REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Projet de Fin d'Etudes (PFE) pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Construction et Matériaux.

Thème

Élaboration d'un éco-matériau à base de poudres de marbre et de brique cuite.

Réalisé par :

M^{elle}**KHALFAOUI Maroua Amina**

M^{me}**CHELLALI Sara**

Proposé et encadré par:

Pr. DEBIEB Farid

Juin 2017

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail qui reflète nos efforts le long des années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos gratitudes et vifs remerciements à notre promoteur, Monsieur Debieb Farid pour son orientation et ces précieux conseils pendant la durée de travail sur ce projet.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Nous remercions également monsieur Skender Zakaria et tous les enseignants du département génie civil et tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les étudiants de Master 2 Génie civil, notamment les étudiants de la 2ème Année Master Construction et Matériaux pour leur esprit de groupe et leur solidarité.

Maroua, Sara

Dédicace

Je m'incline devant dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé à la franchir.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, source d'affectation de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.

A Chère être humain à ma grand-mère sur mon cœur, je vous aime.

« Je veux que Dieu vous récompense paradis »

Dieu garde ma grand-mère et prolonge sa vie

A ma petite fille fatma Zohra Dounia

A mes sœurs Salsabil, Khaoula, Imen, Basma, Laila et mon seul frère Nouafel et ma chère sœur Mimi et sa fille.

A mes oncles, et cousins de la ville du Berouaghia et d'Alger spécialement à ma tonte fatma et son fils Cherif et ma tonte Aicha et ces enfants : Hizia , Salah el dine et Afaf et la petite Nour el houda .

Je remercie et gratitude à mes très chers beaux parents Bettayeb , mon marie et son frère rabah et ses sœurs Nassima, Nabila et leurs enfants Assil et Chichou, Ghanou et DJahid

A tous mes amis(es) et leur famille de la faculté de promotion du génie CIVIL (2016/2017) et spécialement à mon binôme et compatriote de ce projet, ma chère Maroua Amina,

A mes amis intimes et préférés : Imen, Afaf et surtout Bilal,

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

Sara.Ch

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier le dieu tout puissant qui m'adonné la force et la patience à achevé ce travail.

Pour la fontaine de patience et d'optimisme et d'espoir...qui m'a appris a donné sans attendre...Mes chers parents

Pour ceux qui portent son nom avec fierté... je demande à dieu de vous donner une longue vie mon cher père...

Pour mon ange dans la vie...

Pour la signification de l'amour et le sens de la compassion et le dévouement...

Pour le secret de mon succès a été son invocation et d'affection pour ma chère mère...

Pour ceux qui sont plus proches de la spiritualité mes chères frères : Mohamed Amine, Abd Allah Mounib, Abd Errahmane Taki Eddine.

Et ma chère précieuse sœur :

Touba Batoul

Pour mon fiancé pour son encouragement

Pour mes beaux parents, ma belle sœur et ses enfants

Pour mes beaux frères et ses familles

Pour mes grands-parents maternelle que dieu les gardes

Mes chers oncles : A/Halim et Mohamed et ses familles

Et touts ma famille paternelle

Pour mon binôme Sara pour son encouragement

A tous mes amis(es) de spécialité de Génie CIVIL promotion (2016/2017) et surtout mes amis(es) de 2ème année Master Construction et Matériaux.

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

Maroua Amina

Résumé

Dans le domaine de la construction, les recherches actuelles visent la production des éco-matériaux afin de parvenir au développement durable. Ce nouveau type de matériau qui peut être un béton ou un mortier de ciment doit répondre aux doubles exigences économiques et écologiques pour assurer la durabilité. La modification de la matrice cimentaire, par incorporation des ajouts cimentaires, permet d'améliorer la microstructure des bétons et mortiers et par conséquent, améliorer leur compacité et leurs performances. L'objectif de ce travail de recherche consiste à l'étude de la possibilité d'élaboration d'un mortier autoplaçant (un éco-matériau) avec la substitution du ciment (de 5%, 10%, 15% et 20%) par la poudre de marbre, la poudre de brique cuite et la combinaison des deux. Les résultats obtenus montrent que la substitution de 5% de ciment par la poudre de marbre avec une finesse F_2=3400 (cm^2/g) améliore la résistance à la compression du mortier autoplaçant de 15% et diminue son retrait de 60% avec la finesse F_1=3900 (cm^2/g) qui avoisine la même finesse du ciment utilisé. Ce MAP réalisé est considéré comme éco-matériau et il est fort recommandé aux ingénieurs du BTP et aux utilisateurs du ciment dans la construction.

Mots clés : Eco-matériaux, marbre, brique, finesses, mortier autoplaçant, résistances mécaniques durabilité.

Abstract

In the domain of construction, current researches are aimed at the production of eco-materials in order to achieve sustainable development. This new type of material, which can be concrete or cement mortar, must meet both of economic and ecological requirements to ensure durability. The modification of the cementitious matrix, by incorporation of the cementitious additions, makes it possible to improve the microstructure of the concretes and mortars and consequently improve their compactness and performances. The objective of this research is to study the possibility of elaboration of self-compacting mortar (an eco-material) with the substitution of cement (5%, 10%, 15% and 20%) by marble powder, brick powder and the combination of both. The results obtained show that substitution of 5% of cement with marble powder with a fineness of F_2=3400 (g /cm^2) improves the compressive strength of the self-compacting mortar by 15% and reduces its shrinkage by 60% with fineness F_1=3900 (g/cm^2) which the approximate same fineness of the cement used. This self-compacting mortar is considered as an eco-material and is strongly recommended for construction engineers and all users of cement in construction.

Key words: Eco-materials, marble, brick, finenesses, self-compacting mortar, mechanical resistance, durability.

ملخص

في مجال البناء, الأبحاث الحالية تهدف إلى إنتاج مواد بيئية من أجل الوصول إلى تطور دائم.هذا النوع الجديد من المواد سواء كان خرسانة أو ملاط إسمنتي يستوفي كل من المتطلبات الاقتصادية و البيئية من أجل تحقيق الديمومة.

تعديل المصفوفة الإسمنتية بإدماج مضافات إسمنتية ,تسمح بتحسين البنية المجهرية للملاط و الخرسانة و عليه تحسين التخزين و الفعالية.

الهدف من هذه المذكرة يتمثل في دراسة إمكانية تحضير مواد بيئية مع استبدال الاسمنت بنسب (5%, 10%, 15%و20%) بمسحوق الرخام, بمسحوق الأجور, وخليط الاثنين معا.

النتائج المحصل عليها تبين أن لستبدال 5% من الاسمنت بمسحوق الرخام بنعومة(بسم^2/غ) 3400=F_2تحسن مقاومة الملاط الذاتي التموضع بنسبة 15 و تنقص تقلصه بنسبة 60 %بنعومة (بسم^2/غ) 3900=F_1المقاربة لنعومة الاسمنت المستعمل.

هذا الملاط الذاتي التموضع المحصل عليه يعتبر كمادة بيئية و عليه ينصح به لمهندسي البناء و كل مستعملي الاسمنت في البناء.

الكلمات المفتاحية: مواد بيئية , الرخام,الأجور,النعومة,ملاط ذاتي التموضع,مقاومة ميكانيكية,ديمومة.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations et Abréviations

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale……02

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I- Introduction……...……...……..03

I.1- Mortier de construction…..…….....03

I.1.1-Définition……03

I.1.2-Composants du Mortier……04

a. Les liants…..……..04

a) Ciments naturels…….05

b) Ciments artificiels……...05

b. Les sables…..……...…….05

c. Les adjuvants..……..06

d. Eau……...……..07

I.1.3- Formulations des Mortiers…..……..07

I.1.4- Types de Mortier……..07

A. Mortier du ciment……07

B. Mortier de chaux hydrauliques……..08

C. Mortier bâtard…..……...08

D. Mortier fabriqués sur chantier…...……....08

E. Mortier de hourdage de maçonnerie……..08

F. Mortier colle……..09

G. Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi……..……...09

H. Mortier industriel…….09

I. Mortier de résine……...09

J. Mortier de fibres……...09

I.1.5-Domaines d'utilisation des mortiers…...……..10

I.1.5.1-Mortiers pour chape……10

I.1.5.2-Enduits……..10

I.1.5.3-Joints de maçonnerie……11

I.1.5.4-Scellements et calages……..12

I.1.5.5-Mortiers et coulis de réparation…….12

I.2-Béton Auto plaçant……13

I.2.1-Historique des bétons autoplaçants……..…….13

I.2.2-Constituants d'un BAP……..14

a. Ciment……15

b. Granulats……...15

c. Additions minérales……..16

d. Adjuvants…….17

e. Eau……..……..……..19

I.2.3- Formulations des BAP…….19

a. Formulations OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)……20

b. Formulation LCPC (France)……..21

c. Formulation CBI modifiée……...22

d. Formulation JSCE...……22

I.2.4-Caractérisation d'un BAP…….24

A. Etat frais……...24

A.1- Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement)……...……24

A.2- Mobilité en milieu confiné……24

i. Essai des anneaux japonais……..24

ii. Essai de la boite en L (L-box test)……..25

iii. Essai de tube en U, du caisson et de passoire……..……26

iv. Essai d'entonnoir (V-Funnel)……28

A.3- Stabilité……..29

i. Essai de stabilité au tamis……29

ii. Essai de ressuage…….30

B. Etat durci…….31

B.1-Résistance mécanique…….31

B.2-Durabilité…...……..32

I.3-Recyclage des déchets……..…33

I.4-Brique et déchets de brique……..34

I.4.1-Historique……34

I.4.2-Définition…….34

I.4.3-Types de brique……35

A. Les brique…….35

B. Brique de terre cuite……..……..35

C. Brique de laitier…….35

D. Brique silico-calcaires……..36

I.4.4-Mode de fabrication……..37

I.4.5-Propriétés des briques…….39

A. les propriétés thermo- physico -mécaniques de brique……..…….39

B. Résistance eu gel……..……40

C. Propriété thermique……...…….40

I.4.6-Valorisation des déchets de brique….……...40

I.4.6.1-Sur mortier…….40

a. Etat frais……40

b. Etat durci……..42

I.4.6.2-Sur béton…….44

a. l'état frais.……44

b. l'état durci…….45

I.5-Marbre et déchets de marbre…….……..50

I.5.1-Historique……..……50

I.5.2-Définition……..51

I.5.3-Types de marbre……..51

I.5.4-Mode de fabrication…….52

1) L'extraction……...52

2) Le bardage…….52

3) Le sciage et l'usinage…….……..52

4) Le polissage……...52

5) La pose……..53

I.5.5-Propriétés de marbre……..54

I.5.6-Valorisation des déchets de marbre dans le mortier et le béton……..54

I.5.6.1-Sur mortier…….54

a. Etat durci……..54

I.5.6.2-Sur Béton…….55

a. Etat frais……55

b. Etat durci..……...57

CHAPITRE II : <u>MATERIAUX ET ESSAIS</u>

II.1-Introduction…….61

II.2-Caractérisation des matériaux……...62

II.2.1-Ciment……62

II.2.2-Le sable……..62

II.2.3-Eau de gâchage…….63

II.2.4-Superplastifiant…….63

II.2.5-Déchets……..64

II.2.5.1-Déchets de brique……..65

II.2.5.2-Déchets de marbre…….65

- **Recyclage et caractérisation des déchets de brique cuite et de marbre……66**
  - **Poudres de brique recyclé…….....66**
  - **Poudres de marbre recyclé……67**

II.3-Essais sur le déchet recyclé……...……..67

II.4-Formulation des mortiers……...68

II.5-Séquence de malaxage du mortier…….69

II.6-Préparation et Conservation des éprouvettes……...70

II.7-Les essais sur les mortiers……...71

II.7.1-Etat frais……..……71

a) **Essais d'étalement au mini-cône……..……71**
b) **Essai d'entonnoir en V (V-Funnel)……..……72**

II.7.2-Etat durci…….……...73

a. **Résistance à la compression…….73**
b. **Absorption d'eau par capillarité…….……...……73**
c. **Retrait et Gonflement……..……...……74**
d. **Des variations de longueur……..……...75**

II.8-Variables Etudiées……..…….76

II.9-Conclusion…….…….....78

CHAPITRE III : <u>RÉSULTATS ET INTERPRETATIONS</u>

III.1-Introduction……..79

III.2-Etat frais……79

III.2.1-Etalement…….79

III.2.2-Temps d'écoulement à travers le V-Funnel…….81

III.3-Etat durci……...82

III.3.1-Résistance à la compression……...82

III.3.2-Absorption d'eau par capillarité……87

III.3.3-Retrait et Gonflement……..90

a. **Retrait…….90**
b. **Gonflement…….94**

III.4-Conclusion…….98

CONCLUSION GÉNERALE ET RECOMMENDATIONS

Conclusion Générale…….99

Recommandations…….100

RÉFERANCES BILBIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographique……..106

Liste Des Tableaux

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° de tab	Titre	Page
Tableau I.1	caractéristiques des briques	**36**
Tableau I. 2	1es propriétés physico –mécaniques des Briques creuses et Perforées	**39**
Tableau I.3	la Résistance thermique des briques pleines, perforées et creuses	**40**
Tableau I.4	Les résultats de l'essai à l'état frais	**45**

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET ESSAIS

N° de tab	Titre	Page
Tableau II.1	Les caractéristiques du sable.	**62**
Tableau II.2	Essais effectués sur les déchets.	**67**
Tableau II.3	Composition des différents mortiers réalisés (V=1l).	**68**

Liste Des Figures

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° de Figure	Titre	Page
Figure I.1	Composants du mortier.	**4**
Figure I.2	Mortier pour chape.	**10**
Figure I.3	Les mortiers pour enduit	**11**
Figure I.4	Les mortiers pour joint de maçonnerie	**11**
Figure I.5	Les mortiers pour scellements et les calages.	**12**
Figure I.6	Les mortiers et coulis de réparation.	**13**
Figure I.7	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP	**15**
Figure I.8	cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement.	**24**
Figure I.9	Anneau Japonais – Laboratoire GC de Polytech'Orléans	**25**
Figure I.10	Essai de la boite en L (L-box test)	**26**
Figure I.11	Essai du tube en U	**27**
Figure I.12	Essai du caisson.	**27**
Figure I.13	Essai de la passoire	**28**
Figure I.14	Essai d'entonnoir V-funnel	**29**
Figure I.15	Essai de stabilité au tamis	**30**
Figure I.16	Essai de ressuage	**31**
Figure I.17	Nomination de différente face d'unité de brique	**35**
Figure I.18	Briques creuses	**35**
Figure I.19	Exemples de briques LD NF EN 771.	**37**
Figure I.20	Exemples de briques HD NF EN 771.	**37**
Figure I.21	découpage	**38**
Figure I.22	fabrication des produits de terre cuite	**39**
Figure I.23	L'effet de l'ajout des déchets de brique sur l'ouvrabilité d'un mortier	**41**
Figure I.24	Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr)	**41**
Figure I.25	Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de déchets de brique	**42**
Figure I.26	Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr	**43**
Figure I.27	Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr	**43**
Figure I.28	Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges (en Litres)	**44**
Figure I.29	Densité et Air Occlus des Bétons Frais	**45**
Figure I.30	Absorption d'eau des bétons à base de déchets de brique	**46**
Figure I.31	Variation de la résistance à la compression des bétons à base de déchet de brique sous l'action du Gel-Dégel	**46**
Figure I.32	La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés.	**47**
Figure I.33	Absorption d'eau du béton avec et sans granulats recyclés	**48**
Figure I.34	Perméabilité au gaz du béton avec et sans granulats recyclés	**48**
Figure I.35	Diffusion des ions chlores du béton avec et sans granulats recyclés	**49**
Figure I.36	Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge.	**54**
Figure I.37	Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement	**56**
Figure I.38	Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAPFC) et (BAPDM).	**57**
Figure I.39	Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.	**58**
Figure I.40	Résistance à la compression pour différents bétons.	**59**
Figure I.41	Evolution de la résistance à la compression Comparaison en fonction du temps de (BAPFC) et (BAPDM).	**60**

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET ESSAIS

N° de Figure	Titre	Page
Figure II.1	Courbe granulométrique de sable	**63**
Figure II.2	Adjuvant utilisé « MEDAFLOW 145 »	**64**
Figure II.3	Concasseur à mâchoires	**65**
Figure II.4	Broyeur à disque	**65**
Figure II.5	Brique récupérée	**65**
Figure II.6	Poudre de brique recyclé	**65**
Figure II.7	Marbre récupérée	**66**
Figure II.8	Poudre de marbre recyclé	**66**
Figure II.9	Protocole d'obtention des finesses de déchets de brique.	**66**
Figure II.10	Protocole d'obtention des finesses de déchets de marbre.	**67**
Figure II.11	Séquence de malaxage du mortier autoplaçant	**69**
Figure II.12	protocole de malaxage.	**70**
Figure II.13	Les éprouvettes après le décoffrage	**71**
Figure II.14	Conservation dans l'eau a20 °C±2°	**71**
Figure II.15	Protocole de l'essai d'étalement.	**72**
Figure II.16	Protocole de l'essai de V-Funnel	**72**
Figure II.17	Essai de compression sur mortier.	**73**
Figure II.18	Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier.	**74**
Figure II.19	Réfractomètre et son étalonnage (variation dimensionnelle)	**74**
Figure II.20	Matériaux utilisées	**76**
Figure II.21	les familles de mortiers	**77**

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATOPNS

N° de Figure	Titre	Page
Figure III.1	Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de marbre.	**79**
Figure III.2	Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de brique cuite.	**80**
Figure III.3	Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.	**80**
Figure III.4	Étalement en fonction de teneur et finesse de déchet de marbre et de brique.	**81**
Figure III.5	Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de marbre.	**82**
Figure III.6	Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de brique cuite.	**82**
Figure III.7	Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.	**83**
Figure III.8	Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.	**83**
Figure III.9	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.	**84**
Figure III.10	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.	**84**
Figure III.11	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.	**85**

Figure III.12	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.	**85**
Figure III.13	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite et de marbre avec la finesse 1.	**86**
Figure III.14	Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite et de marbre avec la finesse 2.	**86**
Figure III.15	Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.	**87**
Figure III.16	Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.	**88**
Figure III.17	Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.	**88**
Figure III.18	Absorption des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.	**89**
Figure III.19	Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.	**89**
Figure III.20	Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.	**90**
Figure III.21	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.	**91**
Figure III.22	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.	**91**
Figure III.23	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.	**92**
Figure III.24	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.	**92**
Figure III.25	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.	**93**
Figure III.26	Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.	**93**
Figure III.27	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.	**94**
Figure III.28	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.	**95**
Figure III.29	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.	**95**
Figure III.30	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.	**96**
Figure III.31	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.	**96**
Figure III.32	Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.	**97**

Notation et Abréviation

BAP	Béton autoplaçant
CEMI 42,5	Ciment portland ordinaire de classe 42.5 MPa
D	Diamètre d'étalement au mini cône
d	Le diamètre final de la galette
d0	Le diamètre inférieur du cône
Dmax	Diamètre maximal des granulats
E	Quantité d'eau
E/C	Rapport eau sur ciment
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
Rc	Résistance à la compression
MT	Mortier témoin
MAPT	Mortier autoplaçant
$\mathbf{MMF_1}$	Mortier de Marbre Finesse 1
$\mathbf{MMF_2}$	Mortier de Marbre Finesse 2
$\mathbf{MBF_1}$	Mortier de Brique Finesse 1
$\mathbf{MBF_2}$	Mortier de Brique Finesse 2
$\mathbf{MMBF_1}$	Mortier de Marbre et de Brique Finesse 1
$\mathbf{MMBF_2}$	Mortier de Marbre et de Brique Finesse 2
NA	Norme Algérienne
NB	Norme Belgique
NE	Norme Européenne
C	Dosage du ciment
E	Quantité d'eau efficace
G/S	Rapport gravillon/sable
c	la compacité
dB	Décibel unité de son
p	la porosité
W	Teneur en eau
ES	Equivalent de sable à piston

ESV	Equivalent de sable à vue
M_f	Module de finesse
S	Le sable
R_C	La résistance a compression
ΔL	Variation de longueur par rapport à la longueur origine
L_0	Longueur de base prise égale à160mm
BO	Béton Ordinaire
ACI	American concrete institute
S/M	le rapport Sable/Mortier
JSCE	Japan society of civil engineers
AFGC	Association française du génie civil
EFNARC	european federation of national association representing for concrete
SSB	Surface Spécifique de Blaine
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, dans le domaine de la construction et des travaux publics, devant les besoins croissants en matériaux et devant les exigences de préservation de l'environnement dans une vision du développement durable, il est devenu nécessaire de prospecter et d'étudier toutes les possibilités d'élaboration de nouveaux matériaux avec la réutilisation et la valorisation des déchets et sous produits industriels. Cependant, les contraintes d'ordre économique, écologique et technique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets. Par conséquent, dans plusieurs pays du monde, beaucoup d'importance est donnée à la valorisation des déchets et de sous-produits industriels dans la fabrication du ciment et du béton. Dans ce contexte, dans plusieurs universités du monde entier, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de déchets, dans le but de réduire le coût de réalisation, d'éliminer ces déchets de l'environnement d'une part, d'autre part d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers et des bétons. Dans cet axe, ce travail de recherche a pour objectif l'étude de la possibilité d'élaboration d'un mortier autoplaçant (un éco-matériau) avec la substitution du ciment (de 5%, 10%, 15% et 20%) par la poudre de marbre, la poudre de brique cuite et la combinaison des deux.

Pour le besoin de l'étude, le mémoire est structuré comme suit :

Après une introduction générale, le chapitre 1 fait l'objet d'une synthèse bibliographique sur le mortier et le béton autoplaçants, la valorisation des déchets de brique cuite et du marbre dans le domaine du BTP ainsi que les propriétés du mortier et du béton a base de ces deux type de déchets. La description des matériaux utilisés, les différents mélanges réalisés et les essais effectués à l'état frais et durci font l'objet du chapitre 2. Juste après, viens le chapitre 3 pour résumer la présentation des résultats obtenus, leur analyse et leurs interprétations. Enfin le mémoire est clôturé par des conclusions générales et des recommandations pour les futurs travaux.

I. Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, donc il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

On doit choisir correctement le liant en fonction de son type et de sa classe, le ou les sables, la teneur en eau (pour obtenir la plasticité désirée) et les adjuvants adaptés à la destination du mortier.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires; leur granulométrie est de préférence continue. Les dosages en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume du sable humide (foisonnement).

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :

– réducteurs d'eau-plastifiants ;

– plastifiants ;

– entraîneurs d'air ;

– modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs)

- Hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre. Dans ce chapitre, on présentera les différents composants du mortier et ses propriétés principales telles que la résistance, durabilité et les déformations des mortiers frais (retrait, ressuage).

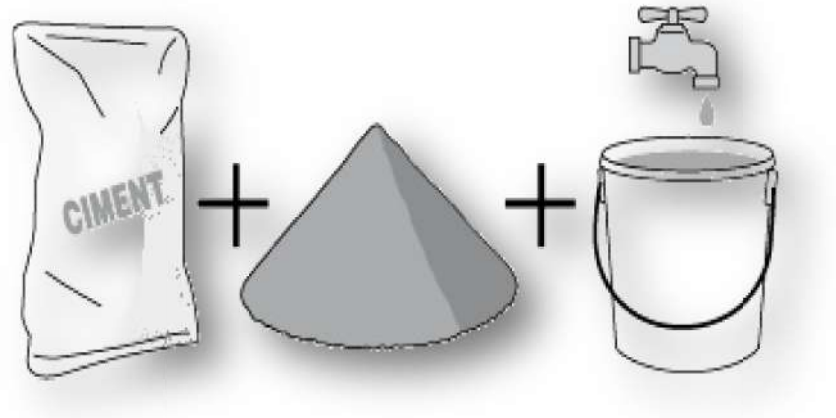
I.1- Mortier de construction

I.1.1- Définition

Classiquement, on appelle mortier les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau et de sable. Néanmoins, de nos jours, l'emploi d'adjuvants et de différentes additions minérales est obligatoire pour atteindre des propriétés

souvent antagonistes et ainsi obtenir un comportement adéquat en fonction de l'application désirée et des performances souhaitées.

Le mortier ce diffère du béton par la dimension D du plus gros granulat, on a D ≤ 4mm pour mortier et D≥4 mm pour béton **[1].**



Liant (ciment) + sable + Eau

Figure I.1 : Composants du mortier.

I.1.2-Composants du Mortier

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure **[2].**

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- Liant (ciment ou chaux) ;
- Sable ;
- Ajout ;
- Adjuvants ;
- Eau.

a. Les liants (Ciment)

Le ciment est une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

- silicate tricalcique, ou C_3S (3 CaO, SiO_2).
- silicate bicalcique, ou C_2S (2 CaO, SiO_2).
- aluminate tricalcique, ou C_3A (3 CaO, Al_2O_3).
- aluminoferrite tricalcique, ou C_4AF (4 CaO, Al_2O_3, Fe_3O_3). **[3]**

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile.

Généralement, on peut utiliser :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc) ;
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..) ;
- Les liants à maçonner ;
- Les chaux hydrauliques naturelles ;
- Les chaux éteintes. **[3]**

Ainsi qu'il existe différentes types de ciment :

a) Ciments naturels

Obtenus par cuisson de roches calcaires contenant 20 à 40 % d'argile. Ils sont à prise rapide ou demi-lente et ne conduisent pas à des résistances finales élevées.

Exemple : les ciments prompts.

b) Ciments artificiels

Les liants les plus importants et les plus employés dans la construction actuelle.

Ils sont à prise lente et on distingue les catégories suivantes :

- **CPA :** Ciment Portland artificiel (97% clinker plus des fillers) ;
- **CPJ :** Ciment Portland composé (65% clinker plus des ajouts) ;
- **CHF :** Ciment de haute-fourneau (40% à 75% laitier plus du clinker) ;
- **CLK :** Ciment de laitier au clinker (80% laitier plus du clinker) **[3].**

b. Les sables

Les sables utilisés sont le plus souvent des sables naturels. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. **[2].**

Ils peuvent être:

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;

- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs ;
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers) ;
- Sable de laitier;
- Sable d'oxydes de fer, de chromite;
- Corindon;
- Sable de briques concassés;
- Liège torréfié;
- Polystyrène expansé;
- Vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les "sables à lapin", généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres **[2].**

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- Extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis);
- Fins: jusqu'à 1,6 mm;
- Moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- Gros: jusqu'à 5 mm.

c. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (tout dépend de la plage recommandée dans la fiche technique). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- Les plastifiants (réducteurs d'eau);
- Les entraîneurs d'air;
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre **[2].**

d. Eau

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (Maniabilité à l'état frais) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir plus de 5 grammes par litre de matières en suspension (vases, limons, etc.) **[4].**

I.1.3-Formulations des Mortiers

Les mortiers composés de chaux et de ciment portland sont définis en deux étapes **[5].**

Le mortier doit d'abord être défini en fonction de la résistance requise pour l'application.

Ensuite, il faut décider si on spécifie les proportions ou les propriétés énumérées dans la norme Américaine **[6]**.

La norme ASTM C270 **[4]** (Mortar for Unit Masonry) fournit une base pour la définition des mortiers de ciment et de chaux. Cette norme fournit une base pour cinq types de mortier différents en fonction de la résistance du mortier requise pour l'application.

La norme ASTM C270 fournit une spécification de proportion et de propriété pour chaque type de mortier **[5]**.

I.1.4-Types de Mortier

Dans les travaux publics et les Travaux de bâtiment on utilise plusieurs types de mortier selon l'ouvrage à réaliser et de son environnement :

A. Mortier du ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35 Les dosages courants sont de l'ordre de 300 a 400 kg de ciment pour $1m^3$de sable **[6].**

B. Mortier de chaux hydrauliques

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments **[6].**

C. Mortier Bâtards

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue **[6].**

D. Mortier fabriqués sur chantier

C'est encore le cas très souvent pour des menus travaux; le plus grand soin doit être apporte tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction de l'ouvrage à réaliser : type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants.

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner.

Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids, soit en volume. Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables **[6].**

E. Mortier de hourdage de maçonnerie

On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm, le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau qui joue un rôle important ne peut être fixée à priori, en règle générale on adopte une valeur voisine de la moitié du poids du liant qui peut être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant **[6].**

F. Mortier colle

Le mortier colle regroupe la famille des mortiers adhésifs destinés à coller un revêtement comme :

- le carrelage.
- le dallage.
- certains blocs de maçonnerie.

Si le mortier colle est parfaitement adapté pour le collage des céramiques, il est tout de même possible de les coller à l'aide de mortier-ciment ou de mortier chaux sous certaines conditions **[6].**

G. Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Depuis quelques années est apparue une nouvelle génération de mortiers livrés par les centrales de béton prêt à l'emploi : les mortiers frais retardés et stabilisés. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante.

On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 24 heures sans avoir le souci de préparer de nombreuses petites gâchées. Très maniables et homogènes, ils possèdent des résistances très largement suffisantes pour les travaux auxquels ils sont destinés : maçonnerie et jointoiement.

Lorsqu'ils sont étalés en couche mince, la prise de ces mortiers est accélérée (effet d'absorption d'eau par le support et perte par évaporation).

Ces mortiers permettent, comme le béton prêt à l'emploi, de simplifier et d'améliorer les conditions de travail, en évitant les pertes de temps **[6].**

H. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins **[6].**

I. Mortier de résine

Ils utilisent des résines synthétiques, en particulier le polyester ou l'époxyde **[58].**

J. Mortier de fibres

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissura blés. Ce sont soit des mortiers pré mélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales **[6].**

I.1.5- Domaines d'utilisation des Mortiers

I.1.5.1-Mortiers pour chape

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels).

Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme **NF P 14-201 [7,8].**



Figure 1.2 : Mortier pour chape.

I.1.5.2-Enduits

Ce domaine d'application, qui constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers, Rappelons simplement qu'à côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme **NF P 15-201 (DTU 26.1),** se développent aujourd'hui les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels. Ces produits font l'objet d'une procédure d'Avis technique par le **CSTB [8].**



Figure I.3. Les mortiers pour enduit

I.1.5.3- Joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche.

Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente. La norme **XP P 10-202-1 [9].**

Fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiement, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre **[8].**



Figure I.4. Les mortiers pour joint de maçonnerie.

I.1.5.4-Scellements et calages

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques.

Adaptés aux travaux à réaliser, scellements d'éléments de couverture, scellements d'éléments de second œuvre, scellements de regards de regards de visite **[8]** ; assemblage des éléments préfabriqués sont caractérisée par :

- Absence de retrait.
- Caractère expansif du mortier.
- Résistance au jeune âge.



Figure I.5. Les mortiers pour scellements et les calages.

I.1.5.5-Mortiers et coulis de réparation

Comme son nom l'indique, ce type de mortier est utilisé pour le reprofilage du béton, la reconstitution de la protection des armatures, et le rétablissement de l'étanchéité. Illustre en gros une partie du cas pratique **[8].**

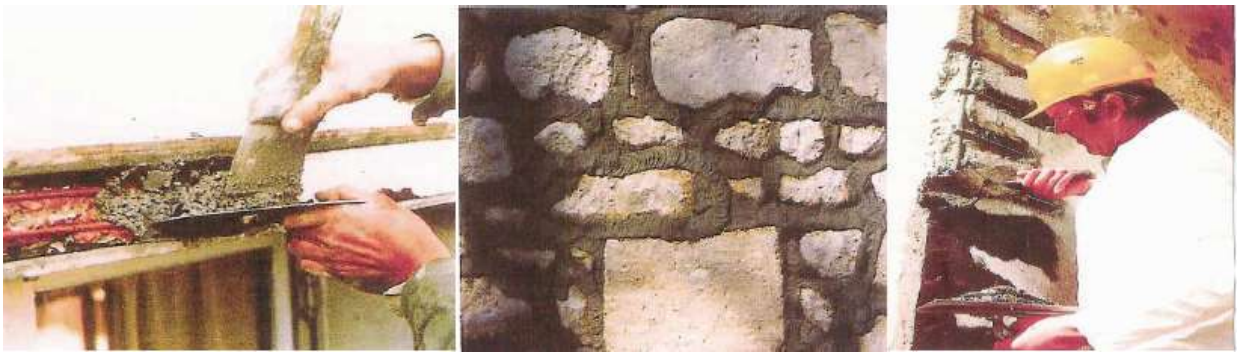


Figure I.6. Les mortiers et coulis de réparation.

I.2- Béton Auto plaçant

I.2.1-Historique des bétons autoplaçants

Le japon est le pionnier du développement de ce béton ou il a été apparu en 1980.

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

Pour satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coules sous l'eau, en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

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

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

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

Nous citons quelques exemples de réalisation Japonaises :

- Le pont Kiba Park ou 650 m^3 de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 60 MPa **[10]** ;

- Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de 3910m ou 390.000 m^3de béton autoplaçant versés dans les coffrages des fondations piliers (OKAMURA et Coll.1994) **[11]** ;
- Le bâtiment Landmark Tower ou un béton autoplaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (HAYAKAWA et Coll.1995) **[12]** ;
- Le stade de Fukaka ou 10.000 m^3 de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferraillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995) **[13].**

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

I.2.2- Constituants D'un BAP

Les bétons autoplaçants (BAP), sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Comme tout type de béton, les BAP sont composés de matériaux de base soit de ciment, de sable, de granulats et d'eau, afin d'assurer leur fluidité et leur homogénéité.

Les bétons autoplaçants nécessitent l'utilisation des adjuvants chimiques (Superplastifiants et Agents de Viscosité), ainsi que les ajouts minéraux. Ces derniers sont incorporés en faibles quantités au béton frais, afin d'améliorer certaines propriétés.

Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais, qui sont reliées à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange en lui-même.

Il existe de parts le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP.

Nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, additions minérales, granulats, adjuvants et eau).Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants. La **Figure I.7** présente la comparaison entre la composition d'un béton fluide autoplaçant et d'un béton ordinaire.

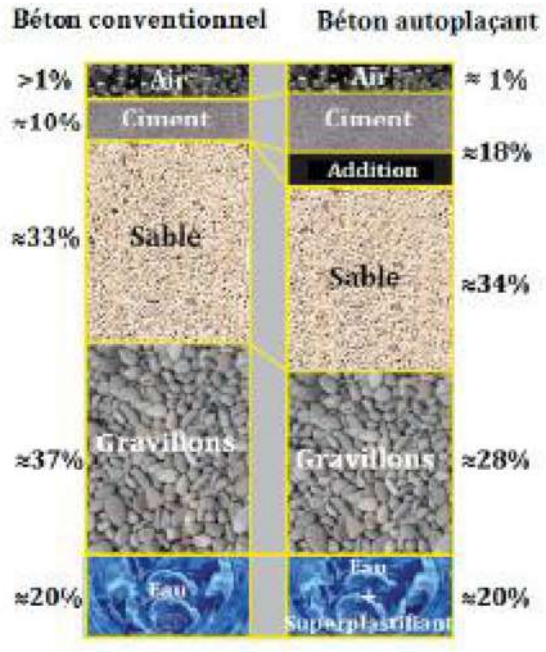


Figure 1.7: Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

a. Ciment

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts.

b. Granulats

En générale le béton est constitué de deux phases : une phase solide constituée du squelette granulaire (sable, gravier, cailloux) en principe inerte et une phase constituée d'une pâte liante, les grains qui constituent le squelette granulaire, C'est l'ensemble des grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm **[15],** et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent la granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

La fluidité d'un béton autoplaçant est contrôlée par l'état de contrainte entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s'écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides (gravier, sable, additions minérales, liant) qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement.

L'utilisation de granulats roulés (de forme plus ou moins sphérique) peut être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats **[16].** Le volume des gros granulats dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération.

Afin d'empêcher tout risque de blocage du béton par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre différent **[17].**

De plus la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire, afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable (G/S) est proche de 1 **[18].**

c. Additions minérales

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux : fumées de silice, laitiers, cendres volantes, pouzzolanes et aditions calcaires.

Ce sont des matériaux finement broyés tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, les cendres volantes qui viennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent des avantages dans l'industrie (la diminution de l'émission du CO^2) et des avantages dans la formulation des bétons.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

- ✓ Les produits artificiels :
- Le laitier des Hauts Fourneaux ;
- Les cendres volantes ;
- La fumée de silice ;
- L'argile calcinée (méta kaolin) ;
- Les déchets d'incinération ;
- Les déchets de briques concassées
- ✓ Les produits naturels :

- La pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories) ;
- Le calcaire ;
- L'argile opaline ;
- Les additions siliceuses (sable).

d. Adjuvants

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000 –30000 gr) **[18].**

Les adjuvants sont des produits chimiques solubles dans l'eau, ajoutés à moins de 5% du poids du ciment, au moment du malaxage des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont frais, afin d'améliorer certains propriétés, en modifiant principalement :

- Les solubilités
- Les vitesses de dissolution
- L'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps. Les chinois employèrent des ci-dessus. Les Romains additionnaient parfois du sang animal comme plastifiant à leur béton de chaux et de pouzzolane **[19,20].**

- **Les agents de viscosité**

L'utilisation des agents de viscosité dans la formulation des bétons fluides est devenue récemment une nécessité pour garantir une bonne résistance à la ségrégation du béton.

Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures, en général se sont des polysaccharides hydrosolubles **[23].**

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme Whelan ou gomme de xanthine.
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d"hydroxy-éthyl cellulose.

- Colloïdenatural.
- Suspension des particulars siliceuses.

Mailvaganarn **[24]** divise les agents colloïdaux selon leur action physique dans le béton en cinq classes comme suit :

- **Classe A** : polymères naturels et synthétiques qui sont solubles dans l'eau et qui augmentent la viscosité de l'eau dans le mélange ; ce sont les éthers de cellulose, les oxydes de polyéthylène, etc.
- **Classe B** : floculant organiques so1ubles dans l'eau qui s'adsorbent sur les grains de ciment et augmentent l'attraction entre eux ce qui augmente la viscosité ; ce sont les copoiymères de styrène avec le groupe carboxylique et Les gommes naturelles.
- **Classe C** : émulsions des différentes matières organiques qui augmentent l'attraction entre les grains de ciment et introduisent les particules superfines dans la pâte de ciment ; ce sont les émulsions acryliques et les dispersions aqueuses de l'argile.
- **Classe D** : matières inorganiques de grande surface spécifique qui gonflent dans l'eau et augmentent les possibilités du mélange à garder de l'eau libre ; ce sont les bentonites, les fumées de silice, etc.
- **Classe E** : matières inorganiques de grande surface spécifique qui augmentent la quantité de particules superfines dans le mélange, comme les cendres volantes et les terres à diatomées.

Kawai **[25]** a classifie les agents colloïdaux selon leur origine comme suit :

- **polymères naturels** : amidons, protéines de plantes et gommes naturelles.
- **polymères semi-synthétiques** : amidons décomposés et leurs dérivés, dérivés de la celluloseéther (hydroxyde propyle méthyle cellulose (HPMC), hydroxyde éthyle cellulose (HEC) et &oxyde méthyle cellulose (CMC)).
- **polymères synthétiques** : basés sur l'éthylène (oxyde de polyéthylène) ou sur le vinyle (polyvinyle alcool).

Les agents de viscosité (agents colloïdaux), les plus utilisés dans le béton sont des dérivés de la cellulose et des polysaccharides de source microbienne (gomme de Whelan). La gomme de Whelan est un polysaccharide à masse moléculaire élevée (autour de 2 millions) produit par un procédé de fermentation **[26].** Si on compare la viscosité causée par la présence de la gomme de Whelan dans la solution avec celle causée par la présence du HPMC, la gomme de Whelan donne une plus grande viscosité pour des bas taux de cisaillement tandis qu'à des hauts taux de cisaillement sa viscosité est plus faible.

La gomme de Whelan est très efficace et est utilisée à faibles concentrations (0,02 % - 0,2 % de la masse de ciment) **[27].** La présence d'un superplastifiant, soit à base de mélanine, soit à base de naphtalène, ne change pas ses effets rhéologiques s'il est utilisé en dosages habituels jusqu'à 3 %.

Les dérivés de la cellulose ont une masse moléculaire comprise entre 10 000 et un million. Ils sont souvent utilisés avec les superplastifiants à base de mélamine à cause de leur incompatibilité avec les superplastifiants à base de naphtalène.

Ils entrent en réaction chimique avec ces derniers pour former un gel qui provoque un fort accroissement de la viscosité. Dans l'industrie du béton les dérivés de la cellulose sont utilisés à des dosages de 0,02 – 2% de la masse de ciment [**25**].

Certains agents colloïdaux à base de cellulose (HPMC, HEC) peuvent entraîner une importante quantité d'air dans le béton (jusqu'à 15 %) et il est recommandé de les utiliser avec une certaine quantité d'agent des entraîneurs d'air [**25**].

e. Eau

L'eau utilisée pour la formulation du béton ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.).

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de suspension entre granulats.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais, pour cela on utilise l'eau efficace qui consiste à tenir compte de la quantité d'eau existante dans les granulats.

I.2.3- Formulations des BAP

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée.

Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis **[28].**

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications.

a. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par **[29].**

Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances. Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés :

$$G = \frac{50}{100} G_{lim}(1 - A) \qquad \textbf{(I.2)}$$

Où :

A : Quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel ;

$\mathbf{G_{lim}}$**:** Volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats.

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier :

Où :

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1-A-G)}{(1-K_{sf})} \qquad \textbf{(I.3)}$$

$\mathbf{K_{sf}}$ **:** Taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable.

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%.

- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad \textbf{(I.4)}$$

Avec :

d : est le diamètre de la galette ;

d_0: La base du cône.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$T = \frac{10}{t} \quad \textbf{(I.5)}$$

Avec :

T : le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de D est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de Test faible, plus la viscosité est élevée).

Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément :

$$D = 5 \text{ et } T = 1 \pm 0{,}1 \quad \textbf{(I.6)}$$

Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

b. Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par Sedran et De Larrard **[32]** est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches, est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlabpro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche **[30,31],** et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants). Pour un béton autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont :

- Un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm ;
- Un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa ;
- Une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTHREOM).

Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation. Une proportion de liant (ciment + addition) est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée.

c. Formulation CBI modifiée

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportée par Bui et al dans **[33],** qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. Leur méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de bétons **[34].** L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm.

d. Formulation JSCE

La démarche proposée en 1998 par la Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques **[35].** Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de

L'utilisation ou non d'un agent de cohésion.

Les points principaux de cette formulation sont **[36] :**

- ✓ Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'auto-compactibilité désirée.

Il est situé entre 0.30 et 0.32 m^3/m^3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.

- ✓ Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m3. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m^3.
- ✓ Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume.
- ✓ Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en général l0.13m^3/m^3. Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 m^3/m^3.
- ✓ La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.
- ✓ La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air).
- ✓ Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de superplastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les superplastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par m^3, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

I.2.4- Caractérisation d'un BAP

A. Etat Frais

A.1- Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement)

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies.

La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme.

L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas **(Figure I.8)**, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton.

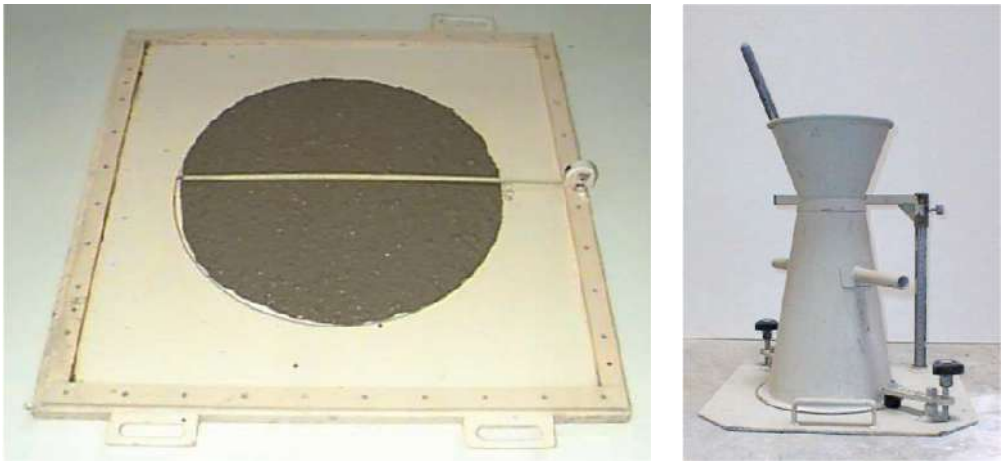


Figure I.8 : cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement.

A.2- Mobilité en milieu confiné

i. Essai des anneaux japonais

Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié **[37].** On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser 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 blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (**Figure I.9**). Une fois le cône rempli, on soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes **[38].**



Figure I.9: Anneau Japonais – Laboratoire GC de Polytech'Orléans.

ii. Essai de la boite en L (L-box test)

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique.

La partie verticale du L **(Figure I.10)** est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferraillage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferraillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres) **[39].**

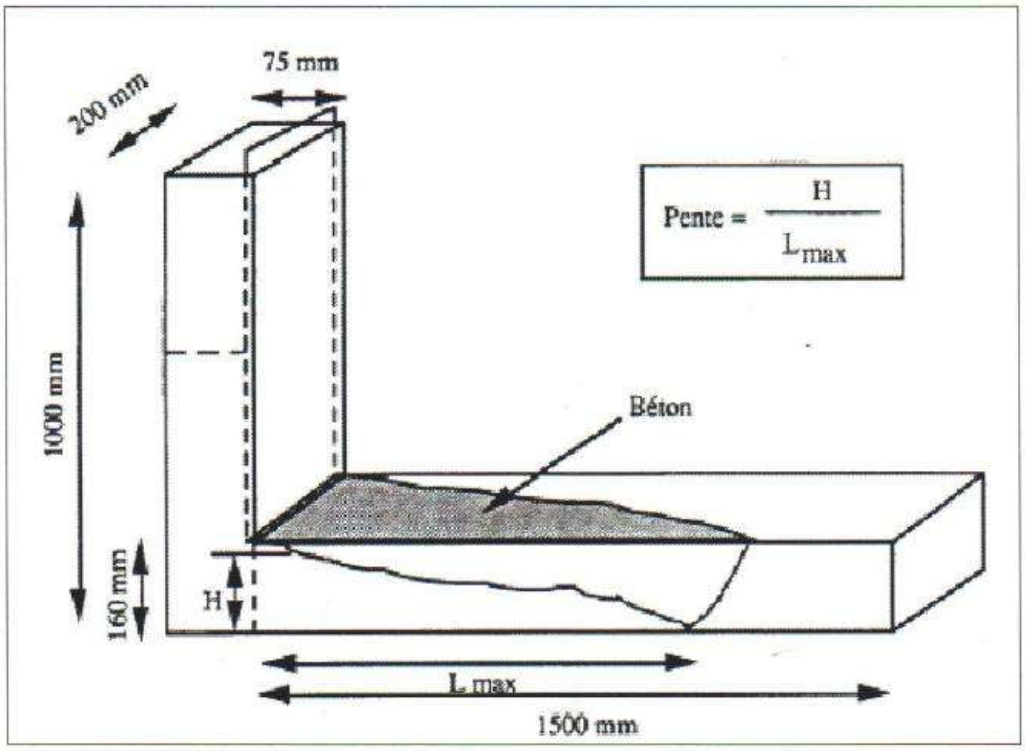


Figure I.10 : Essai de la boite en L (L-box test).

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boite en L (rapport des hauteursH/L_{max}) doit être supérieur à 0,8 **[40].** Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

iii. Essai de tube en U, du caisson et de passoire

Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des bétons autoplaçants (**Figure I.11**, **Figure I.12** et **Figure I.13**) **[38].**

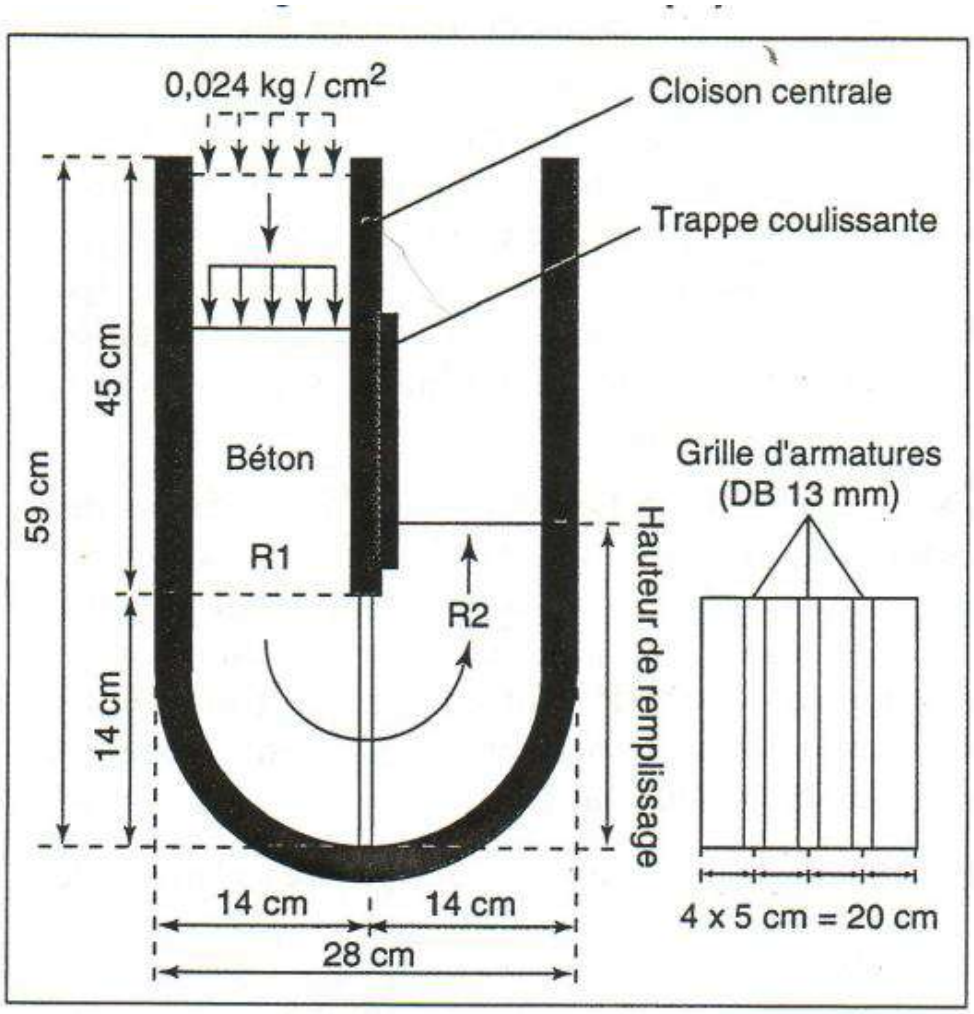


Figure I.11 : Essai du tube en U

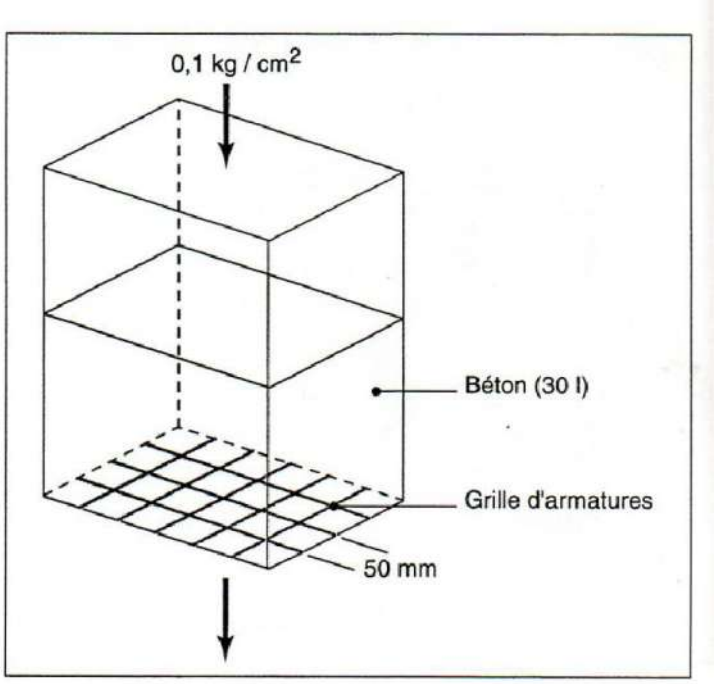


Figure I.12 : Essai du caisson.

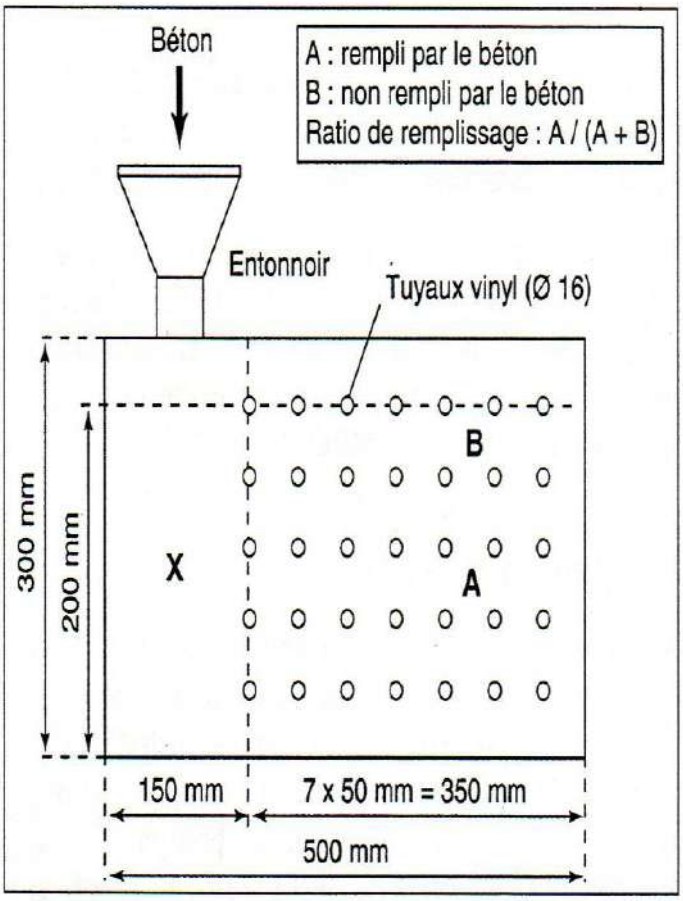


Figure I.13 : Essai de la passoire.

iv. Essai d'entonnoir (V-Funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la **Figure I.14**, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autocompactant.

Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP.

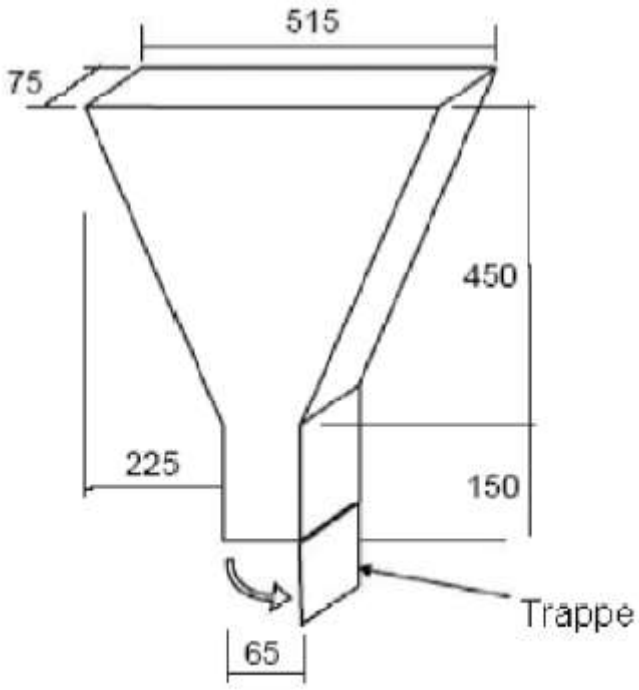


Figure I.14 : Essai d'entonnoir V-funnel

A.3- Stabilité

i. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation **(Figure I.15).** 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 **[41].**

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 (Plaitance) d'un échantillon de béton (4,8 ± 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 **[39]** :

- 0% ≤ % Plaitance ≤ 15 % : stabilité satisfaisante,
- 15% < % Plaitance ≤ 30 % : stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- % Plaitance > 30 % : stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.

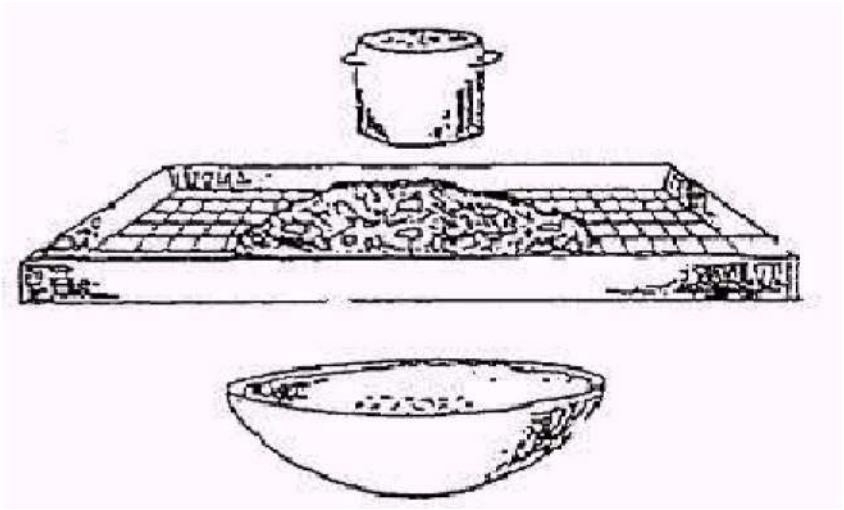


Figure I.15: Essai de stabilité au tamis.

ii. Essai de ressuage

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

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée **[42].** Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC **(Figure I.16).** Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer **[43].** Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

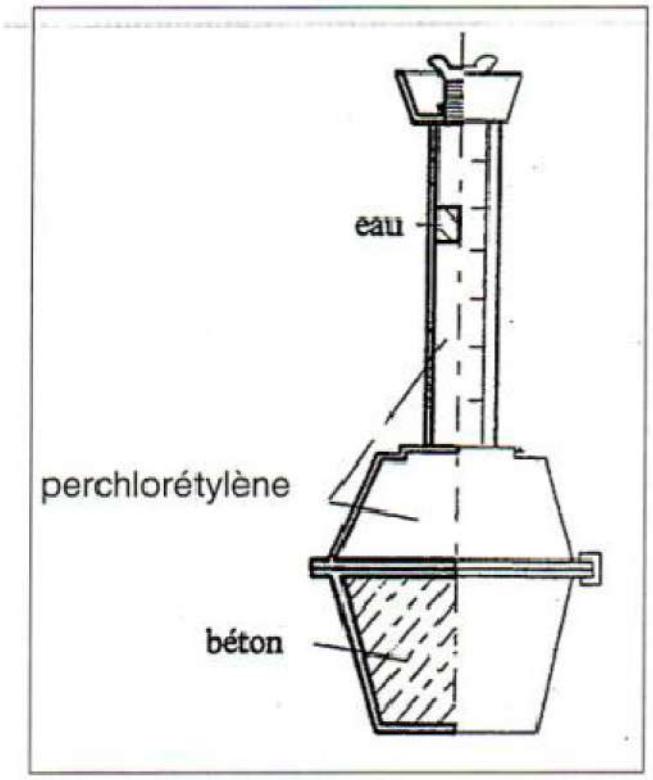


Figure I.16: Essai de ressuage.

B. État durci

B.1-Résistance mécanique

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles. Elles projettent généralement une image globale sur la qualité d'un béton

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28ème jour) **[44]**. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **[45]**. 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. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

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 sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique **[46].**

Étant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

B.2-Durabilité

La durabilité d'une structure en béton est associée étroitement à sa perméabilité. En pratique, la durabilité dépend du choix des matériaux, de la composition du béton, ainsi que du degré de supervision durant la mise en place, la compaction et la cure du béton.

Le déficit de compaction dû aux difficultés de vibration dans des espaces étroits entre les bars et le coffrage a été reconnu comme étant un facteur clé de faible durabilité pour des structures en béton exposées à des environnements agressifs. Le surpasser était l'une des raisons essentielles pour le développement des bétons autoplaçants au Japon.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcaliréaction).

Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et la résistance au gel – dégel. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- Un volume de pâte élevé,
- La présence d'additions en quantité importante,
- Un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton.

Assié et al **[28]** ont trouvé qu'il n'y a pas une différence significative dans les propriétés physico-chimiques (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau et carbonations par le nitrate d'ammonium) pour les deux types de béton, BAP et ordinaire.

Après avoir eu connaissance le Bap la question qui se pose, quelle différence existe entre le Bap et le Map ?

Les BAP ont des compostions granulométriques fortement chargées en éléments fins. Des adjuvants de type « superplastifiants », ou plastifiants « réducteurs d'eau » sont utilisés systématiquement. Le rapport E/C, facteur principal dans la qualité d'un BAP, est voisin de 0,352. Un BAP se caractérise par son hyperfluidité dont le seul moteur de mise en place est la gravité sans recours à la vibration.

Tandis que le MAP réalisée à l'aide de ciment, d'ajouts cimentaires et d'adjuvants de dernière génération « superplastifiants »., permet de produire un béton d'une fluidité accrue qui facilite et accélère la mise en place.

I.3- Recyclage des déchets

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités.

Le terme déchets désigne toutes substances mise en rebut, ou tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé **[47].**

Le recyclage est le procédé de traitement des différents types de déchets et des sous-produits. Il constitue une activité importante dans les pays développés.

Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques: la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

Plusieurs types de résidus, sous produits et déchets divers peuvent être utilisés en fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés comme granulats.

Parmi les divers matériaux on trouve, les laitiers, le béton récupéré, la brique concassé, les déchets de centrales thermiques (cendres volantes), les déchets provenant d'exploitation des mines, et les déchets de marbre.

I.4-Brique et déchets de brique

I.4.1-Historique

Matériau très ancien utilisé autant par les Égyptiens que par les Romains, la brique façonnée ou moulée à partir de terre argileuse pétrie, séchée ou cuite, peut avantageusement remplacer la pierre. Au Québec, la brique ne devient un matériau de construction répandu qu'à partir du $19^{ème}$ siècle. En Nouvelle-France, elle est plutôt rare et sert presque exclusivement à la construction de foyers, de cheminées et de fours à pain grâce à sa bonne résistance aux variations de chaleur que subissent ces ouvrages (qualité réfractaire).

À partir de la fin du $18^{ème}$ siècle, ce matériau entre en force dans l'architecture québécoise avec l'arrivée des Britanniques, chez qui la tradition de construire en brique est beaucoup plus répandue que chez les Français.

La brique de teinte rougeâtre devient alors la plus commune. Les conduits en grès, la terre cuite et les tuiles d'argile sont d'autres produits de construction similaires fabriqués par moulage.

Dans la $2^{ème}$ moitié du $19^{ème}$ siècle, la brique commence à être utilisée pour tous les types de bâtiments: banques, églises, écoles, commerces, institutions, etc. Elle occupe toutefois une place privilégiée dans l'architecture industrielle. En effet, l'industrie est friande de ce matériau aux formes et aux dimensions standardisées, fabriqué à peu de frais et incombustible, pour revêtir les usines et les manufactures et ériger de hautes cheminées. Ces bâtiments présentent même des motifs décoratifs.

L'utilisation de ce matériau économique, ininflammable et durable changera du tout au tout la couleur de ces quartiers en leur forgeant une nouvelle identité architecturale très forte, qu'ils possèdent encore aujourd'hui **[48].**

I.4.2-Définition

La brique est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, à une température appropriée (la température de frittage). Les particules d'argile commencent alors à fondre et s'agglomèrent pour former une masse à caractère pierreux. Après la cuisson, la brique conserve une certaine porosité, qui lui confère d'ailleurs des propriétés spécifiques et la distingue des autres matériaux de construction. En réalité, la brique de terre offre une isolation thermique, phonique et hydrométrique bien supérieure au parpaing béton et une résistance à la compression également supérieure au parpaing **[49].**

I.4.3-Types de Brique

A. Les briques

Les briques sont des pierres artificielles à base de terres argileuses (briques de terre moulée et cuites), de laitier (brique de laitier) ou à base de chaux et de silice (briques silico-calcaires).
Ce sont des unités prismatiques disponibles dans une grande variété de tailles, de textures, de couleurs et de formes. Elles peuvent être pleines, perforées ou creuses.

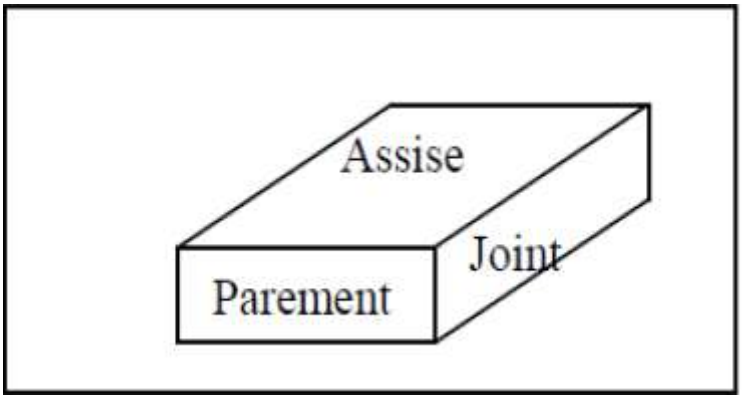


Figure 1.17 : Nomination de différente face d'unité de brique.

B. Brique de terre cuite

Les briques cuites sont des pierres artificielles à base de terres argileuses subirent à un traitement avant le moulage.



Figure I.18 : Briques creuses.

C. Brique de laitier

Les briques de laitier s'obtiennent par le mélange sous presse (pression d'environ 30 GPa) d'un mélange de laitier et de liant (chaux grasse, chaux au laitier ou ciment de

laitier). La fabrication de ces briques est totalement mécanisée. En France, elles ont des dimensions assez réduites puisqu'il faut en général 145 briques pour la construction d'un mètre carré de mur de 22cm d'épaisseur. Elles sont surtout employées comme matériau de parement.

- Les briques pleines ont une résistance à la compression qui se situe autour de 15MPa.
- Les briques de céramique ont des résistances qui avoisinent les 40 MPa.
- En traction, les résistances varient entre 6 et 12MPa. Elles ont également un module d'élasticité compris entre 9 et 14 GPa. Ce qui donne en moyenne pour un mur de briques de premier choix un module de 15 GPa.

D. Briques silico-calcaires

La fabrication des briques silico-calcaires consiste à comprimer un mélange de silice 90 % et de la chaux grasse à une pression de 30 MPa et à soumettre ce mélange à un jet de vapeur d'eau sous pression pendant plusieurs heures.

Ces briques sont des matériaux de remplissage, la rugosité des surfaces permet l'accrochage des enduits.

L'emploi des silico-calcaires légers ou denses donne des résistances à la compression qui peuvent aller respectivement jusqu'au 7 MPa pour des densités de l'ordre de 0.8 et jusqu'à 60 MPa pour les densités d'ordre de 2.2.

En général, les briques sont caractérisées par leur résistance à la compression et à la traction comme indiqué dans le **Tableau I.1** :

Tableau I.1 : caractéristiques des briques.

Texture	Masse volumique (Kg/m^3)	Module élastique (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance Compression (MPa)	Résistance Traction (MPa)
Brique creuse	3000	5000	0.3	20	8
Brique pleine	3000	15000	0.2	40	4

Quelques figures montrent les différents types de briques :

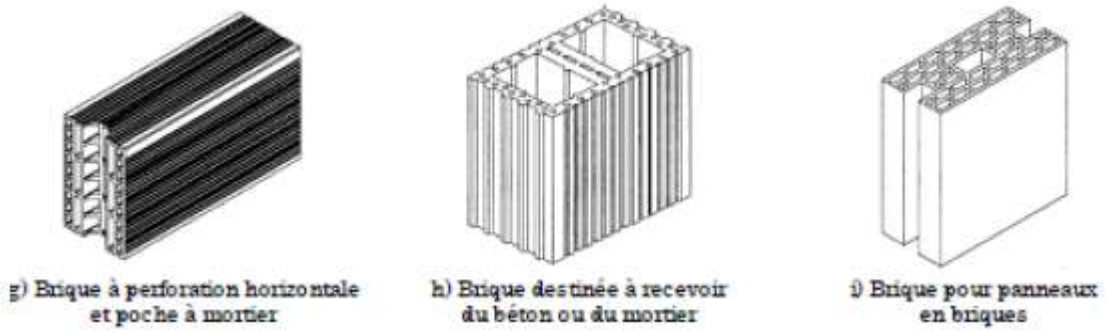


Figure I.19: Exemples de briques LD NF EN 771.

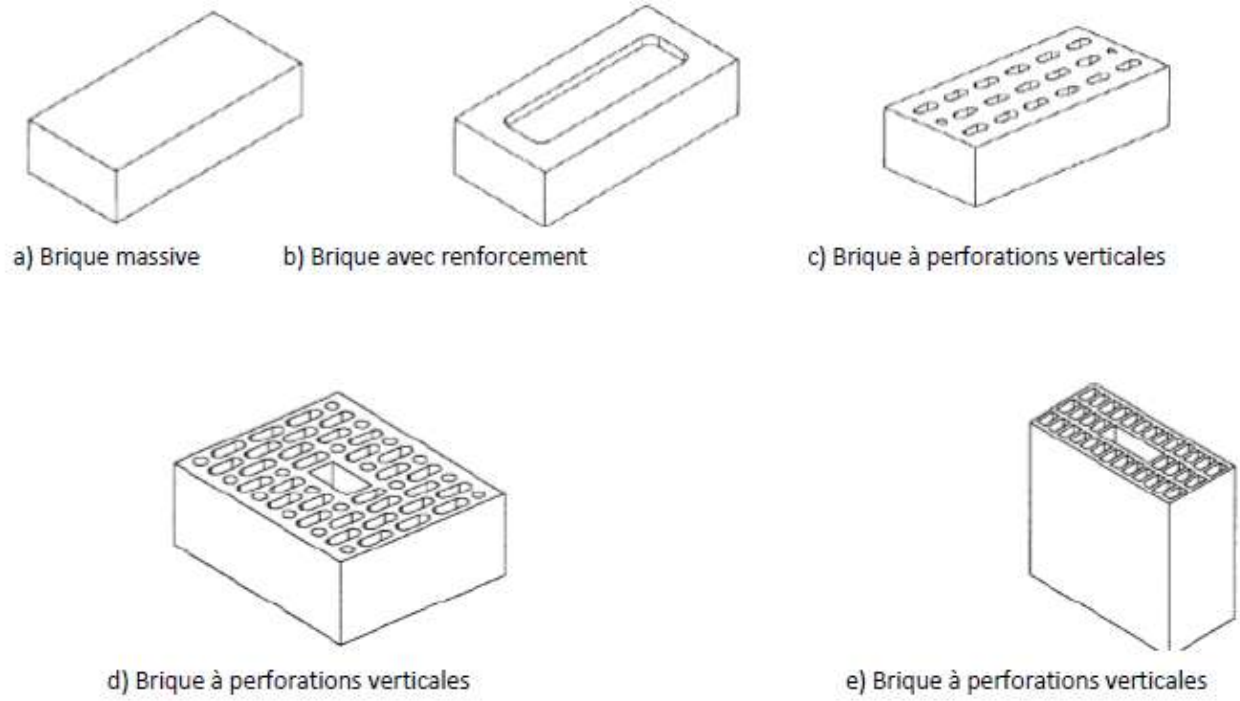


Figure 1.20 : Exemples de briques HD NF EN 771.

I.4.4- Mode de fabrication

Extrusion des briques à travers une filière.

La fabrication d'une brique moderne passe par les grandes étapes suivantes : **[50]**

- Extraction de l'argile rouge et de l'argile verte. On mélange environ 10% d'argile verte avec 90 % d'argile rouge. La terre argileuse, généralement extraite à proximité de la briqueterie, ne peut pas inclure trop de sable. **(**Voir **Figure I.22)** ;

- Broyage de la terre pour obtenir la granulométrie désirée ;
- Humidification et mélange des divers types de terres ; ajout d'une faible quantité de lignosulfite, résidu de l'industrie du papier, dérivé de la lignine contenue dans les arbres ; le lignosulfite facilite l'extrusion ;
- Extrusion au travers de filières correspondant à une forme donnée de brique ;
- Coupage (Voir **Figure I.21**) ;
- Séchage dans un séchoir à gaz (durée entre vingt et cinquante heures) **Figure I.22** ;
- Cuisson à environ 900 °C, pendant trente heures ;
- Éventuellement rectification (fraisage des bords jointifs pour faciliter le montage).

Les Figures **(I.22)** et **(I.21)** résument les processus moderne de fabrication des briques.



Figure I.21: découpage.

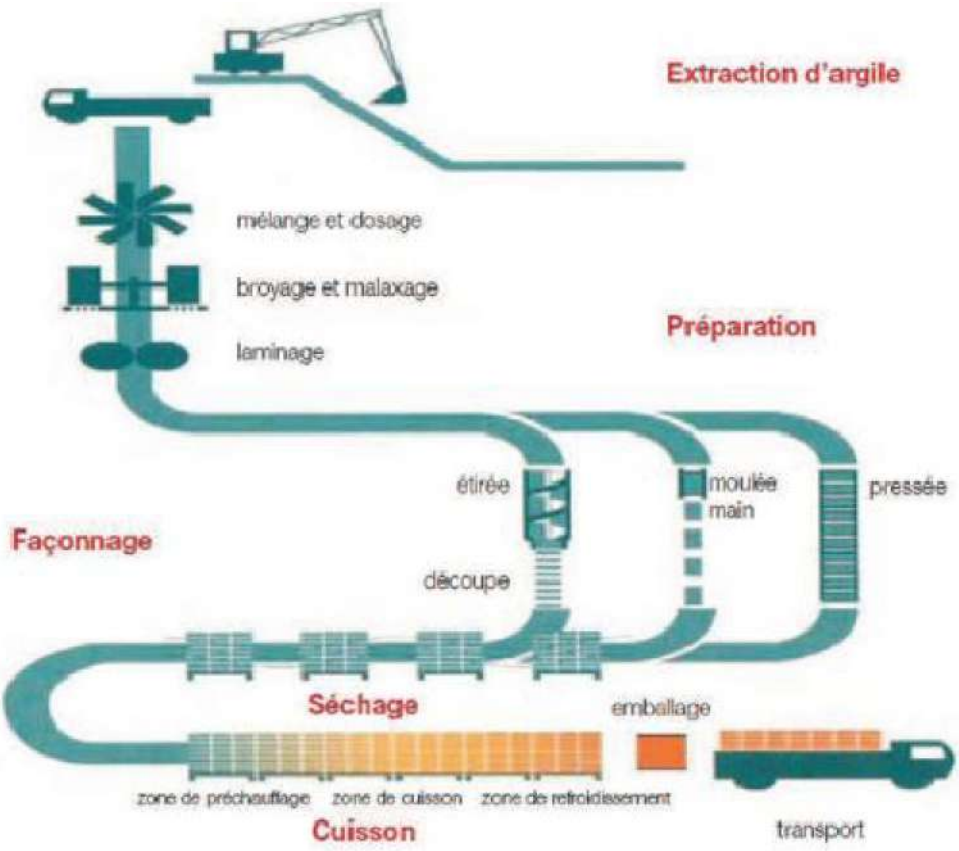


Figure I.22 : fabrication des produits de terre cuite **[51].**

I.4.5- Propriétés des briques

A. les propriétés thermo- physico -mécaniques de brique

Les propriétés thermo- physico –mécaniques de brique sont indiquées dans les tableaux **(I.1 et I.2)** suivants :

Tableau I. 2 :1es propriétés physico –mécaniques des Briques creuses et Perforées **[52, 53,54]**

Masse volumique (kg/m^3)	**Briques creuses**	**Briques perforées**
	1750-2050	1650-2000
Absorption d'eau	< 15%	30 - 80 %
Isolation acoustique	41 -58 dB	41 - 54 dB
Résistance à la compression	4 - 8 MPa	12.5 - 40 MPa

Tableau I.3: la Résistance thermique des briques pleines, perforées et creuses **[52, 53,54]**

Pleines		**perforées**		**Creuse**	
Epaisseur (cm)	**R (m2. °C/W)**	**Epaisseur (cm)**	**R (m2. °C/W)**	**Epaisseur (cm)**	**R (m2. °C/W)**
5.5	0.05	20	0.52	5	0.10
10.5	0.09	30	1.00	10	0.2
22	0.20	35	1.21	20	0.39

- **La conductivité thermique** : des briques de terre cuite égale 0.8 (W /m. °C) ;
- **La conductivité thermique** : des briques de terre cuite pleines égale 1.15 (W /m. °C) ;
- **Coefficient de dilatation** : des briques de terre cuite entre 5 -8 x10^{-6} K^{-1} ;
- **Porosité :** des briques de terre cuite quelques % à 50% ;
- **Adsorption** : des briques de terre cuite est faible **[55].**

B. Résistance au gel

La résistance au gel est l'image de la propriété qu'a un matériau à résistera une succession de cycles gel – dégel. On l'eau dans les pores en cas de gel. Si les pores sont totalement remplis d'eau et que cette dernière ne peut être évacuée à temps durant le gel, la glace exerce une pression interne sur la brique et le fait éclaté. La résistance au gel est déterminée sur base d'essais normalises.

C. Propriété thermique

La brique fournit des conditions de vie et un confort intérieur excellents grâce à ses bonnes propriétés thermiques et acoustiques. Celles-ci découlent d'un équilibre judicieux entre leur structure poreuse, qui confère entre autres le caractère isolant thermique, et leur masse qui apporte résistance mécanique et isolation acoustique **[56].**

I.4.6- Valorisation des déchets de brique

I.4.6.1-Sur mortier

a. Etat frais

F.Bektas et al. **[57]** ont examiné les effets du recyclage de la brique d'argile sur la durabilité du mortier. La brique a été utilisée par remplacement du poids de sable avec des taux de substitution de 5% à 30%. Les auteurs ont remarqué une diminution de l'ouvrabilité des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution **(Figure I.23)**. Cela peut être dû au degré d'absorption des déchets de brique (7%).

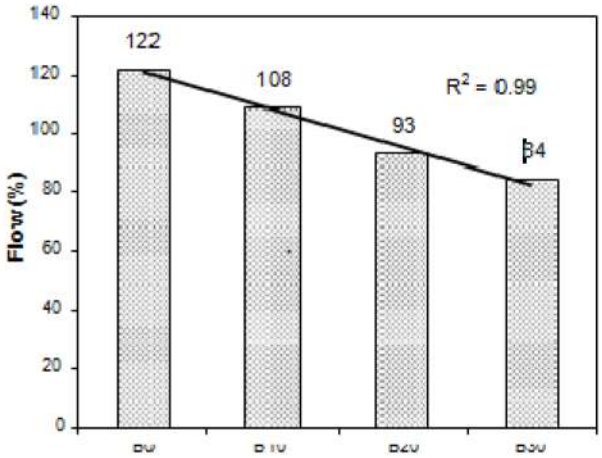


Figure 1.23 :L'effet de l'ajout des déchets de brique sur l'ouvrabilité d'un mortier **[57].**

Debieb.F, Aouni.M **[58]** ont réalisés un mortier à base des déchets de brique cuite (MBr) en faisant substituer une partie du poids de ciment par une quantité similaire en poudre et comparées au mortier témoin. Les taux de remplacement des poudres recyclées, sont choisis de 0 à 30 % avec une marge de 5%. Ils ont remarqué que les déchets de brique influent négativement sur l'ouvrabilité du mortier, et également que plus le pourcentage des déchets augmentent, le temps d'écoulement du mortier augmente aussi. Les résultats d'ouvrabilité sont présentés sur un histogramme **(Figure I.24)** qui permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différents mortiers à base de déchets de brique (MBr) au mortier témoin (MT).

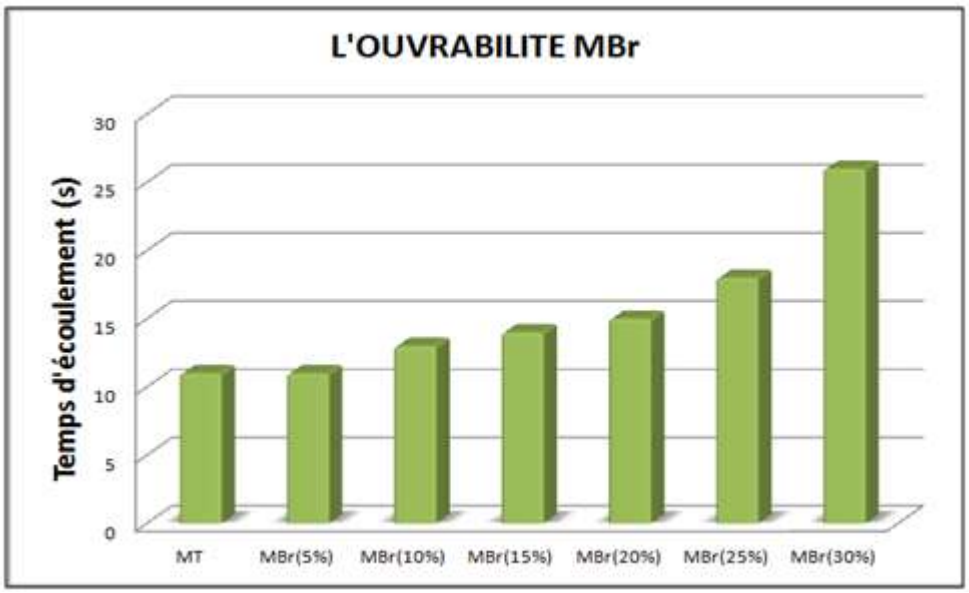


Figure I.24 : Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique (MBr) **[58].**

b. Etat durci

NIGRI.G. et al. **[36],** Ont cherché à élaborer un nouveau ciment composé à base de déchets de briques. Des résultats préliminaires montrent que l'incorporation de 5 à 15% de déchets de briques dans un broyeur à haute énergie, permet une amélioration des principales caractéristiques physiques (retrait, densités, expansion à chaud, etc.) du nouveau liant, avec des propriétés mécaniques comparables aux ciments portlands composés de classe de résistance normale de 42,5 MPa. Les meilleures valeurs des caractéristiques et des propriétés physico-mécaniques ont été obtenues pour un ciment contenant les proportions en masses suivantes : 85% de clinker + 10% de déchets de briques + 5% de gypse

Les travaux de Dina M. S. **[60],** ont pour but d'étudie les propriétés physico-mécaniques des mortiers de ciment à base du déchet de brique d'argile broyées comme granulats recyclés.

Quatre séries de mélanges dont la teneur en ciment de 100, 150, 200 et 300 kg/m3 ont été préparés. Dans chaque série, les granulats naturels fins, ont été remplacés par des agrégats de briques concassées (ABC) à avec des taux de substitution de 0%, 50% et 100% en volume.

Les résultats expérimentaux ont montré une diminution du poids et des résistances mécaniques des mortiers avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés. En plus ils ont remarqué que l'absorption d'eau par capillarité augmente en augmentant le taux de remplacement des granulats recyclés des granulats naturels

F.Bektas et al. **[57]** ont examiné les effets du recyclage de la brique d'argile sur la durabilité du mortier. La brique a été utilisée par remplacement du poids de sable avec des taux de substitution de 5% à 30%. Concernent l'état durci (Résistance à la compression), les auteurs ont trouvé une augmentation graduelle avec le vieillissement (B0, B5%, B10% et B20%). Au-delà ils ont remarqué une réduction de 5% à 10% pour un pourcentage de 25% de brique.

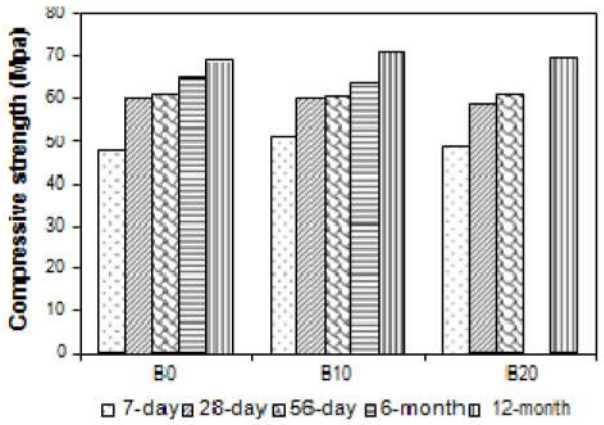


Figure I.25 : Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction du pourcentage de déchets de brique **[57].**

Debieb.F, Aouni.M **[58]**ont réalisés un mortier à base des déchets de brique cuite (MBr) en faisant substituer une partie du poids de ciment par une quantité similaire en poudre et comparées au mortier témoin. Les taux de remplacement des poudres recyclées, sont choisis de 0 à 30 % avec une marge de 5% concernent l'état durci la résistance à la compression des Mortiers MBr 5%, MBr 10%, MBr 15%, dépasse celle du mortier de référence, les résultats sont présentent sous forme d'histogramme **(Figure I.26)**, ainsi que les résistances à la traction augmentent en fonction de l'âge quel que soit le type du mortier Les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15%dépassent celle du mortier témoin pour les trois âgés et il est de l'ordre de 7,51 MPa, 7.21 MPa et 7,23 MPa respectivement à 28 jours, et la plus faible valeur de l'ordre de 3.30 MPa est remarquée pour le mortier MBr 30% La traction par flexion nous donne à peu près une idée sur la résistance à la traction, on constate alors qu'on a un gain de résistance de 11%les résultats sont présenté sous forme d'histogramme donné par la **Figure I.27**

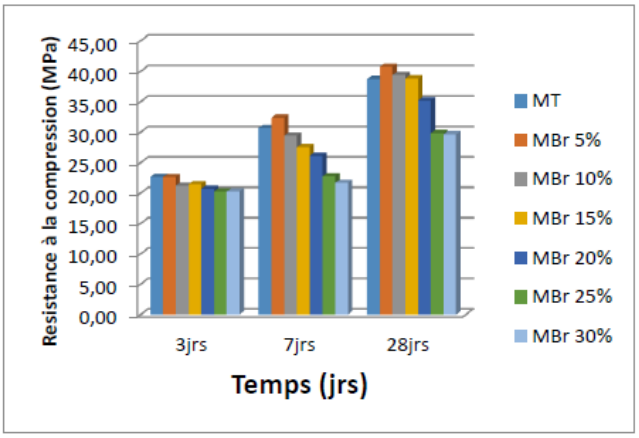


Figure I.26 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr **[58]**

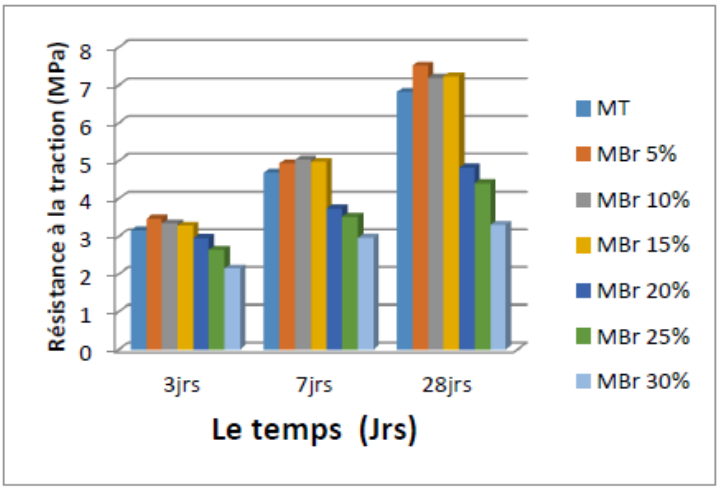


Figure I.27 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr **[58]**.

I.4.6.2-Sur béton

a. L'état frais

Selon Akhtaruzzaman et hastan **[61],** les résultats des essais à l'état frais du béton de granulats de brique concassée sont favorablement comparables avec ceux du béton normal sont obtenu comme suites :

- Pour les bétons de granulats de brique concassée, le rapport eau-ciment optimum est 0,55 ; bien que si la haute ouvrabilité soit exigée, alors les mélanges puissent être faits avec un rapport eau - ciment jusqu'à 0,7 **[62].**
- L'ouvrabilité peut être appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams ou par essai VeBe **[62].**

BARKAT.A et al **[63]**ont réalisé trois types de béton à base de déchets de brique Les granulats employés dans la composition des bétons sont obtenus à partir d'un mélange ternaire de sable (0/5), de gravillon (3/8) et de gravillon (8/15).les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité constante appréciée par un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 6cm de la classe de consistance des bétons plastiques. La **Figure I.28** suivants donne une indication Sur les quantités d'eau totales réellement utilisées dans les mélanges ainsi que les quantités effectivement ajoutées aux mélanges (compte tenu du pourcentage élevé d'absorption d'eau de granulats à base de brique concassée).ainsi que pour la densité du béton frais qui diminue Successivement par substitution successive des granulats naturels par les granulats recyclés et que le pourcentage de l'air occlus augmente en variation entre 1et 2.5% dans le béton **(Figure I.29).**

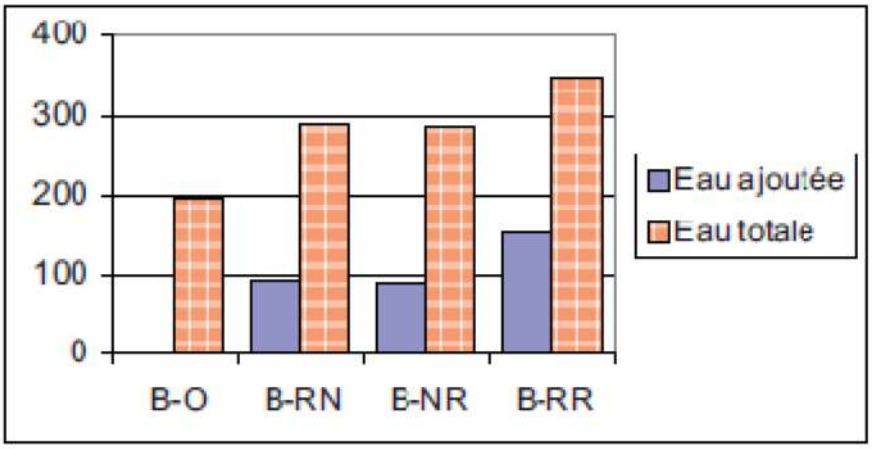


Figure I.28 : Eaux Totales et Eaux Ajoutées aux Mélanges (en Litres) **[63].**

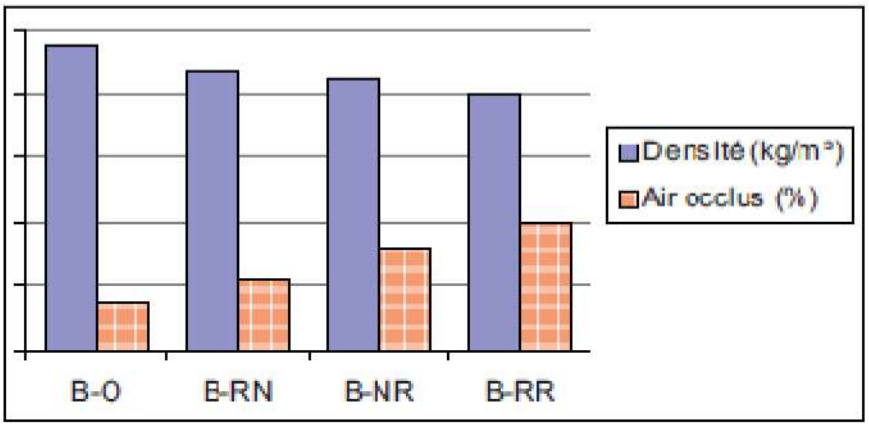


Figure I.29 : Densité et Air Occlus des Bétons Frais **[63].**

Benakli.S **[64]** et al ont réalisent un BAP à base de déchet de brique pour l'objective d'étudie l'influence d'ajout 10% de poudre de déchet de brique broyée sur le comportement à l'état frais.

Les résultats des essais à l'état frais sont représentés dans le tableau comme suit :

Tableau I.4 : Les résultats de l'essai à l'état frais.

Type	Etalement (cm)	La boite en L dénivelée	Stabilité au tamis	Appréciation visuelle de la galette d'étalement
BAP a base des déchets de brique	**61**	**25**	**5**	**Bon**

b. L'état durci

HADJOUDJA M. et BEDERINA M. **[65]**, ont étudié la possibilité de récupération des déchets de briques dans le béton de sable de dunes. Leur étude a pour objet d'étudier l'effet du dosage en filler des déchets de briques sur la capacité d'absorption de l'eau du béton de dunes, ses cycles de séchage–ré-humidification et l'évolution de sa résistance sous l'effet gel-dégel.

Leur travail a permis d'observer l'intérêt et l'efficacité de l'ajout des fillers sur le comportement physico-mécanique du béton de sable dunaire à base de déchets de brique.

Néanmoins les résultats de cette étude ont montré l'importante absorption capillaire avec l'augmentation du dosage en filler de brique **(Figure I.30).**En ce qui concerne la résistance au

gel-dégel, ils ont remarqué que l'augmentation de la teneur en fillers de briques provoque une nette diminution des taux de variations en poids, elle semble présenter un optimum pour la composition avec 200 Kg/m^3 de fillers de brique **(Figure I.31).**

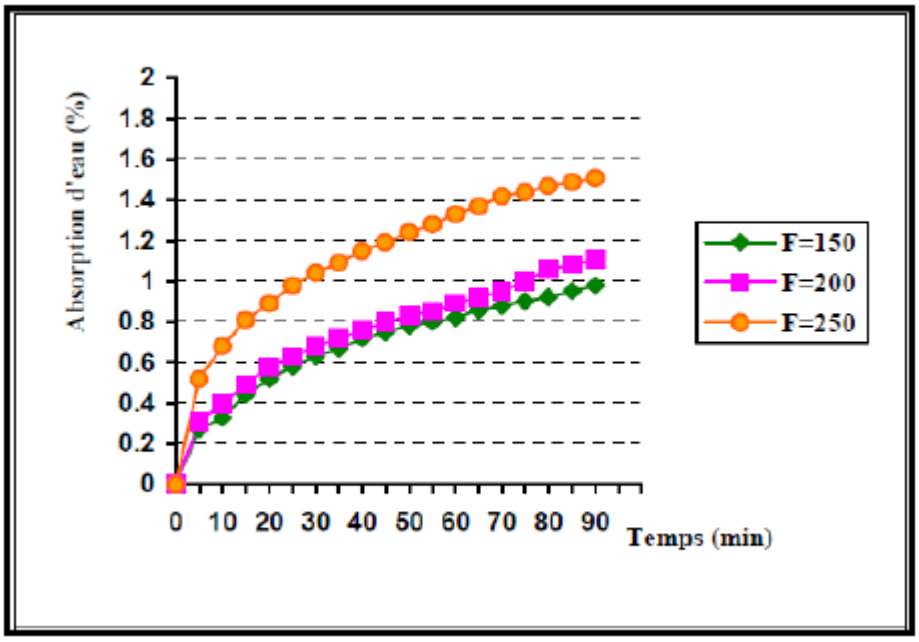


Figure I.30 : Absorption d'eau des bétons à base de déchets de brique **[65]**

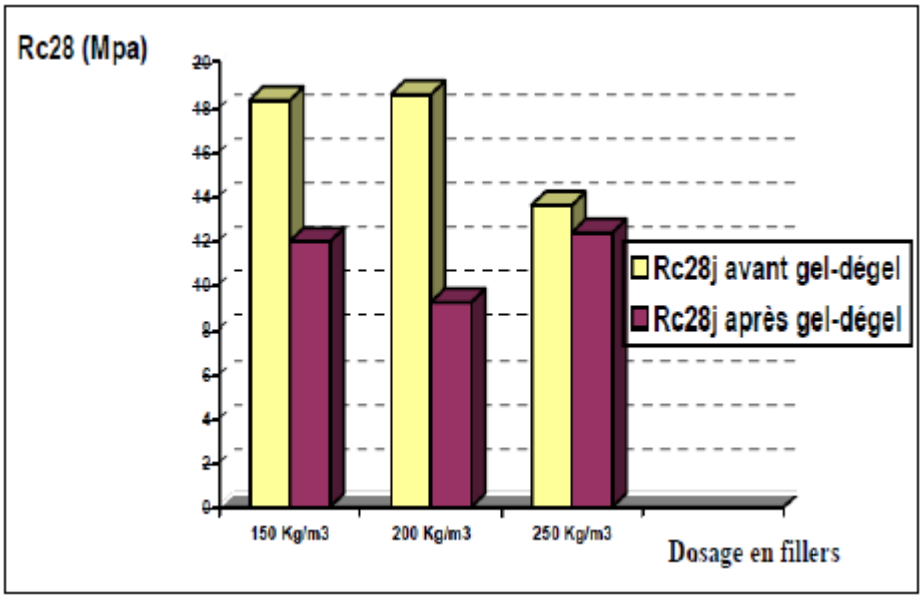


Figure I.31 : Variation de la résistance à la compression des bétons à base de déchet de brique sous l'action du Gel-Dégel **[65].**

Debieb F. et al. **[66]**, ont étudié la possibilité d'utilisation des déchets de brique dans la fabrication d'un béton ordinaire avec des taux de remplacement de 25, 50, 75 et 100% des

granulats naturelles (fin et grossier). L'introduction des granulats de déchet de brique a été faite une fois, par le remplacement partiel du sable naturel seulement. La deuxième fois par le remplacement du gravier seulement. Et en dernier par le remplacement des deux granulats à la fois. Les résultats de cette étude montrent qu'un remplacement maximal de 25 % pour le sable et de 50% pour le gravier avec le déchet de brique, mènent à des caractéristiques similaires à celles du béton à base de granulats naturelles en termes de résistances mécaniques (Compression et flexion), retrait, absorption capillaire, porosité et perméabilité à l'eau.

Lan Z. et al **[59]**, ont utilisé des déchets de brique provient d'un site de construction et ont une résistance à la compression plus de 10 MPa. Ces déchets sont introduits dans la fabrication d'un béton à base de 15% de cendre volante, avec des taux de remplacement de 0, 30, 40 et 50% des granulats concassées. Les résultats de cette étude ont montré que les granulats recyclés (déchets de brique) ont une porosité très élevée par rapport aux granulats concassés. Et que les résistances mécaniques du béton sont diminuées avec l'augmentation du dosage en granulats recyclés **(Figure I.32)**

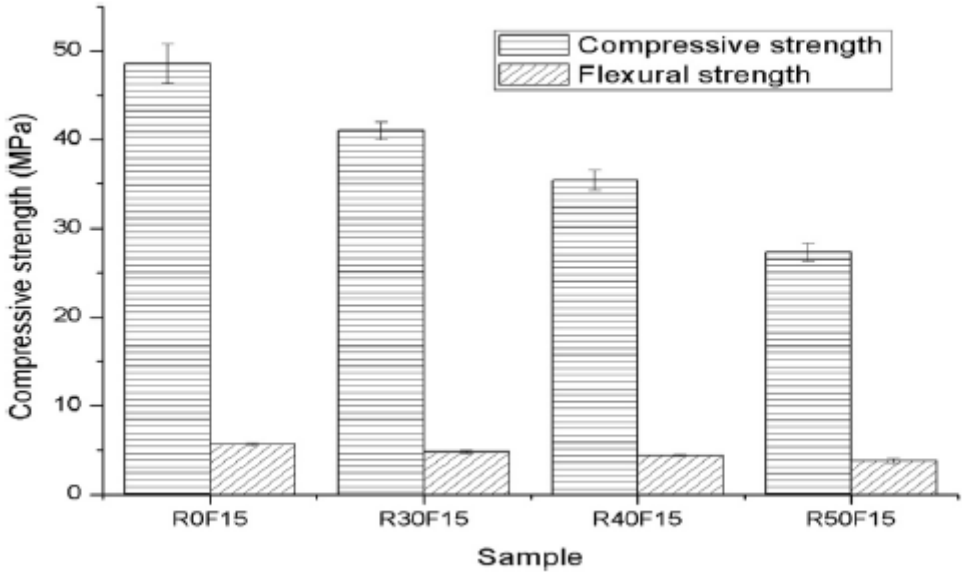


Figure I.32 : La variation de la résistance du béton avec et sans granulats recyclés. **[59]**.

En outre les résultats des essais de durabilité en termes de perméabilité à l'eau, au gaz et la diffusion des ions chlores, ont montré une augmentation de ces caractéristiques avec l'augmentation du pourcentage d'addition des déchets **(Figure I.33, I.34** et **I.35).**

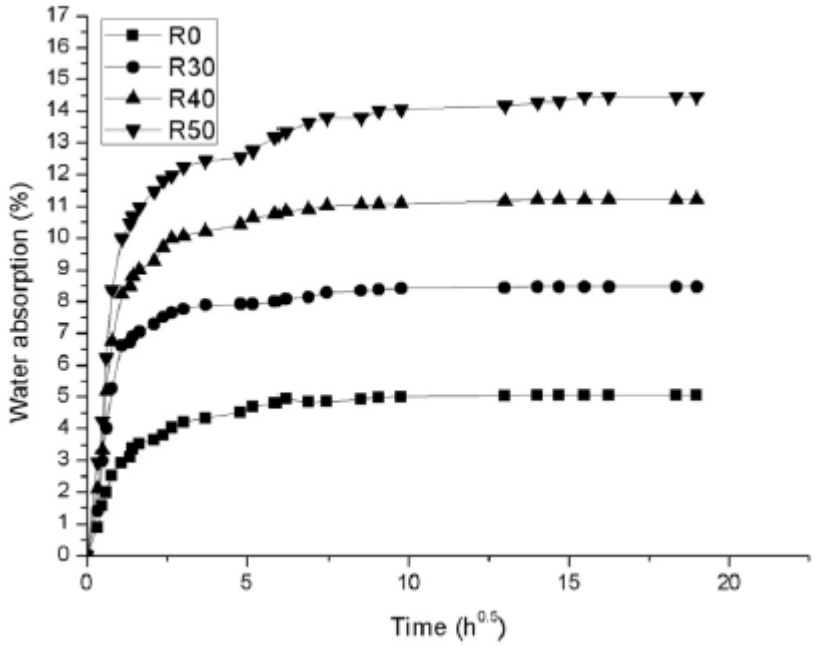


Figure I.33 : Absorption d'eau du béton avec et sans granulats recyclés **[59].**

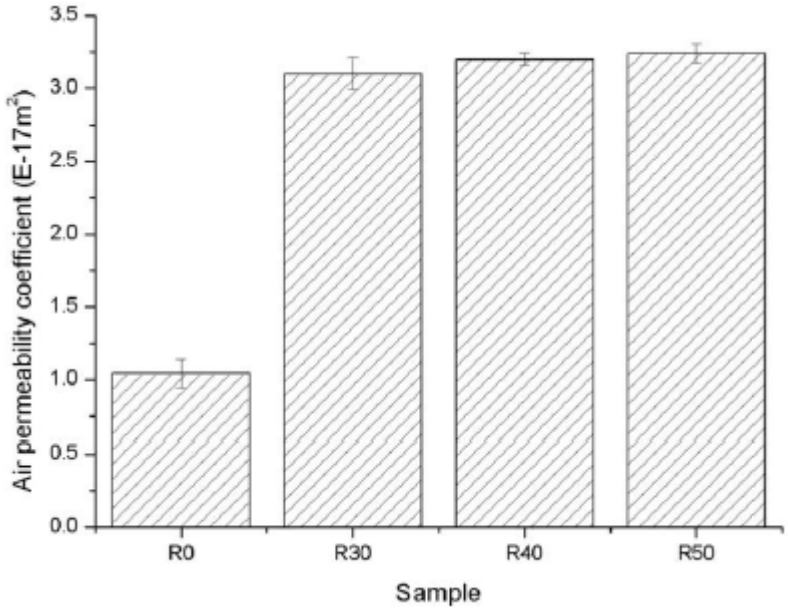


Figure I.34 : Perméabilité au gaz du béton avec et sans granulats recyclés **[59].**

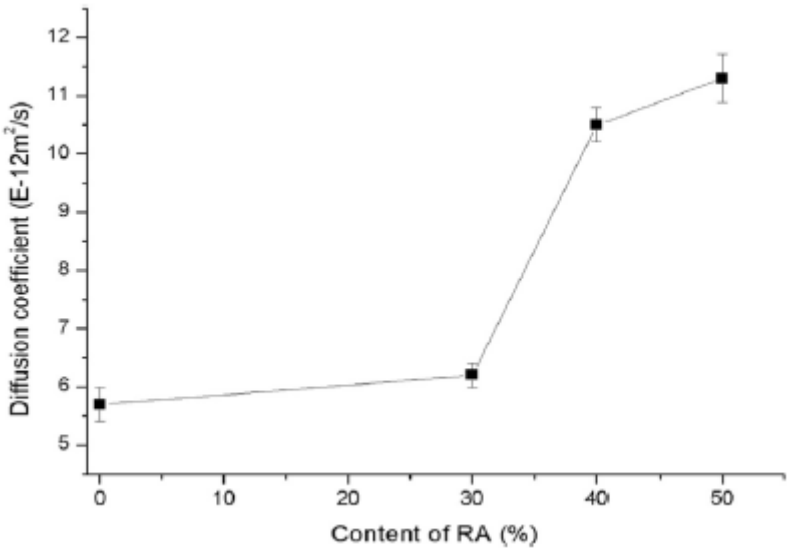


Figure I.35 : Diffusion des ions chlores du béton avec et sans granulats recyclés **[59].**

Selon Akhtaruzzaman et hastan **[61],** les résultats des essais du béton de granulats de brique concassée sont favorablement comparables avec ceux du béton normal, obtenus par
L'ACI. Bien que largement usagé, il n'y avait pas d'études systématiques des différentes propriétés du béton de granulats de brique **[61].** Parmi les différentes propriétés, de granulats ainsi que de béton de granulats de brique concassée, résultantes des essais et des recherches sont :

- Les briques concassées, provenant des briques et tuiles, possèdent des résistances propres de 100 à 300 kg/cm^2 **[59].**
- L'absorption de brique concassée est estimée entre 5 et 15 % par rapport au poids de la matière dans son état sec. C'est nécessaire, par conséquent, à saturer les granulats de la brique concassée avant tout mélange pour empêcher le raidissement du béton. Dans la pratique et suite aux implications économiques, cette condition peut être accomplie en vaporisant simplement le stock du granulat avec l'eau au lieu de 0l%immersion totale du granulat pendant 30min **[62].**
- La masse volumique apparente du béton de brique concassée varie de 2000 à 2080 kg/m^3. Elle est approximativement de 17 % inférieure à celle du béton normal **[61].**
- La procédure de la reproduction du mélange pour bétons de granulat normal, peut être utilisée avec succès pour la production du béton de brique concassée **[62].**

- Il est nécessaire de procéder au maintien prolongé à l'état humide de tous les bétons de débris de briques, pour empêcher le dessèchement des liants et la ségrégation de surface du béton **[59].**
- La résistance à la compression nominale du béton de granulats de brique concassée est comprise entre 13.8 et 34.5 MPa **[61].**
- L'utilisation du granulat grossier de brique concassée peut produire un béton de structure de haute résistance avec une économie de poids allant jusqu'à 15 % pour une diminution de quelques 20 % de la résistance, par rapport à un béton normal **[62].**
- Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), le module d'élasticité, en général, est approximativement 30% inférieur à celui du béton normal et approximativement de 40% plus grand que celui du béton léger **[61].**
- Pour le même niveau du béton (même résistance à la compression), la résistance à la traction est de 11% supérieure à ceux du béton normal **[61].**
- Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel **[67].**
- Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal. Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton **[68].**

I.5-Marbre et déchets de marbre

I.5.1-Historique [69]

L'Histoire du marbre date de très longtemps. L'utilisation du marbre dans l'architecture remonte à des milliers d'années pour les anciennes cultures égyptiennes et mésopotamiennes. Capable de supporter un poids immense, le marbre a été idéal pour les colonnes monolithiques et structures d'appui dans les bâtiments publics, privés et religieux.

De la salle rouge richement colorée de la basilique de Saint-Paul à Rome aux murs du palais de Versailles, à la nef richement conçue de Salisbury Cathédrale de l'Angleterre, le marbre a été utilisé dans certains des bâtiments les plus impressionnants du monde. Le Trésor des Athéniens, construite au VIe siècle avant JC, a été le premier bâtiment construit entièrement en marbre. Le Parthénon, érigé par Périclès dans la même période, a été construit pour être le phare de l'Acropole. Le Parthénon est encore aujourd'hui, témoigne de la résistance de l'un des matériaux de construction les plus luxueux du monde.

L'histoire du marbre a aussi une signification. Le mot «marbre» provient du grec, marmaros, ce qui signifie « Neige pierre blanche et sans tache ». Et parce qu'aucune autre pierre n'offre le raffinement du marbre, il a été utilisé par les plus grands sculpteurs du monde. Le plus célèbre, Michel-Ange, « David » sculpté à partir d'un seul bloc de marbre. Les architectes ont également profité des caractéristiques uniques du marbre, les détails iconographiques sont intégrés ainsi que des portraits de marbre dans la conception du bâtiment.

Les technologies modernes ont permis aux concepteurs de profiter de la beauté et de l'élégance du marbre sans être pénalisé par un coût élevé. Aujourd'hui le marbre est fabriqué à un prix abordable et en masse.

I.5.2-Définition [69]

En géologie le marbre est une roche_métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite. En architecture, sculpture et marbrerie ce terme peut désigner n'importe quelle pierre difficile à tailler et capable de prendre un beau poli, dont les plus courantes sont les « vrais » marbres.

Le marbre est classé selon son type et son type varie de pierre en pierre. Il existe trois classifications de marbre : la Dolomite, le Magnésium et la Calcite.

- la Dolomite contient plus de 40% de carbonate de magnésium.
- le Magnésium contient entre 5% et 40% de magnésium.
- la Calcite contient moins de 5% de carbonate de magnésium.

I.5.3-Types de marbre [70]

Les différents types de marbre qu'on peut trouver :

a) **Marbre Algériens :**

- **Marbre blanc - marbre gris - marbre reseda vert** : carrière de marbre de Fil-Fila
- **Marbre rouge - marbre jaune et rose** : gisement de marbre de Krystel
- **Marbre Mahouna** : la carrière de marbre de Mahouna
- **Marbre onyx dore** : filon d'onyx de Ain Smara
- **Marbre onyx jaune** : carrière de Bouhnifia
- **Travertin** : carrière de Sidi M'barek
- **Tarbre blanc et vert** : carrière de Honaine (Tlemcen).

b) **Marbre de Portugal** :

- **Marbre de Lisbonne :** couleur rougeâtre, avec des débris de coraux et fossile de couleur blanchâtre.
- **Marbre de Vila Viçosa** : dans l'Alentejo moucheté gris.
- **Marbre de Troncao** : jaune pâle veiné gris.

c) Marbre de Russie :

- **Marbre de l'Oural** : les monts de l'Oural fournissent les marbres les plus variés. La plupart se tient dans la région de Iekaterinbourg pour les monuments de Saint-Pétersbourg et d'ailleurs que Catherine de Russie fit construire, comme le Palais de Marbre (Saint-Pétersbourg).

I.5.4-Mode de Fabrication

1) L'extraction [70]

Les blocs de marbres étaient autrefois extraits avec des pics et des coins. À partir du $19^{ème}$ siècle, le découpage des blocs de marbre se fait par le passage d'un fil hélicoïdal qui entraîne dans sa course de l'eau qui le refroidit et du sable qui sert d'abrasif. Il est guidé par des poulies, et actionné par un moteur. Plus tard, le fil est muni de fragments de diamant.

2) Le bardage [70]

3) Le sciage et l'usinage [70]

Fin $18^{ème}$ siècle, la scie de marbrier consiste en une lame de fer doux sans dents, droite et unie dans sa monture, servant à débiter les marbres en tranches en y versant du grès pilé et de l'eau dans la voie que fait la scie pour traverser le bloc.

Une usine désigne une machine composée de roues que l'eau fait tourner et qui fait mouvoir plusieurs fers de scie pour débiter en branches les blocs de marbre. Les usines sont aussi appelée châssis pourront être équipées de jusqu'à 100 lames et seront actionnées par la suite par des moteurs

Plus tard des scies circulaires seront utilisées.

4) Le polissage [70]

Après le sciage, la dalle de marbre est polie. Cette opération se fait fin $18^{ème}$ siècle par les polisseurs, de la manière suivante: Les blocs de marbre sont égrisés. Première opération du poli des marbres qui sert à faire disparaitre le brut de la scie ou du ciseau, on l'exécute en

frottant la surface du marbre avec un morceau de grès ou un fer, sous lesquels on met du grès pilé et de l'eau.

Le marbre est ensuite rabattu, c'est-à-dire qu'on le frotte avec des morceaux de faïence non émaillés, du sable doux et de l'eau ; c'est la seconde opération du polissage, et que l'on nomme rabat dur. Après avoir mastiqué on donne le rabat doux ; cette opération consiste à faire usage pour molette, de pierre de Gotland au lieu de faïence et de terre à four, puis de la pierre-ponce réduite en poudre et mêlée avec de l'eau. Le masticage des fils, cavités ou terrasses qui se rencontrent dans le marbre est la troisième du poli. On adoucit ou doucit le marbre - C'est-à-dire que l'on frotte le marbre avec une pierre-ponce dure et de l'eau; c'est la quatrième opération employée pour parvenir au poli du marbre. Le marbre est ensuite piqué - La cinquième opération que l'on exécute pour le poli: elle consiste à frotter avec un bouchon de linge fin humecté d'eau.

Le marbre est ensuite relevé ou lustré, la dernière opération du poli, pour rendre la surface du marbre luisante et réfrangible aux rayons de la lumière: elle s'exécute au moyen d'un bouchon de linge humecté d'eau, ensuite d'un autre non humecté, avec lesquels on frotte sur la surface de la matière en y ajoutant de la potée réduite en poudre.

Au $21^{ème}$ siècle, le polissage se fait par meulages successifs au moyen de meules tournantes horizontales. La grenaille d'acier, le carbure de silicium ou le carbure de bore, l'électrocorindon, et les diamants naturels ou artificiels sont les produits abrasifs couramment utilisés. Des produits chimiques tels l'acide sulfurique ou le sel d'oseille, peuvent par ailleurs être ajoutés à la poudre abrasive.

5) La pose [70]

Au $18^{ème}$ siècle, les tranches de pierre ou de marbre sont taillées en carreau/morceaux de diverses grandeurs, de forme carrée, octogone ou losange, qui se posent au sol de différentes pièces, comme salles à manger, vestibules, paliers d'escaliers, etc. ; les carreaux de compartiment sont des carreaux en marbre de différentes formes et couleurs. Le travail se fait à la sciotte.

Les plaques définitives sont éventuellement moulurées.

La cire à cacheter sert à mastiquer les marbres filardeux et à rejoindre les éclats qui peuvent se faire dans la taille des moulures ou autres.

Les pièces de marbre sont assemblées à chaud par des goujons, agrafes et pattes de fixation ou maçonnées au plâtre. Les goujons et agrafes de fer sont graissés, c'est-à-dire enduits

de mastic, pour empêcher l'oxydation d'une part et d'autre part augmenter la cohésion entre les pièces métalliques et le marbre.

I.5.5-Propriétés de marbre [70]

La sensation de froid que l'on a en touchant du marbre, bien qu'étant à la température ambiante, est due à sa forte effusivité thermique.

I.5.6-Valorisation des déchets de marbre dans le mortier et le béton

I.5.6.1-Sur Mortier

a. Etat durci

A.H. Med Belhadj et A. Mahi **[71]** ont démontrée que la présence de la pouzzolane avec l'adjuvant BV40 (mortier G2) a fait augmenter la résistance à la compression par rapport au mortier de référence G1 d'environ 30%. L'ajout de la pouzzolane et de la poudre de marbre engendre des modifications significatives sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci. L'ajout de la poudre de marbre et la pouzzolane avec l'adjuvant BV40 (mortier G4) a donné une amélioration de la résistance à la compression d'environ 74%. Le mortier avec de la poudre de marbre et adjuvant BV40 (mortier G3) affiche une résistance de 62% par rapport au mortier de référence (mortier G1). L'adjuvant Sika BV40 est le mieux adapté pour cette étude parce qu'il donne les meilleures résultats par rapport aux autres adjuvants utilisés.

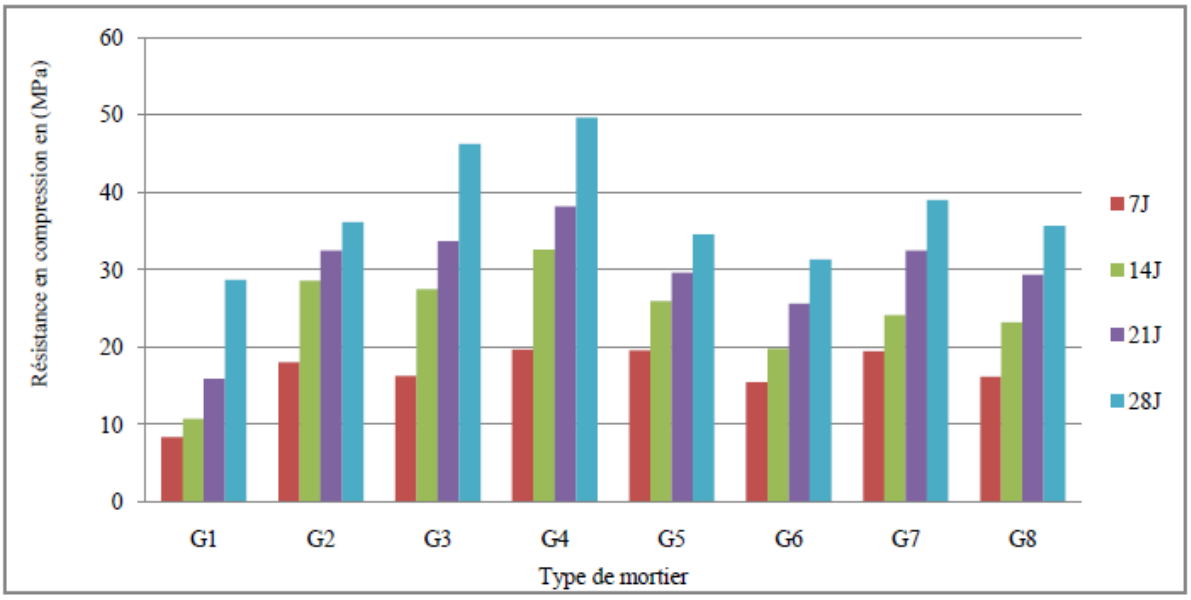


Figure I.36 : Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge.

I.5.6.2-Sur Béton

a.Etat frais

Haddadou.N **[72]** montre que les meilleurs étalements sont obtenus pour les BAP qui renferment une quantité de poudre de marbre élevés. Ceci confirme l'action bénéfique du déchet industrielle (PM) vis-à-vis de la fluidité et bien sûr l'effet du superplastifiant utilisés pour minimiser le frottement inter granulaire.

De cette figure, on remarque que l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une augmentation de la déformabilité du BAP, ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. La meilleure déformabilité a été obtenue avec une teneur en PM de 30%.

Les valeurs obtenues varient entre 63 et 73 cm, ce qui permet de conclure que, toutes les BAP sont à l'intérieur de la fourchette ciblée 60÷80cm [AFGC 2008]. Ces résultats témoignent de l'effet positif de l'utilisation de la PM dans l'objectif d'améliorer la déformabilité des BAP.

L'augmentation de la déformabilité peut être due aussi à la finesse de la poudre de marbre qui est plus grande que celle du ciment. Cette finesse, qui améliore la granulométrie et la compacité, contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons **[73, 74].** L'augmentation du volume de la pâte (en raison de la faible densité de la PM par rapport au ciment) permet d'écarter les particules des granulats les unes des autres conduisant à une diminution des frottements inter granulaires **[75].** En conséquence, la résistance à l'écoulement devient plus faible, et la déformabilité devient plus grande. L'augmentation du volume de la pâte contribue non seulement à l'amélioration de la déformabilité, mais aussi l'ouvrabilité, la plasticité et l'homogénéité des BAP **[76].** La substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une diminution de la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation, ce qui résulte une quantité d'eau libre plus grande, raison pour laquelle la déformabilité augmente.

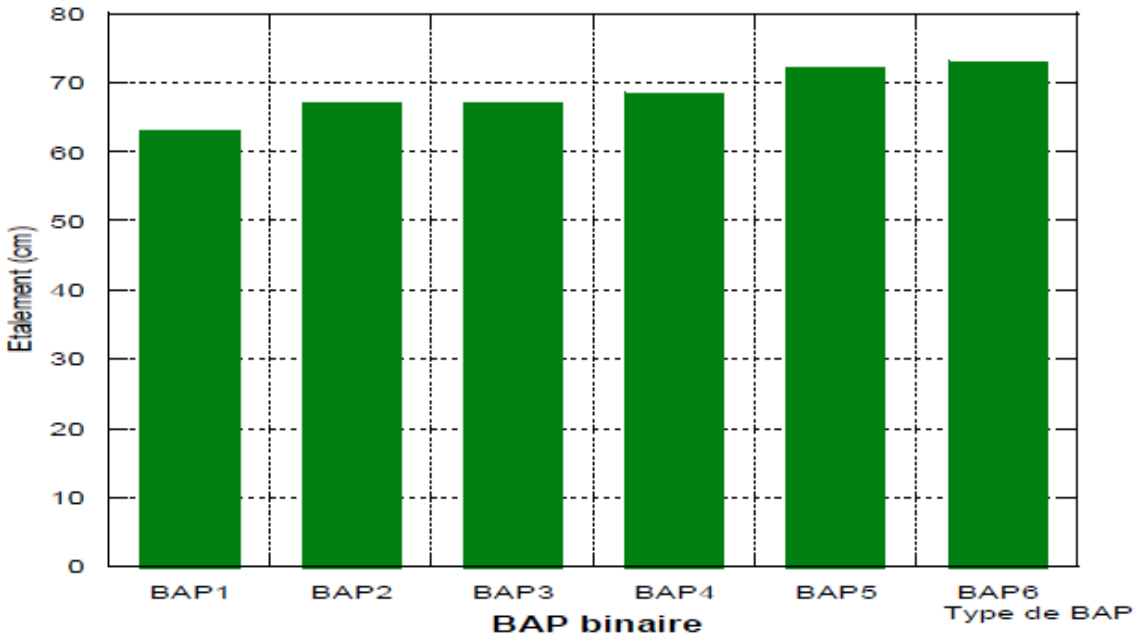


Figure I.37 : Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement.

CHIBANI.N et HOUARI.H **[77]** ont trouvé que Le temps d'écoulement mesuré par l'entonnoir est (24,75s) ci concerne le béton (BAPDM), donc cela peut être considéré comme satisfaisant et à la limite du domaine de la spécificité autobloquante.

Ils ont remarqué sur l'histogramme de la **Figure I.38** que le temps d'écoulement de béton (BAPDM) est plus élevé de (60%) que celui de béton (BAPFC). Donc les fillers calcaires peuvent avoir une influence sur la fluidité des BAP par rapport aux fines des déchets de marbre, en d'autres termes, ces fines des déchets de marbre freinent l'écoulement de béton.

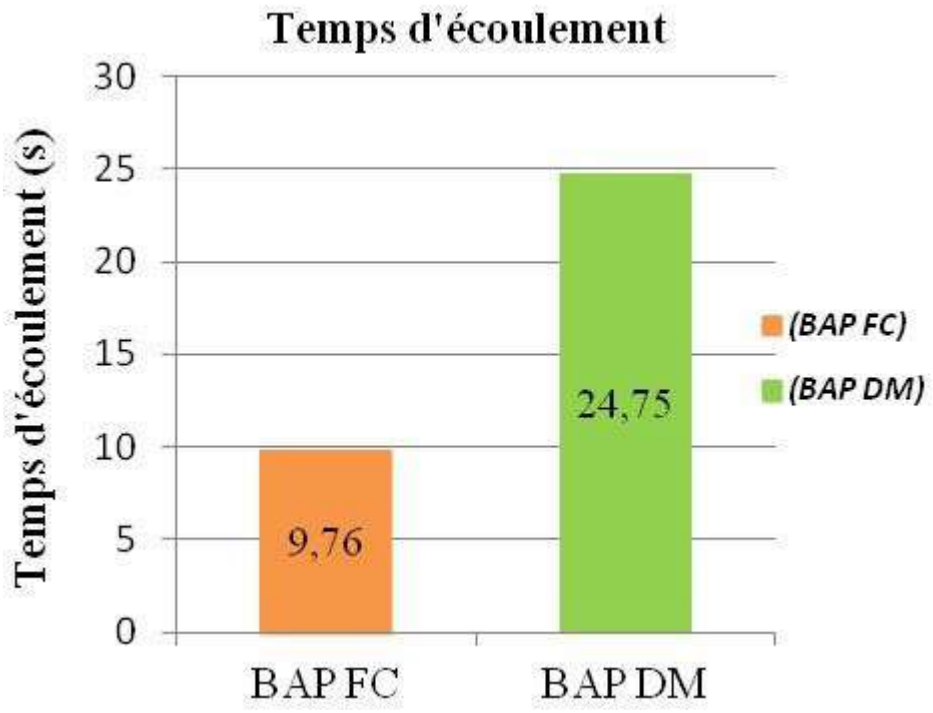


Figure I.38 : Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAPFC) et (BAPDM).

b.Etat durci

Haddadou.N **[72]** constate que la résistance à la compression augmente à fur et à mesure que l'âge augmente et elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de PM incorporé. Pour un pourcentage de 30% de PM incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 81% de la résistance du BAP avec 5% de PM, ceci est dû à la nature de la PM qui appartient à la famille des fillers quasi inertes **[78, 79, 80]**. Ces fillers sont composées principalement de CaCO3. Cet élément accélère l'hydratation du C3S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges **[81, 82]**. Néanmoins, l'effet associé de ces fillers est la réduction du potentiel pouzzolaniques qui cause la diminution des résistances à long terme **[83]**. Autrement dit que, si le filler PM accélère l'hydratation des BAP au jeune âge, son effet a tendance à se stabiliser à long terme **[84, 85]** ; de plus, l'augmentation du dosage en filler ne semble pas avoir une influence significative sur le développement des résistances.

Topçu et al. **[86]** ont testé des BAP comportant la PM. Ces auteurs ont montré que la substitution du ciment par de la PM conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce qui est en conformité avec nos résultats. Les mêmes auteurs ont trouvé des résistances, à 28 jours, qui varient entre 30 et 60 MPa.

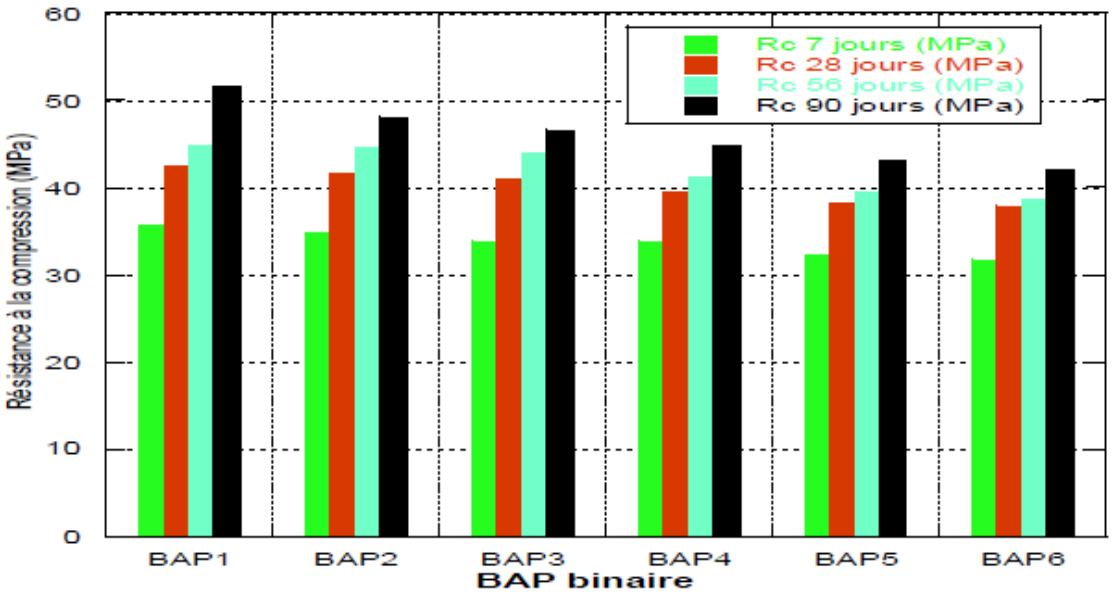


Figure I.39 : Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.

Tennich.M et Ben Ouezdou.M **[87]** ont constaté que les bétons autoplaçants ont développés des résistances plus importantes que le BOV à jeune âge (3jours). On peut constater aussi que la courbe du BAPT a la même allure que le BOV mais avec des performances nettement supérieures.

Les résistances à la compression des trois autres BAP avec déchets sont proches du BOV pour l'âge de 28 jours mais représentent des valeurs un plus faibles à 14 jours. Ceci ils conduisent a montré que :

- Le dosage en SP dépend de la finesse des additions calcaires. Plus le filler (filler calcaire ou déchets de marbre ou de carrelage) est fin, plus que le dosage en SP diminue.
- La substitution de filler calcaire par les déchets de marbre et de carrelage donne une fluidité et une résistance à la ségrégation satisfaisante des BAP étudiés et s'approchent de celles d'un béton autoplaçant témoin à base de filler calcaire.
- Le béton autoplaçant témoin (BAPF) a développé des résistances supérieures par rapport à ceux contenant des déchets de marbre et de carrelage ainsi que celles du béton ordinaire vibré, mais les valeurs de ces derniers restent acceptables et intéressantes.
- Les bétons autoplaçants à base de déchets de marbre et de carrelage ont donné des résistances à la traction nettement plus meilleures que celle du béton ordinaire vibré (BOV).

- Les déchets de marbre et de carrelage ne manifestent aucune réactivité qui contribue à la résistance en compression ou à la traction. Ils sont des additions complètement inertes comme le filler calcaire.

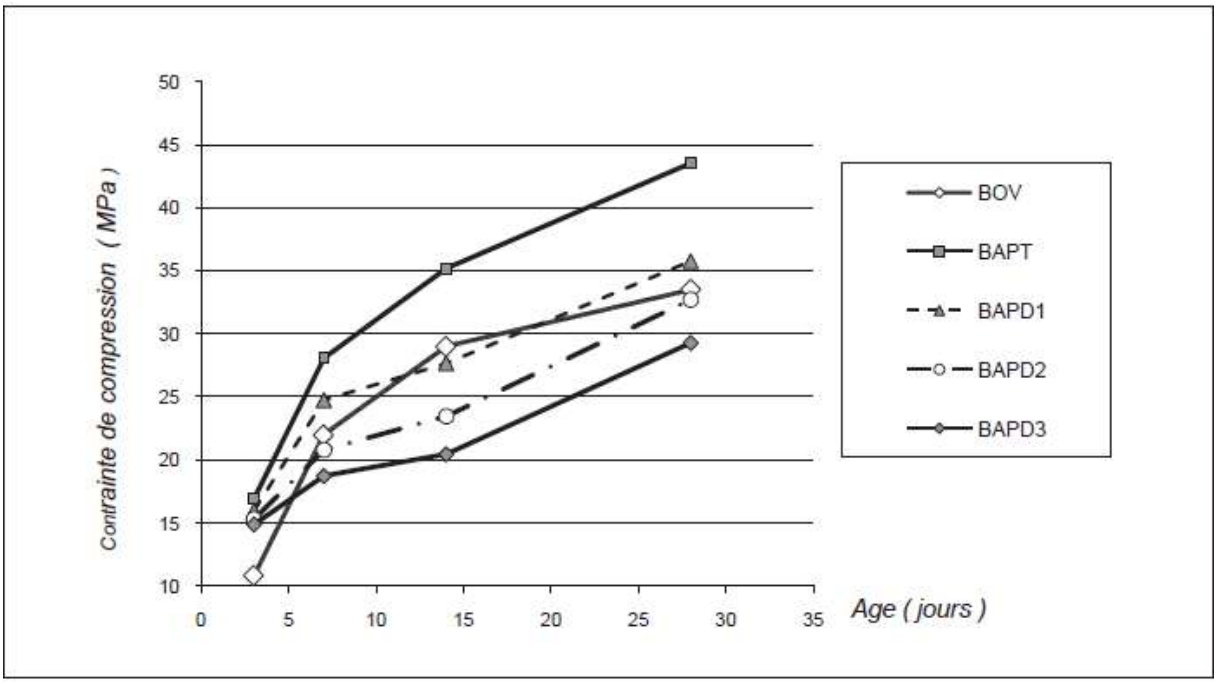


Figure I.40 : Résistance à la compression pour différents bétons.

CHIBANI.N et HOUARI.H **[77]** ont trouvé que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes. Elles présentent la même allure quelle que soit le type de béton.

La résistance initiale au jeune âge (3jours) de béton (BAPDM) atteint (40%) par rapport à la résistance à 28 jours, et à 7 jours l'hydratation de béton (BAPDM) affiche une augmentation de résistance de 8MPa. En d'autre terme le béton (BAPDM) atteint presque (59%) ce qui montre que plus de la moitié de la résistance est acquise pendant les 7 premiers jours.

Et entre 28 jours et 90jours, la résistance obtenue de béton (BAPDM) n'enregistre pas une augmentation sensible, on voit une différence de 1 MPa. En d'autres termes une augmentation de (3%) par rapport à 28 jours.

Le béton (BAPDM) donne de meilleures performances que le béton de référence (BAPFC) à jeune âge, moyen et long terme, On rappelle que la quantité de superplastifiant utilisée dans la formulation de (BAPDM) est supérieure à celle employée dans la formulation de (BAPFC)

(respectivement de 11,32 à 10.50 kg/m^3) et de tels produits peuvent avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique, malgré E/C de béton (BAPDM) est légèrement supérieure que E/C de béton (BAPFC) (respectivement de 0,455 à 0,45). Ce qui confirme le rôle et la fonction d'un retardateur de durcissement joué par le déchet de marbre.

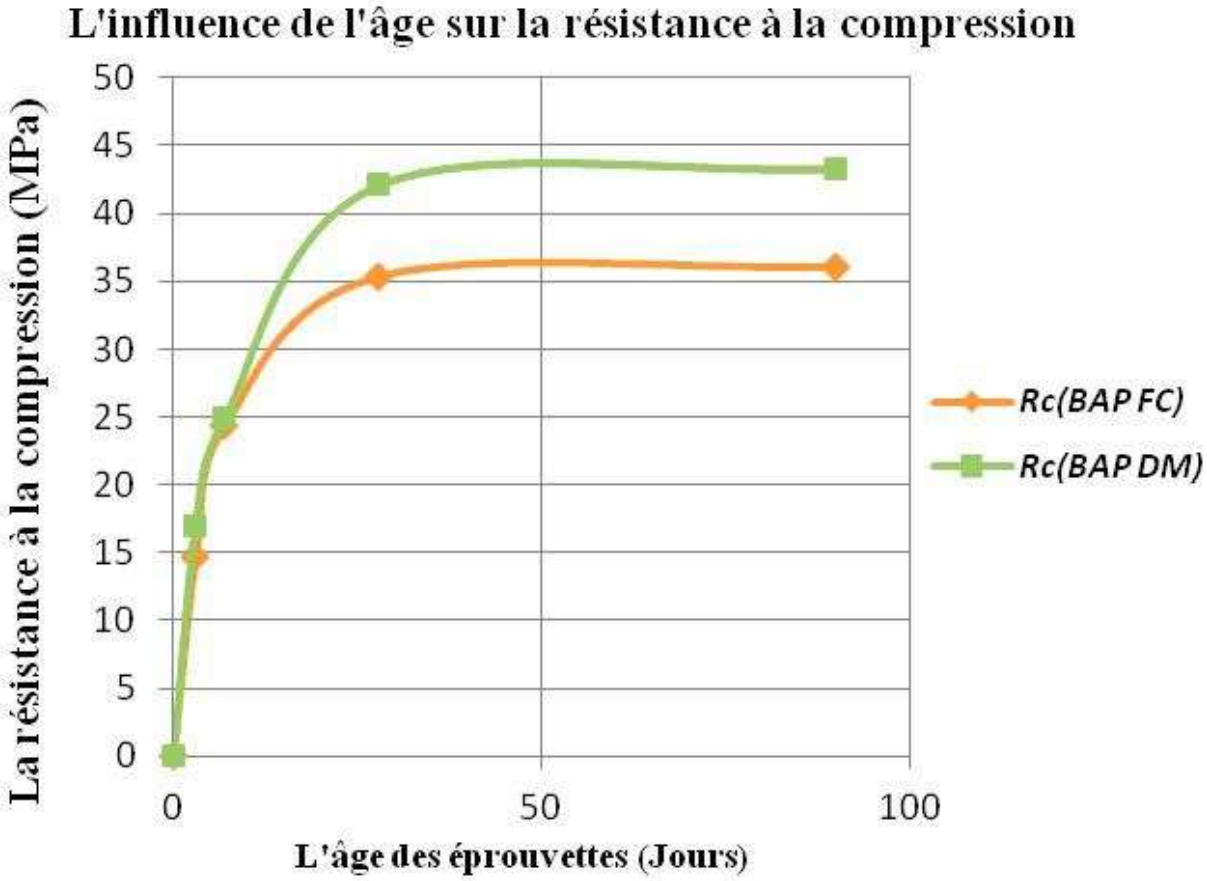


Figure I.41 : Evolution de la résistance à la compression Comparaison en fonction du temps de (BAPFC) et (BAPDM).

II.1- Introduction

À la lumière de la synthèse bibliographique, il est bien marqué que l'utilisation des granulats recyclés dans la production des matériaux cimentaires présente plusieurs avantages tant au niveau environnementale, technologique qu'économique. En outre le choix des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier autoplaçant joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du mortier sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, ce chapitre est consacré dans une première partie à la présentation de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, à savoir : le ciment, sable, les déchets recyclés, l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, nous décrivons les formulations adoptées et nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude.

Pour les besoins de cette étude, des matériaux locaux de la wilaya de Skikda (Fil-fila) et Boumerdes (Zemouri) sont employés et disponibles en abondance dans notre payé :

- Déchets de brique,
- Déchets de marbre.

Les caractérisations des mortiers de déchets de brique et de marbre, à l'état frais et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais effectués au cours de ce travail sont :

❖ **Essais sur Mortier Autoplaçant :**

✓ **Etat frais**

- L'étalement
- V-Funnel.

✓ **Etat durci**

- Compression sur éprouvettes 4x4x16 cm.
- Retrait.
- Gonflement.
- L'absorption d'eau par capillarité.

II.2-Caractérisation des matériaux

II.2.1-Ciment

Le ciment utilisé est un CPA-CEM I, Un ciment Portland a haute résistance aux sulfates ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la Cimenterie Artificiels Tunisiens "CAT" dont les constituant principaux sont le clinker à 95-100% et le calcaire (L) de 0-5% conforme à la norme **[NT 47.01, NT 47.26]**

L'Analyse chimique du ciment, la composition hypothétique du clinker ainsi que la composition minéralogique sont présentés dans l'annexe

- **Masse volumique absolue (g/cm^3) = 3.15**
- **Surface Spécifique de Blaine (cm^2/g)= 3800**

II.2.2-Le sable

Dans cette étude, on a utilisé un seul type de sable (0/3) naturel provenant de la carrière d'Oued Souf située au SUD-EST Algérien, ses caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau II.1 : Les caractéristiques du sable.

caractéristique	Sable d'oued Souf
Le module de finesse	2.3
La masse volumique absolue (g/cm3)	2.56
La masse volumique apparente (g/cm3)	1.61
Equivalent de sable à vue (%)	90.63
Equivalent de sable à piston (%)	87.5
Taux d'absorption d'eau (%)	0.44

L'analyse granulométrique de sables utilisés est présentée sur la **Figure II.1** suivante :

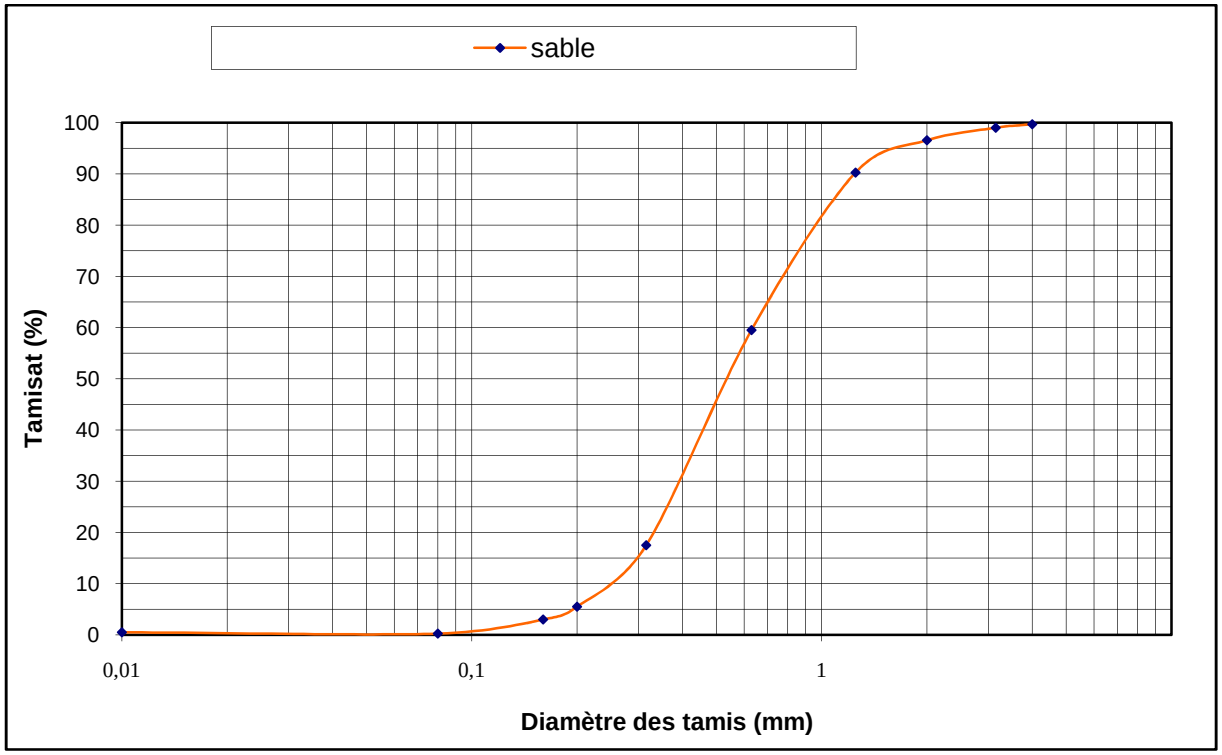


Figure II.1 : Courbe granulométrique de sable.

II.2.3-Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des mortiers est celle du robinet considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au mortier et conforme à la norme NF EN 1008 **[89]**. Sa température est comprise entre 18 et 20°C.

II.2.4-Superplastifiant

Pour assurer une ouvrabilité satisfaisante, on a employé un Superplastifiant – Haut réducteur d'eau à base de poly carboxylate d'éther formulé à base de polymère de synthèse combinée commercialisé par la société Granitex, sous le nom « MEDAFLOW 145 » (**Figure II.2**) .Voir la fiche technique en annexe pour avoir plus de détail sur ce adjuvant.



Figure II.2: Adjuvant utilisé « MEDAFLOW 145 »

II.2.5-Déchets

Comme nous avons vue dans le chapitre précédant qu'il existe plusieurs ajouts introduits comme substituant dans le mortier autoplaçant. Dans ce travail on a utilisé deux types de déchets :

- Déchets de brique,
- Déchets de marbre.

Les déchets une fois réceptionnés, ils ont fait l'objet d'un concassage par un concasseur à mâchoires de laboratoire (**Figure II.3**) qui nous a permet d'obtenir un matériau dont les grains sont de dimensions 0-5 mm. Après, les déchets sont subis un broyage par un broyeur à disque (**Figure II.4**) pour les transformer en poudre fine, des finesses voisines à celle du ciment utilisé (3800 cm^2/g).



Figure II.3 : Concasseur à mâchoires



Figure II.4 : Broyeur à disque

II.2.5.1-Déchets de brique

Les déchets de brique cuite utilisée dans ce travail de recherche proviennent de la briqueterie de Zemouri, la wilaya de Boumerdes sous forme :

- Des pierres de briques qui ont été broyés.



Figure II.5 : Brique récupérée



Figure II.6 : Poudre de brique recyclé

II.2.5.2- Déchets de marbre

Les déchets de marbre utilisé dans ce travail de recherche proviennent du marbrier de la wilaya de Skikda (Fil-fila) sous forme :

- Une poudre de marbre.



Figure II.7 : Marbre récupérée



Figure II.8 : Poudre de marbre recyclé

❖ **Recyclage et caractérisation des déchets de brique cuite et de marbre**

Notre travail consiste une méthode pour le recyclage de nos déchets de brique cuite et de marbre qui ce résume comme suit :

✦ **Poudres de brique recyclé**

Nous avons utilisé deux finesses selon la norme NFP15-476 suivant un protocole de broyage indiqué par la suite :

- **SSB (F_1)=3800 (cm^2/g)** : Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 9 min. **(Figure II.9)**
- **SSB (F_2)=3500 (cm^2/g)** : Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 8 min. **(Figure II.9)**

La masse volumique absolue de ce matériau est déterminée suivant la norme NF P18-555qui a donné une valeur de 2,27 g/cm^3.



Figure II.9: Protocole d'obtention des finesses de déchets de brique.

✦ **Poudres de marbre recyclé**

Nous avons utilisé deux finesses selon la norme NFP15-476 suivant un protocole de broyage indiqué par la suite :

- **SSB (F_1) =3900 (cm^2/g) :** Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 4 min. **(Figure II.10)**
- **SSB (F_2) =3400 (cm^2/g) :** Cette finesse est obtenue à travers un broyage des fines brutes avec une vitesse de 800 tr/min pendant 3 min. **(Figure II.10)**

La masse volumique absolue de ce matériau est déterminée suivant la norme NF P18-555qui a donné une valeur de 2,75 g/cm^3.



Figure II.10 : Protocole d'obtention des finesses de déchets de marbre.

II.3- Essais sur le déchet recyclé (brique, marbre)

Les essais effectués sur nos déchets sont résumé en annexe et les résultats dans le **Tableau II.2** :

Tableau II.2 : Essais effectués sur les déchets.

Caractéristiques	Déchet de marbre	Déchet de Brique	Normes
Masse Volumique absolue (g/cm^3)	2.75	2.27	**NF EN 196-6 [90]**
Finesse de Mouture (Surface Spécifique de Blaine) (cm^2/g)	3900	3800	**NF EN 196-6 [90]**
	3400	3500	
Absorption d'eau (%)	4	11	**NF EN 1097-6[91]**

II.4-Formulation des mortiers

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir un mortier avec des propriétés souhaitées. Notre étude est focalisée sur l'influence de l'ajout des déchets de brique et de marbre sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un mortier autoplaçant.

Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, la formulation du MAP est basée sur la méthode japonaise (JSCE) **[35],** en assurant un rapport **S/M=0.50**, un rapport **E/C= 0.42** et un dosage en superplastifiant **Sp/L=1.2%** pour toutes les familles des mortiers pour assurer une ouvrabilité constant (290 ± 2mm), les différentes compositions sont présentées dans le tableau (**II.3**).

Tableau II.3: Composition des différents mortiers réalisés (V=1l).

	Finesses	Substitution (%)	Ciment (g)	Sable (g)	$\frac{E}{C}$	Eau (g)	Sp		Déchets de Brique (g)	Déchets de Marbre (g)
							(%)	(g)		
MT	**0**		**678**	**1315**	**0.42**	**294.85**	**1.2**	**8.13**	**0**	**0**
MM	F_1	**5**	**644.1**	**1315**	**0.42**	**294.85**	**1.2**	**7.73**	**24.43**	
		10	**610.2**					**7.32**	**48.85**	
		15	**576.3**					**6.92**	**73.30**	
		20	**542.4**					**6.51**	**97.72**	
	F_2	**5**	**644.1**					**7.73**	**24.43**	
		10	**610.2**					**7.32**	**48.85**	
		15	**576.3**					**6.92**	**73.30**	
		20	**542.4**					**6.51**	**97.72**	
MB	F_1	**5**	**644.1**	**1315**	**0.42**	**294.85**	**1.2**	**7.73**		**29.59**
		10	**610.2**					**7.32**		**59.18**
		15	**576.3**					**6.92**		**88.80**
		20	**542.4**					**6.51**		**118.39**
	F_2	**5**	**644.1**					**7.73**		**29.59**
		10	**610.2**					**7.32**		**59.18**
		15	**576.3**					**6.92**		**88.80**
		20	**542.4**					**6.51**		**118.39**
MMB	F_1	**5**	**661.05**	**1315**	**0.42**	**294.85**	**1.2**	**7.93**	**12.21**	**14.80**
		10	**644.1**					**7.73**	**24.43**	**29.59**
		15	**627.15**					**7.53**	**36.64**	**44.39**
		20	**610.2**					**7.32**	**48.85**	**59.18**
	F_2	**5**	**661.05**					**7.93**	**12.21**	**14.80**
		10	**644.1**					**7.73**	**24.43**	**29.59**
		15	**627.15**					**7.53**	**36.64**	**44.39**
		20	**610.2**					**7.32**	**48.85**	**59.18**

II.5-Séquence de malaxage du mortier

Pour la confection du mortier, la séquence de malaxage décrite dans la Figure **II.11** suit les étapes suivantes **[91]** :

- Malaxer à sec le ciment et le sable afin d'homogénéiser le mélange pendant 30 seconde (On a utilisé un malaxeur à mortier de capacité de 5 litres) à vitesse lente.
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (E_1 = 60% Eau).
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (E_2= 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant.
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes à vitesse rapide.
- Laisser reposer le mélange pendant 3 minutes.
- Redémarrer le malaxage pendant 90secondes à une vitesse rapide.

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier. Pour assurer une meilleure incorporation, et d'après la séquence de malaxage de ce produit cité en fiche technique, l'ajout de brique qui est en poudre fines doit être mélangé avec les agrégats (ciment, sable) cette quantité a été prise d'un pourcentage massique du ciment et ajouté d'un seul coup. La même procédure pour les mélanges du mortier à base de sable recyclé.

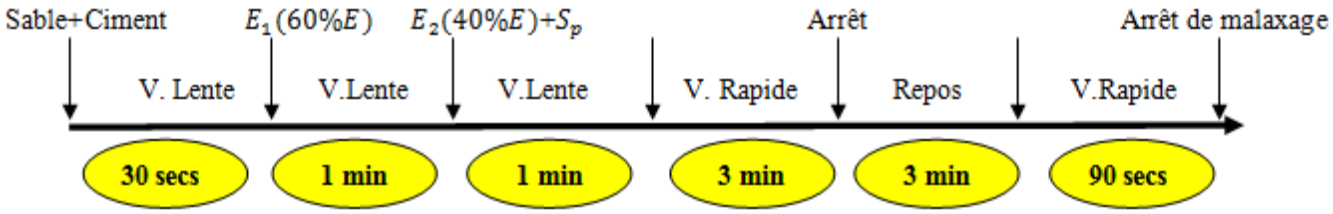


Figure II.11 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant.



Figure II.12 : protocole de malaxage.

II.6-Préparation et Conservation des Eprouvettes

La préparation des éprouvettes (40X40X160) mm du mortier autoplaçant est effectuée selon la norme EN196-1 **[92].**

.





Figure II.14 : Conservation dans l'eau a20 °C±2°

Figure II.13 : Les éprouvettes après le décoffrage.

II.7-Les essais sur les mortiers

II.7.1-Etat frais

Dans cette étude, deux essais ont été effectués pour valider le caractère des mortiers autoplaçant formulés selon les recommandations de l'AFGC.

a) Essais d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du mortier est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La Figure **II.15** montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône.

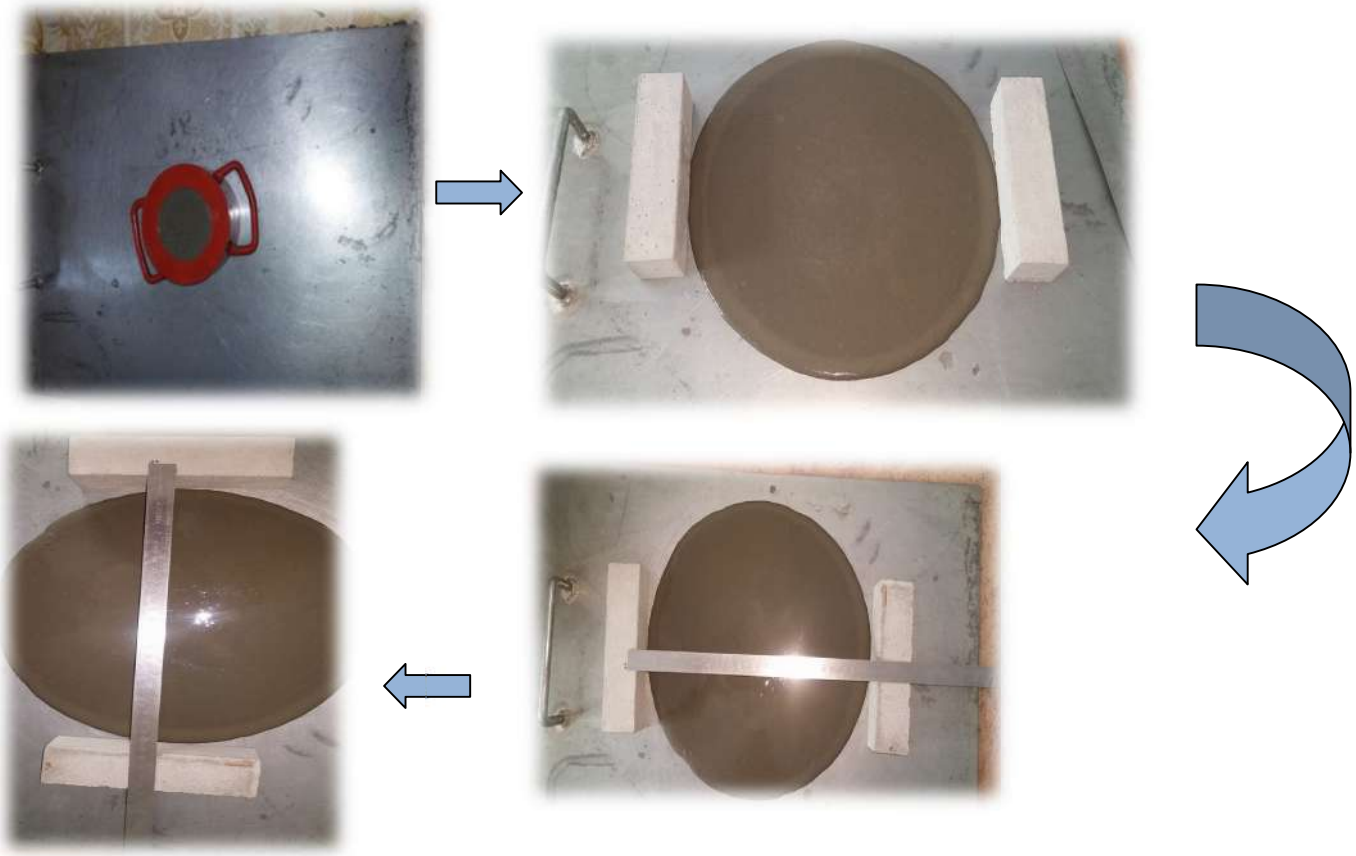


Figure II.15 : Protocole de l'essai d'étalement.

b) Essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui impose entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesuré. Ce temps mesuré indique la fluidité et caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif. La Figure **II.16** montre les étapes de l'essai



Figure II.16 : Protocole de l'essai de V-Funnel

II.7.2-Etat durci

a. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] **[93]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques après rompre en flexion à l'âge de 3, 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN (**Figure II.17**). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (03)
Demi-prismes des trois éprouvettes.

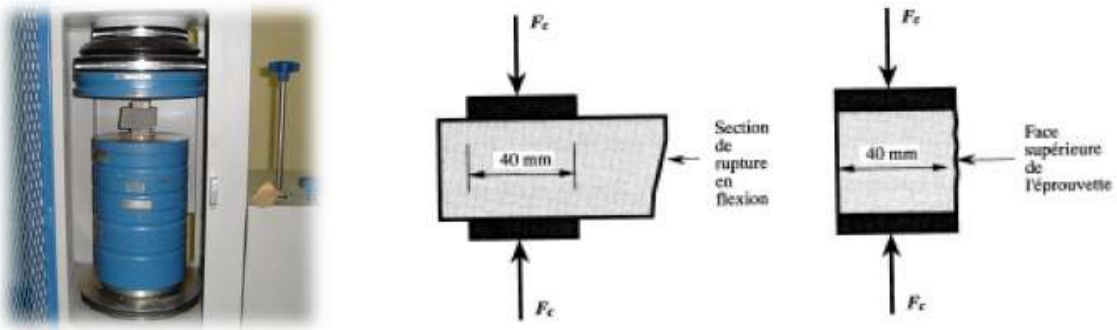


Figure II.17: Essai de compression sur mortier.

Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra : $\delta^2 = \frac{Fc}{a^2}$
Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en Newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$f_{c(MPa)} = \frac{f_{c(N)}}{1600}$$

b. Absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NF EN 1015-18**[95]**, dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de mortier déjà utilisé puis séché .On le pèse (m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5 mm d'eau) (**Figure II.18**) et pendant chaque intervalle de temps (12min, 30min, 1h, 2h, 4h, 24h) on ressort les morceaux du bac et on les pèse (m_1).La différence de poids entre $m_1$et m_0 est le poids de l'eau absorbée (m_1-m_0).

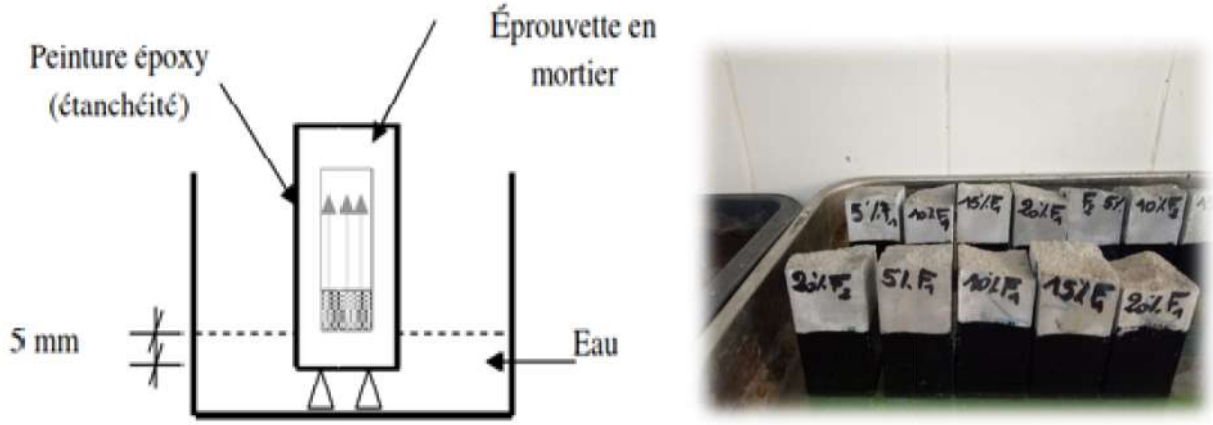


Figure II.18: Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier.

c. Retrait et Gonflement

En l'absence de toute charge, le mortier autoplaçant se déforme instantanément. Ces déformations sont dus essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se Traduit par un rétrécissement des éléments en mortier .Le retrait dépend non seulement des Conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du mortier **[95]**.

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16cm) conformément à la norme [NFP18-404] **[95]**.Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24h, placées dans un réfractomètre (**Figure II.19**) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à court, moyenne et long terme (du 1, 2, 3, 7, 14, 28 jours).



Figure II.19 : Réfractomètre et son étalonnage (variation dimensionnelle).

d. Des variations de longueur :

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,…etc.).Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de160mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants :

$\Delta \mathbf{L}$: Variation de longueur par apport à la longueur origine.

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 160 mm Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au l'éprouvette a une longueur au temps considéré :

$$l = L + dl\,t \qquad \textbf{Equation 2.3}$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t cette origine est prise au moment du Démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps sera :

$$\Delta l\,t = lt - lt_0 = dlt - dl\,t_0 \qquad \textbf{Equation 2.4}$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par et a pour expression :

$$\varepsilon t = \frac{\Delta \mathbf{l}\,(\mathbf{t})}{\mathbf{L}} = \frac{\mathbf{dl\,t - dl(t_0)}}{\mathbf{L}} \qquad \textbf{Equation 2.5}$$

L(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes. Lorsque les éprouvettes sont Conservées dans l'air l(t) est généralement négatif et l'on parle alors du retrait de L'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou à froid, l(t) peut être positif : Il y a alors gonflement **[97,98].**

II.8-Variables Etudiées

Les variables étudiées du travail expérimental accomplit sont résumées dans les figures suivantes (**Figure II.20** et **II.21**)

Figure II.20 : Matériaux utilisées

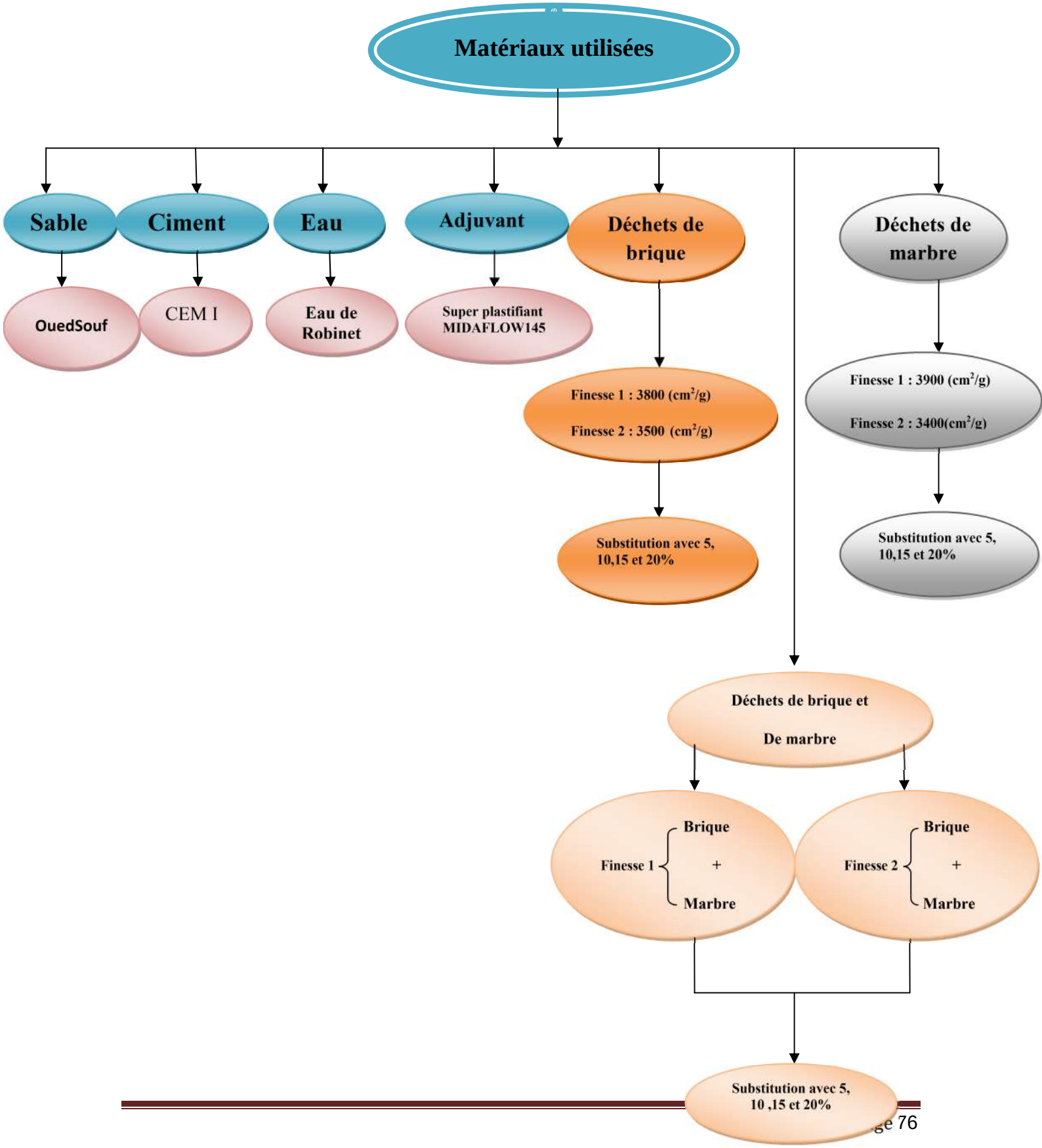
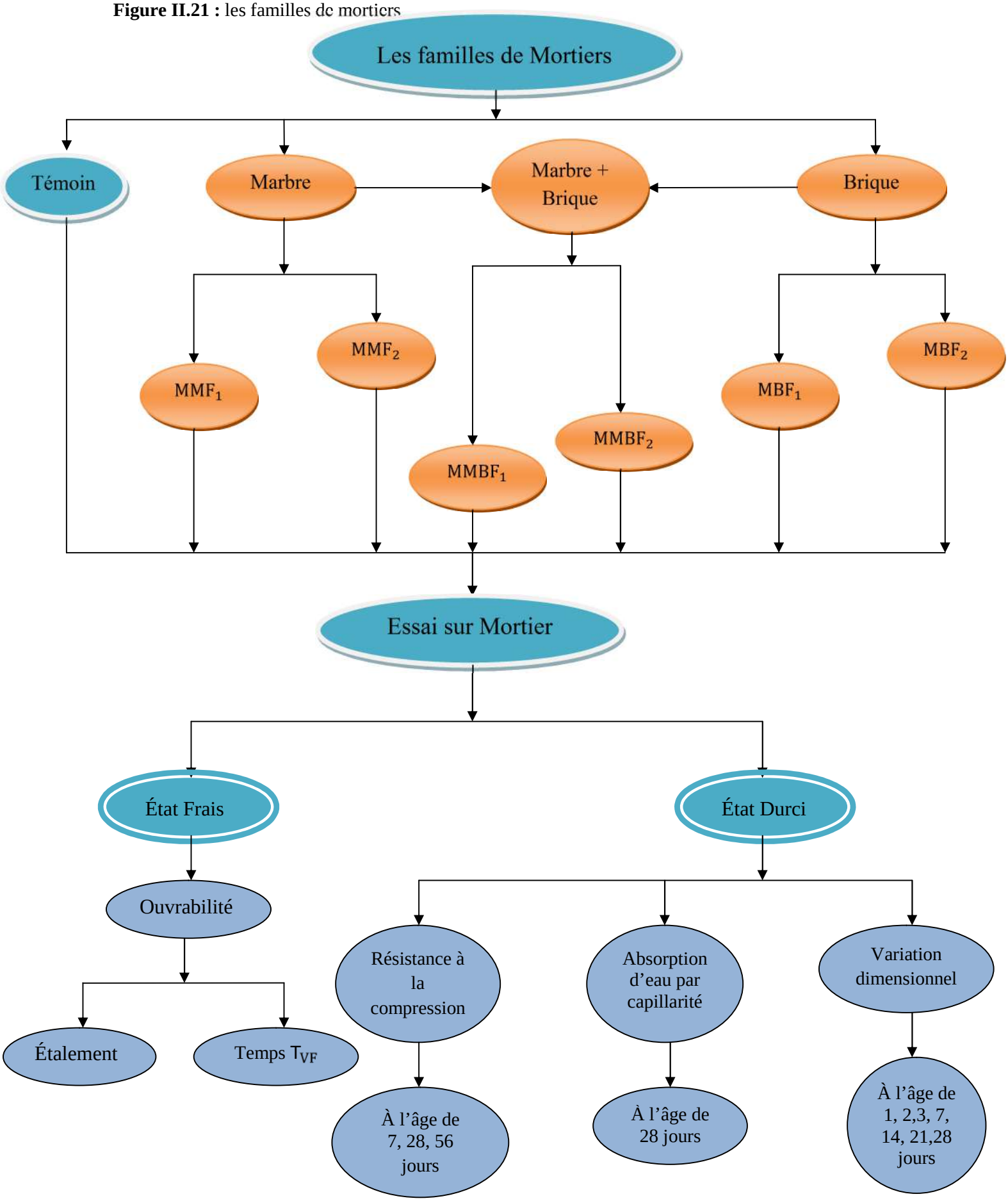


Figure II.21 : les familles de mortiers



II.9-Conclusion

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans le laboratoire donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

III.1-Introduction :

L'étude expérimentale a pour objectif principal d'étudier l'effet des déchets de brique cuite et de marbre sous forme de poudre sur le comportement du mortier autoplaçant (MAP) à l'état frais et durci. Pour cela, différents MAP sont réalisés et comparés à un MAP témoin sans déchets. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés ci-après.

III.2 - État frais

Pour obtenir un MAP à base des déchets de brique et de marbre tout en assurant la fluidité et la capacité de passage recommandée par EFNARC **[98],** les différents mélanges sont soumis à l'essai d'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement par l'essai V-Funnel.

III.2.1 - Étalement

Pour ce travail un diamètre d'étalement situé entre 28.5 et 29.5 cm recommandé par l'AFGC **[100]** est pris en compte pour toutes les familles de MAP réalisés**.** Les résultats d'étalement sont présentés sur les Figures III.1 ; III.2 ; III.3 ; III.4 suivantes qui permet de comparer les valeurs d'étalement entre eux.

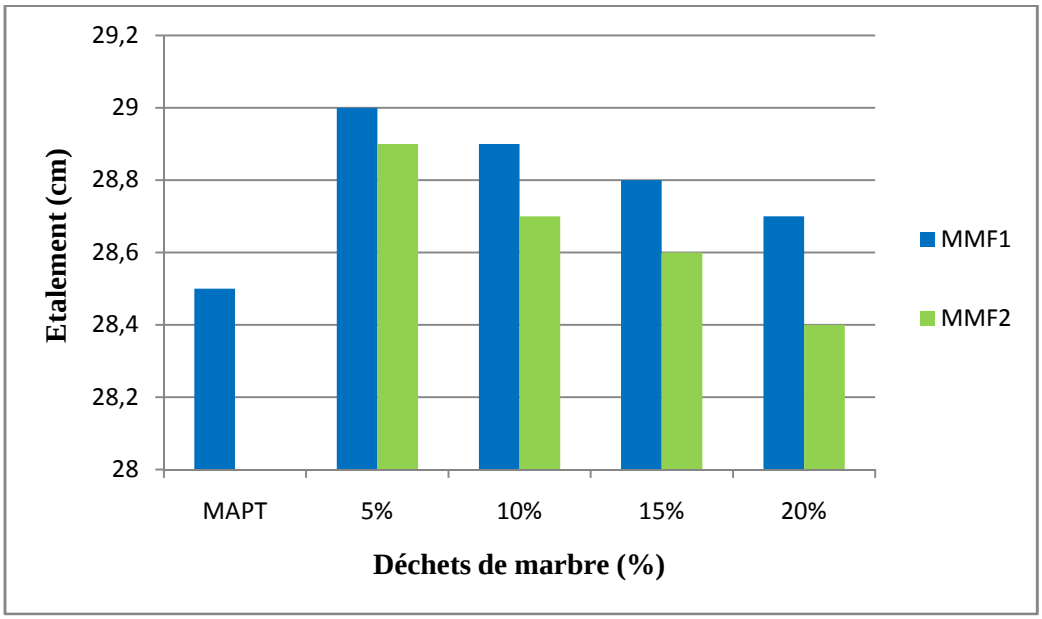


Figure III.1 : Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de marbre.

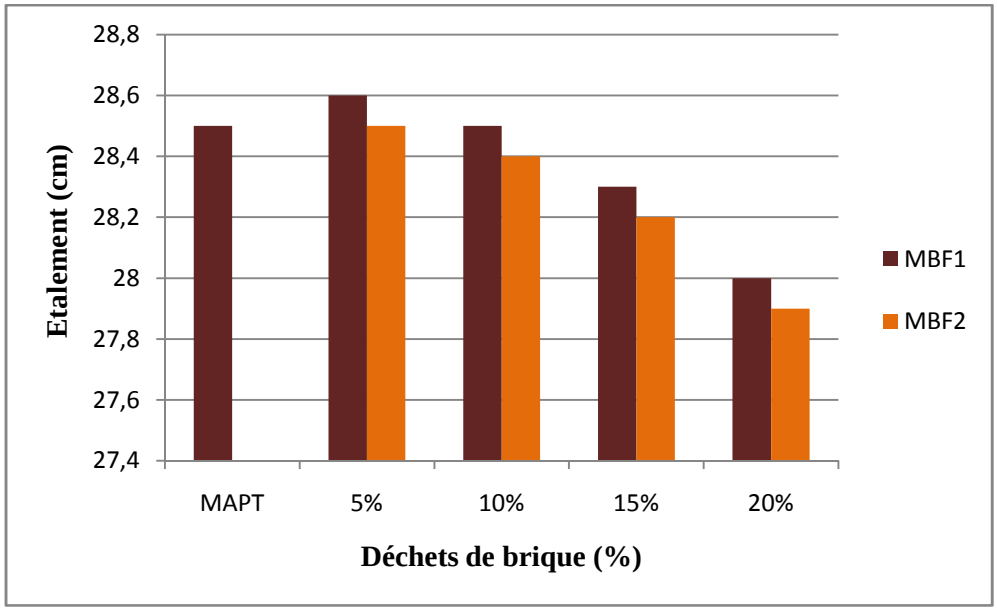


Figure III.2 : Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de brique cuite.

.

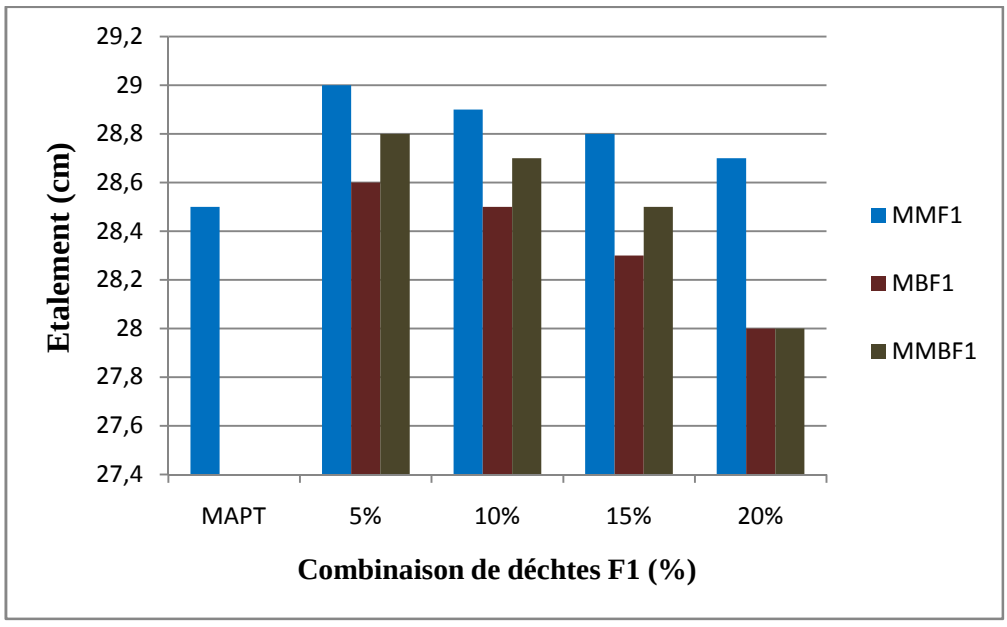


Figure III.3 : Étalement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.

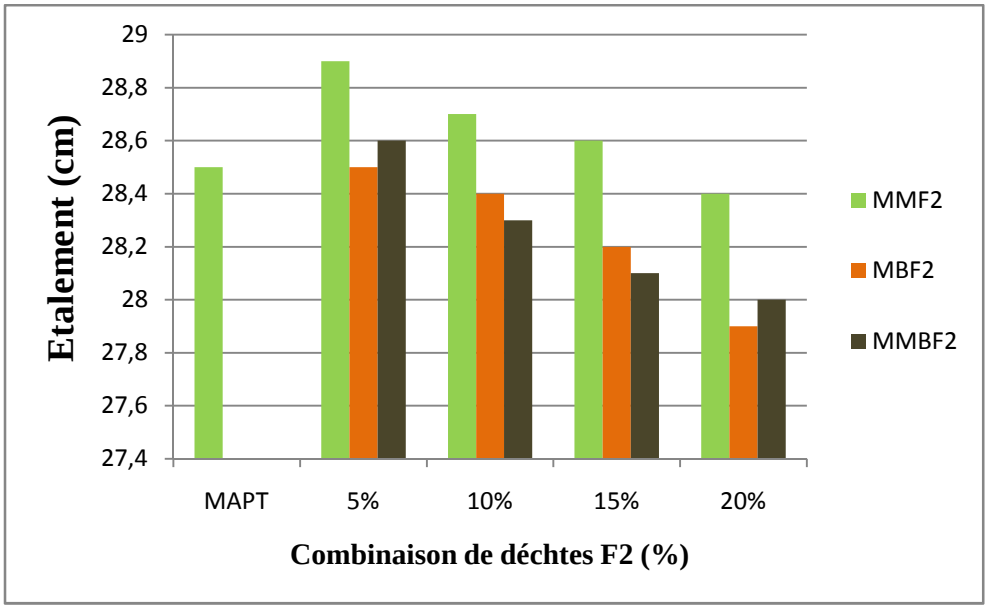


Figure III.4 : Étalement en fonction de teneur et finesse de déchet de marbre et de brique.

A travers les figures précédentes III.1-III4, on constate que la fluidité du MAP augmente en fonction des pourcentages de substitution en marbre et celui de la combinaison entre le marbre et la brique mais par contre, elle diminue avec le pourcentage en brique. Ce résultats semble logique et attendu car la brique absorbe plus d'eau que le marbre et par suite elle diminue la fluidité du mortier plus que le marbre.

III.2.2- Temps d'écoulement à travers le V-Funnel

L'essai à l'Entonnoir en V (V-Funnel test) a été également réalisé pour évaluer la fluidité et la stabilité du MAP. Les résultats sont présentés sur les Figures III.5 à III.8.

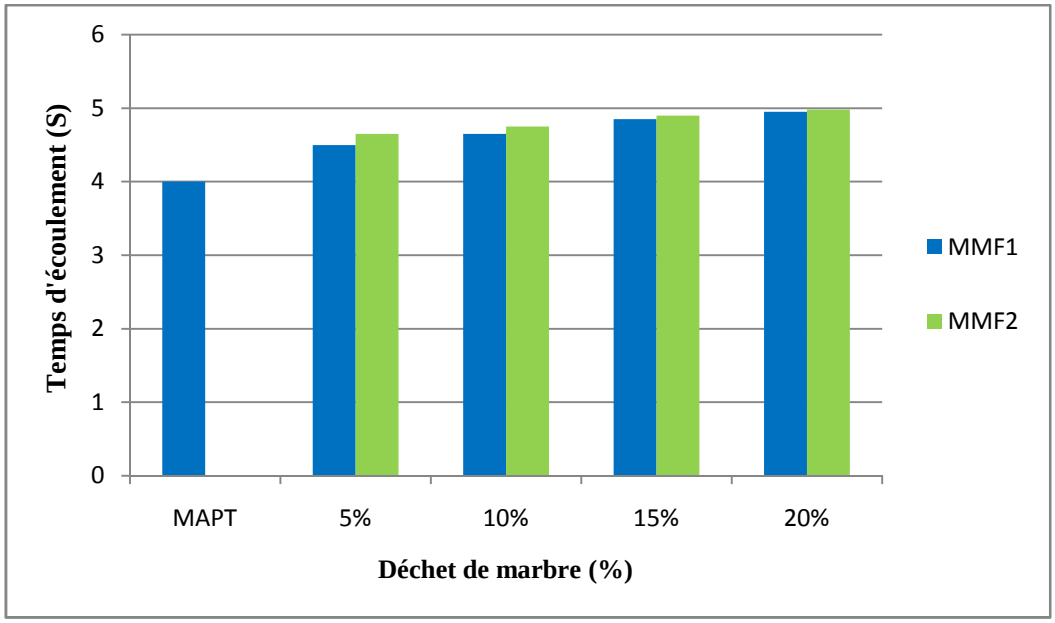


Figure III.5 : Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de marbre.

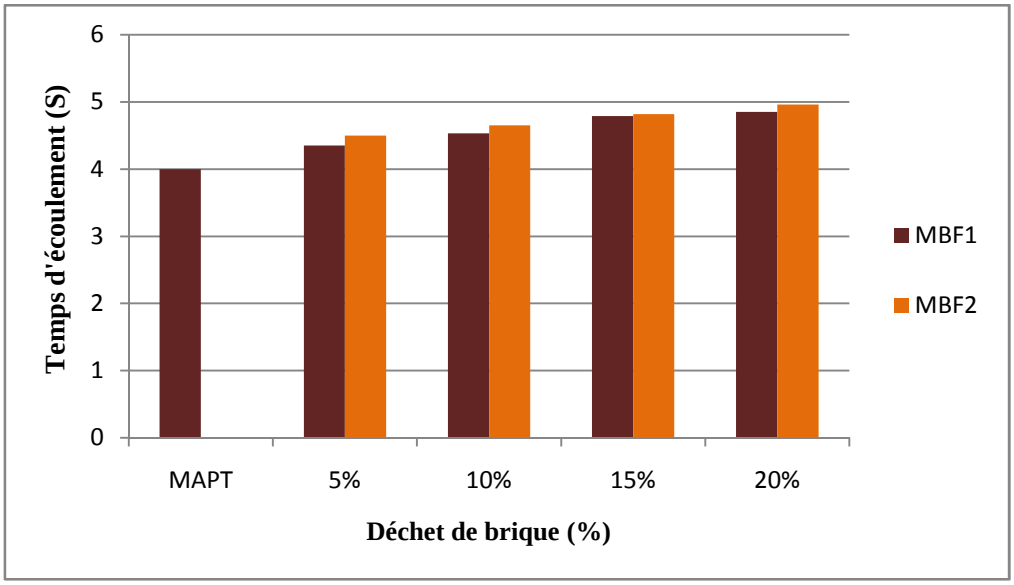


Figure III.6 : Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur et la finesse de la poudre de brique cuite.

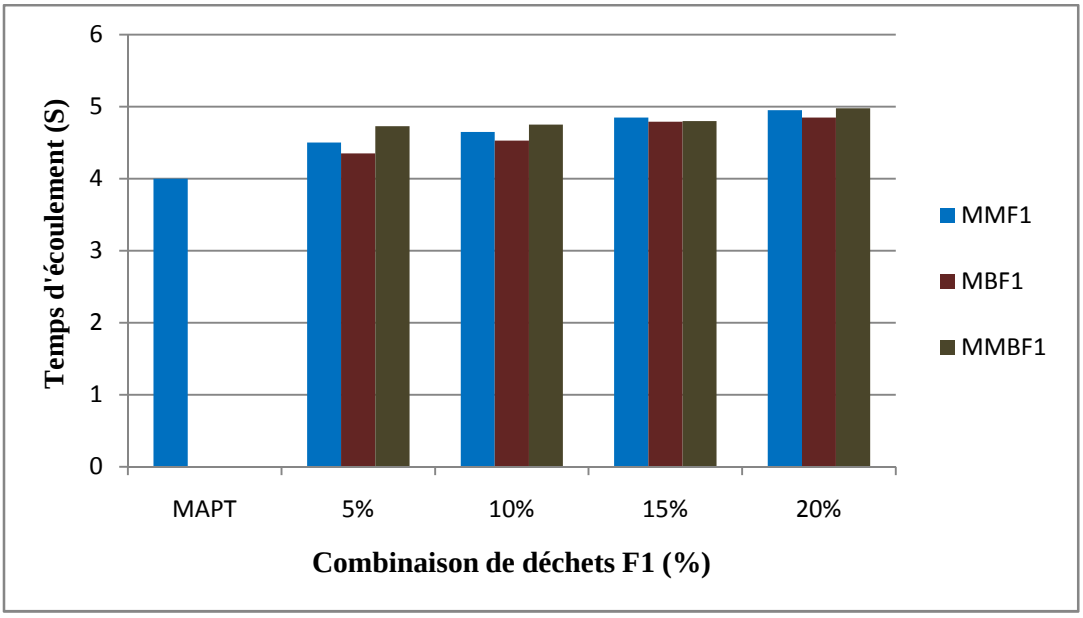


Figure III.7: Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.

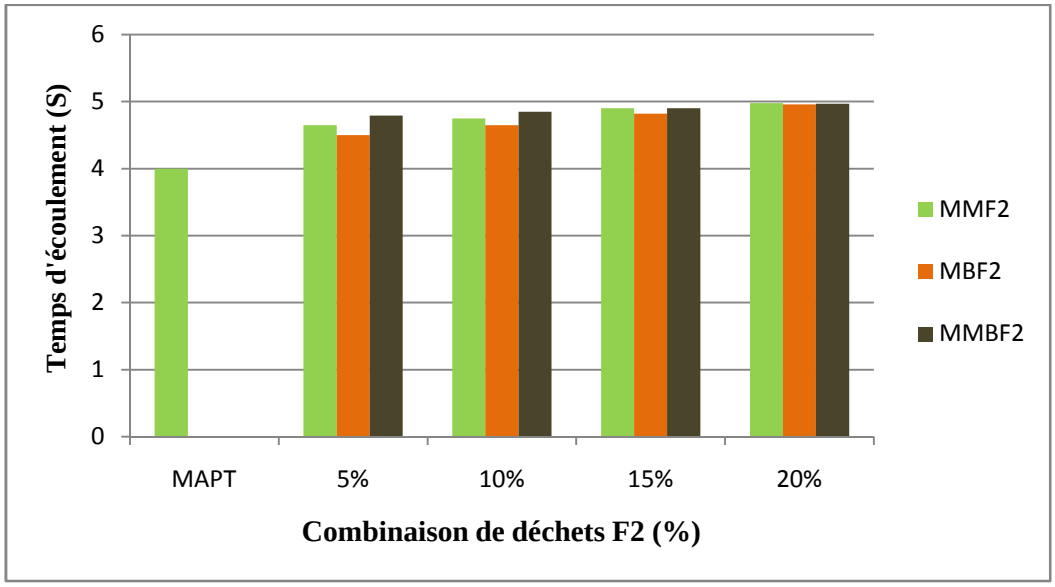


Figure III.8: Temps d'écoulement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur de la poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.

En continuité, les résultats trouvés sur le temps d'écoulement des différents MAP réalisés confirment bien ceux trouvés sur la maniabilité. Encore une fois, on confirme que la poudre de brique cuite diminue la fluidité du MAP par rapport à la poudre de Marbre et par suite elle augmente le temps d'écoulement de ce dernier réciproquement.

III.3 - État durci

III.3.1 - Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de l'âge et le pourcentage de substitution en poudre de marbre, de brique cuite et la combinaison entre les deux sont présentés dans les Figures III.9 - III.14 suivantes.

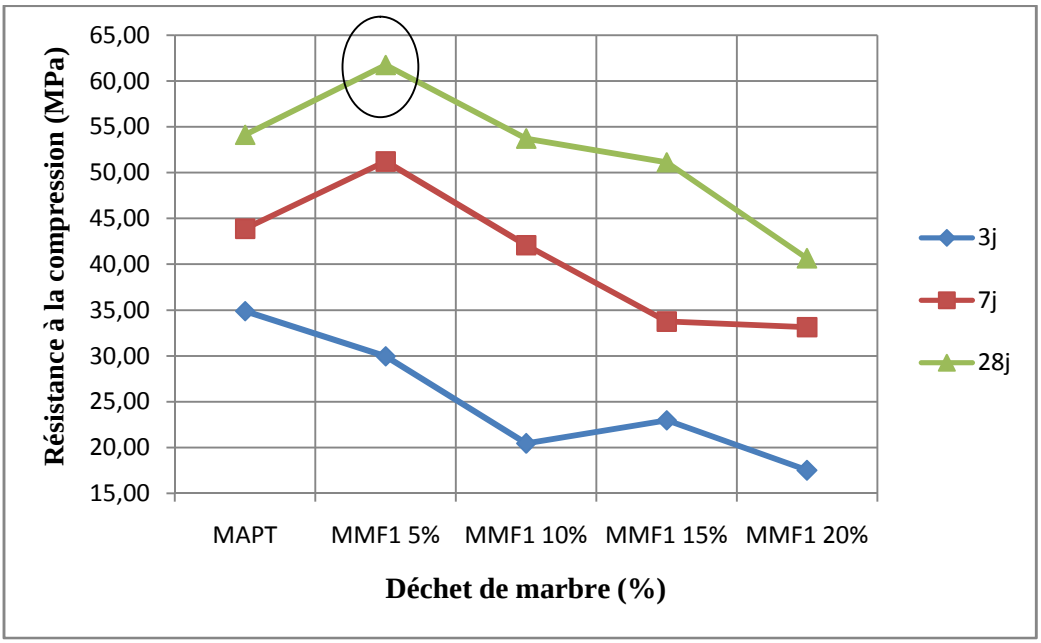


Figure III.9 : Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.

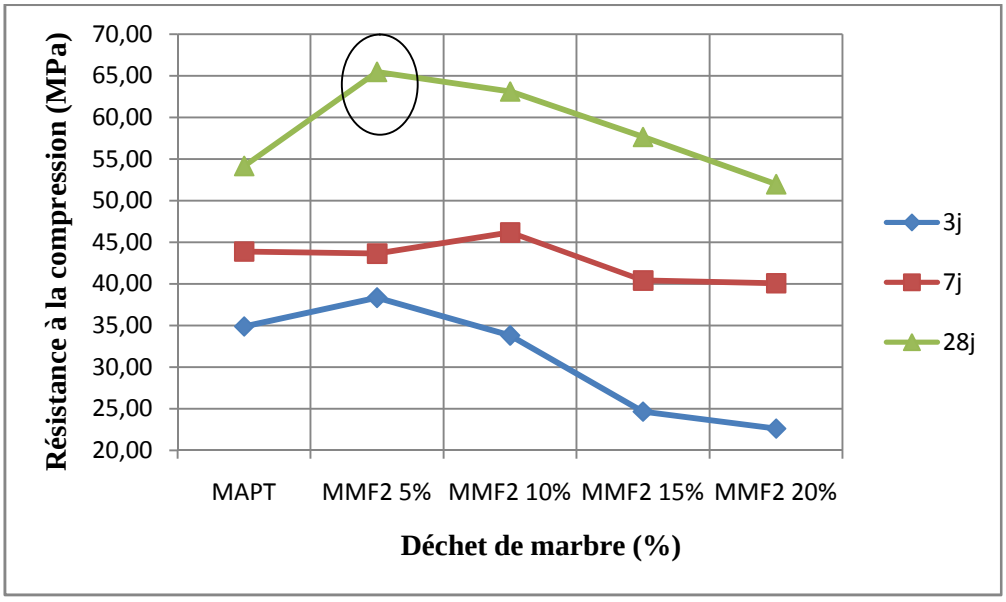


Figure III. 10: Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2

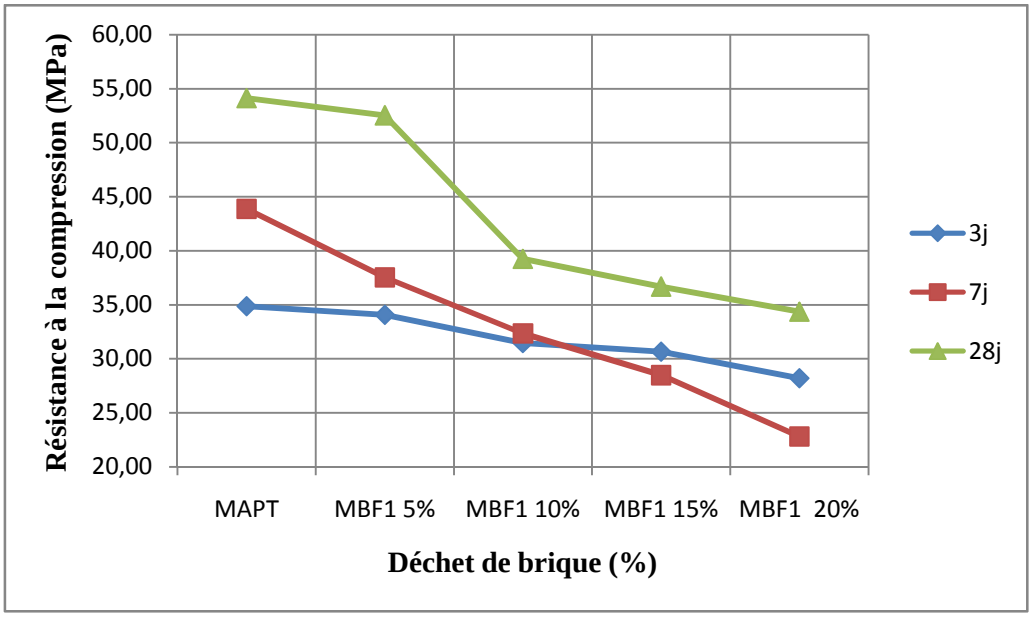


Figure III. 11: Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.

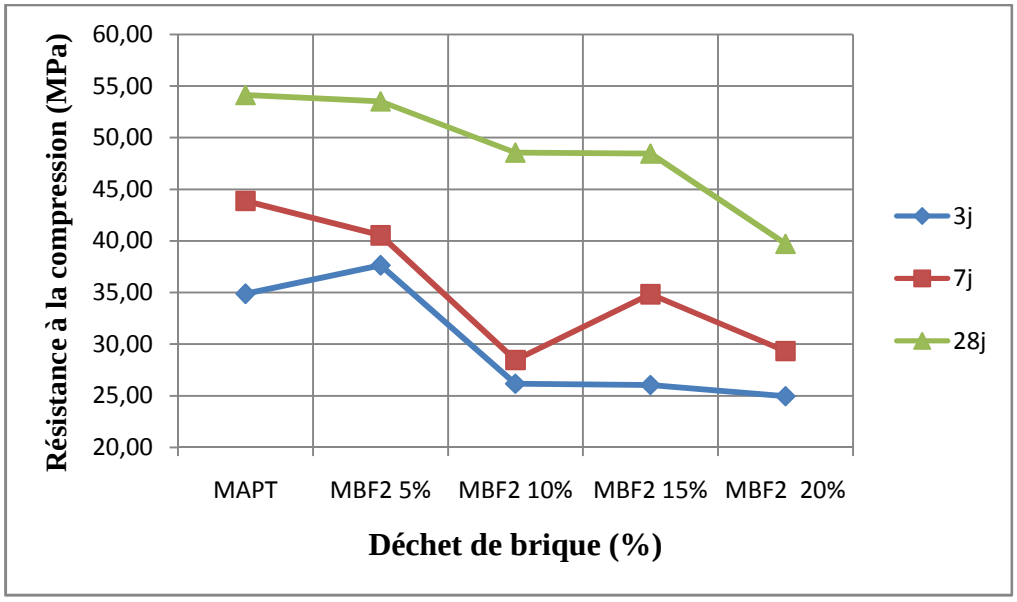


Figure III. 12: Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.

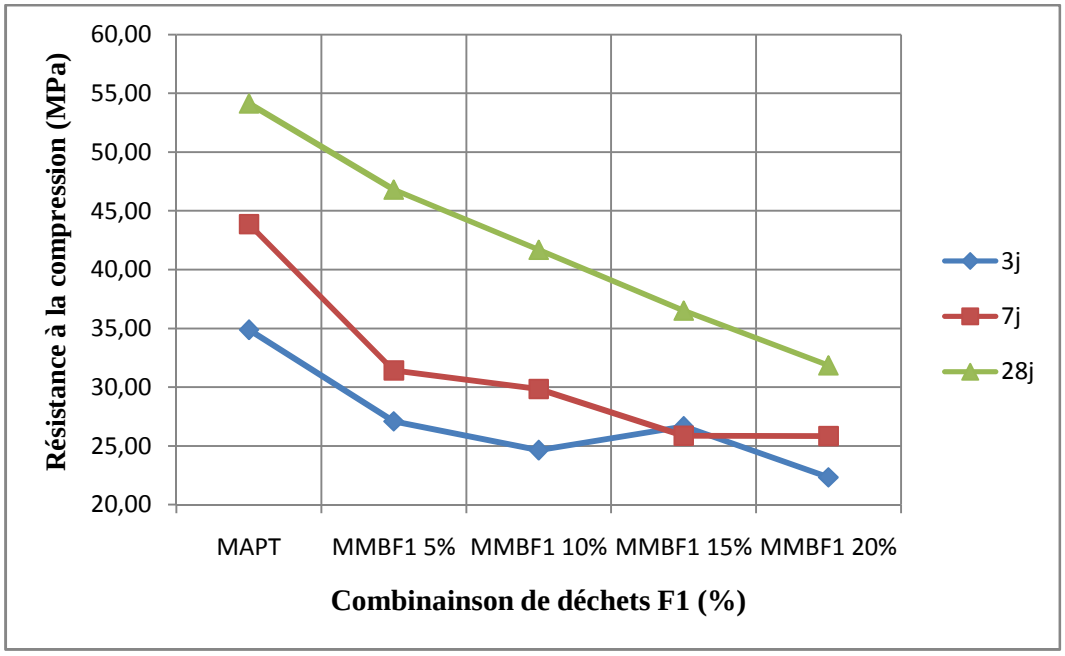


Figure III. 13: Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite et de marbre avec la finesse 1.

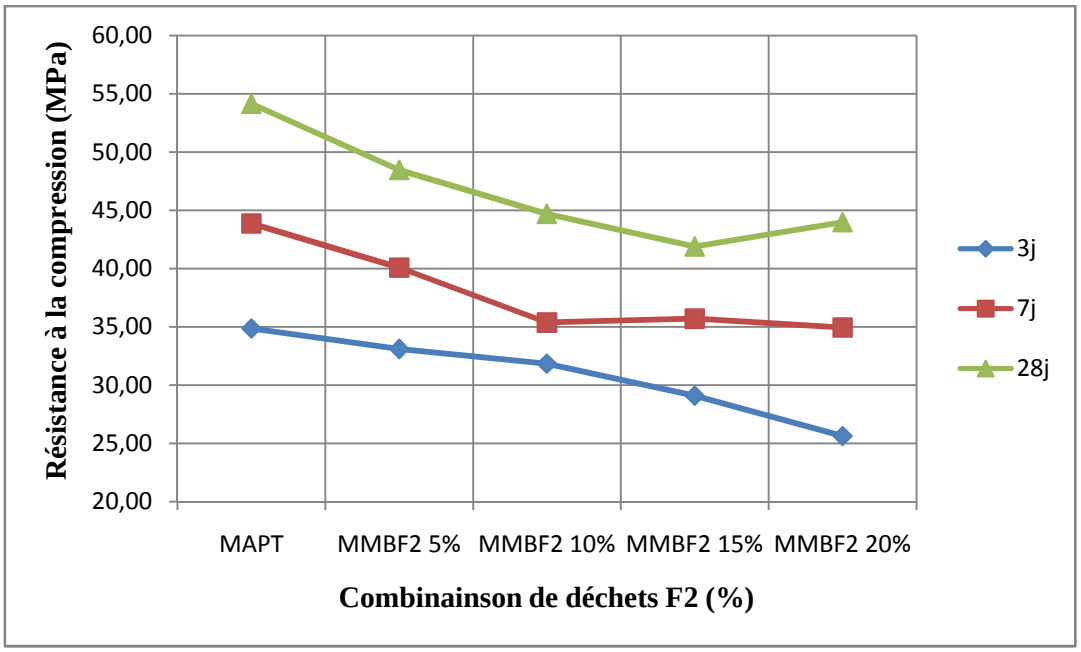


Figure III. 14: Résistance à la compression des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite et de marbre avec la finesse 2.

Des figures III.9 à III.14 on constate clairement que la poudre de marbre augmente la résistance à la compression du MAP avec les deux finesses utilisées par contre la poudre de la brique cuite ainsi que la combinaison entre les deux poudres de brique cuite et de marbre

diminuent la résistance à la compression des MAP réalisés et ceci avec les deux finesses utilisées.

Un optimum de gain en Resistance à la compression (09% pour la finesse 1 et 15% pour la finesse2) est enregistré pour une substitution de 5% en poudre de marbre. Ce résultat est très important et semble être prometteur car on réalise un MAP avec moins de ciment et en gagne en résistance à la compression. De ce faite, le coté économique ici est assuré.

Concernant la poudre de brique, la résistance à la compression du MAP chute en fonction du pourcentage en poudre de brique ajouté mais reste acceptable pour une substitution de 5% max, au delà la chute est grande et la perte en résistance devienne importante.

Pour le cas de la combinaison entre les deux poudres de brique cuite et celle du marbre, il semble que c'est as intéressant car le MAP perd beaucoup en résistance et ceci dès le début de substitution en déchets combiné.

III.3.2 - Absorption d'eau par capillarité

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité des différents mortiers réalisés sont résumés dans les Figures III.15 à III.20 suivantes.

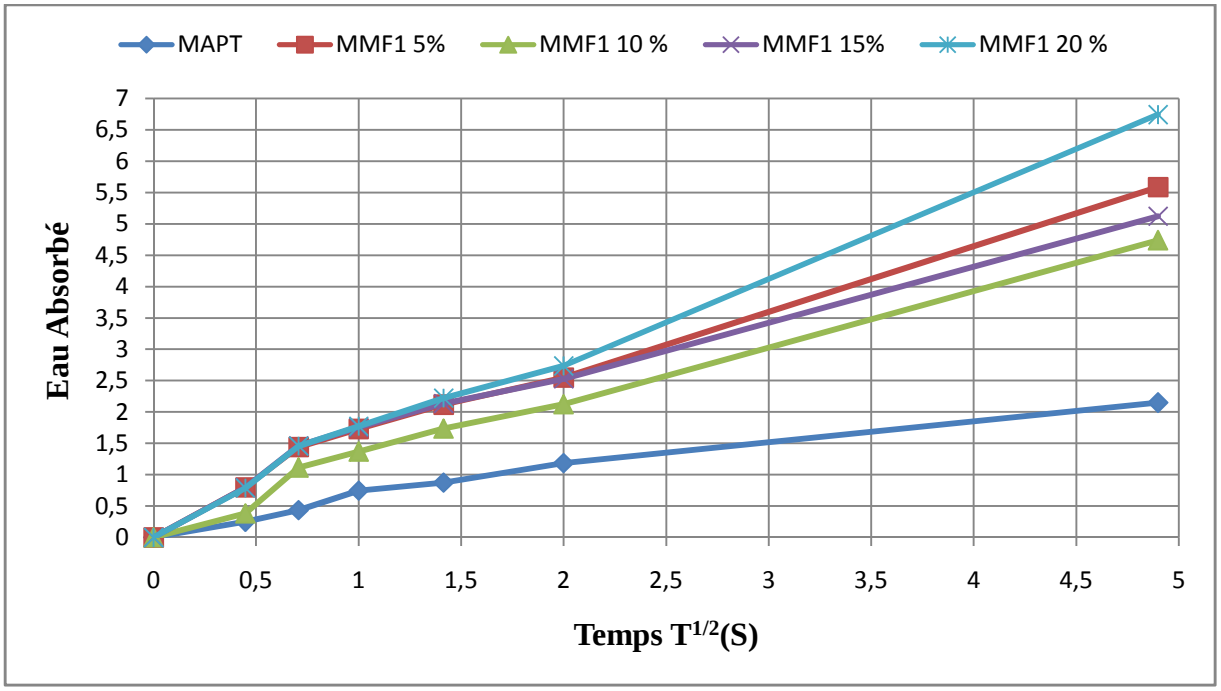


Figure III.15 : Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.

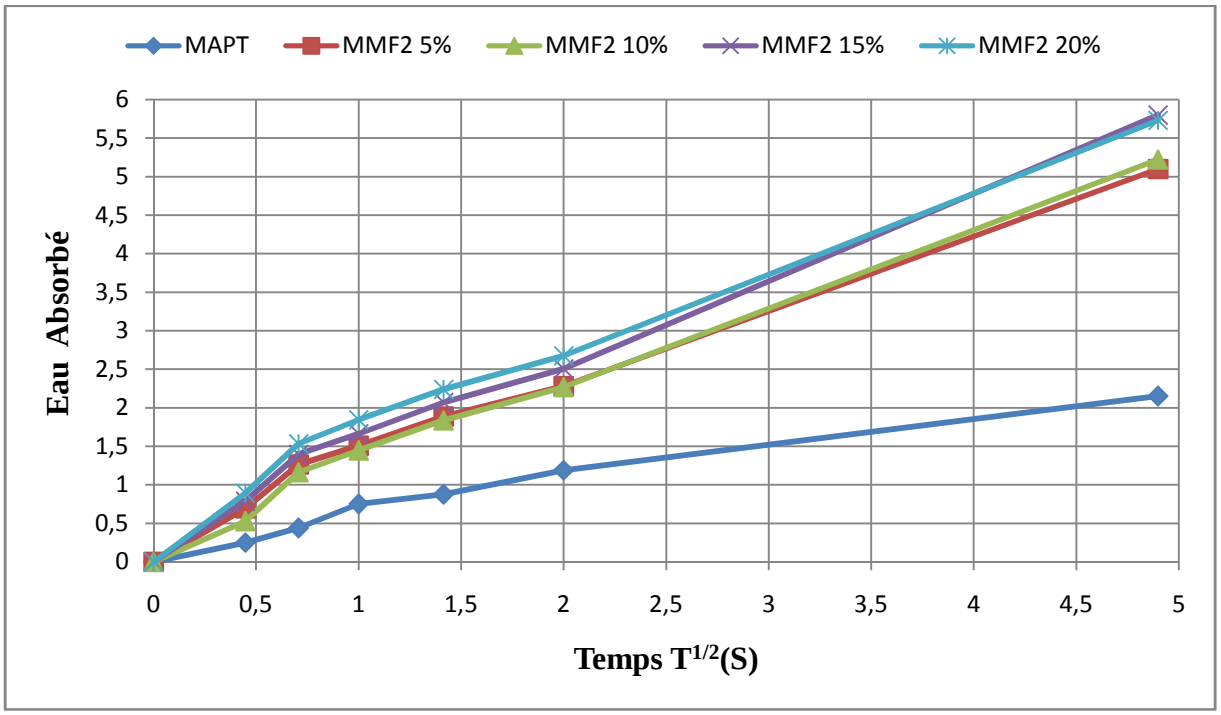


Figure III.16 : Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.

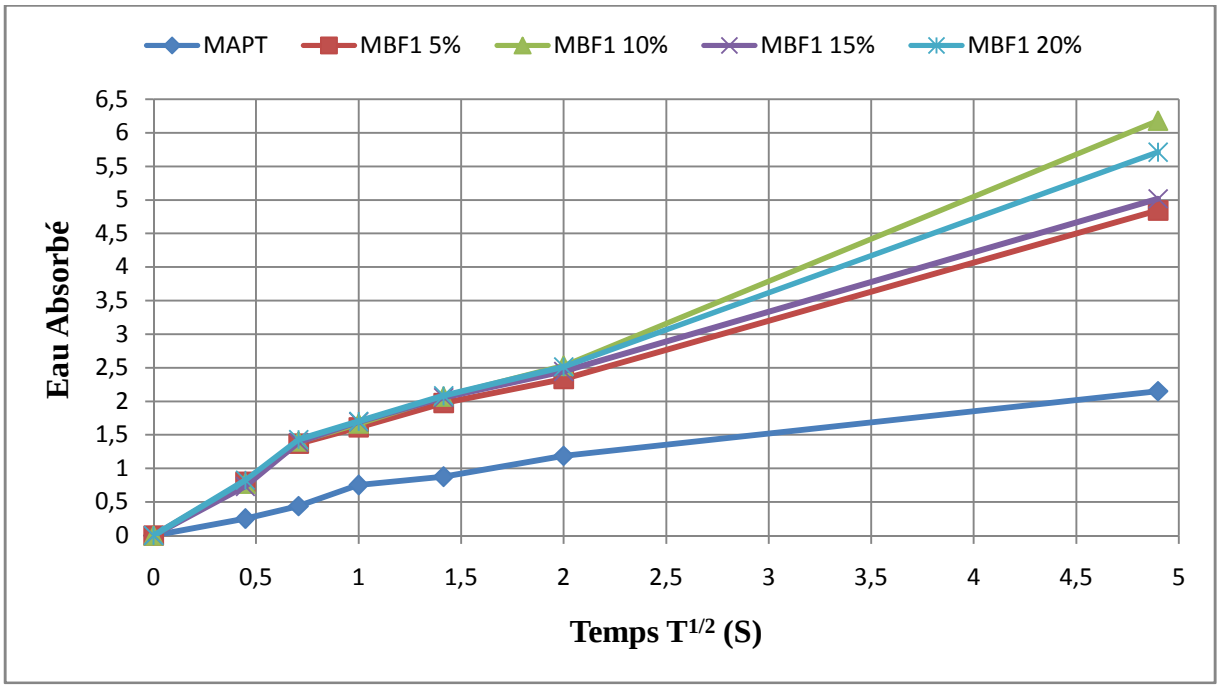


Figure III.17 : Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.

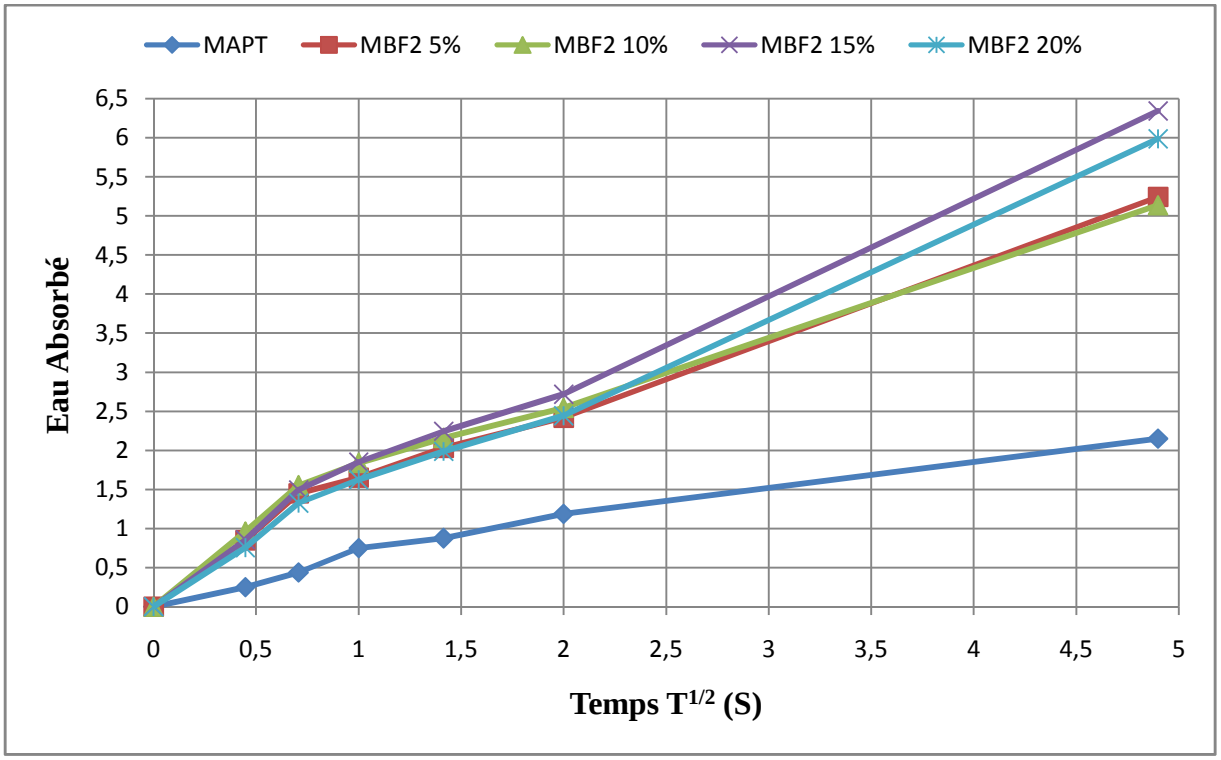


Figure III.18 : Absorption des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2.

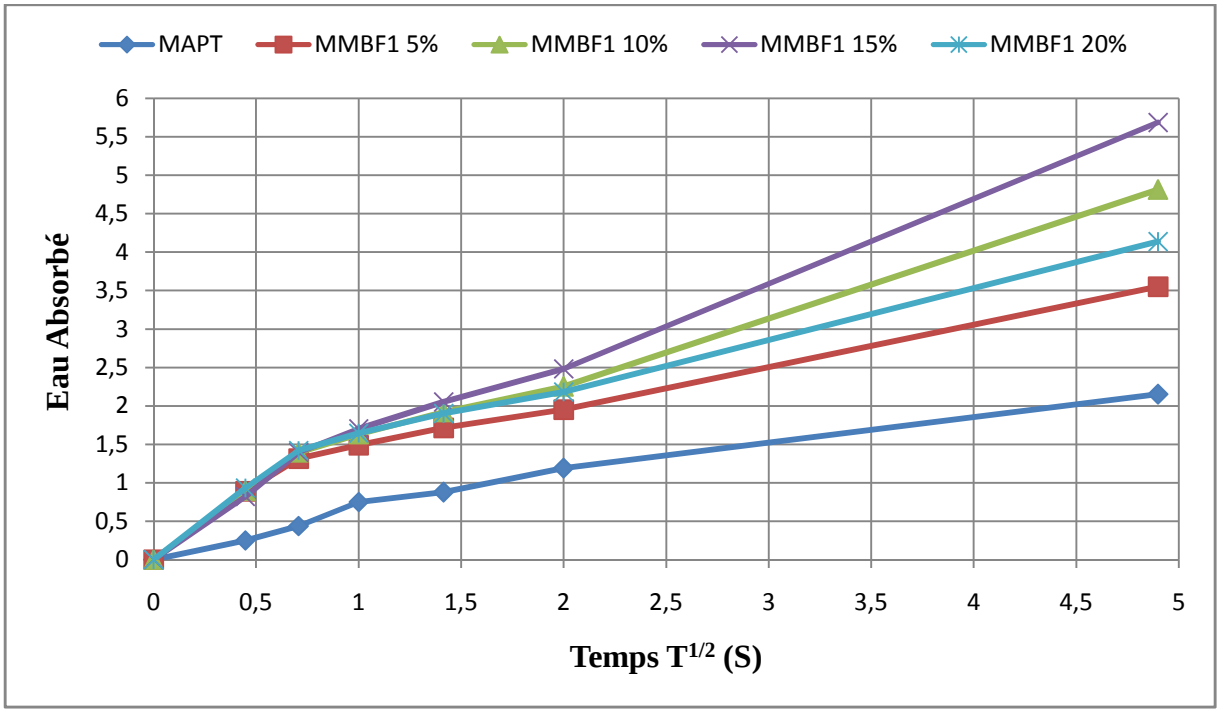


Figure III.19 : Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1.

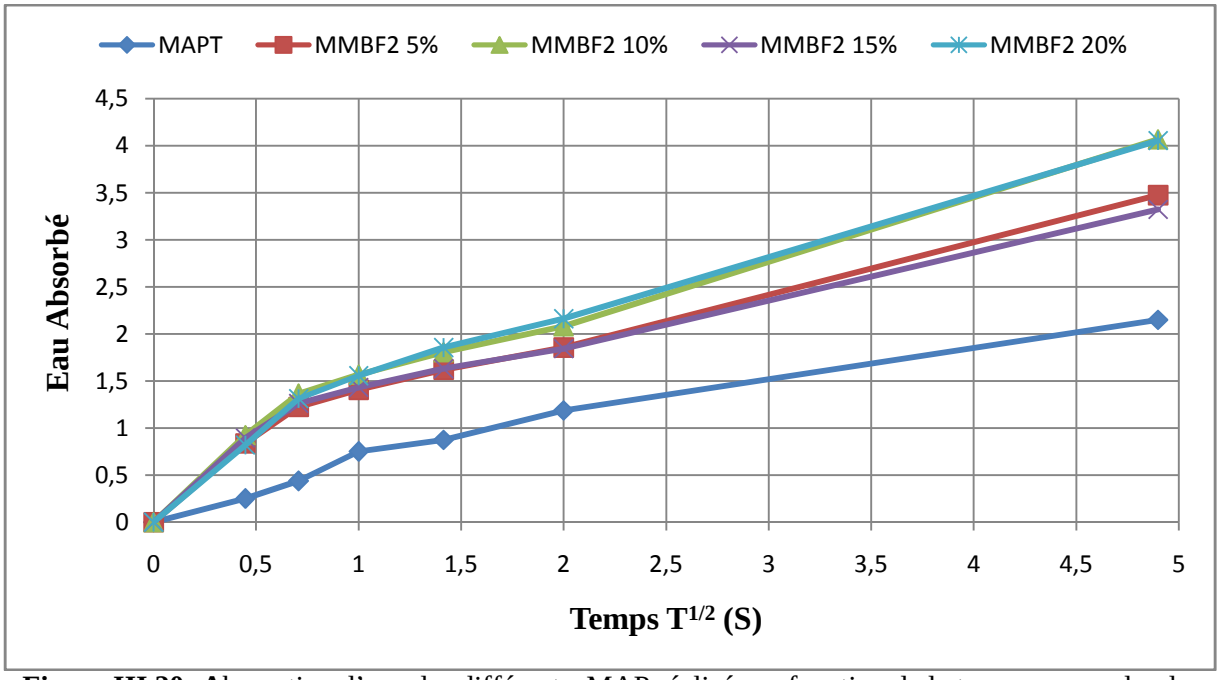


Figure III.20: Absorption d'eau des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2.

Des figures III.15 à III.20 on constate que les trois familles MAP à base de déchets de poudre de brique cuite, de marbre ou de la combinaison des deux absorbent plus d'eau que le MAP Témoin. Ceci semble être logique du faite que les deux types de poudre absorbent de l'eau malgré une différence soulignée entre les deux. Ce genre de comportement peut être négatif pour ce type de mortier dans le cas d'utilisation dans les régions à climat chaud, sec ou aride comme le sud Algérien.

III.3.3 - Retrait et Gonflement

a. Retrait

Les Figures III.21 à III.26 illustrent l'évolution moyenne du retrait à l'air libre (de séchage) des différent MAP réalisés au cours du premier mois après coulage.

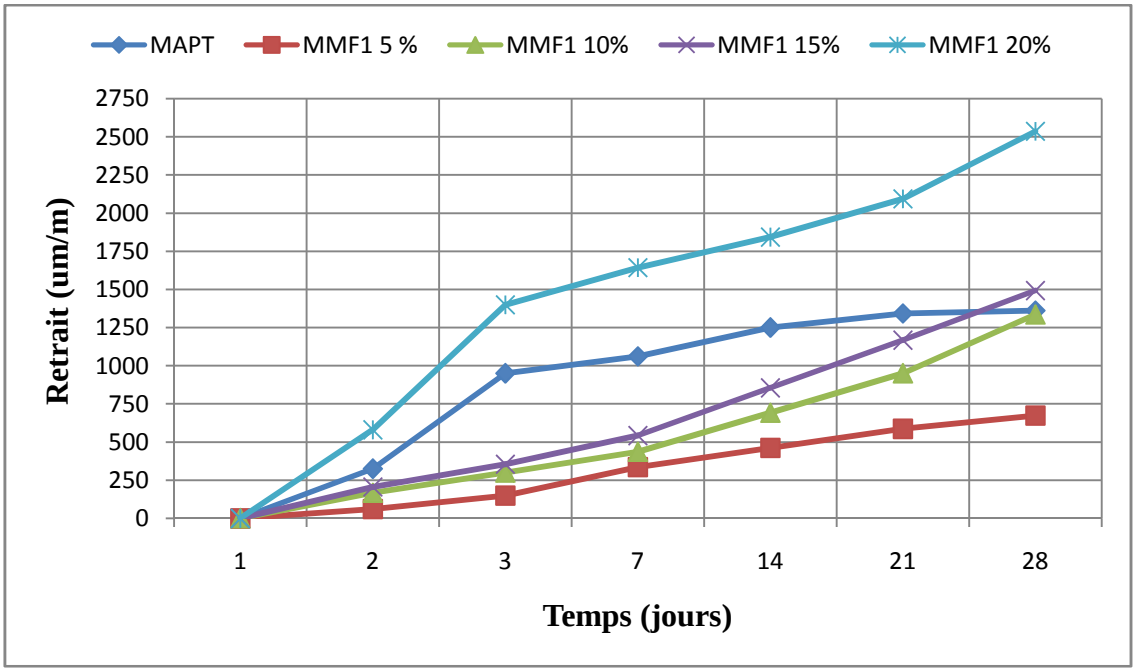


Figure III.21 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1.

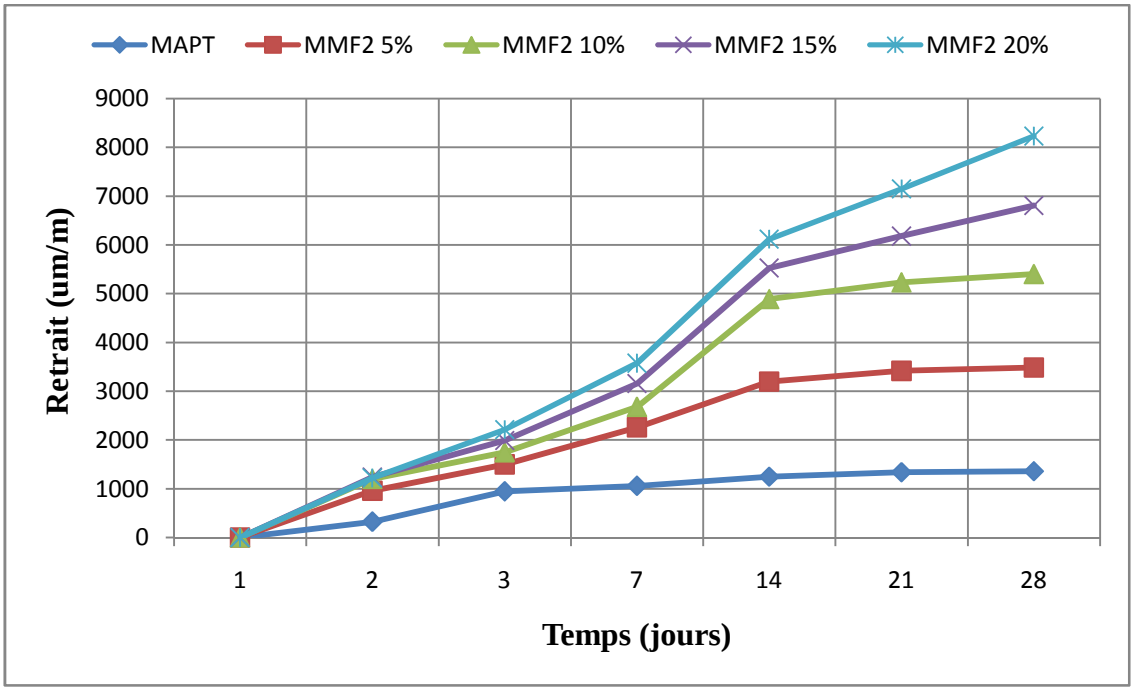


Figure III.22 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2.

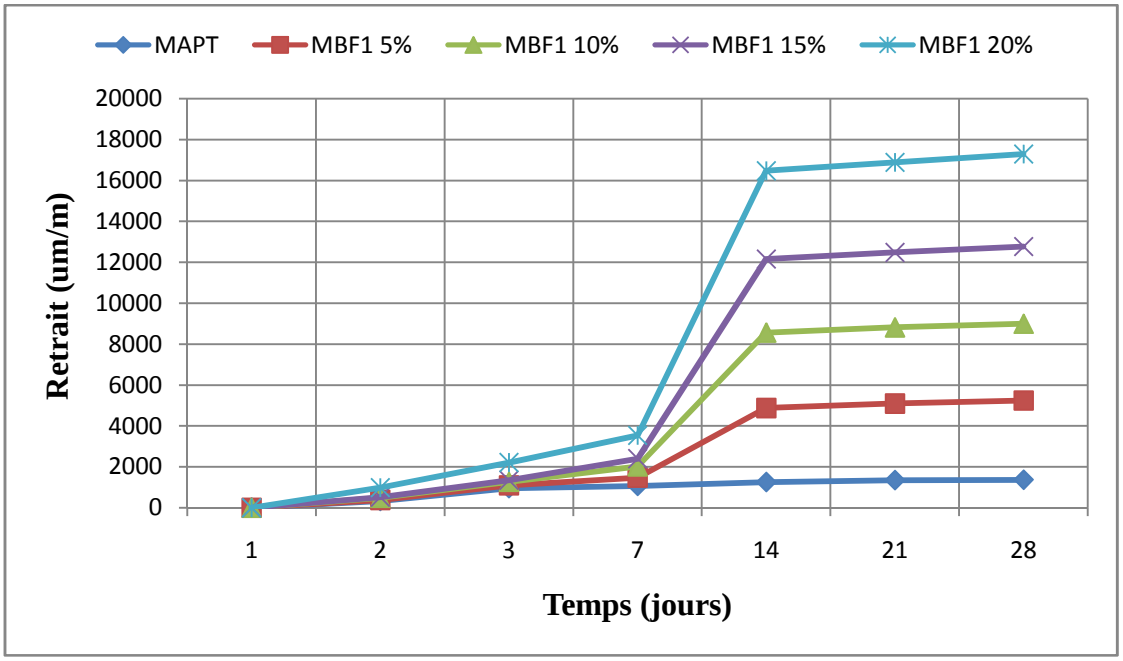


Figure III.23 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1.

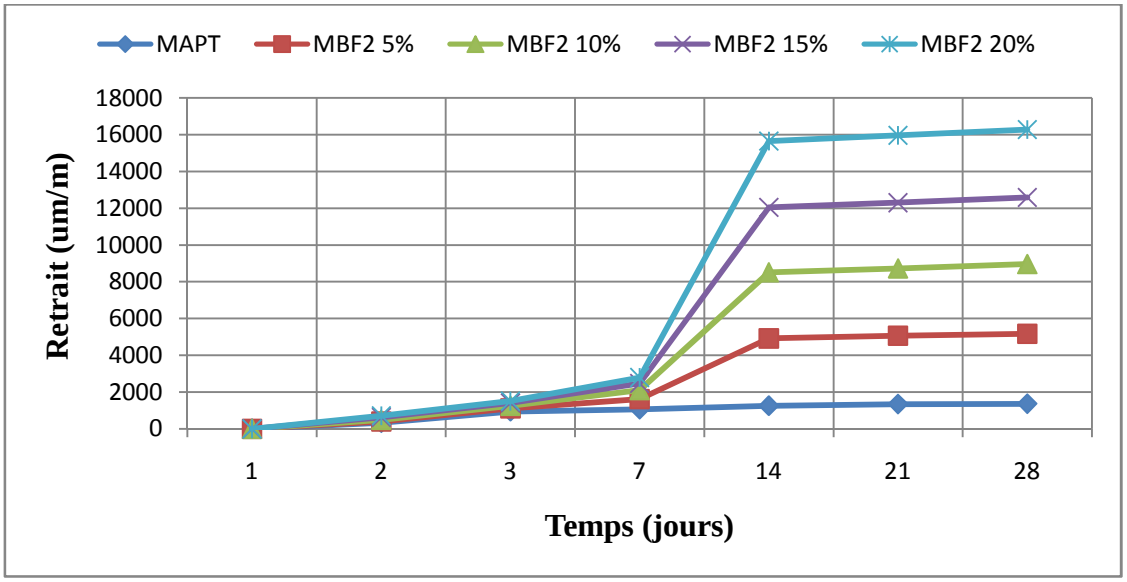


Figure III.24 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2

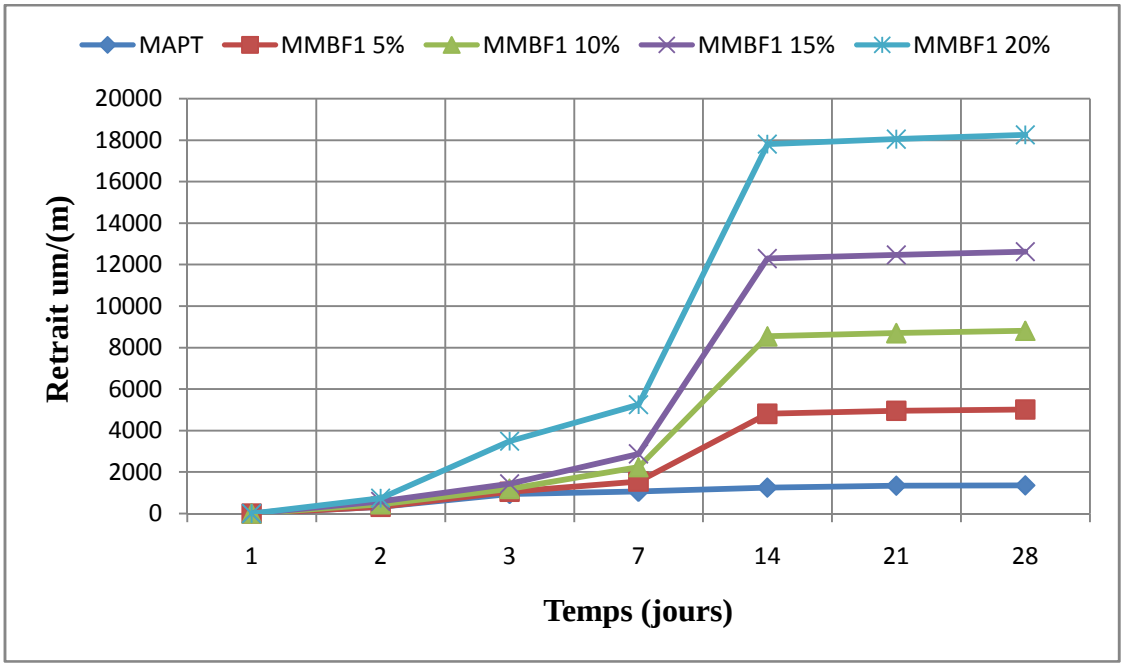


Figure III.25 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1

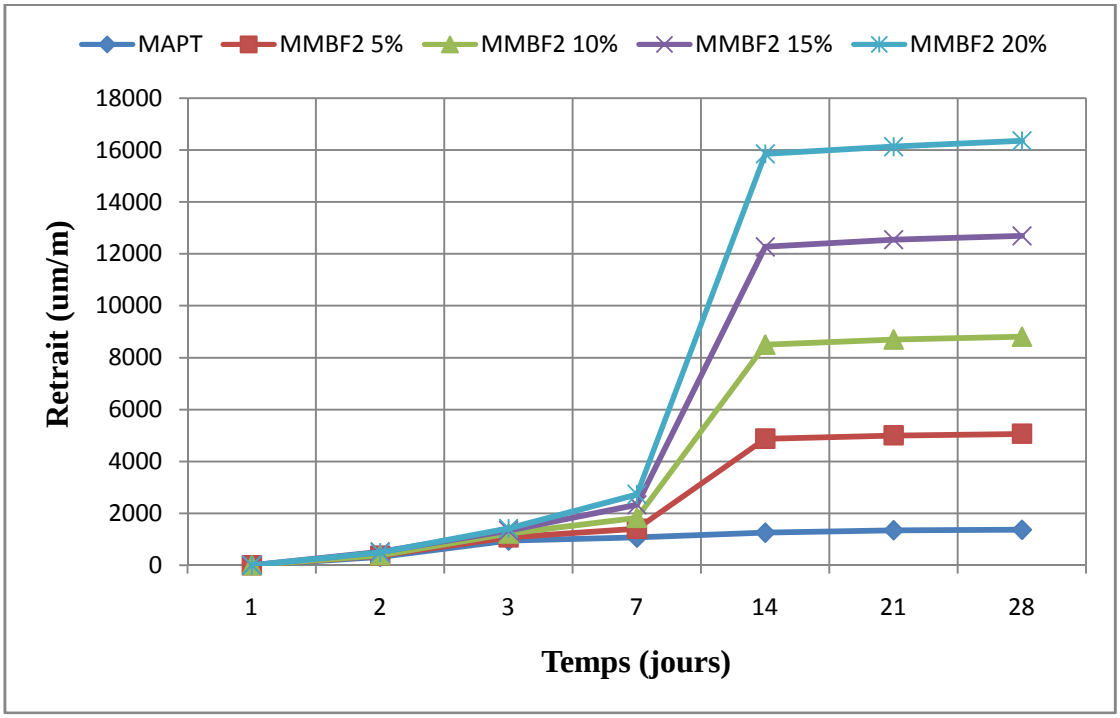


Figure III.26 : Evolution du retrait des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2

Les résultats présentés dans les figures III.21 à II.26 montrent clairement une différence dans l'influence du type de déchet utilisé et son pourcentage de substitution sur l'évolution du

retrait des trois failles de MAP réalisés. En effet, au cours du premier mois après le coulage, la poudre de marbre avec la Finesse 1 semble être bénéfique par la diminution (environ 60% pour 5% de substitution) du retrait à l'air libre des MAP avec un pourcentage de substitution ne dépassant pas les 15%. Ceci n'est pas valable pour le même type de déchet mais avec la finesse2 qui provoque une augmentation du retrait du MAP dès le premier pourcentage (5%) d'ajout en poudre de brique dans le ciment.

Concernant la poudre de brique et la combinaison entre la poudre de brique et celle du marbre dans le ciment, les deux ont un effet négatif provoquant une augmentation du retrait du MAP et ceci pour les deux finesses utilisée 1 et2.

b. Gonflement

De la même façon que le retrait, les résultats de l'essai de gonflement sont illustrés dans les Figures III.27 à III.32 suivantes :

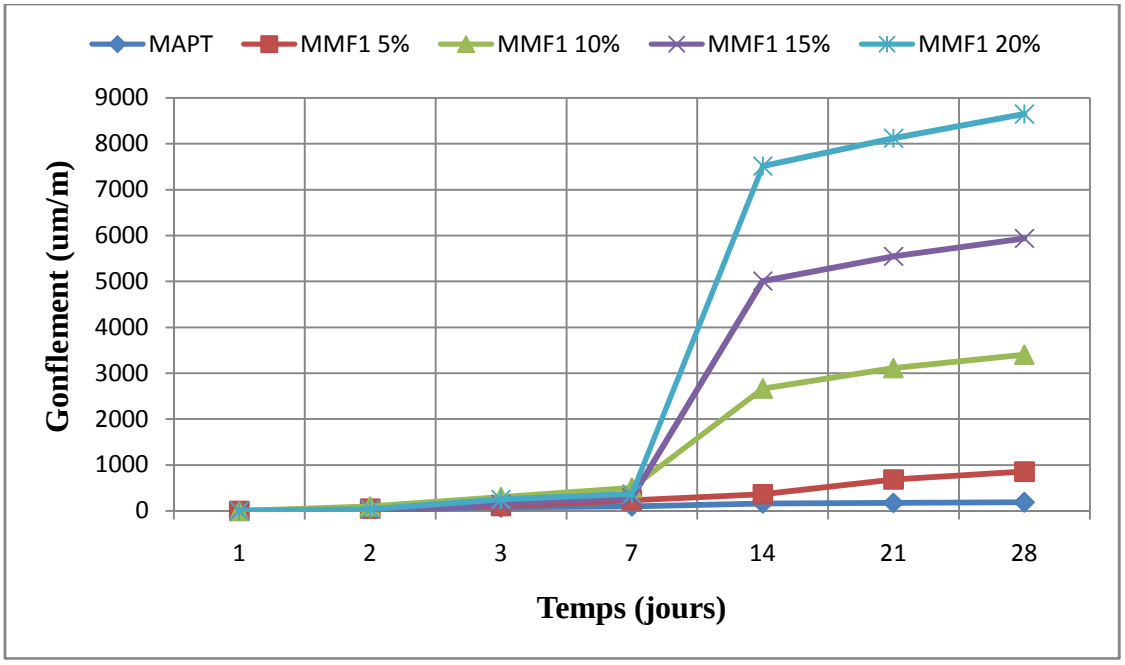


Figure III.27 : Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 1

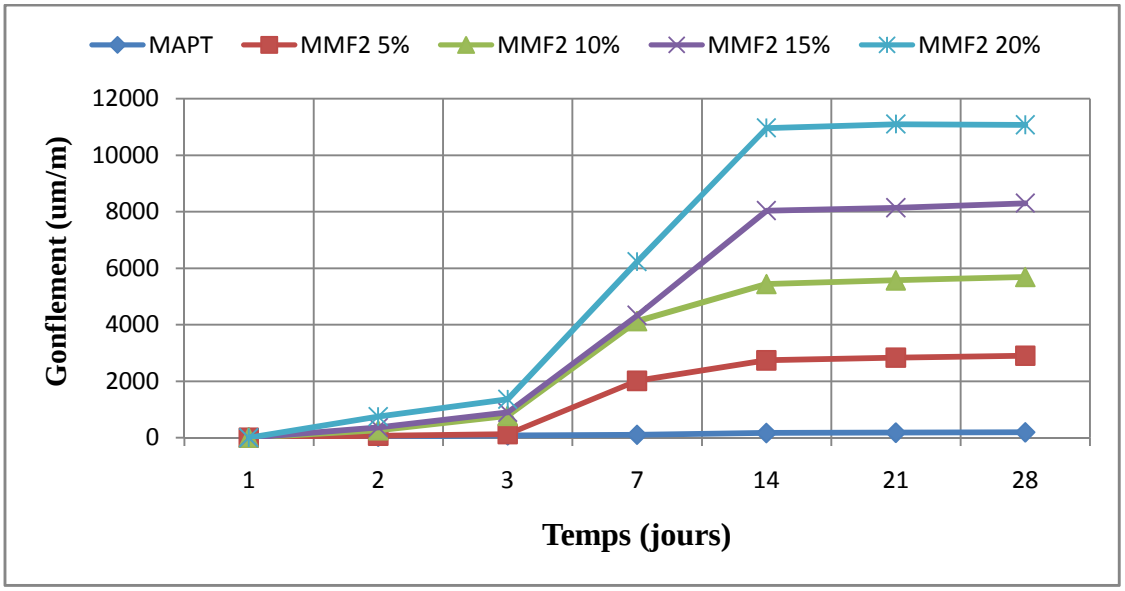


Figure III.28: Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre avec la finesse 2

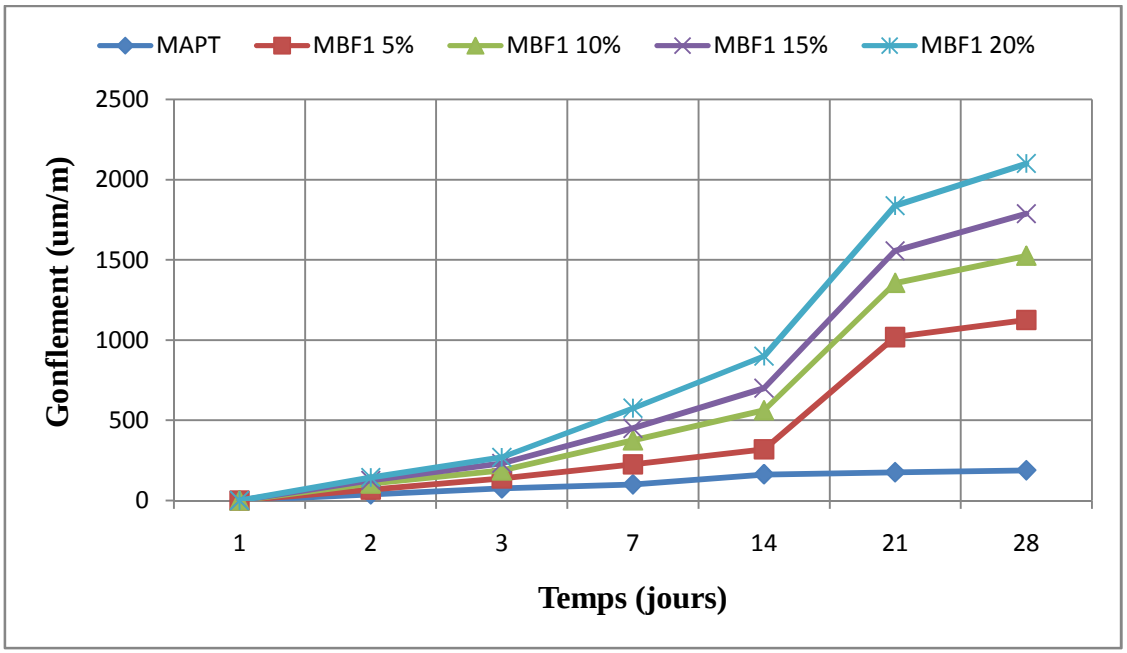


Figure III.29 : Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 1

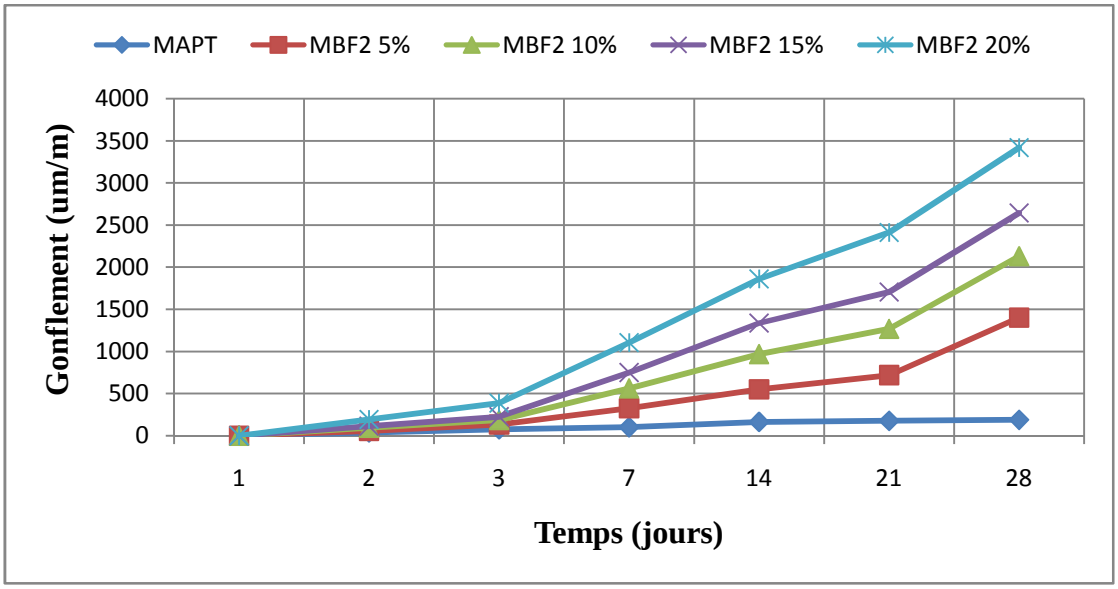


Figure III.30 : Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de brique cuite avec la finesse 2

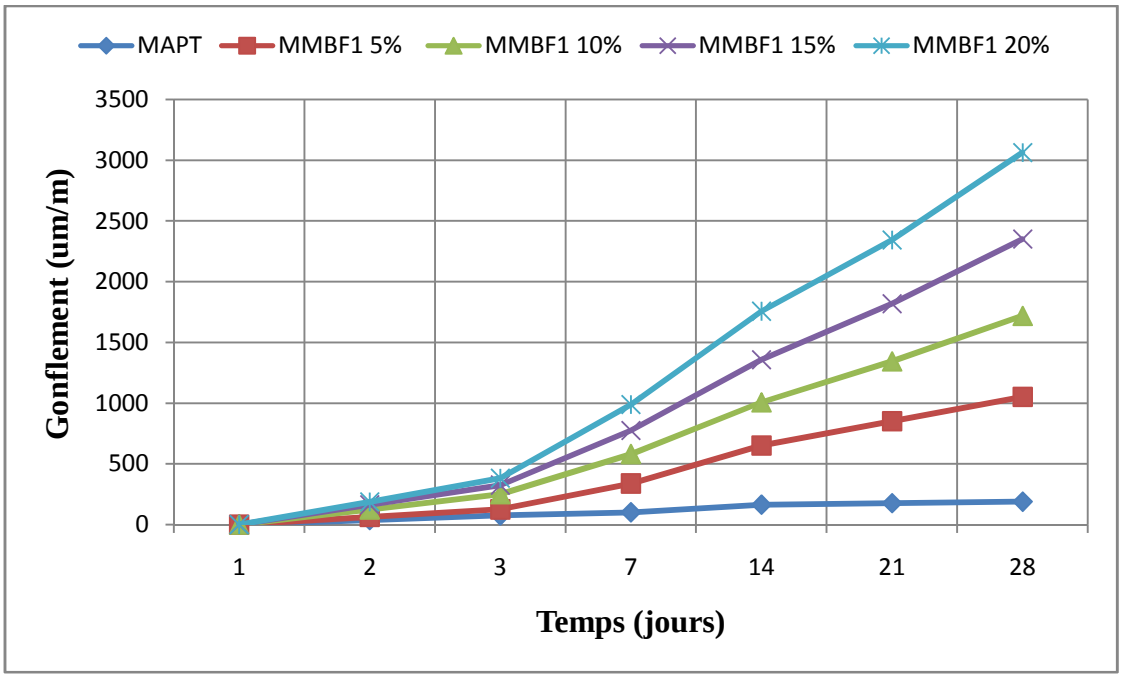


Figure III.31 : Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 1

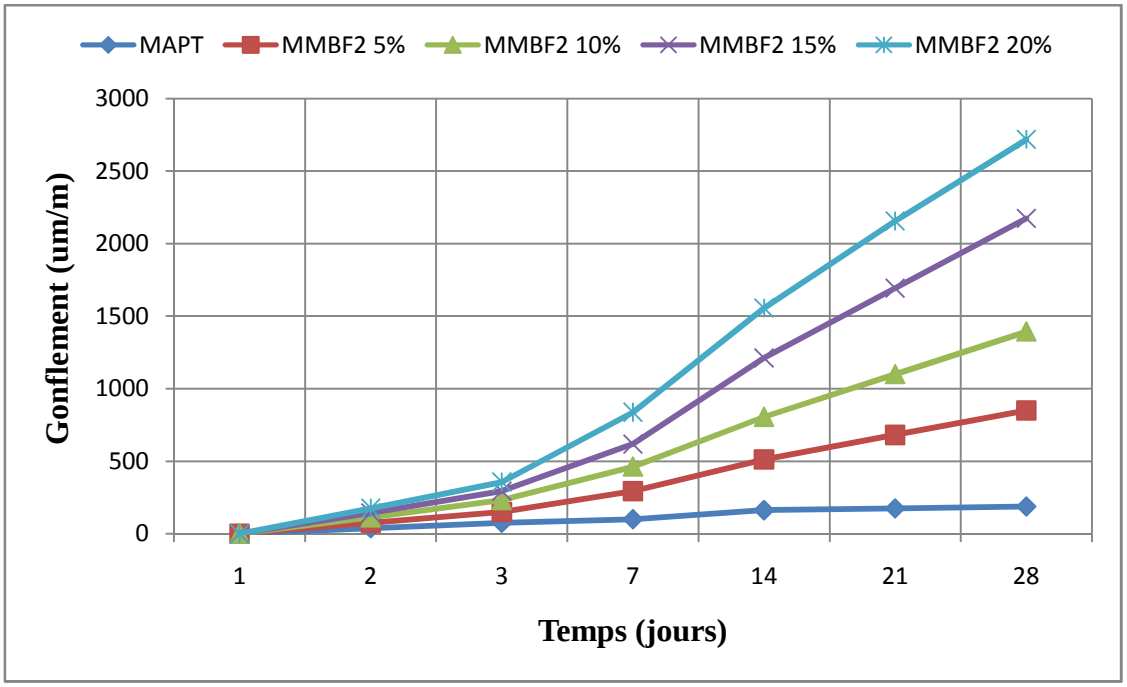


Figure III.32 : Evolution du gonflement des différents MAP réalisés en fonction de la teneur en poudre de marbre et de brique cuite avec la finesse 2

Des figures III. 27 à III.32 on remarque que le gonflement dans l'eau du MAP augmentent en fonction du pourcentage de substitution en marbre et brique cuite ou la combinaison entre les deux et ceci pour les deux finesses utilisées. Cette augmentation du gonflement est moins importante lors de l'utilisation de la poudre de marbre que celle de la brique cuite. Ceci est logique et revient eu pouvoir absorbant de l'eau de la poudre du marbre par rapport a celui de la brique cuite comme déjà souligné auparavant.

III.4 – Conclusion

A la lumière des résultats trouvés dans ce chapitre on peut conclure que :

- La poudre de marbre donne les meilleurs résultats à l'état frais et durci ainsi que l'approche de durabilité (absorption d'eau, retrait et gonflement) du MAP qu'avec la poudre de brique cuite.
- Un gain de résistance avec une amélioration de la durabilité (diminution du retrait) du MAP sont enregistré lors de la substitution du ciment par la poudre de marbre avec un optimum de 5%.
- La finesse 2 avec 5% de substitution de la poudre de marbre améliore plus (15%) la résistance à la compression du MAP que la finesse 1 (09%).
- Le MAP avec la substitution de 5% du ciment par la poudre de marbre peut être considéré comme matériau économique et sur la base il est fort recommandé aux ingénieurs du BTP et aux utilisateurs du ciment dans la construction.

Conclusions Générales

Le présent travail vise à fabriquer un matériau économique par la substitution du ciment par la poudre de marbre, la poudre de brique et la combinaison des deux dans le mortier autoplaçant. A travers le protocole utilisé pour la réalisation expérimentale et à la lumière des résultats trouvés on peut conclure que :

1. Il est possible donc de réaliser un MAP en substitution du ciment avec la poudre de marbre, la poudre de brique cuite et la combinaison des deux ensembles.

2. La fluidité du MAP augmente en fonction du pourcentage de substitution en poudre de marbre et celui de la combinaison entre la poudre de marbre et la poudre de brique cuite mais par contre, elle diminue avec le pourcentage de substitution en poudre de brique

3. La poudre de marbre donne les meilleurs résultats à l'état frais et durci ainsi que l'approche de durabilité (absorption d'eau, retrait et gonflement) du MAP qu'avec la poudre de brique cuite.

4. Un gain de résistance avec une amélioration de la durabilité (diminution du retrait) du MAP sont enregistré lors de la substitution du ciment par la poudre de marbre avec un optimum de 5%.

5. La finesse 2 avec 5% de substitution de la poudre de marbre améliore plus (15%) la résistance à la compression du MAP que la finesse 1 (09%).

6. La poudre de marbre avec la Finesse 1 semble être bénéfique par la diminution (environ 60% pour 5% de substitution) du retrait à l'air libre des MAP avec un pourcentage de substitution ne dépassant pas les 15%

7. Le MAP avec la substitution de 5% du ciment par la poudre de marbre peut être considéré comme matériau économique et sur la base il est fort recommandé aux ingénieurs du BTP et aux utilisateurs du ciment dans la construction.

Enfin, il est a souligné que le travail réalisé, malgré le peut de temps alloué pour la réalisation de la partie expérimentale (en moyenne 2 mois) et malgré les difficultés et le manque de moyens au laboratoire, le travail réalisé a été fait en apothéose et les résultats trouvés semblent être prometteurs avec une contribution appréciable dans le domaine de la construction en général et les matériaux de construction en particulier.

Recommandations

C’est clair qu’avec le peut de temps alloué, le travail réalisé a donné ses fruits mais à travers la bibliographie consultée ainsi que le volume d’essais réalisés aux laboratoires il fort souligné qu’il reste beaucoup de travail à compléter dans cet axe de recherche et sur la base on recommande aux futurs travaux de :

- Réaliser un béton autoplaçant (BAP) avec les même déchets utilisés et les même pourcentages des substitution ainsi que les même finesses pris en compte pour pouvoir comparer les résultats avec ceux trouver sur le mortier autoplaçant (MAP) réalisé ;

- Réaliser d’autres types de mortier et de béton avec les mêmes déchets utiliser ;

- Utiliser d’autres types de déchets sous formes de poudre en substitution avec le ciment pour la réalisation d’autre types de mortier et de béton dans le même axe de la recherche du coté économique du matériau à réaliser.

- Faire une étude technico-économique du MAP réalisé avec la poudre de marbre

Annexe

Fiche technique du MEDAFLOW 145

NOTICE TECHNIQUE 1101

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 :TAB 1 ,TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.
Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme .....Liquide
- Couleur .....brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec.....30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR** .

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Précaution d'emploi:
Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur notre site web : www.granitex.dz

Fiche technique du ciment

L'analyse chimique du ciment et composition du clinker

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 3,0
	Résidus insolubles (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 0,75
	Teneur en sulfates (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 3,5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 4,0
	Teneur en chlorures (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 0,10
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques $C_4AF + 2*C_3A$ (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 20
	Aluminates tricalciques C_3A (%) (NT 47.01, NT47.26)	≤ 3,0

Composition minéralogique du ciment

Exigences Mécaniques	Résistance à court terme (2 jours)	≥ 10,0 MPa
	Résistance courante (28 jours)	≥ 42,5 et ≤ 62,5 MPa
Exigences Physiques	Temps de début de prise	≥ 60 min
	Stabilité (expansion)	≤ 5 mm





-Masse volumique absolue :

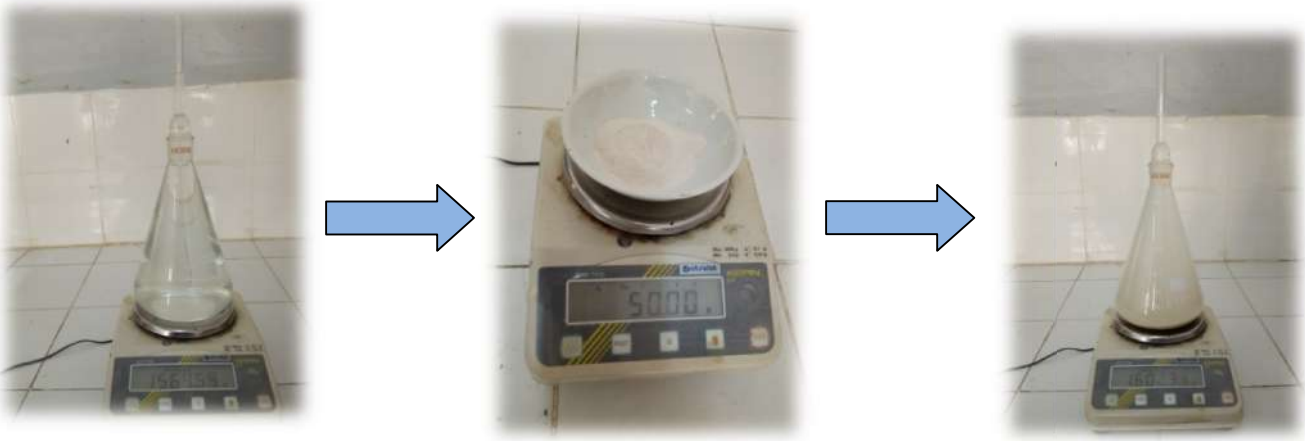
Pour la détermination de la masse volumique ; on doit suivre le protocole suivant :

- Déterminer avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au niveau du trait repère ;
- Déterminer avec précision la masse M_2 d'un échantillon de déchet sec (environ 50g) ;
- Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre ;
- Remplir d'eau, fermer le bouchon ;
- Amener le niveau de l'eau au niveau du trait repère ;
- Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'aire. Peser alors le pycnomètre, soitM_3.

La relation entre les différent poids mesurés est : $M_3 = M_1 + M_2 - M_2 \frac{\rho_w}{\rho_s}$



Protocole de l'essai de La masse volumique absolue pour les déchets de brique.



Protocole de l'essai de La masse volumique absolue pour les déchets de marbre.

-Finesse de mouture (Surface Spécifique de Blaine) :

Pour cet essai, on a :

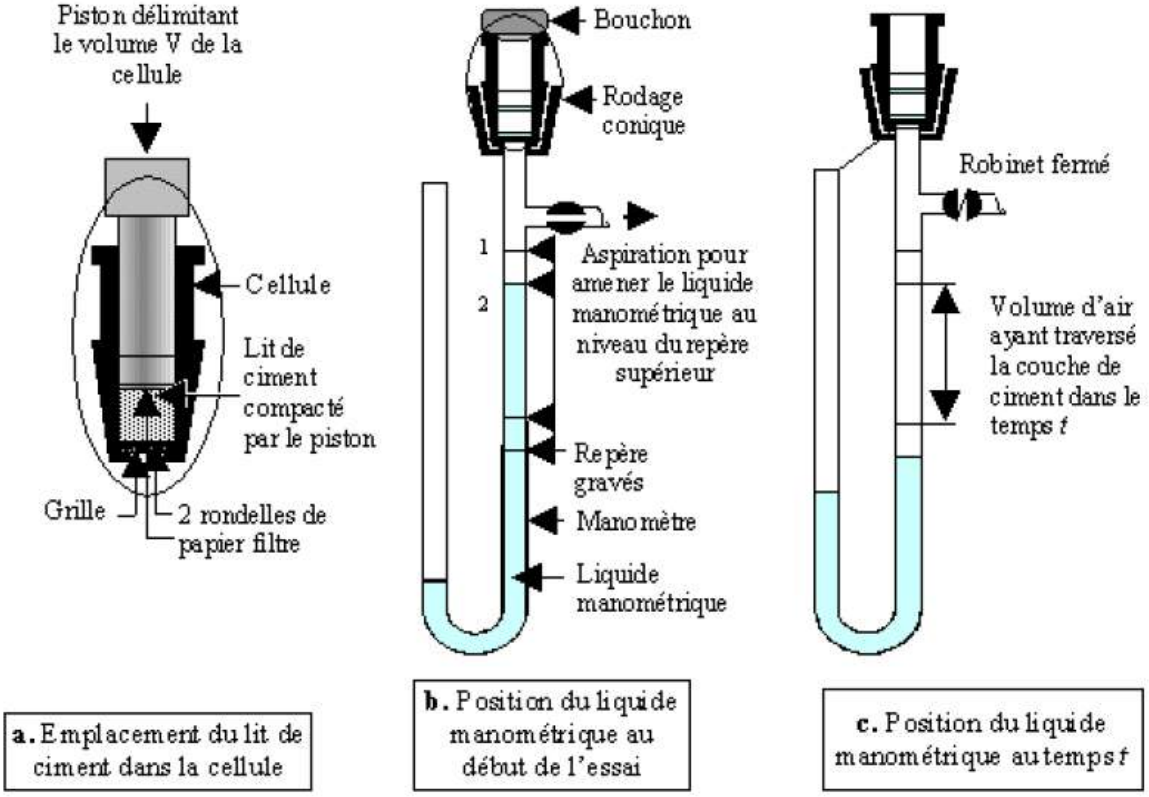
- Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier filtre ;
- Verser le ciment lentement dans la cellule en utilisant un entonnoir ;
- Donner quelque légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du ciment, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre ;
- Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule ;
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur ;
- Enduire de vaseline les parois extérieures de la cellule ;
- Placer la cellule sur l'appareil et enlever le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative) ;
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur (n°1).Fermer le robinet ;
- Lorsque le niveau de liquide atteint le deuxième trait (n°2), déclencher le chronomètre ;
- Arrêter le chronomètre quand le niveau de liquide atteint le troisième trait (n°3) ;
- Relever le temps écoule t1 à 0.2s près ainsi que la température de la salle à 0.1 °C près ;
- L'essai est répété une deuxième fois sur le même lit de ciment. Puis un deuxième lit est préparé et essayé de la même manière. Soit t la moyenne des quatre temps ainsi obtenus.

La surface spécifique (massique) du ciment SSB est calculée par la formule :

$$S_{cm^2/g} = K\frac{\sqrt{e^3}.\sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{0.1\eta}}$$



Perméabilimètre de Blaine



Principe de fonctionnement du Perméabilimètre de Blaine

Références Bibliographiques

[1] : Étienne B. et Georges-Bernard D., 1837, Règlements sur les arts et métiers de Paris, rédigés au 13e siècle, et connus sous le nom du Livre des métiers d'Étienne Boileau. Crapelet.

[2] : Bessa A, Philippe J. B. & Gallias J. L, **2004,** « Évaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers », 22iemes Rencontres universitaires de Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, France, 8p.

[3] : Dreux G. et Festa J., 1998, Nouveau guide du béton et ses constituants, 8ème édition,Eyrolles.

[4] : Centre D'information Sur Me Ciment Et Ses Applications: «Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre », France, 2006.

[5] : ASTM C270, □ Standard Specification for Mortar for Unit Masonry □, Norme Americaine, January 1999.

[6] : Groupe des ingénieurs, □ Mortiers et bétons hydraulique, matériaux de construction □, Edition Eyrolles, Paris, 1997.

[7] : « DTU 26.2. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques. »

[8] : BRAHMA.A «Le béton», Office des publications universitaires, **Alger, 1996.**

[9] : « DTU 20.1.Ouvrage en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs. »

[10] : K.H.KHAYAT, « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1er Novembre 1996.

[11] : OKAMURA.H, OZAWA, K(1994), « Self compactable high performance concrete in Japan » ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Tailand.

[12] : HAYAKAWA, M, MATSUOKA, Y., YOKOTA, K(1995). « Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan »ACI SP154, Las Vegas.

[13] : IZUMI, I., YONEZAWA, T., IKEDA, Y., MUTA,.A.(1995) « Placing 10 000 m^3 super workable concrete for guide track structure of retractable rof of Fukuoka Dome,Supplementary »Papers,2^{nd} CANMET\ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology,Las Vegas.

[14] : Khélifa R., «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, mémoire de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.

[15] : G.Dreux, J. Festa, «Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants », 8ème Edition, Edition Eyrolles.1998.

[16] : Daoud.Atef, «Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant contribution à la modélisation numérique de l'interface », Thèse de Doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, Juin 2003.

[17] : Holcim, « Le béton autocompactant », Version 26-11-2004.

[18] : M. Madani et Z. Abib « Les Adjuvants des Bétons » Séminaires sur les technologies des bétons Hilton 18 -19 Septembre 2004 ACC.

[19] : M. Venuat , « La pratique des ciments mortiers et bétons ». Edition le MONITEUR, 1976.15.

[20] : J. Baron et R. Sautrey , « Le béton Hydraulique : connaissance et pratique». Presse de L'école ponts et chaussées. 1995. 16.

[21] : M. El Barak, «Contribution de l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais», thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2005.

[22] : M. Saric-Coric, P. Aïtcin, «Béton à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice », Canadien Journal of Civil Engineering 30, pp. 414-428 (2003).

[23] : Khayat K.H., « Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials – An overview » Cement and Concrete Composites, 20, pp. 171-188, 1998. 18.

[24] : MAILVAGANAM, N.P. (1984) Miscellaneous admixtwes, tiré de: Concrete adniixture handbook, ~ropreties, science. and technolow - V.S. Ramachandran, Noyes Publication Park Ridge, New Jersey, US& p. 528-597.19.

[25] : KAWAI, T. (septembre 1987) Non-dispersibe un demater concrete trringpolpers,5 & International Congess on Polymers in Concrete, Brighton, England, 6 p.20

[26] : KHAYAT, K.R, (mars-avril 1995) Effects of antiwashout admütwes 02 fiesh conmete properties, AC1 Màterïals Journal, V.92, No. 2,. 8 p.

[27] : SKAGGS, C.B., RAKZTSKY, W.G., WHITAKER, S.F., (1994) Applications of rheological modzflers and superplasticizers in cementitious system, Proceedines of the Fourth International Conference of the ACI, Montréal, Canada, p. 189-207.

[28] : J. Trägardh, « Microstructural features and related properties of self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 175-186, 13-15 September 1999.

[29] : Debieb F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et sulfates. Thèse PhD, Departement génie civil, Université Houari Boumediene Algiers ; 2007.

[30] : Loi N° : 01-19 du 12 / 12 / 2001, Relative à la Gestion, au Contrôle et à l Elimination

des déchets, Journal Officiel de la Republique Algerienne Democratique et Populaire Démocratique et Populaire, N° : 77 du 15 / 12 / 2001.

[31] : Pimienta. p et remond. „„Bétons de déchets : prévenir les risques"", CSTB magazine, n°109, novembre 1997, pp. 28-30

[32] : Debaili F. Journées d'Information sur la Promotion de L'Inverstissement dans la Fabrication des Produits Rouges ', Revue Construire N°34, CNAT, Alger, 1990.

[33] : Zhen H. D. etChi S. P., 2014, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

[34] : Kenai S. et Debieb F., 2011, Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fin granulats de briques et de granulats concassés, Journal of Materials and Structures, N° 44, pp. 815-824.

[35] : TECHNIQUE DE L'INGENIEUR ., Doc. C3370, 1989-1991.

[36] : Ramachandran V. S., „Utilisation des déchets et Sous-produits comme Granulats du Béton ', Conseil National de Recherches Canada,[en ligne], 2004,Disponible sur http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd215f.html, (consulté en 2004).

[37] : Brunetaud X. et Jausserand L., «Travaux pratiques ; Ciment et bétons», Ecole Polytechnique de L'Université d'Orléans, 2005.

[38] : Sedran T., «Les Bétons Autonivelants», bulletin LCPC 196, réf, 3889, pp, 53-60, mars-avril 1995.

[39] : Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.

[40] : Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants », http://www.betoncouillard.com, Internet, 2008.

[41] : Turcry P., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.

[42] : Josserand L, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.

[43] : Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants », http://www.betoncouillard.com, Internet, 2008.

[44] : T. Noguchi, S.G Oh, F. Tomosawa, « Rheological approch to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete », Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, suede, pp. 59-70, 1999.

[45] : T. Nawa, T. Izumi, Y. Edamatsu «State- of- the-art- report on materials and design of self compacting concrete» Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, ed K. Ozawa

and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, 166-190.

[46] : S. Assie, G. Escadellas, G. Marchese, « Durability of self-compacting concrete » 3rd International Symposium on Self Copacting concrete, pp 665-662, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.

[47] : L.Azzouz ; M.Bouhicha ; S.Kenai ; M.Hadjoudja : Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes (PROCEDINGS du 1er colloque national de génie civil : matériaux de construction, novembre 2000, université de Mostaganem).

[48] : Article sur net Publié le 20 mai 2015 | Par Martin Dubois.

[49] : BOURMATTE N., 2004, Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, thèse de magister, Université de Constantine, Algérie.

[50] : Dehouse N., le Jeune A., "Les mortiers et bétons renforcés de fibres", Bruxelles, C.S.T.C, Revue 1974, N° 2, 15 p

[51] : ALVISETI " Matériaux de Terre Cuite " ; Techniques de l'Ingénieur ; 1994.

[52] : DELEBECQUE R.,"Éléments de Construction Bâtiment", Edition Delagrave; 1990.

[53] : VENUAT M., "Produits Silico–calcaire "Techniques de l'Ingénieur ; 1994.

[54] : RENAUD H.,"Murs Poutres Planchers", Edition Eyrolles ; 2002.

[55] : ARABI N.,"Etude des Brique Silico-calcaire à Base de Laitier Granule", Mémoire de Magister Université De Annaba ; 1988.

[56] : KHELAFI H.,"Contribution à l"étude expérimentale de la brique silicocalcaire", semenaire Université BISKRA ; 2000.

[57] : Bektas F.Wang K. et Ceylan H.2008,Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability, Civil Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, United States.

[58] : Aouni M, «valorisation de la poudre recyclée dans le mortier de ciment », Mémoire de Master , Université de medea, 2014.

[59] : Al-Manaseer, A.A., T.R., Dalal.,1 997. "Concerte containg plastic agrégats", Concret International, 47– 52.

[60] : NF EN 933-1, 1997. « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des Granulats. Partie 1:Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[61] : Akhtaruzzaman A.A. et Hasnat A., "Properties of Concrete Using Crushed Brick as Agregate ", Concrete International, Vol.5, N° .2 ,Feb. 1983, p. 58-63.

[62] : Devenny A. et Khalaf F.M., "The Use of Crushed Brick as Coarse Agregate in Concrete ", Masonry International, Vol. 12, N° .3, 1999, p.81-84.

[63] : BARKAT A, « Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton », Mémoire de magister, Université de Ouargla, 2006.

[64] : BENAKLI S, « Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction », Mémoire de magister, Université de Tizi-ouzou.

[65] : NF P 15-452, 1988, «Essai pour béton frais, Mesure du temps d'écoulement des béton et de mortier aux maniabilimètre, AFNOR.

[66] : Marzouk, O.Y, Dheilly, R.M., Queneudec, M., 2007. Valorisation of post-consumé waste plastic in cementations concrete composites. Waste Management 27, 310–318.

[67] : Kleinlogel A., " l"Infleunce des Divers Eléments Physico - Chimique sur les Bétons",Editions Dunod, Paris, 1960, p. 75 140.

[68] : Ramachandran V. S., Utilisation des déchets et Sous – produits comme Granulats du Béton , Conseil National de recherches Canade, [en ligne], 2004, Disponible sur : http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd215f.html, (consulté en 2004).

[69] :B.E.D Import Blog sur la pierre naturelle.

[70] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_marbres_modernes

[71] : A.H. Mohammed Belhadj « Valorisation du déchet de marbre et de la pouzzolane naturelle dans les mortiers»

[72] : Haddadou.N, Thèse de Doctorat « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre », UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.

[73] : SONEBI M, BARTOS P J M, " Hardened SCC and its bond with reinforcement ", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, 13-15 September, 275-89, 1999.

[74] : SAHMARAN M, CHRISTIANTO H A, YAMAN I O, "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars"Cement and Concrete Composites 28(5): 432–40, 2006.

[75] : LANE R. O, BEST J F, "Properties and use of fly ash in Portland cement concrete", Concrete International, 4(7): 81–92, 1982.

[76] : YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y, "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio", Cement and Concrete Research, 35(3): 532–9, 2005.

[77] : CHIBANI.N et HOUARI.H « VALORISATION DES FINES DE DECHETS DE MARBRE RECYCLEES DANS LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLACANT (BAP) », Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie.

[78] : UYSAL M, SUMER M, "Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures", Construction and Building Materials, 25: 4112-20, 2010.

[79] : UYSAL M, YILMAZ K, "Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete", Cement and Concrete Composites, 33: 771-6, 2011.

[80] : UYSAL M, YILMAZ K, IPEK M, "The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete", Construction and Building Materials, 27(1): 263-70, 2011.

[81] : BONAVETTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F., "Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy", Cement and Concrete Research, 33(6): 865–71, 2003.

[82] : PERA J, HUSSON S, GUILHOT B, "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement and Concrete Composites, 21(2): 99–105, 1999.

[83] : HEIKAL M, EL-DIDAMONY E, MORSY M. S, "Limestone-filled pozzolanic cement", Cement and Concrete Research, 30(11): 1827–34, 2000.

[84] : ZHU W, GIBBS J C, "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, vol.35, n° 8, p.1457-1462, 2005.

[85] : VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, TSIVILIS S, « Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements », Cement and Concrete Composites, vol.27, n° 2, p.191-196, 2005.

[86] : TOPÇU I B, BILIR T, UYGUNOGLU T, "Effect of waste marble dust content as filler on properties of selfcompacting concrete", Construction Building Materials, 23(5): 1947–53, 2009.

[87] : Tennich.M et Ben Ouezdou.M « Béton autoplaçant à base des déchets de marbreries et de carrelage » ; Université de Tunis El Manar-Tunisie.

[88] : SABLOCRETE, (1994) « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

[89] : NF EN 196-6 Avril 2012 Méthodes d'essai des ciments - Partie 6 : détermination de la finesse.

[90] : NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[91] : NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[92] : P.L. Domone, J.Jing, « Properties of Mortar for Self Compacting Concrete »,

Proceedings of RILEM International Symposium on SCC, Stockholm, September 1999, RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[93] : CEN EN 196-1 Nome française CENEN 196-1 ≪ Méthode d'essais des ciments, partie I : ≪ Détermination des résistances mécanique ≫ AFRON, Paris, Aout 1995.

[94] : NF EN 1015-18, 2002, Méthodes d'essais sur mortier de maçonnerie, Partie 18 : Absorption d'eau par capillarité du mortier durci.

[95] : DUPAIN et LanchonR., 2000, «Granulats, sols, ciment et béton: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire»,2emeédition CASTEILLA,Paris, France.

[96] : NFP18-404,1989, Normes AFNOR: «Essais pour béton durci-Partie1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules ».

[97] : Neville A., Geon M., 2000, Propriétés du béton, traduit par CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBOOKE-Laval-éditions Eyrolles.

[98] : Nasr-Eddine Kedjour, 2003, Le laboratoire de béton, office des publications universitaires, Algérie.

[99] : Chaid, R., Jauberthie, R., Boukhaled, A., Talah, A., « Endommagement, Déformations et microstructure des BHP de pouzzolane », First International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries, 2009, pp. 12- 14.

[100] : Kenai S, Debieb F, Azzouz L (2002) Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. In: Sustainable concrete construction. Procedings of an international conference, Dundee, Sept. 2002. Thomas Telford, London, pp 383–392.

Conclusions Générales et Recommandations

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

CHAPITRE II : Matériaux et Essais

CHAPITRE III : Résultats et interprétation