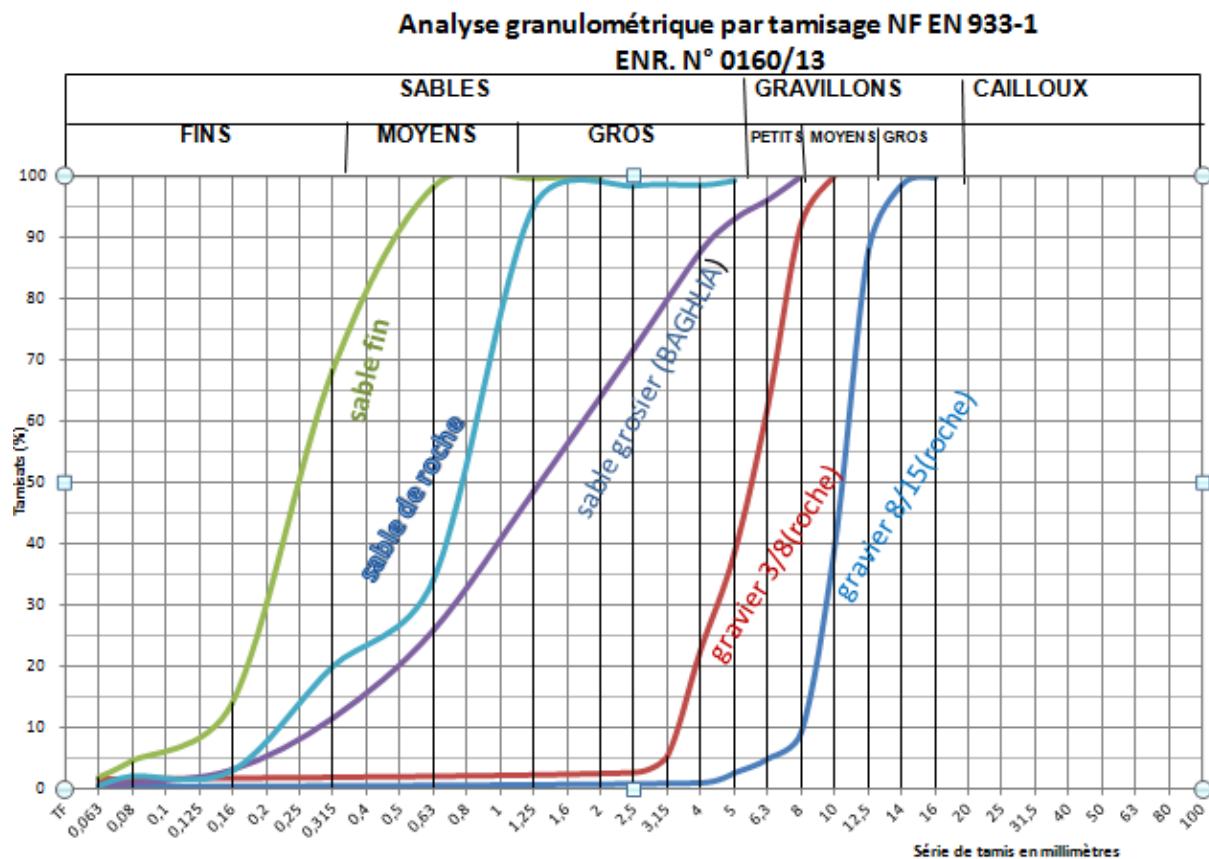
De même, la roche est broyée jusqu'à obtenir un sable grossier.

Tableau III.21. : Caractéristiques physiques du sable grossier

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2,43	g/cm ³
Masse volumique apparente	1,28	g/cm ³
Teneur en eau	0.85	%
ESV	75,98	%
ESP	66,13	%
Absorption	0,75	%
Porosité	1.98	%
La teneur en bleu	0.85	%

Tableau III.22. : Analyse granulométrique par tamisage du sable grossier

Echantillon : sable fin			
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	
5	10.2	0.51	99.49
4	25.6	1.28	98.72
2,5	27.56	1.37	98.63
1,25	95	4.75	95.25
0,63	1316	65.8	34.2
0,315	1696	79.88	20.12
0,16	1939.3	96.95	3.05
0,08	1957.1	97.85	2.14
Fon de tamis	1988.6	99.43	0.57
Module de finesse (M_f)	2.49		

**Figure III.4 : Courbes granulométriques des granulats de la roche.**

III.09. L'eau de gâchage

Pour la confection des bétons, l'eau potable d'oued Samar a été utilisée.

III.10 L'adjuvant

Un superplastifiant de type **MEDAFLOW 30** est utilisé dans le béton. C'est un haut réducteur d'eau de troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise.

III.10.1 Domaine d'application

Les bétons de préfabrication.
Les bétons prêts à l'emploi
Les bétons lourds et légers
Les bétons d'ouvrages d'art
Les bétons de dallages industriels
Les bétons de bâtiment
Les bétons précontraints
Les bétons pompés
Les bétons pour fondations profondes
Les bétons pour ouvrages fermement ferrailés
Les bétons soumis à des milieux agressifs
Les BHP, BTHP et BUHP
Les bétons architectoniques.

III.10.2 Propriétés

Grace à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Eviter la ségrégation

- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau)
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration.

III.10.3 Caractéristiques

Aspect	Liquide
Couleur.....	Brun clair
PH	6-6,5
Densité.....	1,07± 0,01
Teneur en chlore.....	< 0,1 g/l
Extrait sec.....	30%

III.10.4 Mode d'emploi

Le MEDAFLOW 30 ne doit pas être ajouté directement dans l'eau de gâchage, mais après un temps préalable de malaxage et après que 50 à 70 % de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Le MEDAFLOW 30 peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), et après introduction de la dose convenable, le malaxeur devra tourner à grande vitesse pendant 2 à 3 minutes après l'introduction du superplastifiant ; Il est conseillé d'ajouter le MEDAFLOW30 à un béton qui ne soit pas trop ferme.

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Conditionnement et stockage :

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10 kg et 240 kg, cubitenaire 1100 kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la formulation des bétons autoplaçants étudiés et les résultats expérimentaux, ainsi que leurs caractérisations rhéologiques à l'état frais (étalement au cône d'Abrams, boîte en L et l'essai de stabilité au tamis) et physico-mécanique à l'état durci (résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion ainsi que la vitesse du son).

IV.2 Formulation du BAP témoin par la méthode japonaise

a) Calcul de composition

Cette étape est consacrée à la formulation d'un BAP par la méthode japonaise. Les intervalles pour chaque composant donnés par cette méthode sont donnés dans le tableau :

Tableau IV.1 : intervalles pour chaque composant selon la méthode japonaise.

Composant	Intervalle préconisé
Volume de la pate	330 à 400 (l/m ³)
La masse de ciment	300 à 450 (kg/m ³)
Le dosage de calcaire	10 % de poids du ciment
Volume de gravillons	G/S proche de 1
Le dosage en super plastifiant	Proche de son dosage de saturation

b) Données de base: Le dosage en superplastifiant est donné selon l'essai de point de saturation pour MEDAFLOW 30. Il est de 1.7% du poids de liant.

c) Optimisation de la composition du BAP

$$M_C = 430 \text{ kg/m}^3$$

$$M_F = 43 \text{ kg/m}^3 \text{ de Filler de calcaire (10\% de poids de ciment)}$$

$$G/S = 0,9$$

$$E/(C+F) = 0,38$$

d) Détermination de la masse de chaque constituant

$$C = 430 \text{ kg/m}^3$$

$$F = 43 \text{ kg/m}^3$$

$$E/(C+F) = 0,38 \text{ donc } E = 0,38 \times (430+43) \Rightarrow E = 179,74 \text{ l/m}^3$$

La masse de Superplastifiant Sp est de 1.7% du point de liant, L = 473 kg

$$Sp = 0.017 \times (430+43) = 8.04 \text{ kg/m}^3$$

$$Sp = 8.04/1.07 = 7.51 \text{ L/m}^3 \text{ avec } 1.07 : \text{ la densité de Sp}$$

L'extrait sec du superplastifiant est de 30%

Donc la quantité d'eau provenant du superplastifiant est de $0.7 \times 7.51 = 5.25 \text{ L/m}^3$

D'où la quantité d'eau utilisée pour 1 m^3 est de 174.49 L/m^3

Volume de la pâte :

$$V_p = V_c + V_f + V_e + V_{Sp}$$

$$V_p = 137.82 + 16.16 + 174.49 + 7.51 = 335.98 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume des granulats} = 1000 - 335.98 = 664.02 \text{ l/m}^3$$

$$G/S = 0,9 \Rightarrow S = 664.02 - G$$

$$G/S = 0,9 \Rightarrow \begin{cases} S = (664.02/1,9) = 349,48 \text{ l/m}^3 \\ G = 664.02 - 349,81 = 315,54 \text{ l/m}^3 \end{cases}$$

$$\text{Volume de sable: } S = 349,81 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Volume de gravier : } G = 315,54 \text{ l/m}^3$$

e) Les masses des sables

Le volume de sable est $349,48 \text{ l/m}^3$, après la correction avec deux types de sables (fin+grossier) selon la méthode d'ABRAMS.

Sable grossier de Baghlia :

$$\text{Volume sable grossier} = 215.97 \text{ L/m}^3$$

Sable fin de Boussada :

$$\text{Volume de sable fin} = 133.50 \text{ L/m}^3$$

* Pour le gravier :

$$\text{Le volume de gravier est : } 315,54 \text{ l/m}^3$$

Le gravier ($G_{3/8} - G_{8/15}$) est tel que :

$G_{3/8} - 1/3$: volume $G_{3/8} = 104.84 \text{ l/m}^3$

$G_{8/15} 2/3$: volume $G_{8/15} = 209.69 \text{ l/m}^3$

f) Dosage des constituants du BAP pour 1m^3 de béton

Les dosages de chaque constituant de 1 m^3 de BAP témoin sont donnés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Composition d' 1m^3 BAP (témoin) :

Constituants	Volume (l/m^3)	Masse (kg/m^3)
Ciment	137.82	430
Fillers calcaire	16.16	43
Sable fin	133.50	348.43
Sable grossier	215.97	574.48
Graviers (3/8)	104.84	275.72
Graviers (8/15)	209.69	557.77
Eau	174.49	174.49
Superplastifiant	7.51	8.04

IV.3 Formulation du BAP contenant la roche naturelle

Six formulations de BAP ont été élaborées avec différentes dimensions des grains de la roche de Tlemcen (Tableau IV.3, IV.4):

Tableau IV.3: Composition des BAP contenant la roche naturelle

Notation	Composition des bétons autoplaçants
BAP01	BAP témoin (10% filler calcaire)
BAP02	Elaboré à base de sable de roche (substitution 50% de sable)
BAP03	Elaboré à base de gravier de roche (substitution 50% de gravier)
BAP04	Elaboré à base d'ajout de roche (substitution 10% de poudre de roche)
BAP05	Elaboré à base d'ajout de roche (substitution 15% de poudre de roche)
BAP06	Elaboré à base d'ajout de roche (substitution 20% de poudre de roche)

Tableau IV.4 : Composition d'1 m³ des différents BAP

Constituants	BAP 01 (Kg/m ³)	BAP 02 (Kg/m ³)	BAP 03 (Kg/m ³)	BAP 04 (Kg/m ³)	BAP 05 (Kg/m ³)	BAP 06 (Kg/m ³)
Ciment	430	430	430	387	365.5	344
Fillers Calcaire	43	43	43	43	43	43
ajout roche	-	-		43	64.5	86
Sable fin	348.43	348.43	348.43	348.43	348.43	348.43
Sable Grossier	574.48	287.24	574.48	574.48	574.48	574.48
Sable Roche	-	262.41	-	-	-	-
Gravier _{3/8}	275.72	275.72	137.86	275.72	275.72	275.72
Gravier _{8/15}	557.77	557.77	278.88	557.77	557.77	557.77
Gravier _{3/8} Roche	-	-	127.91	-	-	-
Gravier _{8/15} Roche	-	-	257.92	-	-	-
Eau efficace	174,49	174,49	174,49	174,49	174,49	174,49
Superplastifiant	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
Masse volumique théorique	2411.4	2386.57	2380.48	2411.4	2411.4	2411.4

IV.4. Résultats des essais sur les bétons BAP à l'état frais

Après formulation des différentes compositions de béton BAP, une série d'essais d'ouvrabilité à l'état frais a été réalisée à savoir, l'étalement, boîte en L et stabilité au tamis. Le tableau V.5 regroupe l'ensemble des résultats d'essais sur béton frais.

Tableau IV.5: Résultats d'ouvrabilité sur béton frais

Type de béton	Etalement (cm)	Boite en L (%)	Stabilité au tamis(%)
BAP01	71	0.9	4
BAP02	69	0.85	3.7
BAP03	68	0.82	1.6
BAP04	70	0.84	5
BAP05	62	0.81	1.12
BAP06	60	0.80	0.7

IV.4.1 Etalement des bétons BAP

La figure IV.1 montre la fluidité des bétons autoplaçants étudiés à partir de leurs étalements. D'après les résultats de l'essai d'étalement qui est utilisé pour mesurer la mobilité du béton BAP en milieu non confiné, il est clair que toutes les compositions vérifient la condition d'étalement pour un béton autoplaçant.

Les résultats obtenus montrent que la fluidité du béton témoin BAP01 et le béton contenant un taux de substitution au ciment de 10% BAP04 est presque la même. Par ailleurs, la roche utilisée en tant que sable ou gravier à 50%, diminue légèrement l'étalement et donc la fluidité du BAP 02 et BAP03. Cela est dû peut être à la forme angulaire qui freine l'écoulement des bétons comparés au béton témoin BAP01. Par contre, le taux de substitution de 20% et 30% de la poudre de roche engendre une diminution nette d'étalement des BAP05 et BAP06 par rapport à celui du béton BAP01 témoin. Ceci est lié à l'augmentation de la compacité du BAP par les fines de la roche conduisant à un mélange à forte absorption d'eau, augmentant ainsi la viscosité et diminuant l'étalement du BAP.

En d'autres termes, Remplacer la moitié du sable ou du gravier et encore mieux substitué le ciment par un taux de 10% de la poudre de la roche naturelle, est une solution qui donne de bons résultats de fluidité du béton BAP qui s'alignent avec ceux du BAP témoin.

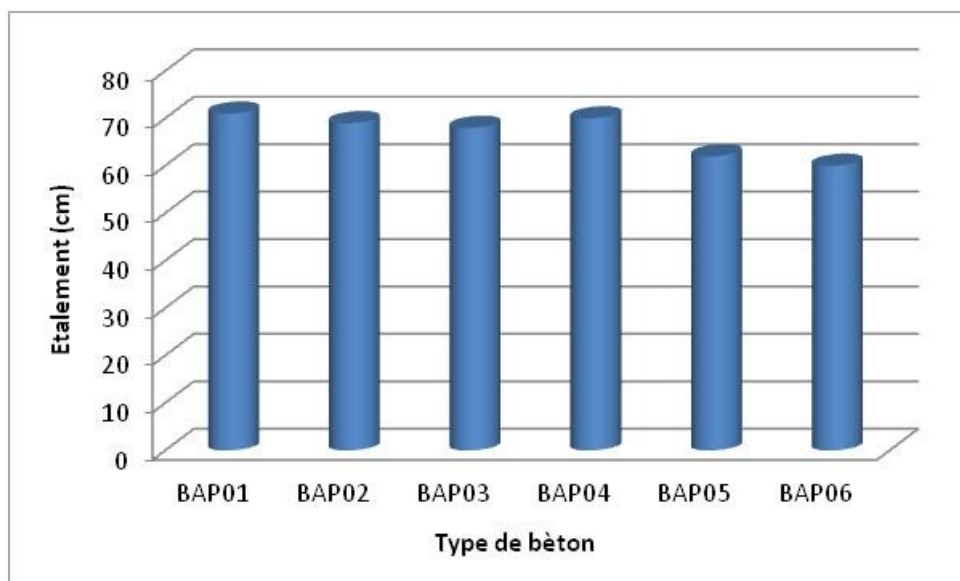


Figure IV.1 Etalement des différentes BAP

IV.4.2 Mobilité des bétons BAP en milieu confiné (Boite en L)

L'essai de la boîte en L est exploité à travers le taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond est en début de la boîte) qui doit en principe être supérieur à 0,8. Cet essai permet de tester la mobilité du béton BAP en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par le blocage des granulats en amont des armatures. Les résultats montrent les valeurs du taux de remplissage sont acceptables lorsqu'on compare les taux des BAP contenant la roche avec des grains à différentes dimensions (passant d'un ajout à un sable, à un gravier) avec ceux du BAP01 témoin (Figure IV.2). Par ailleurs, tous les BAP contenant les granulats et fines (ajout) de la roche naturelle ont donné des résultats conformes aux exigences des BAP, donc la mobilité des BAP dans un milieu confiné est assurée, ce qui leur permet de s'écouler à travers les armatures correctement. Ainsi, dans le BAP, remplacer 50% de sable par un sable de roche ou substitué le ciment par 10% de la poudre de roche mènent aux meilleurs taux de remplissage qui s'approchent le plus de ceux du béton témoin.

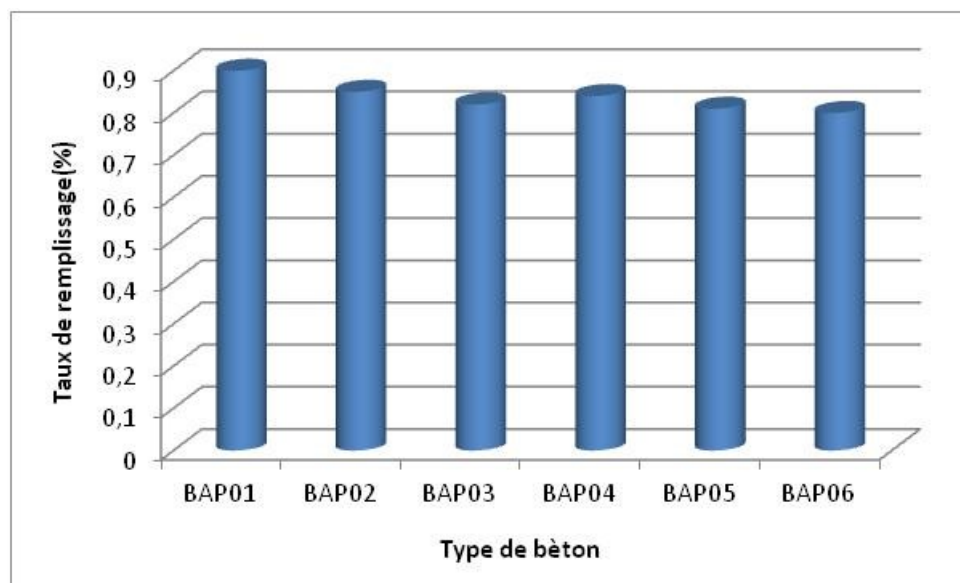


Figure IV.2 Taux de remplissage des BAP (Boite en L)

IV.4.3 Stabilité au tamis des bétons BAP

L'essai de stabilité au tamis utilisé pour mesurer la capacité des bétons autoplaçant à résister à la ségrégation dynamique, donne des valeurs de laitance acceptables pour toutes les compositions du BAP. Il permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non.

Le BAP témoin à base des granulats naturels et tous les BAP à base des granulats et ajout, présentent un taux de ségrégation très proche varie de 0.7% à 5%, inférieur à 15%, indiquant une stabilité satisfaisante selon les critères d'acceptabilité d'une formulation BAP.

Par ailleurs, le béton BAP03 à base de 10% d'ajout de poudre de roche s'avère plus stable que tous les autres bétons notamment le BAP01 témoin. Aussi la résistance à la ségrégation du BAP02 contenant 50% de sable de roche est très proche de celle du BAP01 témoin.

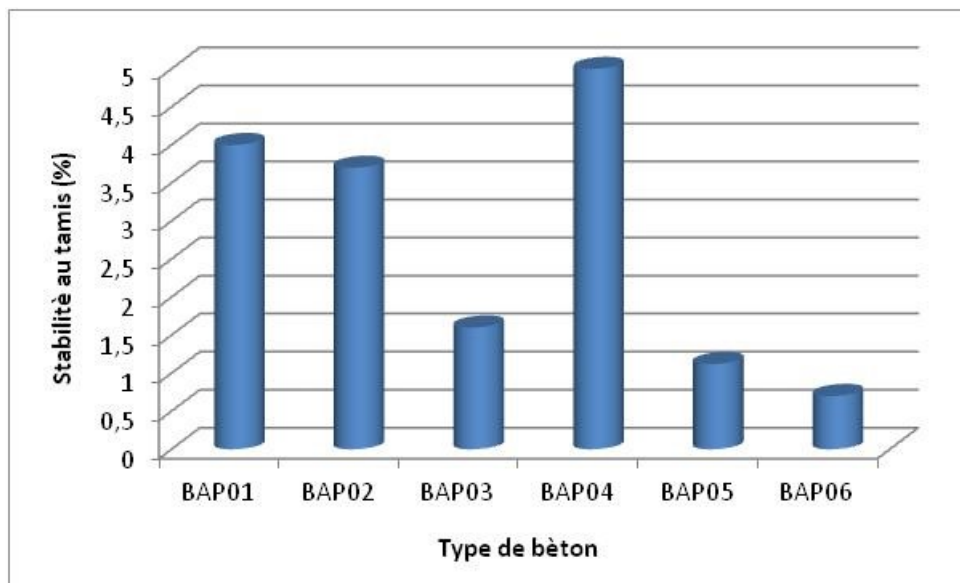


Figure IV.3 Stabilité au tamis des BAP

IV.4.4 Masse volumique apparente des BAP à l'état frais

La figure V.4 donne les résultats de la masse volumique apparente des bétons étudiés. Ils montrent que la masse volumique des BAP02, BAP03, BAP04, BAP05 et BAP06 contenant la roche naturelle a diminué par rapport à celle du BAP01 témoin. Ceci est dû au fait que la roche avec ses différentes dimensions est légère car sa masse volumique est inférieure à celle du ciment, du sable et du gravier naturels. Elle rend donc le BAP plus léger surtout lorsqu'elle remplace le sable ou le gravier naturel par un taux de 50%.

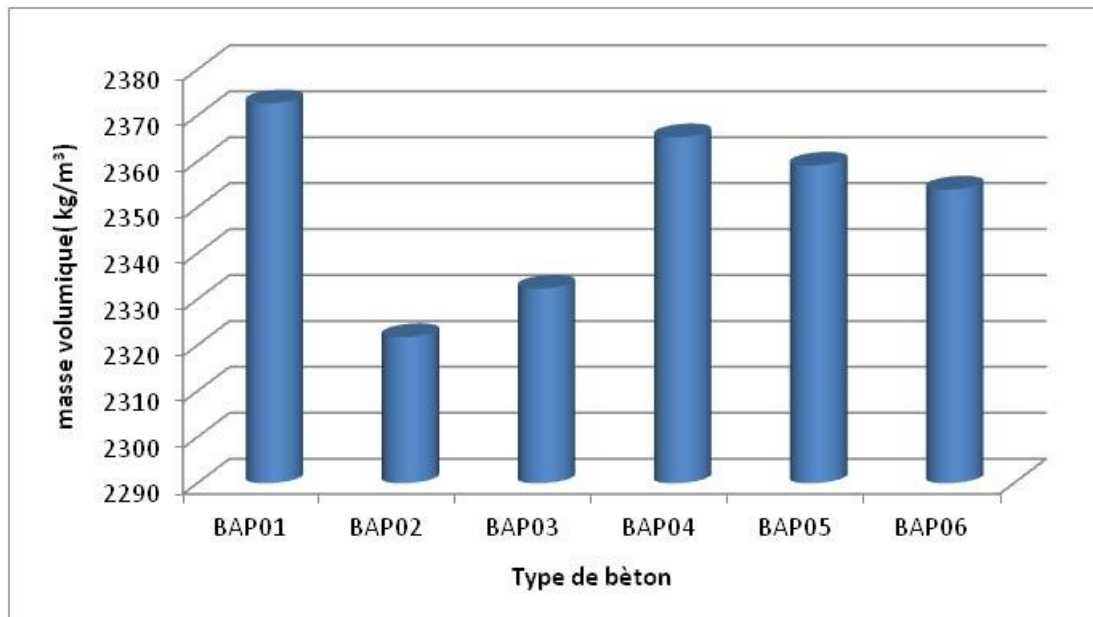


Figure IV.4 Masse volumique des BAP frais.

IV.5. Résultats des essais sur les BAP à l'état durci

IV.5.1. Propriétés physiques :

IV.5.1.1 Masse volumique apparente des BAP à l'état durci

La figure IV.5 représente les résultats des mesures de la masse volumique apparente des bétons étudiés en fonction de l'âge du durcissement (7 et 28 jours). Il est clair que la masse volumique des bétons BAP est similaire à 7 jours et à 28 jours.

Aussi elle diminue en substituant le ciment par la poudre de roche et moins lorsque le taux est de 10%. De même, elle diminue considérablement en remplaçant 50% de sable ou de gravier naturels par les granulats de roche. Ceci est dû à la légèreté de la roche et l'augmentation des pores causée par la forme des granulats de roche.

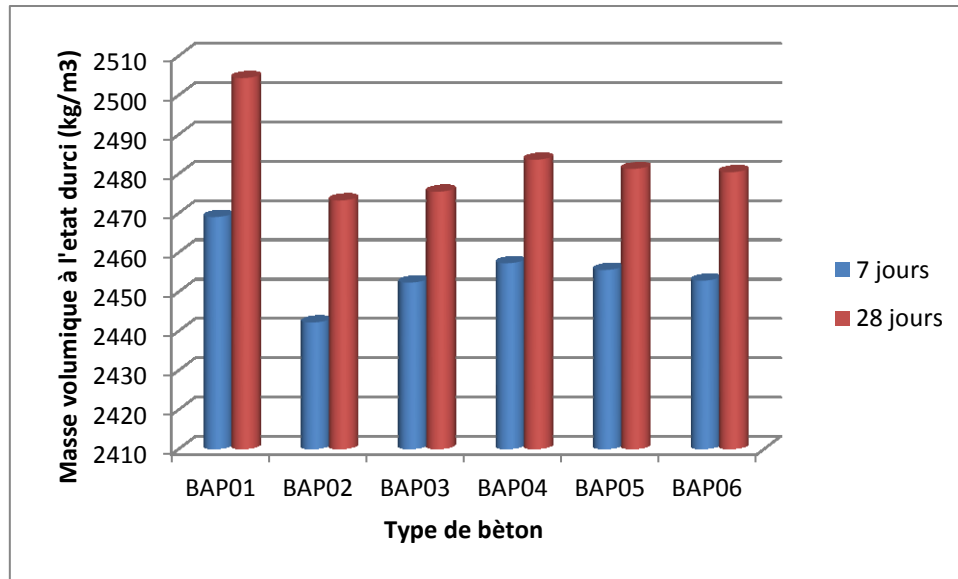


Figure IV.5 Masse volumique apparente des BAP durcis

IV.5.1.2 La porosité des BAP

La porosité des BAP a été déterminée en utilisant la relation ci-dessous, après les mesures des masses des éprouvettes.

$$p\% = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_{\bar{a}}} \times 100$$

Où:

P%: La porosité d'éprouvette en pourcentage(%);

M_a : La masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours en (g);

M_s : La masse d'éprouvette en (g);

M_ā : La masse d'éprouvette pesée dans l'eau en (g).

Les résultats de la porosité des bétons autoplaçants sont représentés sur la figure IV.6. Une légère diminution de la porosité a été constatée pour les BAP02, BAP03, BAP04, BAP05, BAP06 comparée à celle du BAP témoin. La porosité diminue plus lorsque le ciment est substitué par la poudre de roche et surtout quand le taux augmente de 10% à 20%. Ceci est dû à la finesse de la poudre par rapport à celle du ciment. Les grains de la poudre ont comblé les vides entre les grains du ciment. Par ailleurs, l'incorporation de la roche en tant que sable ou gravier a diminué légèrement la porosité du BAP.

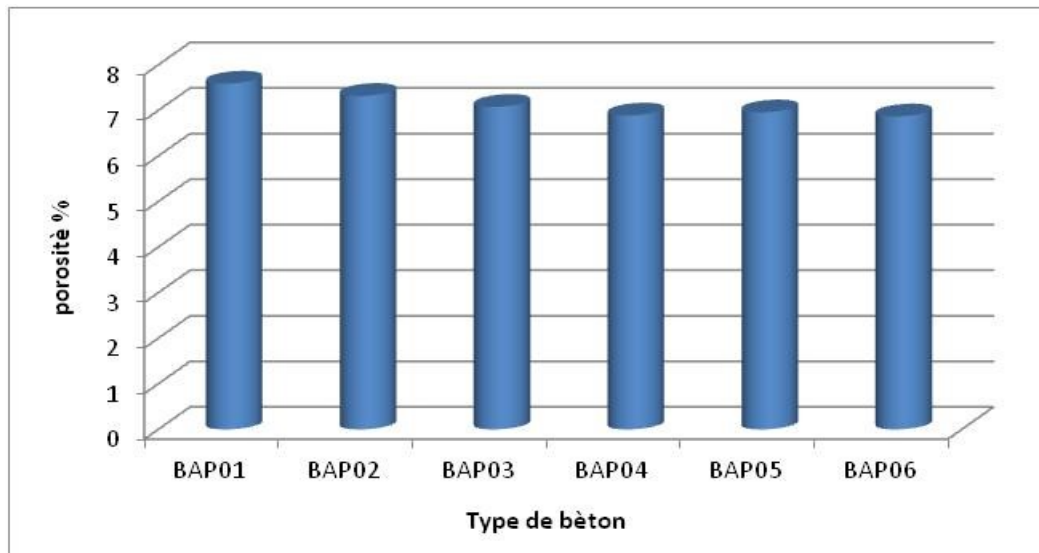


Figure IV.6 Porosité des bétons BAP

IV.5.1.3 L'absorption des BAP

En utilisant les pesées des masses réalisées dans l'essai de la porosité des bétons autoplacants, l'absorption de l'eau de BAP a été calculée selon l'équation suivante :

$$Ab\% = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Ab% : Absorption de l'éprouvette en pourcentage(%).

Mh : La masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours(g).

Ms : La masse sèche de l'éprouvette.

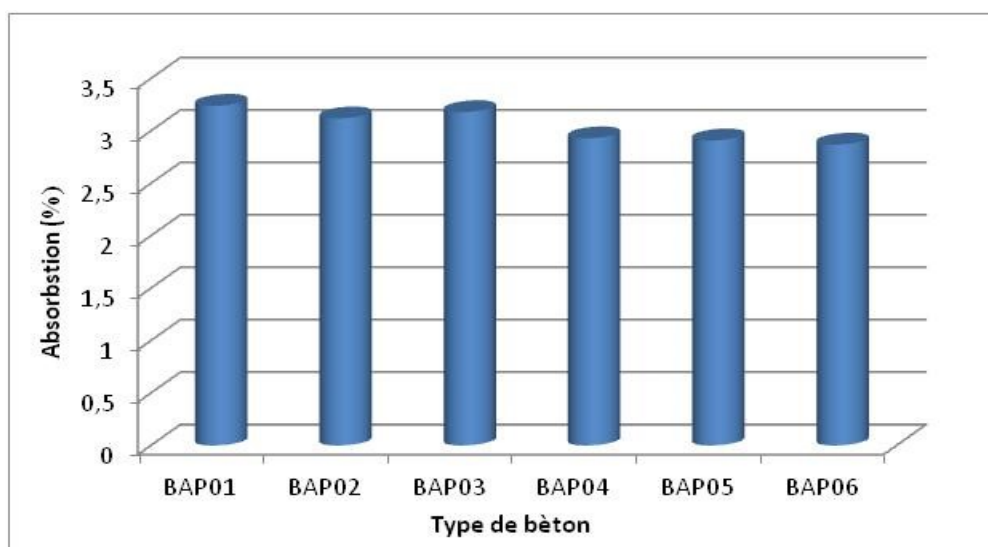


Figure IV.7 : Absorption d'eau des BAP

La figure IV.7 présente l'absorption d'eau des bétons autoplacants BAP en fonction du taux de remplacement de la roche avec les différentes dimensions de ses grains. Remplacer le sable ou le gravier par 50% de sable ou de gravier de la roche n'influe pas sur l'absorption du béton puisque l'absorption des BAP02 et BAP03 sont presque les mêmes que celle du béton témoin BAP01. Par ailleurs une légère diminution de la porosité est obtenue pour les bétons BAP04, BAP 05, BAP 06, par rapport au BAP témoin. Ceci est peut être du à la finesse de la poudre de roche dont les grains ont rempli les vides de la matrice cimentaire où l'eau peut s'installer.

IV.6. Propriétés mécaniques des BAP

IV.6.1 Résistance à la compression des BAP

Les résultats des essais mécaniques montrent l'évolution de la résistance à la compression des bétons BAP en fonction des échéances 7j et 28jours. La figure IV.8 indique une amélioration claire des résistances des BAP. Lorsque la moitié du sable ou du gravier est remplacée par du sable ou gravier de la roche, les résistances à la compression des BAP02 et BAP03aux échéances 7j et à 28j sont très proches de celles du béton BAP01 témoin. Par contre, lorsqu'une partie du ciment est substituée par un taux de 10% et 15% de poudre de roche naturelle, les résistances des BAP04 et BAP05sont remarquables. Elles augmentent et dépassent même celles du béton BAP01 témoin. C'est l'effet pouzzolanique de l'ajout de roche. Il semble qu'utiliser la poudre de la roche naturelle comme ajout est plus performant notamment avec un taux de 10%.

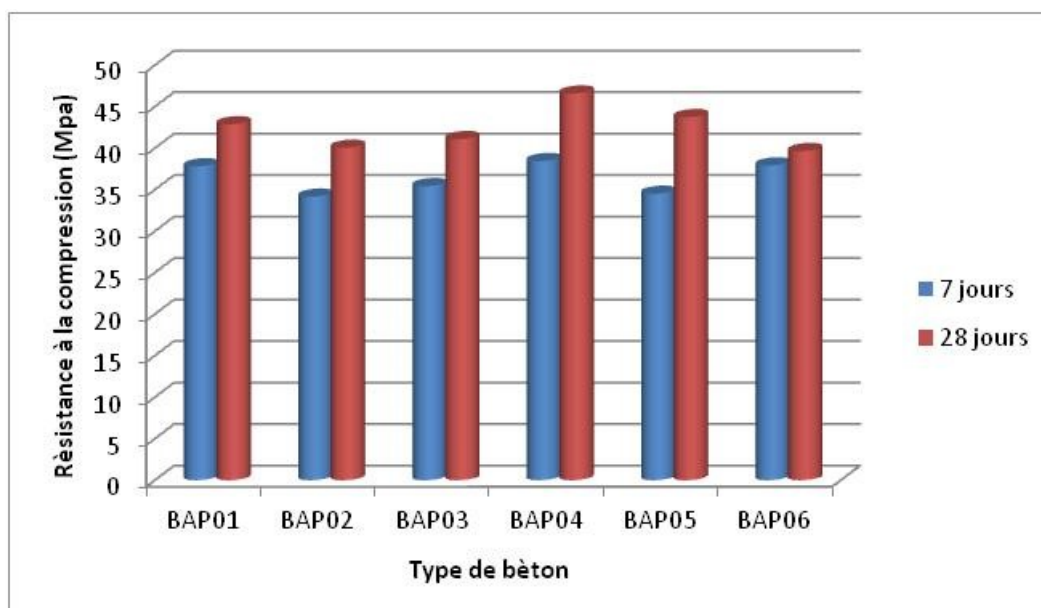


Figure IV.8 Evolution de la résistance à la compression des BAP

IV.6.2 Résistance à la flexion des BAP

De même, l'évolution des résistances à la traction par flexion des BAP en fonction de l'âge est montrée sur la figure IV.9. Ces résistances augmentent aux échéances 7j et 28j pour tous les bétons BAP. Avec 50% de sable ou de gravier de la roche naturelle, les résistances des BAP02 et BAP03 sont intéressantes. Elles s'approchent sans dépasser celles du BAP01 témoin jusqu'à 28 jours. Par ailleurs, avec une substitution au ciment de 15%, encore mieux 10% engendre des résistances à la flexion importantes et dépassent celles du béton BAP01 témoin. Un gain de résistance de 3,3% et de 1% est obtenu en substituant le ciment par 10% et 15% respectivement. Ces résultats confirment ceux des résistances à la compression.

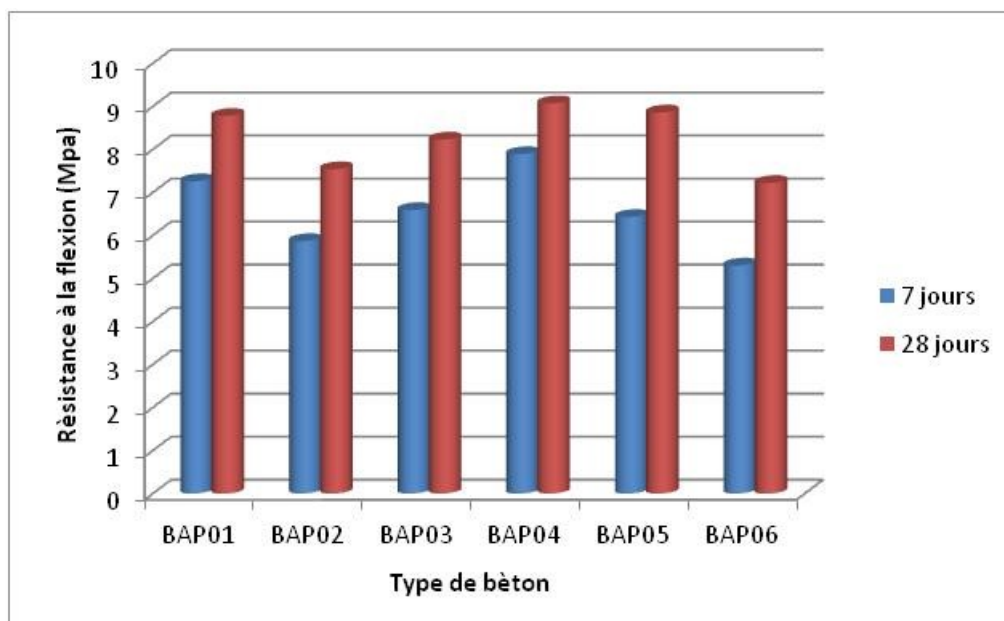


Figure IV.9 Evolution de la résistance à la flexion des BAP

IV.7 Contrôle non destructif par ultrason

IV.7.1 Vitesse de propagation du son

L'essai à l'ultrason permet de déterminer la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers un élément en béton. Elle est déterminée grâce à l'appareil (TICO) de la figure IV.10. L'appareil est muni de deux palpeurs de fréquence 54KHz destinés pour le contrôle du béton.

Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers l'éprouvette de longueur (L) et donne la vitesse de propagation (V) selon l'équation suivante :

$$V=S/T*10^6$$

V : vitesse de propagation.

S : distance entre les têtes en mètre.

T : temps en microseconde.

Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transition du son.

Les résultats obtenus en testant les bétons à l'ultrason sont donnés dans le tableau IV.11. Ils donnent les mesures de la vitesse de propagation du son à travers des éprouvettes testées à 28 jours.

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai à l'ultrason sur les bétons autoplacants

Variantes	Temps (μs)	Vitesse de propagation (m/s)
BAP01	52.4	5430
BAP02	54.4	5450
BAP03	50.5	5550
BAP04	49.4	5670
BAP05	48.6	5760
BAP06	42	5830

L'incorporation de la roche naturelle comme sable ou gravier dans le BAP augmente la vitesse du son mais considérablement lorsque la poudre de roche est utilisée comme substitution au ciment.

En se référant au tableau IV.12 qui indique la qualité du béton en fonction de la vitesse du son, tous les bétons BAP élaborés dans cette étude sont classés comme excellents car la vitesse du son à travers ces derniers est supérieure à 4575 m/s. Les bétons BAP contenant la roche entant qu'ajout ou en tant que sable ou gravier sont considérés comme ayant des compacités élevées et supérieures par rapport au béton témoin car leurs vitesses sont plus élevées.

Tableau IV.7: Les intervalles de la vitesse de propagation

Qualité de béton	Vitesse de propagation du son (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3660
Très mauvaise	Inférieure à 2135

IV.7.2. Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique est déterminé par la méthode acoustique (test ultrasonique), sur des éprouvettes de bétons autoplaçants étudiés à l'âge de 28 jours. Après la détermination de la vitesse de propagation du son à travers l'éprouvette, le module élastique dynamique est calculé en utilisant la formule suivante :

$$E_d = \rho \cdot v^2 \text{ en (Mpa)}$$

Ou :

E_d : Module élastique dynamique en (Mpa)

ρ : Masse volumique de l'éprouvette en (Kg/m^3)

v^2 ; La vitesse de propagation du son en (m/s)

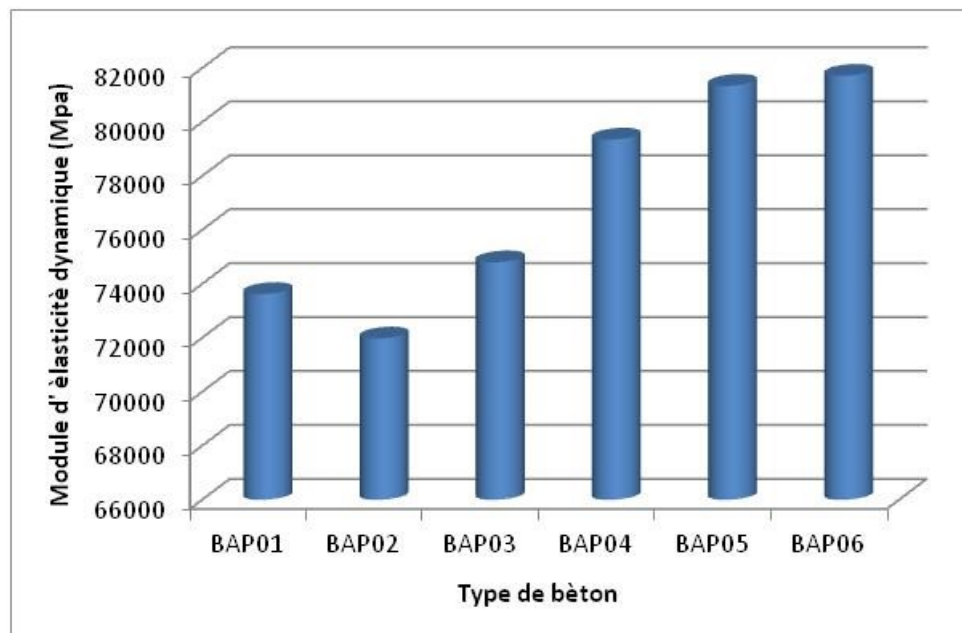


Figure IV.13 Evolution du module d'élasticité dynamique.

La figure IV.13 montre que les bétons (BAP 03, BAP 04, BAP 05, BAP 06) ont un module d'élasticité dynamique plus élevé par rapport au BAP 02 et BAP01 témoin.

La substitution du ciment par l'ajout de la poudre de la roche a nettement amélioré la compacité des bétons provoquant ainsi une augmentation du module élasticité dynamique.

Conclusion générale

Conclusion générale

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. Toutefois, dans le but d'améliorer la maniabilité, la résistance à l'état durci et la durabilité du béton, il s'avère nécessaire d'utiliser des additifs organiques (super plastifiants et agent viscosifiant) et des ajouts cimentaires ou même remplacer les granulats naturels par d'autres types dont les caractéristiques sont meilleurs. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière.

Notre étude a pour objectif la formulation et la caractérisation rhéologique et physico mécanique d'un béton autoplaçant dans lequel une partie du ciment est substituée par un taux de la poudre de roche naturelle de la région de TELMCEN ; ce dernier varie de 10%, 15% à 20%. Par ailleurs, cette même roche a été utilisée comme granulats dans le BAP avec un taux de remplacement de 50%. Six formulations de béton autoplaçant sont étudiées à l'état frais pour estimer les propriétés rhéologiques telles que la fluidité (étalement au cône d'Abrams), la capacité de remplissage (boite en L) et la résistance à la ségrégation (stabilité au tamis ; et à l'état durci pour estimer la densité ainsi que les propriétés mécaniques à savoir la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion.

Les résultats de cette étude aboutissent aux conclusions suivantes:

- L'analyse granulométrique effectuée sur les granulats de roche de Tlemcen montre des courbes granulométriques continues avec une bonne distribution granulométrique et très proche à celle des granulats naturels.
- La méthode japonaise nous a permis de donner une meilleure composition de béton dont les propriétés à l'état frais et durci sont satisfaisantes.
- La fluidité des bétons BAP élaborés est légèrement influencée par le mode d'incorporation de la roche de Tlemcen en tant que granulats à 50% ou en tant qu'ajout au taux de 10%. Autrement dit, remplacer la moitié du sable ou du gravier et encore mieux substitué le ciment par un taux de 10% de la poudre de la roche naturelle, est une solution qui donne de bons résultats de fluidité du béton BAP qui s'alignent avec ceux du BAP témoin.
- L'augmentation du taux d'ajout de la poudre de roche fait diminuer l'étalement de BAP, il résulte une diminution de l'ouvrabilité, néanmoins toutes les compositions

Conclusion générale

vérifient la condition d'étalement pour un béton autoplaçant (plus de 60 cm) et sont conformes aux normes.

- Les résultats de l'essai du taux de remplissage par la boîte en L utilisé pour mesurer la capacité du béton à s'écouler en milieu confiné montre des valeurs acceptables donc la mobilité de tous les BAP dans un milieu confiné est assurée, ce qui leur permet de s'écouler à travers les armatures correctement. Ainsi, dans le BAP, remplacer 50% de sable par un sable de roche ou substitué le ciment par 10% de la poudre de roche mènent aux meilleurs taux de remplissage qui s'approchent le plus de ceux du béton témoin.
- L'essai de stabilité au tamis qui permet de calculer le taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante montre que tous les BAP avec la roche de TELMCEN utilisée comme granulats ou comme ajout ont un taux de ségrégation inférieur à 15% donc une stabilité satisfaisante conforme aux normes. le béton à base de 10% d'ajout de poudre de roche s'avère plus stable que tous les autres bétons notamment le témoin. Aussi la résistance à la ségrégation du béton contenant 50% de sable de roche est très proche de celle du témoin.
- La masse volumique à l'état frais et durci, des bétons avec granulat et ajout de roche, est inférieure à celle du béton témoin ; Ceci est dû au fait que la roche avec ses différentes dimensions est légère car sa masse volumique est inférieure à celle du ciment, du sable et du gravier naturels.
- La porosité diminue plus lorsque le ciment est substitué par la poudre de roche et surtout quand le taux augmente de 10% à 20%. Ceci est dû à la finesse de la poudre par rapport à celle du ciment. Les grains de la poudre ont comblé les vides entre les grains du ciment. Par ailleurs, l'incorporation de la roche en tant que sable ou gravier a diminué légèrement la porosité du BAP.
- Remplacer le sable ou le gravier par 50% de sable ou de gravier de la roche n'influe pas sur l'absorption du béton. Par ailleurs une légère diminution de cette dernière est obtenue pour les bétons avec ajout de roche.
- Lorsque la moitié du sable ou du gravier est remplacée par du sable ou gravier de la roche, les résistances à la compression aux échéances 7j et à 28j sont très proches de celles du béton témoin. Par contre, lorsqu'une partie du ciment est substituée par un taux de 10% et de 15% de poudre de la roche naturelle, les résistances sont remarquables. Elles augmentent et dépassent même celles du béton témoin. C'est

Conclusion générale

l'effet pouzzolanique de l'ajout de roche. Il semble qu'utiliser la poudre de la roche naturelle comme ajout est plus performant notamment avec un taux de 10%.

- Avec 50% de sable ou de gravier de la roche naturelle, les résistances des BAP sont intéressantes. Elles s'approchent sans dépasser celles du témoin jusqu'à 28 jours. Par contre, avec une substitution au ciment de 15%, encore mieux 10% engendre des résistances à la flexion importantes et dépassent celles du béton témoin.
- L'incorporation de la roche naturelle comme sable ou gravier dans le BAP augmente la vitesse du son mais considérablement lorsque la poudre de roche est utilisée comme substitution au ciment. Les bétons BAP élaborés avec la roche sont classés comme excellents car la vitesse du son à travers ces derniers est supérieure à celle du témoin et à 4575 m/s.
- La substitution du ciment par l'ajout de la poudre de la roche a nettement amélioré la compacité des bétons provoquant ainsi une augmentation du module élasticité dynamique.
- Finalement, nous concluons que la substitution des granulats naturels par 50% de granulats de la roche de TELMCEN (sable, gravier) dans un béton autoplaçant offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser les granulats naturels surtout avec le problème d'épuisement en ressources naturelles que fait face le marché des granulats.
- L'utilisation de l'ajout de la poudre de la roche de TELEMEN comme matériau de substitution au ciment a des avantages économique, environnemental et technique importants tels que: la réduction des émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment ainsi que la réduire du besoin en énergie et surtout l'amélioration des propriétés des matériaux cimentaires tel que le béton autoplaçant.

Recommandations et perspectives

- Continuer ce travail en vérifiant qui à long terme, les caractéristiques des bétons autoplaçants élaborés s'améliorent afin de classer la roche siliceuse de TELMCEN comme un matériau cimentaire.
- Elaborer les mêmes bétons autoplaçant en les renforçant par des fibres de polypropylène en faisant varier leur dosage et les traiter thermiquement.

Annexe

I Les essais physico-chimiques et mécaniques des granulats

I.1 Analyse granulométrique par voie sèche (sur le sable) selon la norme NF 18-560

a. 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.

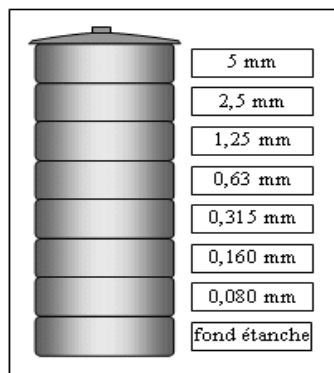


fig01 : série de tamis

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2% du poids total de l'échantillon de départ.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne du tamis est également pesé.

b. Description de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C. On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante

du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

Le sable étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture.

II Détermination de l'équivalent de sable

II.1 Principe

L'essai est fait sur un « sable ». On n'utilise que la fraction des granulats passant sous tamis 5 mm. Laver l'échantillon, dans des conditions normalisées, et laisser reposer.

On distingue

- L'équivalent de sable visuel (ESV)
- L'équivalent de sable avec piston (ESP)

II.2 Préparation de l'échantillon

Il faut tamiser au tamis de 5mm, éliminer le refus et recueillir tout le tamisât. Tamiser à sec comporte beaucoup d'inconvénients. Il faut donc tamiser par voie humide, et laver le refus sur le tamis, au-dessus d'un récipient plus grand, on laissera ensuite décanter c'est donc une opération relativement longue.

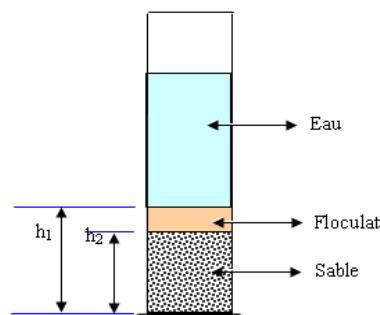
II.3 Mode opératoire

Le matériel et sable tamisé sont supposés préparés :

- Solution lavant dans une bonbonne de 5L à 1m au-dessus des éprouvettes.
- Dispositif sophronique amorcé, et relié au tube laveur.
- Deux éprouvettes propres (on prendra la Moyenne de deux résultats).
- Remplir les éprouvettes jusqu'au 1^{er} trait.
- Verser la quantité de sable voulue.
- Éliminer les bulles d'air (frapper contre la paume de la main).
- Laisser reposer 10 mn.
- Boucher les éprouvettes, et les agités : mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdale, 20 cm d'amplitude, 30 allers et retours en 30 s.
- Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube laveur.

Annexe

- Rincer le ronchon, au-dessus de l'éprouvette.
 - Faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois citérieures de l'éprouvette.
 - Laver le sable en piquant la quantité du sable par le tube laveur; afin que toutes les particules fines soit remontées
 - Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.
 - Laisser reposer 20 mn, éviter les vibrations et mesurer h_1 et h_2
- Après le temps prescrit, mesurer :



- La hauteur h_1 sable propre + élément fin.
- La hauteur h_2 sable propre seulement par définition, l'équivalent de sable est :

$$ES = (h_2/h_1)100$$

II.4 Détermination de la masse volumique absolue

a. Principe de l'essai

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. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 .

b. Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

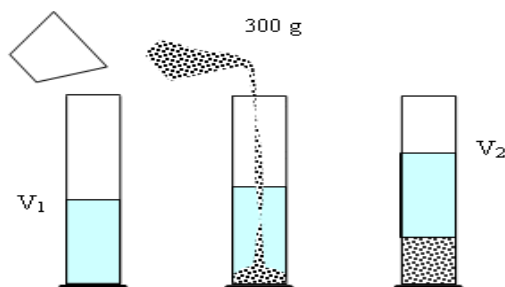
- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau ;

Annexe

-Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;

-Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 . La masse volumique est

alors: $P_S = \frac{M}{V_2 - V_1}$



III La surface spécifique de Blaine SSB NF P 15-471

La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et la température connue, à traverser une couche tassée de liant.



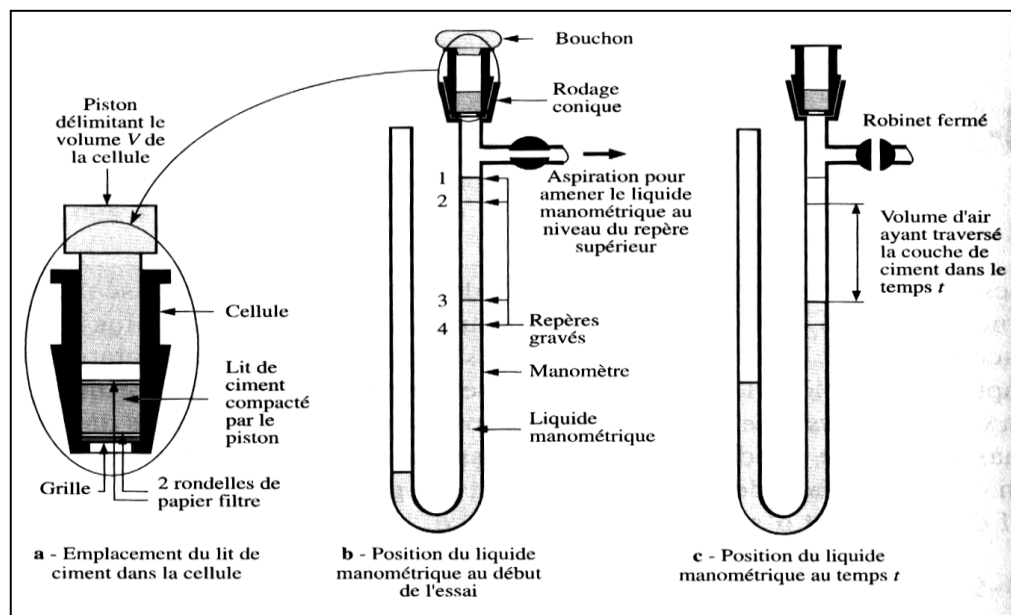
Fig. 2 Perméabilimètre de Blaine

III.1 Spécification du perméabilimètre-Blaine

- la cellule : à un bord supérieur plan et perpendiculaire à son axe, elle s'assemble à l'ajustage par une liaison conique 19/35 ou de dimensions voisines.

Annexe

- Le piston : son extrémité doit être droite et à bords vifs, il comprend un méplat (prolongé par échancrure à la tête) pour permettre le passage de l'air les tolérances de dimensions doivent faciliter un coulisement dans la cellule.
- La grille est composée de 30 à 40 trous de 1 mm de diamètre.
- La cellule, le piston et la grille sont en métal inoxydable.
- Les disques de papier filtre sont découpés à bord net à partir d'un papier filtre à filtration courante, texture moyenne.
- Le manomètre en (U) est en verre de 1 à 1.5 mm d'épaisseur, il est fixé de préférence en planchette support au moyen d'un collier.
- Le liquide effleurant au repos au trait inférieur doit être stable, non volatil et non hygroscopique de faible viscosité et de faible densité (Dibutylphtalate, huile minérale, extra fluide...).



III.2 Mode opératoire

La surface spécifique est déterminée avec le perméabilimètre de Blaine.

- On place un papier filtre sur la plaque inférieure de la cellule.
- On introduit l'échantillon de ciment et on égalise en secouant légèrement la cellule.

Annexe

- En place ensuite un papier-filtre au-dessus de l'échantillon et on comprime ce dernier en tournant légèrement le piston jusqu'à ce que son col et supporter par le bord supérieur de la cellule.
- Après compression de l'échantillon dans la couche soumise à l'essai et le papier filtre.
- On relie la cellule du tube du manomètre et on s'assure de la parfaite étanchéité du raccord.
- On ferme le robinet monté sur le tube manomètre, on comprime la poire on caoutchouc.
- Le relâchement simultané de la pression sur la poire et l'ouverture du robinet d'aspiration ont pour effet, l'air est lentement aspiré du tube du manomètre et le liquide est refoulé vers le haut, lorsque le niveau du liquide atteint le repère supérieur.
- On ferme le robinet on met le chronomètre en marche lorsque la surface inférieure du ménisque franchisse le 2^{ème} trait annulaire depuis le sommet du tube.
- On arrête le chronomètre.

III.3 Expression des résultats

La surface spécifique est calculée par la formule suivant :

$$S = K \frac{\sqrt{e^3 t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

Dans laquelle

S : surface spécifique (cm²).

K : constant de l'appareil, égale à 28,26.

E : porosité de la couche tassée, égale à 0,5.

T : temps mesuré en secondes.

ρ : masse volumique des grains g/cm²

η : viscosité de l'air à la température d'essai (en poise).

IV ESSAI DE CONSISTANCE (EN 196-3)

IV.1 Matériel utilisé

-salle climatisée : l'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

-malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (sites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).

-appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). l'appareil est composé d'un moule tronconique ($h=40\text{ mm}$, $d_1=70\text{ mm}$ et $d_2=80\text{ mm}$) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\phi=10\text{ mm}$.

-balance précisée à 0,1 g près.

-chronomètre précisée à 0,1 s près.

IV.2 Mode opératoire

On procède par tâtonnement :

- préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport $E/C=0.26$, verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,

-mettre le malaxeur en marche et déclencher le chronomètre.

-la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibrations excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

-la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée, relever la distance de séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

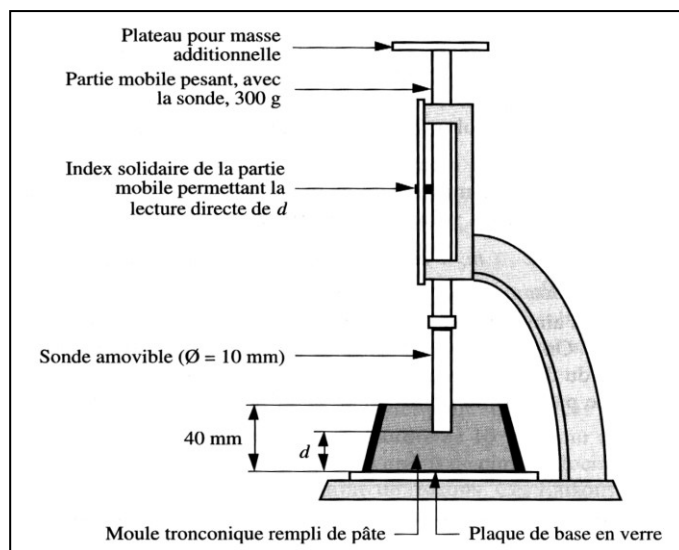
-la pâte sera à consistance normale si $d=6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$.

Si $d > 7\text{ mm}$: il n'y pas assez d'eau.

Si $d < 5\text{ mm}$: il ya trop d'eau.

Annexe

Dans les 2 cas, jeter la pâte nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle W



V ESSAI DE PRISE (EN 196-3)

V.1 Matériel utilisé

C'est le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($\Phi = 1.13 \text{ mm}$).

V.2 Mode opératoire

Une fois la pâte à consistance normale obtenu, on procède au changement de la sonde de Vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

- recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10\text{-}15 \text{ mn}$) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.
- cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.

VI Essai d'étalement au mini-cône d'abrams

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, car le plus facile à mettre en œuvre, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide d'un cône à mortier petit (mini-cône d'Abrams)

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

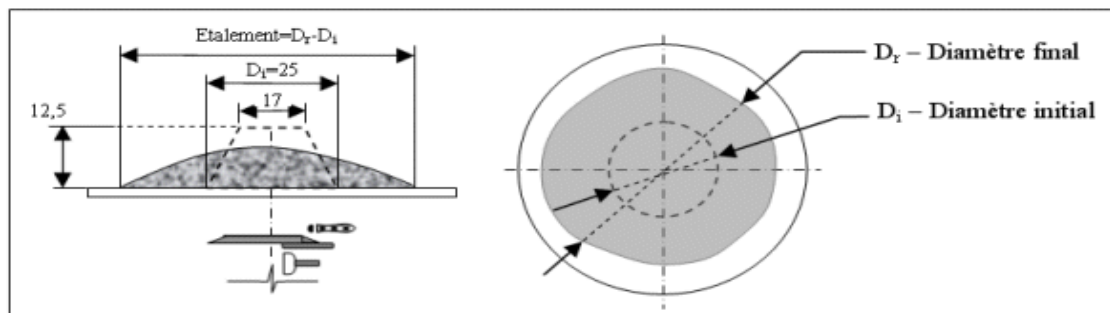


Fig. 3 Essai d'étalement au cône à mortier (Ozawa et al, 1995)

VI. LES ESSAIS MECANQUES

VI.1. DETERMINATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION (EN 196 1)

A. OBJECTIF DE L'ESSAI

LA RESISTANCE D'UN MORTIER EST DIRECTEMENT DEPENDANTE DU TYPE DE CIMENT DONC, IL S'AGIT DE DEFINIR LES QUALITES DE RESISTANCE D'UN CIMENT PLUTOT QUE D'UN MORTIER.

B. CONDUITE DE L'ESSAI

LA NORME EN 196-1 DECRIT DE MANIERE DETAILLEE LE MODE OPERATOIRE CONCERNANT CET ESSAI. AVEC LE MORTIER NORMAL PREPARE COMME INDIQUE AU-DESSOUS, ON REMPLIT UN MOULE 4 x 4 x 16. LE SERRAGE DU MORTIER DANS CE MOULE EST OBTENU EN INTRODUISENT LE MORTIER EN DEUX FOIS ET EN APPLIQUANT AU MOULE 60 CHOCS A CHAQUE FOIS. APRES QUOI LE MOULE EST ARASE, RECOUVERT D'UNE PLAQUE DE VERRE ET ENTREPOSE DANS LA SALLE OU L'ARMOIRE HUMIDE.



Fig 04: malaxeur des mortiers

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ C}^\circ \pm 1\text{ C}^\circ$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps.

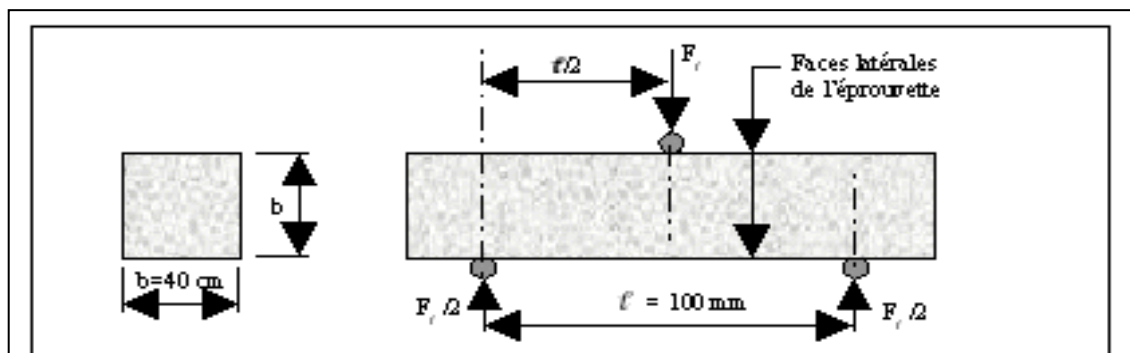


Fig .4 Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot l}{b^3}$$

Annexe

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{MPa}) = 0,234 F_f (\text{N})$$

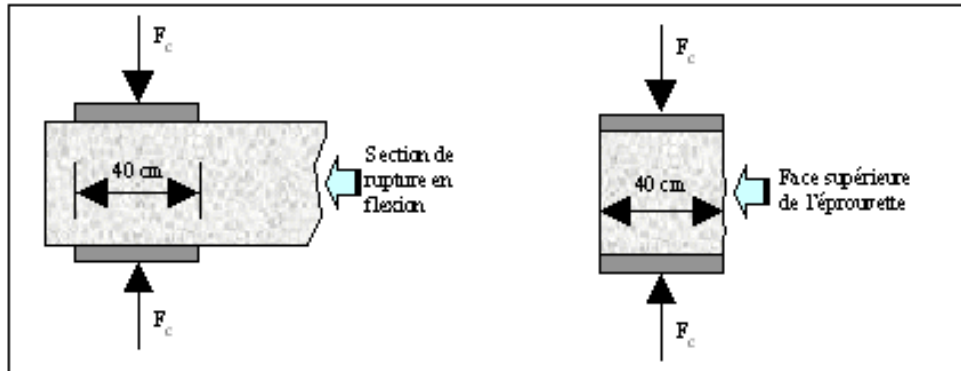


Fig.5 Dispositif de rupture en compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiquée sur la figure. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra : $R_c = \frac{fc}{b^2}$

$$R_c = \frac{F_c(\text{N})}{1600}$$

VII Essais mécaniques

VII.1 Los Angeles NFP 18-573:

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machine Los Angles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisi parmi le tableau suivant :

Annexe

Tableau 1 : Données de lessai Los Angeles

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	Observation
4.0- 6.3	07	3080	✓ le matériau a sera préalablement lavé et séché à l'étuve à 105°C
6.3-10.0	09	3960	✓ la classe 10/25 doit contenir 60% de 10/16 mm
10.0-14.0	11	4840	✓ la classe 16/31.5 doit contenir 40% de 16/25mm
10-25.0	11	4840	✓ classe 25/50 mm doit contenir 40 % de 16/25mm
16.0-31.5	12	5280	✓ pour classe 25/50 faire effectuer à la machine 1000rotation (1/2heure).
25.0-50.0	12	5280	✓ après essai les mâtereaux seront lavés au tamis de 1.6mm

✓ Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits à la cour de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par : $100 \frac{m}{M}$, cette quantité est appelés le coefficient Los Angles du matériau.

VII.2 Préparation de l'échantillon.

- ✓ Tamiser 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.

Annexe

- ✓ la masse d'échantillon pour l'essai sera de $500\text{g} \pm 5\text{g}$

VII.3 Mode opératoire.

- ✓ Introduire avec précaution la charge de boulet correspondant à la classe granulaire choisie puis l'échantillon pour essai.
- ✓ Faire effectuer à la machine 500 rotation à une vitesse régulière 30 à 33 tr/min.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.
- ✓ Laver le refus au tamis de 1.6 mm, égoutter et sécher à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.
- ✓ Peser ce refus une fois sécher, soit m_1 le résultat de la peser.

VII.4 expression des résultats

Le coefficient Los Angeles (LA) est par définition le rapport **$100\text{ m} / 5000$**

Ou : $m = 5000 - m_1$ est la masse sèche de la fraction du matériau après l'essai au tamis de 1.6 mm, en gramme.



Fig. 5 Machine de Los Angeles

VII.5 ESSAI DE MICRO –DEVAL NF 18-572.

V.5.1 Principe.

L'essai consiste à introduire un échantillon dans des cylindres en rotation, en présence d'une charge abrasive afin de mesurer l'usure des granulats.

VII.5.2 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 suivantes.

Annexe

Tableau 2 : classes granulaires

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

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 $500g \pm 2g$.



Fig.6 Machine de l'essai micro deval

VIII. LES ESSAIS SUR BETONS

VIII.1 Préparation des bétons autoplaçants

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 200 litre ce type de malaxeur est très efficace et

Annexe

fournit dans la plupart des cas un béton très homogène. Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Préparer tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Préparer les quantités des constituants (ciment, sable, gravier, adjuvant, ajout de roche, calcaire, eau).
- Placer les constituants par ordre : gravier 8/15, gravier 3/8, sable grossier, sable fine, les fines et le ciment dans le malaxeur pendant (01) min pour malaxage à sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de gâchage.
- Ajouter progressivement l'adjuvant.
-



Fig. 7 Malaxeur à béton.

VIII.2 Confection et conservation des éprouvettes pour les essais de résistance NF EN 12390

Le programme expérimental comprend deux types d'essais devant être effectués à des échéances bien précises, chaque type d'essai comprend plusieurs :

- Eprouvettes cylindriques
- Eprouvettes prismatiques

Eprouvettes Cylindriques :

Conformément à la norme NF P18-406(NA427), les éprouvettes cylindriques s'élancement 2, dont les extrémités ont été préalablement rectifiées sont utilisées pour l'essai d'écrasement compression simple. Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance

de la compression, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai à 28 jours.



Fig. 8 : Eprouvettes cylindriques (16x32).

Eprouvettes prismatiques :

Ces éprouvettes sont réalisées pour les essais de traction par flexion selon les normes NFP18-407(NA428), qui précise les détails d'exécution, les éprouvettes sont des prismes de sections carrées et l'élancement 4.



Fig. 9 : Eprouvettes prismatiques (7x7x28).

Remplissage :

Le remplissage se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, jusqu'au meilleurs remplissage. Les BAP se distinguent des BV, par leur propriété à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, donc l'absence de vibration,... La finition de la surface est effectuée à l'aide d'une règle. Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle à température ambiante, Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. On a remarqué que la qualité des produits finis (aspect apparent) était très bonne.

VIII.3 Conservation

La cure consiste à maintenir des conditions de température et d'humidité propices à l'hydratation de ciment. L'eau doit être continuellement disponible aux particules de ciment pour que l'hydratation se poursuive. Cette hydratation continue rendra le béton plus fort, moins poreux et plus durable.

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température ambiante (20°C), jusqu'au moment de l'essai qui s'effectue à 7 et 28 jour.



Fig. 10 Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau à une température ambiante.

VIII.4 Caractérisation des mélanges à l'état durci

VIII.4.1 Essai non destructifs

a. L'essai d'auscultation sonore

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

$$V = L/T$$

La vitesse conventionnelle de propagation est calculée par la formule :

Où :

L : La distance entre les transducteurs en mètre.

T : Le temps de propagation en secondes.

La spécification de la qualité du béton est montrée sur **tableau 7**

Annexe

Tableau 7 : Spécifications de la qualité du béton.

Vitesse conventionnelle en (m/s)	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bonne
3000 à 3500	assez Bonne
2000 à 3000	Mediocre



Fig.11: Essai d'auscultation sonique des bétons autoplaçants à 28jours.

IX Essais destructifs

IX.1 Préparation des éprouvettes

Surfaçage des éprouvettes :

- Surfaçage au soufre ;
- Mélange soufre (50%)-sable siliceux (50%) ;

Attendre 30 min avant essai de compression, les éprouvettes destinées aux essais de caractérisation traditionnelle (16X32 cm) pour les essais de compression ont été surfacées par coulis, afin d'obtenir des surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices des éprouvettes.



Fig . 12 Surfaçage des éprouvettes cylindriques (16x32) cm

IX.2 L'essai de l'étalement - (Slump flow).

IX.2.1 But : L'essai d'étalement au cône permet de mesurer la consistance d'un béton.

IX.2.2 Appareillage

- **Table d'étalement** : table mobile, comportant un plateau plan et carré d'au moins 900 mm 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 2 mm, 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 1,5 mm. 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.

Annexe

- **Entonnoir**, en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abras 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.
- Truelle.
- Chiffon humide.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Main écope.
- Niveau.

IX.2.3 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 : 1999.

- 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 pré homogénéisé 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.

Annexe

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, mesurer (au centimètre le plus proche) l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires.
- Noter ces deux valeurs D1 et D2. Exemple : 68/70 cm.

Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être rejeté et reconduit.

- Exprimer le résultat final en terme de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.
- On peut également chronométrer la valeur du T50 (temps nécessaire après soulèvement du cône pour que le béton atteigne le cercle de 50 cm).
- Après mesure de l'étalement, un contrôle visuel de la galette de béton peut aussi s'avérer intéressant. En effet, les gros granulats doivent être apparents à la surface du mélange et être uniformément répartis. De plus, sur le pourtour de la galette, il ne peut y avoir une auréole de laitance.



Fig.13 Essai d'étalement au cône d'Abrams.

<i>Ouvrabilité</i>	<i>Étalement à la table (%)</i>
Très ferme	10 – 30
Ferme	30 – 60
Normal	60 – 80
Mou	80 – 100
Très mou à liquide	>100

IX.3 Essai de boîte en L

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

IX.3.1 Mode opératoire

Le principe de l'essai à la boîte en L (L-box) est décrit en figure 2. La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litre). Après arasement en laisse le béton repose pendant une minute.

Puis enlève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (figure 2) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_1/H_2 .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.



Fig.14 Essai de boîte en L

IX.4 Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons auto plaçants vis à vis du risque de ségrégation.

IX.4.1 Mode opératoire

L'essai consiste à verser 10 litre de béton dans un sceau juste après le malaxage. Il faut couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation, après 15 min, en verse au centre d'un tamis de 5mm d'ouverture un poids de béton égal à $4,8 \pm 0,2\text{kg}$, avec une hauteur de chute de béton de $50 \pm 5\text{ cm}$; après 2 min, on calcule le poids de la laitance au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

$$P_{\text{laitance}} \% = \frac{\text{Poids de laitance passée (Kg)}}{4,8 \pm 0,2}$$

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

$0 \% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 15 \% \dots\dots\dots$ stabilité satisfaisante.

$15 \% \leq p_{\text{laitance}} (\%) \leq 30 \% \dots\dots\dots$ stabilité critique.

$P_{\text{laitance}} (\%) > 30 \% \dots\dots\dots$ stabilité très mauvaise (béton inutilisable).



Fig. 15 Essai de stabilité au tamis.

IX.5 Résistances mécaniques

IX. 5. 1 Essais de compression (NF P 18-406)

- **Equipement nécessaire :**
- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412.

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

- **Rectification des extrémités des éprouvettes :**

Conformément à la norme NF P 18-406, l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette. La rectification consiste donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette. Pour parvenir à ce résultat deux méthodes peuvent être employées : le surfaçage au soufre et la rectification par usinage des extrémités.

Le surfaçage au soufre est décrit dans la norme NF P 18-416. Il consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette à base de soufre respectant les deux exigences : planéité et perpendicularité aux génératrices. La planéité est assurée de la façon suivante : le mélange soufre, porté à une température de $125^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, est liquéfié et versé sur une platine dont le fond a été rectifié (figure). La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaires au fond rectifié du moule.

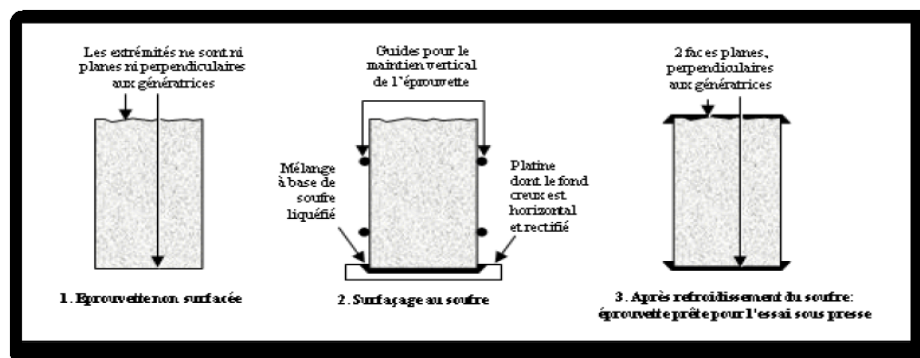


Fig16: Principe du surfaçage au soufre

L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié, l'éprouvette (à laquelle adhère alors la galette de soufre) est de la platine et il a procédé au surfaçage de la deuxième extrémité. Pour les éprouvettes dont la résistance à la compression ne dépasse pas 50Mpa, le surfaçage peut se faire avec un mélange de 60% (en masse) de fleur de soufre et 40% de sable fin de granularité inférieure à 0,5mm.

Annexe

Au-delà, et jusqu'à 80 MPa, il faudra utiliser un mélange soufré spécialement conçu pour les Bétons Hautes Performances.

Pour des bétons dont la résistance est supérieure, la rectification exigera des moyens matériels plus importants : une rectifieuse équipée d'une meule diamantée. L'éprouvette est alors usinée de manière à rendre les extrémités parfaitement perpendiculaires aux génératrices.

Conduite de l'essai de rupture

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. Pour des éprouvettes 11×22 ou 16×32, cela signifie une précision millimétrique qui ne pourra pas être obtenue sans l'emploi d'un gabarit de centrage prenant appui sur l'éprouvette (et non sur le produit de surfacage), comme indiqué sur la figure 6.5.2.

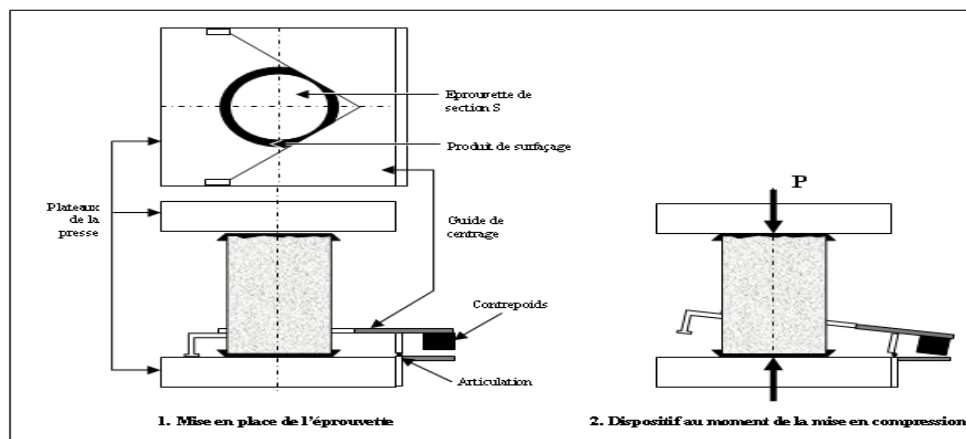


Fig. 17 Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse



Fig.18 Après le surfacage au soufre

Annexe

La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 MPa/s avec une tolérance de 0,2 MPa/s. Pour des éprouvettes 11×22 cela signifie une montée en charge de 5KN/s±2KN/s et pour des éprouvettes 16 ×32 de 10 KN/s ±4 KN/s.

La charge de rupture, P , est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance, F_c , est exprimée en MPa à 0,5Mpa près et a pour expression

$$f_c = \frac{P}{S}$$

Dans la relation ci-dessus F_c est directement obtenue en Mpa si P est exprimée en méga newton (MN) et S en m^2



Fig.19 Essai de compression

IX.5.2 Essai de flexion

L'essai de flexion est effectué sur prisme (7×7×28) cm. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion et soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture. On note alors la charge de rupture P .

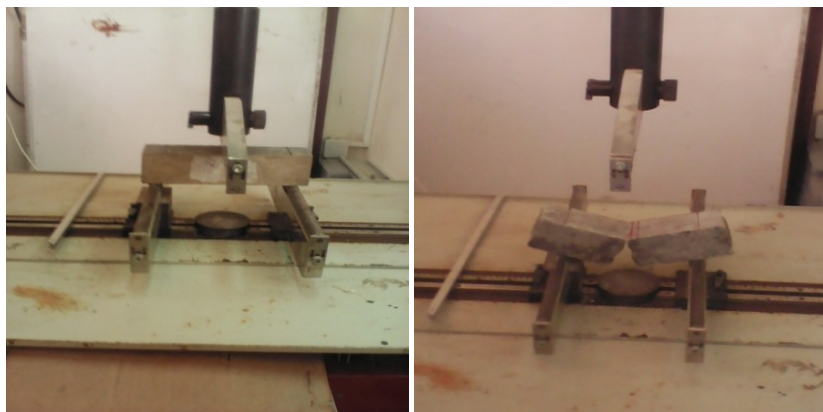
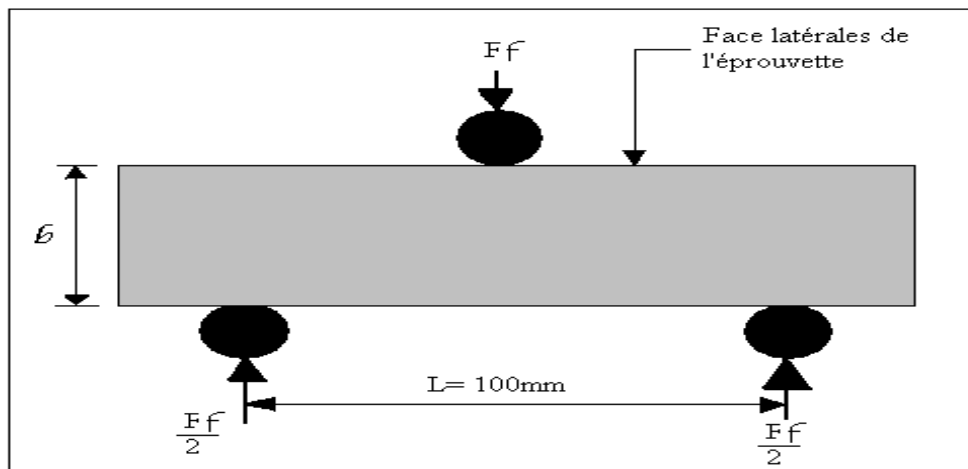


Fig.20 Ecrasement des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm



La résistance à la flexion est calculée par la formule :

$$R_f = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \text{ kgf/cm}^2$$

D'où :

P : La force appliquée.

L : Largeur des appuis

B, h : Largeur et hauteur des éprouvettes.

Références Bibliographiques

- [1] **Hanna FARES** : «propriétés mécaniques et physico-mécaniques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée ». Thèse de doctorat de l'université de Cergy-pontoise. décembre2009.
- [2] Guide d'utilisation du béton en site maritime Benoit THAUVIN & Michel MENGUY (centre d'étude techniques maritimes et fluvial)
- [4] **Tabet Nesrine, 2012** «contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur les comportements physique-mécanique des bétons autoplaçant fibres » Thèse doctorant de faculté des sciences de l'ingénieur.
- [5] **SLIMANI Abderezzak, 2007** « Science et technologie des bétons », mémoire d'ingénieure.
- [6] **Fiche Techniques** « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre».
- [7] **Aoufi Mourad, 2006** « Formulation et caractérisation des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques d'un béton autoplaçant », mémoire d'ingénieur de l'université M'hamed BOUGARRA- Boumerdes.
- [8] **NF EN 197-1** «La normalisation des ciments».
- [9] **KATTAB.R, 2007** «Valorisation de sable de dune». Thèse doctorat ENP Alger.
- [10] **DREUX. G, 1998** «Nouveau guide du béton». Ed, Eyrolles, PARIS.
- [11] Document d'une entreprise canadienne qui travaille en Algérie.
- [12] **NF EN 934-2**(sept.2002), adjuvant pour béton, mortier et coulis.
- [13] **Berkouk Kahina et Ameur Tassadit**, « Etude de l'efficacité des superplastifiant sur les propriétés rhéologique de BAP». Mémoire de fin d'étude de l'Université de Boumerdes 2006-2007.
- [14] **Stéphan ASSIE, 2004** «durabilité de béton autoplaçant». Thèse de doctorat de l'institut national des Science appliqués de Toulouse.

- [15] **Turcry P, 2004** « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.
- [16] **FERGUENE HABIB, 2016** «valoration des granulats recyclés de déchet des carreaux faince dans la formulation des béton autoplaçant » mémoire de master université de Boumerdes.
- [17] **ABDLHAMID R'MILI, 2010** «Etude de formulation et de comportement des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat de l'école Nationale d'ingénieurs de Tunis.
- [18] **CHALLAH Kaci et BEKHTAOUI Ouardai, 2009** « Caractérisation rhéologique et physique-mécanique d'un béton autoplaçant renforcé de fibres de polypropylène et de fibres métalliques». Mémoire de fin d'étude de l'Université de Boumerdes.
- [19] Site Web de groupe holcim, [http:// www. Holcim.com](http://www.Holcim.com).
- [20] Association français de génie civil «Béton autoplaçant –Recommandations provisoires», document scientifique et technique, AFGC juillet 2000.
- [21] **Sandrine BETHMONT** « Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants», thèse de doctorat de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.
- [22] **Thèse Afrique science** «les BAP renforcés par un fibrage mixte et multi-échelle : De la formation au comportement mécanique » et « l'influence des paramètres de composition sur le comportement du BAP à l'état frais».
- [23] **François CUSSIGH** « béton autoplaçant ». Technique de l'ingénieur.
- [24] **Maher EL BARRAK, 2005** « contribution a l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais» thèse doctorat de l'université de Toulouse.
- [25] **BELHOCINE AIDA, NADGOUDI NADJAT, 2014** «étude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux » mémoire de master d'université kasdi merbah-ourgla.
- [26] **ABD EL HAMID R'MILI, 2010** « étude de formulation et de comportement des bétons autoplaçants : incorporation du sable de concassage et du sable du désert» thèse doctorat de l'école nationale d'ingénieurs Tunis.
- [27] **MAHER EL BARRAK** « contribution a l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçants a l'état frais» .thèse doctorat de l'université de Toulouse 2005.
- [28] **Philippe Turcry, 2004** «Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants, Influence de la Formulation» Thèse de Doctorat Université de Nantes.
- [29] **DREUX. G. 1998** «Nouveau guide du béton». Ed, Seyroles, PARIS.

- [30] François PERCHE, 2004** « adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciment » thèse de doctorat d'école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [31] BENGUEDOUAR AFEFF, 2013** «synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (c.s.h) hybrides» mémoire de Magister de l'université de CONSTANTINE.
- [32] BOUDCHICHA Abdelaziz** «utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons » thèse doctorat de l'université de MENTOURI CONSTANTINE.
- [33] SEBBAGH AYOUB, MOKHFI MOHAMED, 2016** « investigation rhéologique et physico-mécanique des propriétés du béton fibré ultra performant contenant les déchets de briques » mémoire de master université de Boumerdes.