République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr.Yahia Farés de MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la Matière
Filière Génie Civil

Memoire de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures

Thème

Influence du Sable Bitumineux Sur le Comportement du Mortier Autoplaçant

Etudié par :

M^elle^. BELLABD Amina

M^elle^ .BENZIANE Souad

Proposé et dirigé par :

Pr. DEBIEB Farid

Dr. SETTARI Chafika

Juin 2016


بسم الله الرحمن الرحيم

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

ٱللَّهُ لَآ إِلَٰهَ إِلَّا هُوَ ٱلْحَىُّ ٱلْقَيُّومُ ۚ

لَا تَأْخُذُهُۥ سِنَةٌ وَلَا نَوْمٌ ۚ لَّهُۥ مَا فِى ٱلسَّمَٰوَٰتِ وَمَا فِى ٱلْأَرْضِ ۗ

مَن ذَا ٱلَّذِى يَشْفَعُ عِندَهُۥٓ إِلَّا بِإِذْنِهِۦ ۚ يَعْلَمُ مَا بَيْنَ أَيْدِيهِمْ وَمَا خَلْفَهُمْ ۖ

وَلَا يُحِيطُونَ بِشَىْءٍ مِّنْ عِلْمِهِۦٓ إِلَّا بِمَا شَآءَ ۚ

وَسِعَ كُرْسِيُّهُ ٱلسَّمَٰوَٰتِ وَٱلْأَرْضَ ۖ وَلَا يَـُٔودُهُۥ حِفْظُهُمَا ۚ

وَهُوَ ٱلْعَلِىُّ ٱلْعَظِيمُ

سُورَةُ البَقَرَةِ ٢٥٥

tara ali

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces langues années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Pr DEBIEB Farid et Dr SETTARI Chafika pour leurs disponibilités, leurs aides durant tout le déroulement de ce projet. Grâce à leurs dévouements, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

Nous adressons nos sincères remerciements Mr YERKI et Melle RAHAL et Mm ZEROUAK, qui ont su comment nous guider toute la durée du travail et nous ont fait bénéficier de sons orientations tant instructive.

A tous les enseignants de l'Université, et surtout nos professeurs durant toutes les années, pour la connaissance qu'ils ont toujours sus nous transmettre et pour leur disponibilité dans la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont de bien vouloir assister à cette soutenance.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.
Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

On leur dit merci de tout notre cœur.

Merci

BELLABD ♡ BENZIANE

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations

Introduction général

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1.Notion de déchets ……..……..01
I.1.1.Introduction ……..…….01
I.1.2.Définition ……..…….01
I.1.3. Différents types de déchets……...……02
I.1.3.1. Déchets ultimes ……..……02
I.1.3.2. Déchets inertes ……..……02
I.1.3.3. Déchets assimilés ……..……03
I.1.3.4. Déchets verts ……..……03
I.1.3.5. Déchets organiques ……...……03
I.1.3.6. Déchets industriels banals (DIB) ……..……03
I.1.3.7. Déchets dangereux ……03
I.1.3.8.Déchets routier ……..…04
I.1.4.Qualification des déchets liés à la route ……04
I.1.4.1.Les déchets inertes……..……04
I.1.4.2.Les déchets industriels banals ……04
I.1.4.3.Les déchets industriels spéciaux……..…04
I.1.5. Recyclage des déchets ……..……05
I.1.5.1. Définition ……..……05

I.1.5.2.Les types des déchets recyclés ……...……05
I.1.5.3.Les matériaux bitumineux recyclés ……...…06
I.1.5.4. Définition et Réglementation des matériaux hydrocarbonés ……...……10
I.1.5.5. Terminologie et identification des déchets ……...……12
I.1.5.6.L'utilisation des granulats issus de recyclage……13
I.1.5.7. Matériaux de recyclage autorisé ……...……14
I.1.6.Conclusion ……15
I.2.Le béton autoplaçant……...…16
I.2.1.Introduction……....16
I.2.2 Historique ……..……16
I.2.3 Définition d'un béton autoplaçant…… 17
I.2.3.1 Avantages techniques……18
I.2.3.2 Avantages socio-économiques……18
I.2.4 Les composants d'un BAP ……..……9
I.2.4.1 Les granulats ……19
I.2.4.2 Le ciment……..……21
I.2.4.3 Les ajouts minéraux……..…22
I.2.4.4 Les Super plastifiants……22
I.2.4.5 L'eau de gâchage……..25
I.2.4.6 Les agents de viscosité…….….25
I.2.5 Propriétés d'un BAP ……..26
I.2.5.1 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état frais……26
I.2.5.2 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci……...…32
I.2.6 Caractérisation des bétons autoplaçant……..42
I.2.6.1 Essai sur mortier frais……42
I.2.6.2 Essai sur béton frais……....43
I.2.7 Formulations et Compositions des BAP ……...48
I.2.7.1 Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon) ……49
I.2.7.2 Formulations modifiées de la méthode générale ……..…51
I .2.7.3 Autres formulations……...52
I.2.8 Comportement des mortiers à base des fines recyclés……..…52
I.2.8.1 Introduction…….....52
I.2.8.2. Le mortier à l'état frais ……....52
I.2.8.3.Le mortier à l'état durci……..…54

I.2.9 Comportement des BAP à base des granulats recyclés……57
I.2.10 Conclusion…….…….……58

Chapitre II : Matériaux et essais

II.1. Introduction…….……59
II.2.Matériaux utilisées …….…….....59
II.2.1 le ciment …….…….....59
II.2.1.1.Définition…….. ……..…….....59
II.2.1.2. Domaine d'utilisation…….....60
II.2.2.Granulats ordinaires…….……62
II.2.2.1. Sable roule…….…..62
II.2.2.2. Sable de concassage…….62
II.2.3. Granulat recycles ……..……...63
II.2.4. L'eau de gâchage .....…..63
II.2.5. Superplastifiant……..…. 63
II.3. Préparation des matériaux .....…...64
II.4. Equipment nécessaire ……..…65
II.5. Essais effectués sur les matériaux .....……..66
II.6. Formulation des mortiers ……....68
II.7. Malaxage du mortier ……...69
II.8. Préparation et conservation des éprouvettes ……...……69
II.9. Essais effectués sur mortier…….…70
II.9.1.Essai à l'état frais …….…70
II.9.1.1. Densité……..…70
II.9.1.2. Essais d'étalement au mini-cône……..70
II.9.1.3. Essai d'entonnoir en v (V-funnel) …….….71
II.9.2. Essai à l'état durci ……...72
II.9.1.1. Densité…….72
II.9.2.2. Résistance à la traction…….…73
II.9.2.3. Resistance à la compression ……74
II.9.2.4. Essai de retrait et gonflement…….….75
II.9.2.5. Essai d'absorption d'eau par capillarité……...77
II.9.2.6. Effet de feu……..……77

II.9.2.7. Effet des sels……78
II.9.2.8. Effet de température ……...……79
II.10. Conclusion ……80

Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1. Introduction……82
III.2. Essais effectués sur granulats…….……82
III.1.1. Analyse granulométrique ……...82
III.2.2. Masse volumique ……..… 83
III.2.3. Equivalent de sable ……83
III.3. Essais effectués sur mortier……84
III.3.1. Etat frais ……84
III.3.1.1. Densité ……....84
III.3.1.2. Etalement au mini cône ……..84
III.3.1.3. V- funnel……85
III.3.2. Etat durci ……86
III.3.2.1. Densité ……86
III.3.2.2. Compression simple ……...87
III.3.2.3. Traction par flexion ……88
III.3.2.4. Absorption d'eau par capillarité …….……90
III.3.2.5. Retrait et gonflement ……..…92
III.3.2.6. Effet de température ……...……95
III.3.2.7. Effet de feu ……..…98
III.3.2.8. Effet des sels ……100

Conclusions générales

Recommandations

Références bibliographiques

Annexe

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprime la gratitude ; l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que je dédie ce travail :

A la lumière de mes jours, la source de mes effort, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; Maman que j'adore que dieu vous procure bonne santé et long vie.

Ce travail est dédié à mon père décédé, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, a tous mes frères : Smain, Ibrahim, Med Isaak et le petit Islam et a ma sœur Yasmine.

A toute la famille : « BELLABD » et « ALI TURKI ».

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours a mes cotés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin de vie et d'études : dhia, et à ma binôme : Souad.

A touts mes aimables amis, et sœurs de cœur, mes collègues d'études, mes collègue de travail.

A madame Ch.SETTARI : cette humble dédicace ne saurait exprime mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie pleine de bonheur.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

Amina

Dédicace

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :

*.**Mon très cher père,** pour tous les sacrifices consentis pour la réussite de mes études, je ne trouverai jamais les mots justes pour te remercier.*

***et ma très chère mère**, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé. Que ce présent soit le témoignage de ma reconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté. Puisse dieu te permettre de jouir du produit de ton effort.*

A Mes frères : benyoucef et Oualid

A Ma sœur : Manal et son marie Bilel

*A toute la famille **« Benziane»** et **« Lakhal»** sans exception.*

A mon binôme et ma chère amie et sa famille (Amina) qui est m'aide infiniment.

A touts mes aimables amis, et sœurs de cœur, mes collègues d'études.

A madame Ch. SETTARI : cette humble dédicace ne saurait exprime mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie pleine de bonheur.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

SOUAD

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Stockage de fraisât de provenance unique avant conditionnement…….	**6**
Figure I.2	Stock d'agrégats avant conditionnement et reprise par pelle mécanique avant concassage……	**8**
Figure I.3	Stock d'agrégats 0 / (10-12,5) mm après concassage – criblage……...	**9**
Figure I.4	Réutilisation des agrégats d'enrobés……..	**10**
Figure I.5	Representation de déchet de béton avant et aprés concassage……	**12**
Figure I.6	Representation de dechet de maçonnerie avant et aprés concassage……..	**13**
Figure I.7	Representation de dechet de béton et de maçonnerie avant et aprés concassage……..	**13**
Figure I.8	Representation de dechet d'enrobés hydrocarbonés avant et aprés concassage.	**.13**
Figure I.9	Synthèse des origines et définition des usages……	**14**
Figure I.10	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP……...	**19**
Figure I.11	Critère de blocage et géométrie du calcul……...	**20**
Figure I.12	Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment……	**24**
Figure I.13	Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique..	**24**
Figure I.14	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant……..	**34**
Figure I.15	Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire……...	**37**
Figure I.16	Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires …….	**37**
Figure I.17	Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant…….	**39**
Figure I.18	Développement du Fluage du Béton……...	**40**
Figure I.19	Essai d'entonnoir pour les mortiers……	**43**
Figure I.20	Essai d'Etalement pour mortier……..	**45**
Figure I.21	Essai à l'Entonnoir pour mortier…….	**45**
Figure I.22	Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs……	**46**
Figure I.23	La boite en L……...	**47**
Figure I.24	Essai à la boite en U……	**48**
Figure I.25	Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique…….	**53**

Figure I.26	L'ouvrabilité du mortier MBr après l'utilisation de l'adjuvant……..	**53**
Figure I.27	Temps d'écoulement des mortiers fabriqués……..	**53**
Figure I.28	Teneur en air des mortiers fabriqués……...	**54**
Figure I.29	Variation de la résistance à la compression des mortiers MBr……...	**54**
Figure I.30	Variation de la résistance à la compression des mortiers……...	**55**
Figure I.31	Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr…….	**55**
Figure I.32	Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers…….	**55**
Figure I.33	Absorption capillaire du mortier à base de déchets de brique……...	**56**
Figure I.34	Résultats du retrait des mortiers à base de déchet de brique……...	**56**
Figure I.35	Résultats du gonflement des mortiers à base de déchet de brique……..	**57**
Figure II.1	Le ciment utilisé…….	**62**
Figure II.2	Sable roule……..	**62**
Figure II.3	Sable de concassage…….	**62**
Figure II.4	Le sable bitumineux utilisé……..……	**63**
Figure II.5	L'eau de gâchage utilisé……..	**63**
Figure II.6	Adjuvant superplastifiant MEDAFLOW 145……	**64**
Figure II.7	Etape de préparation du sable concassage…….	**64**
Figure II.8	Le cône pour mesurer la masse volumique apparente……	**66**
Figure II.9	Mesure de la masse volumique absolue……..	**67**
Figure II.10	Procédure de mesure de l'équivalent de sable…….	**67**
Figure II.11	malaxage du mortier ……..	**69**
Figure II.12	procédure de malaxation……	**69**
Figure II.13	Mesure de la densité du MAP à l'état frais…….	**70**
Figure II.14	Essai d'étalement du mortier…….	**70**
Figure II.15	Essai d'entonnoir en V (V-funnel) pour mortier……..	**72**
Figure II.16	Mesure de la densité du MAP à l'état durci……	**73**
Figure II.17	Dispositif pour l'essai de résistance à la traction……	**74**
Figure II.18	Dispositif de rupture à la compression……	**74**
Figure II.19	Réfractomètre et son étalonnage……	**75**
Figure II.20	Absorption d'eau par capillarité ……..	**77**
Figure II.21	Echauffement de l'éprouvette par le four a moufle ……	**78**
Figure II.22	Mise en solution des éprouvettes dans la solution NaCl…….	**78**
Figure II.23	les 4 modes de conservation des éprouvettes……..	**79**

Figure II. 24	Variables étudiés…….	**81**
Figure III.1	Courbe granulométriques des sables ordinaires et recyclés utilisés……...	**82**
Figure III.2	Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en SRB……..	**84**
Figure III.3	Etalement des mortiers à base de la substitution en SRB……...	**85**
Figure III.4	Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en SRB…….	**86**
Figure III.5	Densité des mortiers à l'état durci à base de la substitution en SRB.	**86**
Figure III.6	Résistance à la compression des mortiers MAPS. ……...	**87**
Figure III.7	Résistance à la compression des mortiers MAPC. ……...	**87**
Figure III.8	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en substitution en SRB des mortiers. ……...……...	**88**
Figure III.9	Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPS. …….	**89**
Figure III.10	Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPC. ……..	**89**
Figure III.11	Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage en substitution en SRB des mortiers. ……...……	**90**
Figure III.12	Absorption d'eau des mortiers MAPS. ……...……	**91**
Figure III.13	Absorption d'eau des mortiers MAPC. ……...…….	**91**
Figure III.14	Evolution du retrait à l'air libre pendant les 56 jours des MAPS. ……	**92**
Figure III.15	Evolution du retrait à l'air libre pendant les 56 jours des MAPC. ……...	**92**
Figure III.16	Perte de masse en fonction de l'âge des MAPS. …….....	**93**
Figure III.17	Perte de masse en fonction de l'âge des MAPC. …….....	**93**
Figure III.18	Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 56 jours des MAPS. ……	**94**
Figure III.19	Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 56 jours des MAPC. …….	**94**
Figure III.20	Gain de masse en fonction de l'âge des MAPS. …….....	**95**
Figure III.21	Gain de masse en fonction de l'âge des MAPC. …….....	**95**
Figure III.22	Effet de la température sur la résistance à la compression des MAPS……...	**96**
Figure III.23	Effet de la température sur la résistance à la compression des MAPC……...	**96**
Figure III.24	Effet de la température sur la perte de masse des MAPS. …….	**97**
Figure III.25	Effet de la température sur la perte de masse des MAPC. ……	**97**
Figure III.26	Effet de feu sur la résistance à la compression des MAPS. ……	**98**
Figure III.27	Effet de feu sur la résistance à la compression des MAPC. ……	**98**
Figure III.28	fissurations d'éprouvette causée par le feu à 400°c. ……...	**99**
Figure III.29	Effet de feu sur la perte de masse des MAPS…….....	**99**
Figure III.30	Effet de feu sur la perte de masse des MAPC. …….....	**100**
Figure III.31	Effet des sels sur la résistance à la compression des MAPS. ……	**100**

Figure III.32 Effet des sels sur la résistance à la compression des MAPC. …… **101**

Figure III.33 création des pores au niveau de surface de l'éprouvette. ……. **101**

liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage. ……	**27**
Tableau I.2	Essais permettant la détermination de la capacité de passage. ……..	**28**
Tableau II.1	l'Analyse chimique du ciment et composition du clincker…….	**60**
Tableau II.2	Essai physiques sur ciment. ……..	**61**
Tableau II.3	Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge……	**61**
Tableau III.1	Analyse granulométriques des différents sables. ……...	**82**
Tableau III.2	Masses volumiques des granulats utilisés……...	**83**
Tableau III.3	Equivalant de sable……	**83**

Notations

ACI : l'American Concrete Institute
Al_2O_3 : L'alumine
ASTM : norme américaine
BAP : Béton Auto Plaçant
BTP : bâtiment et travaux publique
C : Dosage du ciment
c : la compacité
CaCO3 : Teneur en calcaire
CaO : La chaux
CHF : Ciment de haut fourneau
CPA : Le ciment portland artificiel
CPJ-CEM II/A 42.5 : Le ciment portland composé classe II /A avec résistance 42
CRIB : Centre de recherche interuniversitaire sur le béton
Cu : Le coefficient d'uniformité
D : La dimension du plus gros granulat
d : La dimension du plus petit granulat
D : Les fumées de silice
DIB : Déchets industriels banals
DIS : Déchets industriels spéciaux
DMS : Déchets ménagers spéciaux
DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé
E : Dosage en eau
E/C : Rapport eau /ciment
E_{eff} : Quantité d'eau efficace
ES : Equivalent de sable à piston
ES_V : Equivalent de sable à vue
F : Les fillers
f_c : Résistance souhaitée du béton a 28 jours
Fe_2O_3 : L'oxyde de fer
FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères
f_{mc} : Résistance nominale du ciment
GN : gravier ordinaire
GR : gravier recyclé
GTR : guide technique des remblais et couche de forme
H : Heure
H'_2, H_2 : Hauteur du sable propre seulement
H_1 : Hauteur du sable propre avec des éléments fins
I : Moment d'inertie de la section transversale
K_b : Coefficient relatif au squelette granulaire

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160mm
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge
M_0: Masse de l'éprouvette au moment du démoulage
MAP : Mortier autoplaçant
MAPC : Mortier autoplaçant de substitution en SRB de la masse du sable concassé
MAPS : Mortier autoplaçant de substitution en SRB de la masse du sable corrigé
MAPT : Mortier autoplaçant témoin
MBr: Mortier à base de déchets de brique recyclé
M_f : Module de finesse
MgO : Oxyde de magnésium
MT : Mortier témoin.
N : La distance de la fibre la plus éloignée
NA : Norme Algérienne
NB : Norme Belge
NE : Norme Européenne
p : la porosité
P : Pouzzolanes ordinaires
p(x): Pourcentage de passant au diamètre x exprimé en μm
R.C.C: Rolled Compacted Concrete
R.C.D: Rolled Concrete in Dam
R_C : La résistance a compression
R_t : La résistance à la traction
S : Le sable
$S_{roulé}$: sable roulé
SiO_2 : La silice
SO3 : Sulfates
SN_{corr} : sable ordinaire corrigé
SN : sable ordinaire concassé
SR_{corr} : sable recyclé corrigé
SR: sable recyclé
SRB: sable recyclé bitumineux
TOC : Teneur en matières organiques
T : Le temps d'écoulement
V : volume de l'échantillon
v : volume non perturbé
W : Teneur en eau
W : teneur en eau
ε : Déplacement
ρ : Masse volumique
ρ_{abs} : masse volumique absolu
ρ_{app}: masse volumique apparente
ρ_d **:** masse volumique à l'état sec

γ_d **:** poids volumique sec

ρ_h **:** masse volumique à l'état humide

σ_c : La contrainte de compression

σ_t : La contrainte de flexion

γh : poids volumique humide

Δ**L :** Variation de longueur par apport à la longueur origine

Δ**M :** Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage

2CaO SiO_2 (C_2S) : Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

3CaO Al_2O_3, (C_3A) : L'aluminate tricalcique (Célite)

3CaO SiO_2 (C_3S) : Le silicate tricalcique impur (Alite)

4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3 (C4AF) : L'alumino-ferrite tétra-calcique

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير استعمال الرمل الإسفلتي المدور المتحصل عليه عن طريق طحن الطبقات الإسفلتية في الملاط ذاتي الوضع بتعويض الرمل بنسبة (20% و 40% و 60% و 80% و100%).خصائص الرمل الطبيعي و المدور قد أنجزت و كذا تحليل الحالة الفيزيائية و الميكانيكية و ديمومة الملاط ذاتي الوضع و مقارنتها بملاط بنسبة 100% رمل طبيعي . النتائج اظهرت تحسن في مقاومة شد الملاط بدءا من نسبة 60% من الرمل المدور.

Résumé

Ce travail de recherche vise à valoriser le sable recyclé bitumineux (SRB) issu du fraisage des chaussées bitumineux dans le mortier autoplaçant (MAP) par substitution au sable naturel (0%, 20%, 40% ,60%, 80% ,100%). Les sables naturels (SN) et recyclé sont caractérisés et comparés. Les propriétés mécaniques et de durabilité du mortier autoplaçant à base du sable recyclé (MAPR) sont analysée et comparer au mortier avec 100% de sable naturel (Témoin). Les résultats montrent une amélioration de la résistance à la traction du MAPR à partir de 60% de substitution en SRB.

Abstract

This researcher work aims to valorised bituminous recycled sand (RCB) obtanined from bituminous pavements in self-compacting mortar (SCM) by substitution of natural sand (0%, 20%, 40% ,60%, 80% ,100%).The natural sand (NS) and recycled sands are charcterized and compared. The mechanical properties and durability of self-compacting mortar with RS (RSCM) are analysed and compared to the SCM with 100% of NS. The experimental results showed an improvement of tensile strength of RSCM from 60% of substitution in RS.

Introduction général



Introduction générale

La production de granulats est assurée en majeure partie par extraction dans les carrières. Il existe par ailleurs deux autres ressources qui permettent aux industriels de produire des granulats.

On parle alors de granulats recyclés et de granulats artificiels. Les matériaux recyclés peuvent représenter une excellente source de granulats, l'utilisation de ces matériaux dans le béton favorise d'une part la récupération des matériaux en circulation, et d'autre part la protection des ressources naturelles.

Cette recherche présente un travail de fin d'étude de Master, ayant pour but la formulation d'un mortier autoplaçant à base de granulats recyclés bitumineux et l'étude de leur comportement dans le temps.

Les granulats recyclés bitumineux provenant de déchets de fraisage des anciennes routes, pour raison économique et environnementale, il est intéressant d'examiner la possibilité de l'utiliser pour la fabrication d'un mortier autoplaçant.

Dans ce contexte, ce projet alors a pour objectifs d'étudier l'influence de sable recyclé bitumineux sur le comportement à l'état frais et à l'état durci du mortier autoplaçant.

Pour les besoin de cette étude, ce travail est donc structuré comme suite :

On commence par une introduction générale suivi de trois chapitres, le premier chapitre est une revue bibliographique elle-même divisée en deux parties, la première est une notion de déchets, définitions et recyclage. La deuxième partie est la définition d'un béton autoplaçant et son domaine d'utilisation puis on a détaillé le mortier autoplaçant et ces essais.

Le deuxième chapitre, présente les matériaux et les essais d'identification qu'on a effectués sur les granulats et le mortier a l'état frais et a l'état durci.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats et leurs interprétations, les différentes résultats sont analysés indépendamment les uns des autres.

Enfin, on termine ce travail par des conclusions générales et des recommandations pour le future afin de bien contourner et compléter ce modeste par l'initiation à la recherche.

Chapitre I

Synthèse bibliographique



I.1. Notion de déchets

I.1.1.Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir ».

L'approche globale du déchet permettra de définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. Dans cette partie, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde ; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans les différents domaines.

I.1.2.Définition

La notion de déchets peut être définie de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état du déchet. Parmi les nombreuses définitions existantes, nous pouvons mentionner celles qui nous paraissent les plus intéressantes **[1]** :

- Le déchet est un résidu abandonné par son propriétaire, car inutilisable, sal.e ou encombrant ;
- Considéré comme déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destiné à l'abandon ;
- Les déchets sont des résidus de l'emploi de matières solides qui peuvent être putrescibles ou non putrescibles ;
- Les déchets sont des matières normalement solides ou semi-solides résultant des activités humaines et animales qui sont indésirables ou dangereuses.

La Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit :

« **Déchets :** tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ».

I.1.3. Différents types de déchets

I.1.3.1. Déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

I.1.3.2. Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

I.1.3.3. Déchets assimilés

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants).

I.1.3.4. Déchets verts

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages…).

I.1.3.5. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts) ;
- déchets organiques de la cuisine, boues (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.… ;

I.1.3.6. Déchets industriels banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

I.1.3.7. Déchets dangereux

A. Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.…

B. Déchets ménagers spéciaux (DMS)

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.

- Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé **[2].**

I.1.3.8.Déchets routier

Les déchets routiers sont les déchets produits par les activités d'entretien et d'exploitation des chaussées et de leurs dépendances. La typologie et nature au sens des lois et normes existantes sont donc très variables selon l'activité considérée **[3].**

En matière de classification des déchets, le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002**[4]** reprend la liste communautaire des déchets et en établit, dans son annexe II **[4],** une liste unique. L'annexe I **[4]** de ce décret fixe les propriétés qui rendent les déchets dangereux. Cependant, bien que le droit communautaire ne connaisse que la distinction entre déchets dangereux et non dangereux, la notion de Déchets Industriels Spéciaux (DIS) demeure dans l'actuel code de l'environnement.

I.1.4.Qualification des déchets liés à la route

La qualification générale des déchets routiers est identique à celle des déchets de chantiers de BTP **[5]**.

I.1.4.1.Les déchets inertes :

sols, matériaux meubles, intervenant dans la constitution des corps de chaussée et des couches de forme (matériaux ordinaires, reconstitués ou stabilisés aux liants hydrauliques) ou supports de ces derniers ; sols de terrassements, résidus de béton (démolition d'ouvrages ou de parties d'ouvrages, ou rebuts de production).

I.1.4.2.Les déchets industriels banals :

provenant des couches de roulement ou de liaison ou du corps de chaussée, traitées aux liants hydrocarbonés (bitumes purs ou fluidifiés, émulsions de bitume).

I.1.4.3.Les déchets industriels spéciaux :

ils proviennent essentiellement de matériaux enrobés de goudron. On note que parfois (cas des travaux neufs), quelques déchets non classiquement routiers, de type accidentel ou spécifique peuvent se rencontrer :

- Boues de tunneliers (marinage par voie humide) et boues de forage ;
- Dépotoirs sauvages d'ordures ménagères ;
- DIB de type industriel : ferrailles (profilés de blindages, ossatures de coffrages, chutes d'armatures), aluminium, emballages divers (bois, polystyrène, plastiques, amiante).

I.1.5. Recyclage des déchets

I.1.5.1. Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources ordinaireles. C'est une des activités économiques de la société de consommation.

Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés **[2]**. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets ;
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage ;
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

I.1.5.2.Les types des déchets recyclés

A. Travaux publics : des matériaux recyclés au service des chantiers routiers et VRD. Les déblais inertes sont reçus sur site, contrôlés, triés puis recyclés. De la fraction valorisable des déblais, naît le "granulat recyclé", sous la forme de sables, gravillons, graves et cailloux.

B. Bâtiment : des matériaux recyclés pour les applications bétons. Le granulat recyclé est issu de la déconstruction des ouvrages en béton pour être ensuite réintroduit dans la filière béton. L'utilisation des matériaux recyclés dans ce domaine est très réglementée et fait l'objet d'études approfondies et de projets de recherche en cours. L'offre aggneo TM bâtiment est actuellement en tests **[6]**.

I.1.5.3.Les matériaux bitumineux recyclés

A. Origine

Les agrégats d'enrobés sont des mélanges de granulats, de liant bitumineux et quelquefois d'additifs, voire de déchets. Lorsque la traçabilité des anciens chantiers permet de situer les zones dites « à risques » contenant des composants répertoriés dangereux, il est fortement conseillé de procéder à une déconstruction sélective et à un tri préalable destinés à orienter les agrégats vers les destinations adaptées. Ceci correspond par ailleurs aux orientations rappelées dans la circulaire interministérielle du 15 février 2000 **[7].** Les agrégats d'enrobés proviennent essentiellement de trois origines :



Figure I.1 : Stockage de fraisât de provenance unique avant conditionnement.

Les matériaux de provenance unique sont typiquement issus de grands chantiers, susceptibles de fournir plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de tonnes. Ces fraisât, obtenus par un fraisage respectant des consignes de travail définies à l'aide d'une planche de référence, présentent une homogénéité convenable et leur composition d'origine est souvent connue. Ils constituent, selon la norme XF P 98-135, des agrégats d'enrobés de classe (a) et sont recyclables en l'état (figure I.1).

Les matériaux de provenances diverses stockés de façon individualisée sont issus de chantiers de moyenne importance, et stockés en fonction de la provenance de l'enrobé. Obtenus essentiellement sous la forme de fraisât, ces agrégats d'enrobés de classe (b) nécessitent généralement un conditionnement destiné à les homogénéiser avant réutilisation. Envisagé dans le contexte de la norme 98-135 dans l'hypothèse d'un tri préalable, ce cas n'est actuellement pas représenté sur le territoire national.

Les autres matériaux de provenances diverses regroupent les enrobés issus de la déconstruction de chaussées (fraisât et croûtes), les fonds de camion et les surplus de

centrale d'enrobage. Ces agrégats d'enrobés, de classe (c), sont souvent hétérogènes et subissent un conditionnement pour réduire leur dimension maximale et les homogénéiser (figure I.1).

B. Elaboration

Dans le cas d'une mise en stock de mélanges bitumineux de provenances diverses, l'élaboration d'agrégats d'enrobés conformes à la réutilisation comprend les phases de stockage des mélanges, de reprise des mélanges sur stocks, de conditionnement et de stockage des agrégats prêts à être réutilisés. Il existe donc deux types de stockage, avant et après conditionnement **[8].**

C. Stockage

Le stockage (avant et après conditionnement) dont il est question ici est la mise en stock temporaire d'un produit destiné à être réutilisé, et non la mise en décharge. Deux types de considérations sont à prendre en compte :

C.1.Considérations environnementales

- Selon la nouvelle classification des déchets, les agrégats sans goudron sont des déchets non dangereux (classification 17 03 02) **[9]**.
- Selon le guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes les agrégats d'enrobés bitumineux, sans goudron, sont considérés comme admissibles dans la catégorie des déchets inertes **[10]**.

C.2.Considérations pratiques

La mise en conformité d'agrégats de provenances diverses comprend trois parties : les stockages successifs des différents enrobés à recycler, la reprise dans le stock ainsi constitué et le conditionnement de ces agrégats repris. Ces trois opérations sont menées dans l'optique de favoriser l'homogénéité des agrégats d'enrobés. A cet effet, un stockage par couches horizontales des différents approvisionnements, suivi d'une reprise par tranches verticales, permet de prélever avant conditionnement une quantité d'agrégats la plus représentative possible du stock total. Après conditionnement par concassage, criblage ou fraisage avant réutilisation immédiate, les agrégats d'enrobés ne doivent pas être stockés sur une hauteur importante (supérieure à 3m), et la durée de stockage doit être limitée (inférieure à une semaine en période d'été), afin d'éviter la prise en bloc du matériau **[10]**.

C.3.Conditionnement

Le conditionnement des agrégats est fonction de la réutilisation envisagée, avec des contraintes en matière d'études préalables imposées par la technique de réutilisation **[9].**

C.4.Pour le recyclage en centrale à chaud

Le conditionnement des agrégats d'enrobés est généralement nécessaire pour les agrégats de classe b et impératif pour les agrégats de classe c.

Il consiste à réduire la taille maximale des matériaux et à pratiquer une homogénéisation des agrégats. Ce conditionnement, réalisé par concassage - criblage, conduit à constituer des stocks temporaires d'agrégats dont la granularité dépend du type de formulation envisagée (béton bitumineux ou grave bitume). Selon les disponibilités en matière de surface de stockage individualisé, on trouve des stocks de type 0/6, 0/10, 0/12,5 mm destiné à être utilisé dans une formulation bien spécifique (béton bitumineux) ou un stock général. destiné à la fabrication de grave bitume.

Les étapes successives d'un conditionnement sous la forme d'agrégats 0/10mm sont représentées sur les figures (I.2) et (I.3). Dans tous les cas, il reste des refus au criblage réalisé, qui sont destinés aux techniques autres que celle du recyclage à chaud en centrale (figure I.3) **[10]**.



Figure I. 2 : Stock d'agrégats avant conditionnement et reprise par pelle mécanique avant concassage.



Figure I.3 : Stock d'agrégats 0 / (10-12,5) mm après concassage – criblage.

C.5.Pour le retraitement à froid en centrale

Les agrégats de classe b et c font l'objet d'un passage préalable dans une installation de concassage - criblage qui permet d'obtenir la granularité adaptée à l'utilisation ultérieure : 0/20, 0/31,5mm…**[11].**

C.6.Pour le retraitement en place à froid ou le recyclage en place à chaud

Lorsqu'il s'agit d'une réutilisation en place, le conditionnement est effectué par fragmentation lors de l'opération de reprise des agrégats d'enrobés. Les documents de référence sont le guide technique de retraitement à froid des anciennes chaussées et le document CFTR à paraître sur le retraitement des chaussées et le recyclage des matériaux bitumineux de chaussée**[12]**.

C.7.Pour la réutilisation en remblais et couches de forme

La réutilisation en terrassements est subordonnée au classement des agrégats d'enrobés, par la taille maximale de ces agrégats et par la connaissance de leurs caractéristiques géotechniques. Les documents de référence sont la norme NF P 11-300 et le guide technique de réalisation des remblais et couches de forme (GTR) **[13]**.

- La figure(I.4) synthétise les différentes techniques proposées en matière de réutilisation des agrégats d'enrobés **[14]**.

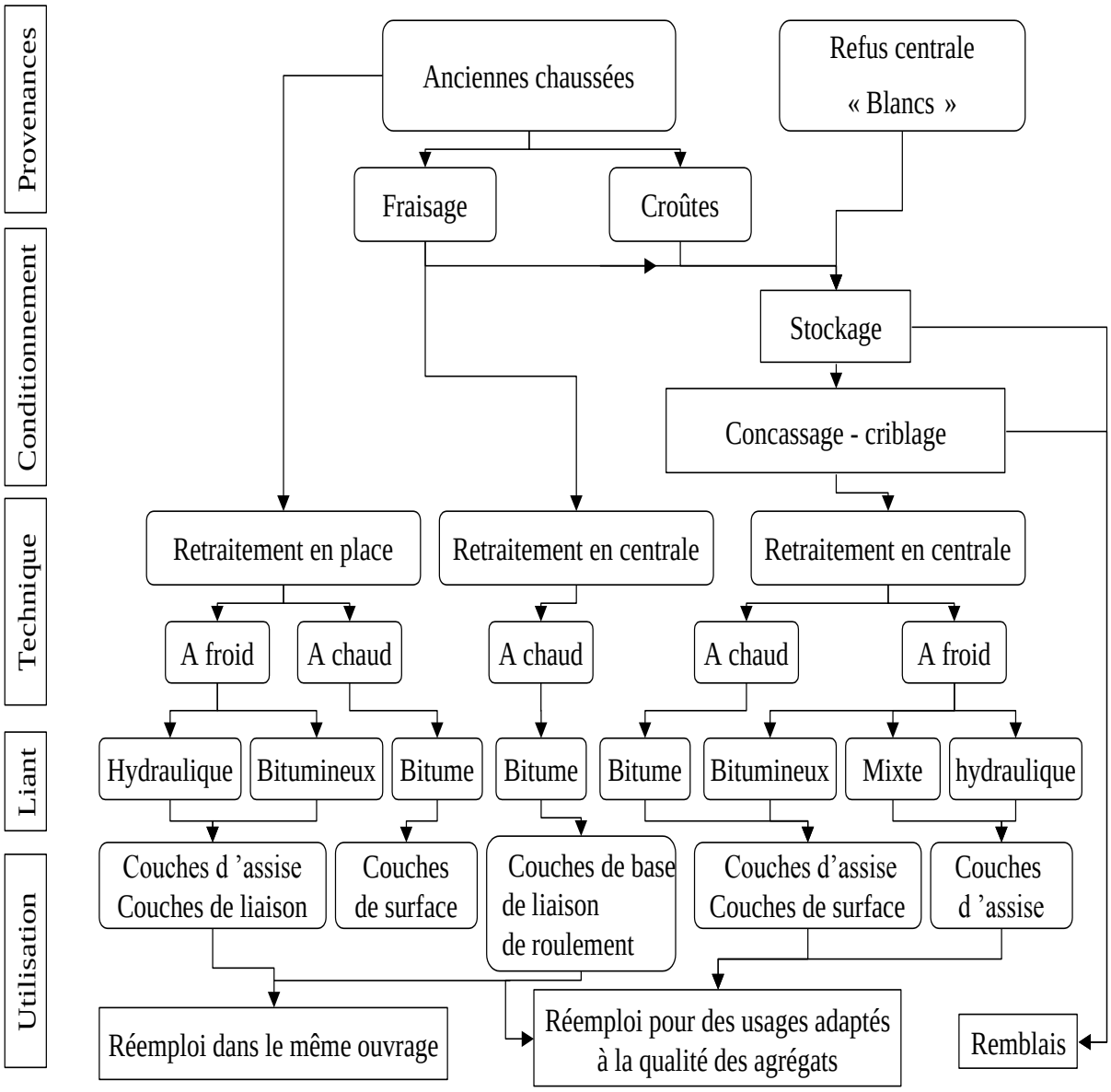


Figure I.4 : Réutilisation des agrégats d'enrobés **[14]**.

I.1.5.4. Définition et Réglementation des matériaux hydrocarbonés

A. Définitions générales

A.1.L'enrobé

L'enrobé est un granulat recouvert de bitume, utilisé dans les revêtements de chaussées. Il peut être constitué d'une ou plusieurs couches de béton bitumineux (mono à tri-couche) **[15]**.

A.2.Le revêtement

Le revêtement consiste en une couche imperméable liée, soit en enrobé bitumineux, soit en béton.

A.3.Les déchets bitumineux

Le terme générique « déchets bitumineux » est consacré pour désigner les déchets de démolition routière parmi lesquels se trouvent des enrobés, revêtements et liants hydrocarbonés, les fraisât et les croûtes.

A.4.Les liants hydrocarbonés

Ce sont des matériaux constitués essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances aux déformations en traction, compression et cisaillement [USIRF, 2001].

Il existe trois grandes familles de liants hydrocarbonés : les asphaltes et bitumes ordinaires, les goudrons, et le bitume de pétrole.

B. Documents réglementaires

On ne dispose pas de réglementation particulière aux déchets routiers. Leur gestion et leur élimination doivent être réalisées en respectant la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 **[16]** relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. Cette loi a été complétée et modifiée par **[17]** .

- la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992**,** relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement ;
- et par la loi n° 95-101 du 2 février 1995 dite loi Barnier relative à la protection de l'environnement, cet ensemble de lois s'impose aux acteurs de la chaîne de production et d'élimination des déchets **[18]**.

Par ailleurs, la mise en œuvre des objectifs de la loi du 13 juillet 1992 impose de recycler et de valoriser au maximum les matériaux, déchets ou sous-produits issus de l'ensemble des secteurs d'activités industriels dans le respect des exigences technologiques, environnementales et de santé publique. Seuls les déchets non valorisables seront éliminés, après traitement si nécessaire, la mise en décharge étant limitée aux seuls *déchets ultimes* dès le 1er juillet 2002.

La particularité des déchets routiers est traitée dans deux circulaires de portée plus spécifique, précisées ci-après Circulaire 2000- du 15 Février 2000 dite : « Déchets du BTP » relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et

des travaux publics **[17]**, Circulaire n°2001-39 du 18 Juin 2001 relative à la gestion des déchets dans le cadre du réseau routier national **[19].**

Dans le cas des déchets dits « routiers », le maître d'ouvrage de l'infrastructure concernée est responsable de ces déchets produits et doit en assurer l'élimination dans les conditions réglementaires en vigueur. Les éléments constituant les équipements de la route répondent aux prescriptions définies dans l'arrêté du 31 juillet 2002.Notamment, l'article 5 de cet arrêté intitulé « Nature, modèle et homologation des signaux, produits ou dispositifs destinés à la signalisation », précise que **[20]**.

« Pour s'assurer des garanties de divers ordres et en particulier pour obtenir la conformité aux normes réglementaires des signaux, produits ou dispositifs de signalisation routière, des arrêtés du ministre de l'équipement déterminent ceux qui sont soumis à homologation et les conditions dans lesquelles celle-ci est accordée. Tous les autres matériels de signalisation non soumis à homologation doivent avoir reçu un avis favorable à l'emploi. Les conditions dans lesquelles sont émis ces avis sont fixées par le ministre de l'équipement ».

I.1.5.5. Terminologie et identification des déchets

Les déchets sont définis comme la fraction pierreuse et sableuse des déchets provenant de la construction, de la rénovation ou de la démolition de bâtiments et d'ouvrages d'art ou de routes ou d'autres installations. On distingue **[21]**.

- Débris de béton

Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil;

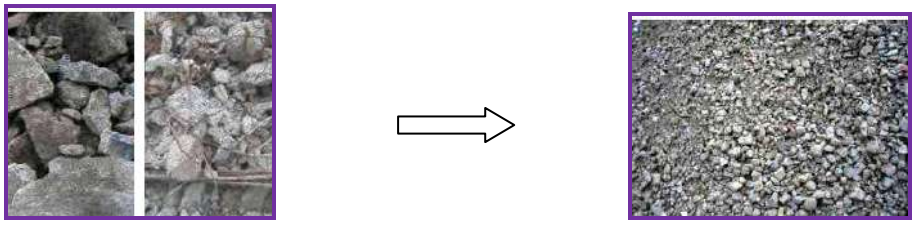


Figure I.5 : Representation de déchet de béton avant et aprés concassage.

- Débris de maçonnerie

Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments ;

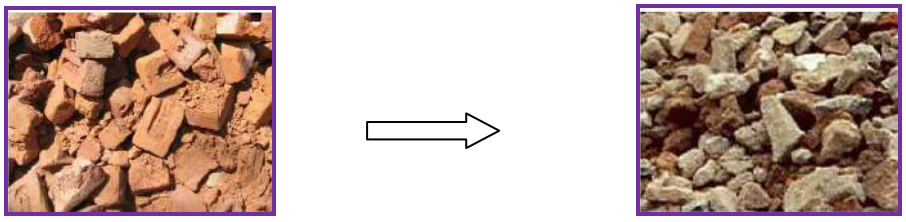


Figure I.6: Representation de dechet de maçonnerie avant et aprés concassage.

- Débris mixtes de béton et de maçonnerie

Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles…) ;

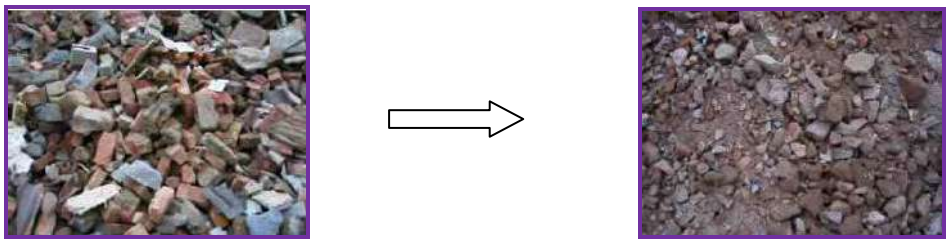


Figure I.7 : Representation de dechet de béton et de maçonnerie avant et aprés concassage.

- Débris d'enrobés hydrocarbonés (bitumineux ou contenant des goudrons)

Proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes…), de la démolition de parkings ;

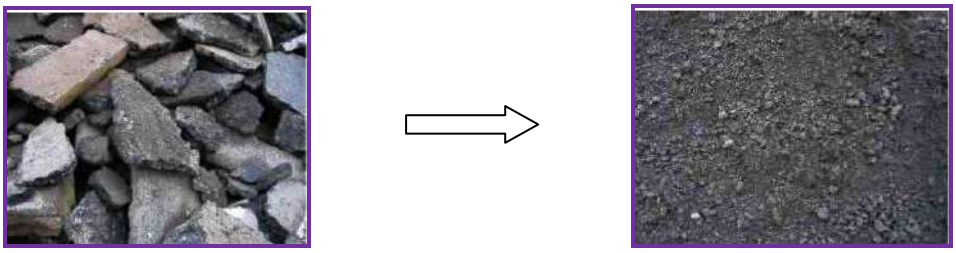


Figure I.8 : Representation de dechet d'enrobés hydrocarbonés avant et aprés concassage.

Les déchets de construction et de démolition se composent pour près de 95% de ces débris. La majeure partie peut être d'autant mieux valorisée qu'elle contient peu d'impuretés et ne doit donc pas être mise en décharge. Les 'débris' deviennent 'granulats recyclés' après tri et concassage.

I.1.5.6. L'utilisation des granulats issus de recyclage

Le tableau de synthèse ci-après présente, les différentes sources de granulats et leur utilisation sur le marché **[21].**

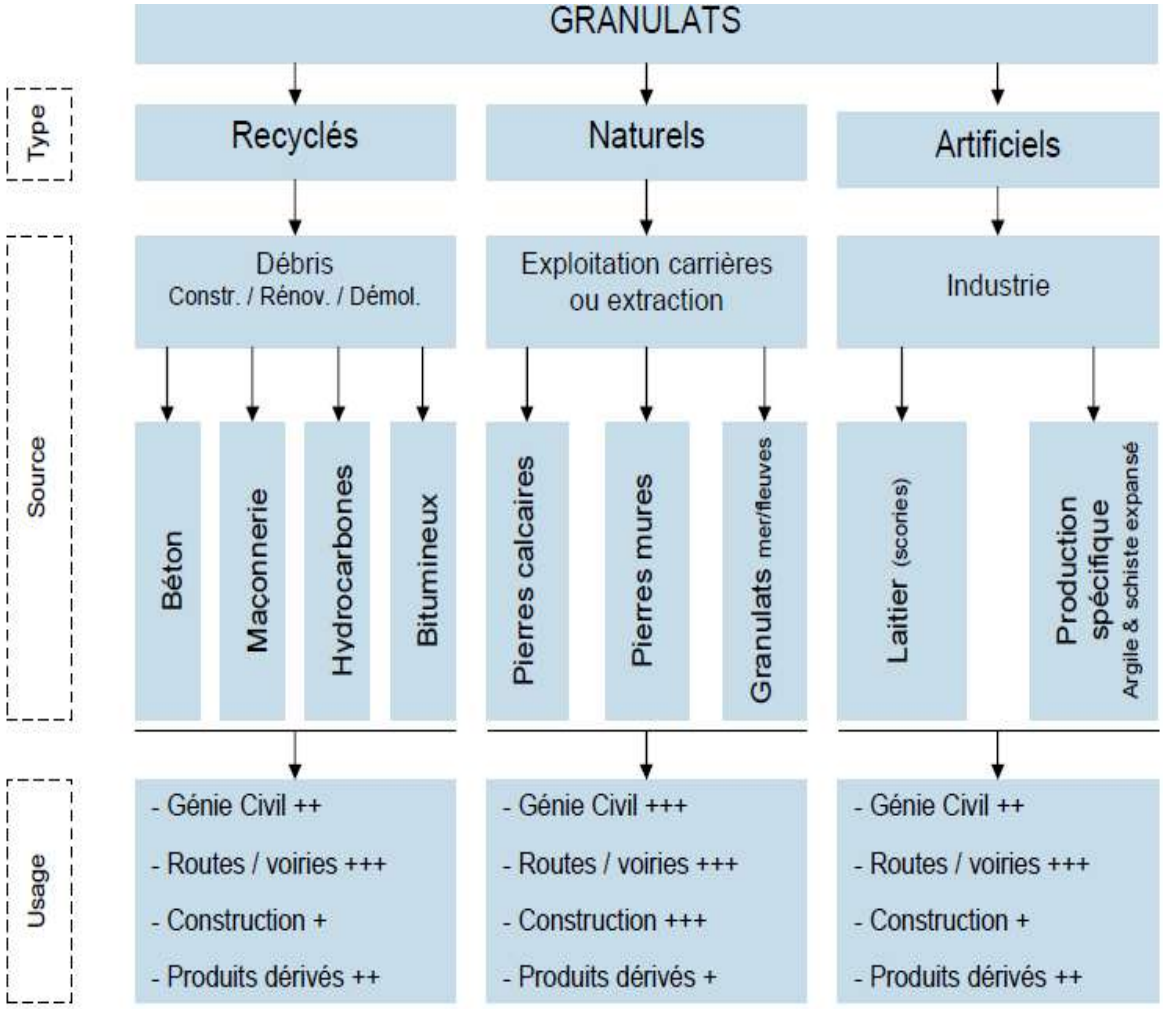


Figure I.9 : Synthèse des origines et définition des usages **[21].**

I.1.5.7. Matériaux de recyclage autorisé

Parmi les matériaux recyclés autorisé pour la construction sont:

A. Remblais

- Sables de criblage de débris ;
- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés de débris de maçonnerie ;
- Concassés mixtes (débris de béton et maçonnerie) ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés ;

B. Sous-fondation

- Sables de concassage de débris ;

- Concassés de débris de béton ;
- Concassés mixtes (débris de béton et maçonnerie) ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés ;

C. Fondation et empierrement

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton (ρ>1950 kg/m³) ;

D. Fondation en empierrement stabilisé au ciment

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés.

E. Béton maigres

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés mixtes (débris de béton et Maçonnerie).

F. Revêtements de chaussées en enrobes bitumineux

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris d'enrobés Bitumineux ;

G. Pavages

- Sablage de concassage de débris ;

I.1.6.Conclusion

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans cette recherche on s'intéresse aux déchets du béton bitumineux et spécialement le sable recyclé bitumineux pour la fabrication d'un mortier autoplaçant.

I.2. le béton autoplaçant

I.2.1 Introduction

Cette partie sera consacré à l'historique du béton autoplaçant, les avantages de son utilisation, ses composants, ses propriétés, ses caractéristiques et sa formulation tout en regroupant en général les travaux de recherche antérieurs dans ce domaine.

I.2.2 Historique

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème **[22] [23]**. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). La nécessité de ce type de béton a été proposée par OKAMURA en 1986 **[24] [25]**. Des études pour développer le béton autoplaçant y compris une étude fondamentale sur l'ouvrabilité du béton ont été effectuées par OZAWA et ses collègues à l'université de Tokyo **[26] [27]**.

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, alors que les Japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides **[28]**.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central. des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont

inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication **[29]**.

Dans des cas particuliers, le BAP peut être considéré comme un béton auto nivelant (BAN). Cette dénomination n'est pas utilisée par tous les auteurs, puisque certains d'entre eux font la distinction entre le béton autoplaçant et le béton auto nivelant, le premier terme étant employé lorsqu'il s'agit d'un coulage vertical et le second correspondant à une mise en œuvre horizontale **[30] [31]**.

Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA **[32] [33]**, et en 1992 OZAWA et d'autres collègues ont présenté un travail sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul **[34]**. Cette présentation a accéléré l'intérêt international pour le béton autoplaçant.

En 1998 le premier atelier international sur le béton autoplaçant été tenu à Kochi au Japon. Grace aux efforts de Ozawa et ses collègues une recherche plus intensive prospérée, particulièrement à de grandes compagnies de construction en Asie et en conséquence le béton autoplaçant été employé pour la réalisation de plusieurs structures comme des ponts, tunnels, bâtiments, etc… **[24] [35]**.

I.2.3. Définition d'un béton autoplaçant

Les bétons autoplaçant (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 **[32]**.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

La fluidité des bétons autoplaçant est due à une quantité de fine élevée et à l'utilisation des superplastifiants. Ces adjuvants spécifiques issus de technologie moléculaire récente permettent de réduire de manière importante le volume d'eau, tout en

conférant au béton autoplaçant une importante fluidité, ils assurent aussi le maintien de l'ouvrabilité du béton durant un temps déterminé. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés agents de viscosité, entre également parfois dans la formulation des BAP qui vont donner une viscosité à la pâte **[36]**. En effet, la qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire **[24]**.

I.2.3.1. Avantages techniques

Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfaçage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un déballage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. On peut résumer ses avantages techniques dans les points suivants:

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés ;
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers ;
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe ;

I.2.3.2 Avantages socio-économiques

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

- une diminution du bruit sur site ;
- une diminution de la pénibilité des tâches ;
- une réduction des risques d'accident ;
- Réduction du coût de la main d'œuvre ;
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier ;
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage. Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant ;

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales ;
- Compatibilité des matériaux ;
- Etanchéité des coffrages ;

I.2.4. Les composants d'un BAP

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral **[37,38]**. Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposés pour composer les bétons autoplaçant, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : Les granulats, les fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité. La figure I.10 montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP.

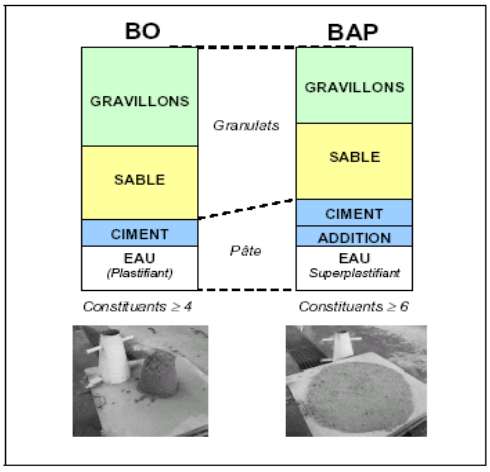


Figure I.10 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

I.2.4.1. Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton **[40]**.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible **[41]**.

Par ailleurs la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 15 mm. Dans sa thèse Bethmont **[42]** explicite que la taille maximale D max des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin **[43]** reporte que Fujiwara et al., ont calculé, dans le cas d'un ferraillage unidirectionnel (ferraillage vertical. uniquement) et dans le cas d'un ferraillage bidirectionnel (ferraillage vertical et horizontal), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent les critères présentés sur la figure I.11 **[43]**.

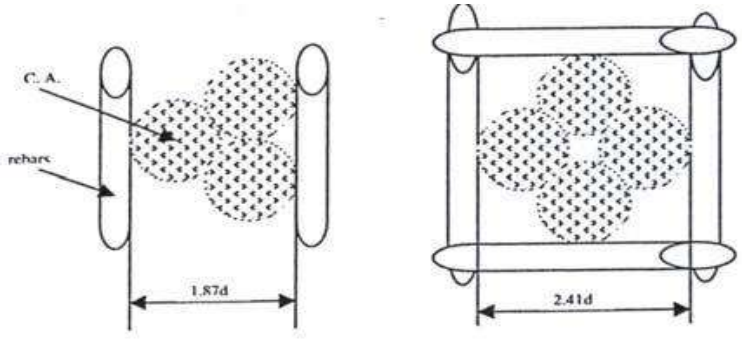


Figure I.11 : Critère de blocage et géométrie du calcul, Jin **[44]**.

Cas 1: $e_{min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) d$ *Avec d : diamètre maximal des granulats* (équ I.1)

Cas 2: $e_{min} = \left(1 + \sqrt{2}\right) d$ *Avec d : diamètre maximal des granulats* (équ I.2)

I.2.4.2. Le ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, c'est à dire faire en sorte que le béton (ou la pâte de ciment) reste en phase dormante pendant une période suffisamment longue (de l'ordre d'une heure et demi) avant le passage à l'état solide. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.).

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et á la durabilité du béton. Le rapport E/C est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton **[40]**.

I.2.4.3. Les ajouts minéraux

A. La fumé de silice

Le fumé de silice est un sous-produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électrique dans lesquels sont élaborés du silicium et autres alliages. La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour sonner de l'oxyde de silicium SiO2 en quantité prédominante (> 90%). La taille fines de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire en comblant les vides et en augmentant la compacité. En plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

B. Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultats de la combustion du charbon dans une centrale électrique. En 1937 R. E. Davis de l'université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie et depuis les études se sont multipliées et son utilisation s'est répandue à cause des améliorations apportées et l'économie enregistrée par son emploi.

C. Laitier des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de l'usine sidérurgique formée essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minéral.es. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous-produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistre la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896).

I.2.4.4. Les Superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le

ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition inter faciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C de 0.55, le ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition inter faciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance inter faciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage.

Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance inter faciale est semblable avec et sans superplastifiant **[44]**. D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition inter faciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années **[44]**.

Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante :

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS)
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS)
- Les lignosulfonates modifiés (LS)
- Les superplastifiants à base de polyacrylate, polycarboxylate (PC) ou de polyéthylène.

En effet, ils sont composés d'une chaîne chargée venant s'absorber à la surface des particules. Une surface sur laquelle sont greffées d'autres chaînes se déployant dans la solution. Uchikawa et al. **[45]** prouvent, pour la première fois, l'action des forces stériques responsables de la dispersion dans une pâte de ciment. Ces forces sont prépondérantes suivant la nature du polymère. Un polymère branché conduit à un effet stérique important du fait des longues chaînes, alors qu'un polynaphtalène est régi par l'effet électrostatique. Neubauer et al. **[46]** ont montré que l'effet stérique est très

important dans la défloculation des pâtes de ciment. Néanmoins, suivant la nature du superplastifiant utilisé les deux effets sont combinés, avec parfois une prédominance de l'un des deux.

Nous pouvons ainsi distinguer, de manière très simplifiée, les polyélectrolytes (ancienne génération) des polymères greffés **[47]** (nouvelle génération). El-Barrak dans sa thèse **[41]** souligne que l'effet des polyélectrolytes, comme leurs noms le laissent supposer, est basé sur les répulsions électrostatiques. Ils viennent s'absorber à la surface des particules de ciment créant ainsi une force répulsive par la présence de charges de même signe. Flatt et al. **[47]** étudient l'absorption de superplastifiants sur des poudres modèles, avec un PH et un potentiel zeta identiques à celui d'une pâte de ciment. Ils relient la répulsion électrostatique au potentiel zeta.

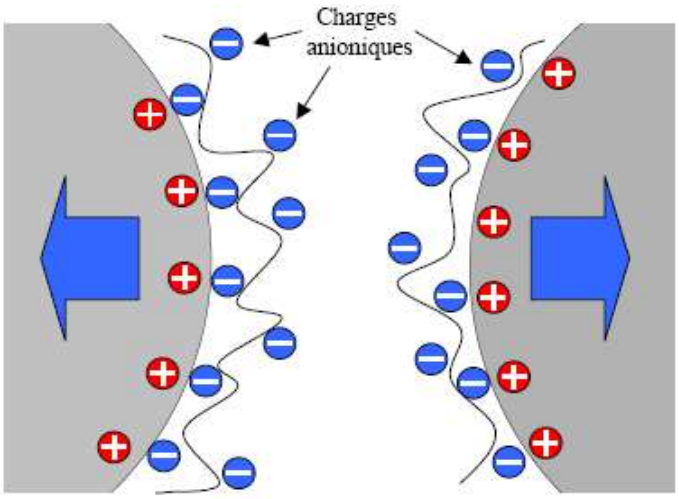


Figure I.12 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment **[39].**

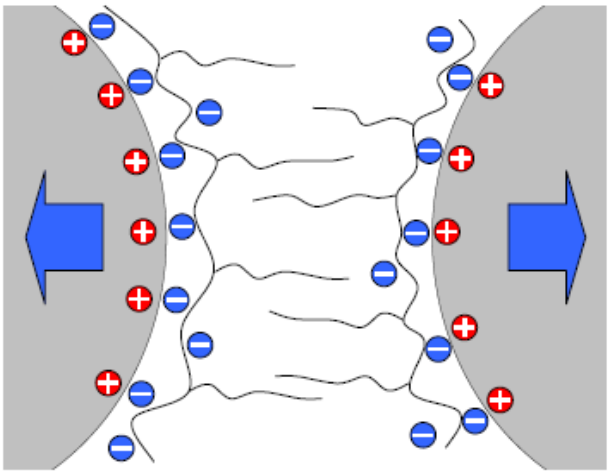


Figure I.13 : Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique **[41].**

Les phénomènes d'incompatibilité ciment- super plastifiant sont dus à une interaction entre le super plastifiant et le sulfate de calcium (gypse - CaSO4 - 2H2O) contenu dans le ciment, en empêchant ce dernier de débloquer l'hydratation du C3A en formant une coquille d'ettringite. Ce problème d'incompatibilité se présente surtout dans les bétons à faible E/C (BHP). Dans tel cas on remarque une perte de fluidité (affaissement) rapide.

Cependant, cette incompatibilité est très rarement remarquée dans les bétons avec un E/C > 0,5. En plus, Agrawal et al. **[48]** ont trouvé que la compatibilité du super plastifiant avec le ciment dépend plus de la qualité du ciment ou du liant. Ainsi le ciment de classe 52,5 est plus compatible que les classes 32,5 et 42,5. En plus ils ont trouvé que le ciment au laitier était compatible avec tout le superplastifiant qu'ils ont utilisé **[49]**.

I.2.4.5 L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés **[50]** qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), al.ors 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 la suspension entre les granulats **[49]**. 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. König et al. **[51]** ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton auto plaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi.

I.2.4.6 Les agents de viscosité

Généralement les superplastifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux

aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

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

Le mode d'action des agents de viscosité se fait par adsorption des molécules d'eau sur les longues chaînes du polymère induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau et par conséquent celle de la pâte de ciment.

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles **[52]**. Khayat et al. **[52]** ont fixé 3 catégories générales pour les agents de viscosité :

Les polymères ordinaires, semi-synthétiques et synthétiques. Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges **[52]**.

Les agents de viscosité peuvent avoir une seconde fonction, le retard de prise, ainsi que l'entraînement d'une certaine quantité d'air, entraînant des conséquences sur la résistance mécanique du béton. Les effets secondaires sont fonction du type et du dosage de l'agent de viscosité utilisé.

I.2.5 Propriétés d'un BAP

I.2.5.1 Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état frais

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

principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'auto compaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides inters granulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l /m3.

- Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette val.eur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m3.
- Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et des modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier **[59]**.

Les guides Européens pour le BAP **[48]**, répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles .

A. Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre **[53]**, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de deux dispositifs, le cône d'Abrams et l'Orimet (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage.

Propriété	Essais à réaliser
Capacité au Remplissage	• Etalement au Cône d'Abrams (Slump-Flow) • Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50} Slump-Flow) • Temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) • Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) • Etalement au Tube Orimet (Orimet) • Essai du caisson (Fill Box)

B. Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferraillage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat.

La dimension à définir est l'espacement entre les bars, cet espacement doit permettre l'écoulement normal du béton. L'espacement entre la barre de ferraillage et le coffrage n'est pas à considérer car le béton peut contourner la barre et n'aura pas besoin de s'étaler continuellement à travers cet espace. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de trois dispositifs, le cône d'Abrams en présence du J-Ring, la boîte en L (L-Box) et la boîte en U (U-Box) (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Essais permettant la détermination de la capacité de passage.

Propriété	Essais à réaliser
Capacité au passage	• Etalement au cône d'Abrams en présence • Temps à T50au cône d'Abrams en présence du J-Ring • Différence d'Hauteurs au J-Ring • Essai de la Boite en L (L-Box test) – Mesure • de H2/H1 • Essai de la boite en U (U-Box test)

C. Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité sur site du béton autoplaçant. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement. La ségrégation qui se produit après la mise en place est le plus défavorable surtout pour les longs éléments et même pour les éléments minces comme les dalles, ce qui peut mener vers des dégradations de surface comme sa fissuration.

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est

généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm.

D. Facteurs clés des propriétés des BAP à l'état frais

Le comportement et les propriétés d'un béton autoplaçant à l'état frais dépendent étroitement de ses caractéristiques rhéologiques. L'expérience de ces dernières années a permis de rassembler des informations suffisantes pour cerner les valeurs limites de certains paramètres déterminants pour l'obtention d'un BAP. A cet égard, il convient de ne pas oublier que l'ouvrabilité et les propriétés d'un béton à l'état frais sont cal.culées en fonction du temps et qu'elles évoluent rapidement. Ainsi, lors d'essais préliminaires pour la production du BAP en centrale de béton prêt à l'emploi on veillera à ce que les performances d'ouvrabilité requises soient assurées à l'arrivée du béton sur le chantier, pour cela les points suivants sont des facteurs clés pour avoir un bon BAP à l'état frais.

D.1. Type de ciment

L'influence du ciment sur l'ouvrabilité dépend de sa composition minéralogique, de sa finesse de mouture et des adjuvants avec lesquels il est utilisé simultanément. Le type de ciment affecte surtout la rhéologie initiale du mélange de béton. La composition du ciment, par exemple la teneur en C_3A qui réagit très rapidement, va déterminer la rhéologie du mélange **[54]**. Beaupré et Mindess **[55]** ont effectué des essais avec trois types de ciment. Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment type 50 (classe 52,5 norme européenne) montre le plus faible seuil de cisaillement, un mélange fait avec du ciment type 30 (classe 32,5 norme européenne) avec fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 30 présente un seuil de cisaillement entre les deux précédents. La viscosité plastique demeure constante en général **[55]**.

D.2. Dosage en eau

Le dosage en eau peut être utilisé comme grandeur de référence de la même manière que pour un béton conventionnel vibré. Si le béton autoplaçant est trop fluide (viscosité Trop faible, ouvrabilité trop élevée) et présente une forte tendance à la

ségrégation, on pourra réduire la quantité d'eau dans la pâte de ciment. Si nécessaire, l'ouvrabilité du béton pourra être adaptée en augmentant le dosage en adjuvant fluidifiant.

Très récemment Hwang et Khayat **[56]** ont trouvé qu'une composition de BAP a une considérable influence sur l'apparition des fissures. Ainsi une composition à E/C = 0,42 prend 26 à 37% plus de temps avant l'apparition des fissures qu'une composition à E/C = 0,35 en utilisant le même superplastifiant. Par contre la première composition montre un plus grand retrait plastique que la deuxième, d'après les auteurs ceci est dû au fait que la composition à E/C = 0,42 a un plus grand volume de pâte et moins de gros granulats (en volume).

D.3. Excédent de pâte de ciment

Un excédent de pâte de ciment dépassant 90 l/m^3 peut s'avérer nécessaire en cas de faible valeur du rapport E/C ou d'une proportion élevée de granulats concassés. L'étanchéité et la résistance à la compression d'un tel béton s'en trouveront améliorées. Si le volume excédentaire de pâte de ciment est nettement inférieur à 90 l/m^3, on doit s'attendre à un étalement plus faible, ainsi qu'à une tendance accrue à l'apparition de blocages au droit des barres d'armatures, de nids de gravier et de bullage sur les parements.

D.4. Quantité de fines (<80μm)

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP doivent contenir une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons ordinaires. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire.

L'ajout de fumée de silice augmente le seuil de cisaillement à partir d'une teneur de 7%. A un dosage inférieur à 7% en fumée de silice, un effet négligeable a été observé **[56]**. Aussi, si la teneur en ciment est faible, l'augmentation du seuil de cisaillement se fait moins sentir. Le comportement des bétons renforcés de fibres est Binghamien, lorsque la quantité de fibres augmente, la viscosité plastique et le seuil de cisaillement

augmentent aussi. Lorsque la longueur des fibres augmente, seul le seuil de cisaillement augmente.

D.5. Choix et dosage des Adjuvants

Les superplastifiants sont généralement utilisés pour des bétons à faible rapport E/C. Généralement, on observe une diminution du seuil de cisaillement avec 1'augmentation de la concentration en superplastifiant al.ors que la viscosité plastique ne change pratiquement pas **[57]**. Un autre effet des superplastifiants est la perte rapide de l'affaissement dans le temps. Un béton non superplastifié sera relativement stable dans le temps quant à ses propriétés rhéologiques al.ors qu'un béton superplastifié peut montrer une prise beaucoup plus rapide ou une prise anormalement retardée à de très hautes concentrations en superplastifiant **[58]**.

L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires. Sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé avec perte des performances recherchées du BAP **[59]**.

D.6. Agents entraîneurs d'air

La teneur en air affecte le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Lorsque la teneur en air augmente ces deux derniers paramètres sont réduits.

D.7.Granulats

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zones confinées, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

En général ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible, ou à la baisse dans le cas contraire. Comme mentionné précédemment, le diamètre maximal D_{max} des gravillons doit rester en dessous de 20 mm pour minimiser le risque de blocage.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible **[59]**.

D.8. Temps

L'hydratation du ciment se fait dans le temps. C'est la période dormante qui donne de deux à quatre heures de maniabilité au béton. Cependant, même si la réaction d'hydratation du ciment est ralentie à ce moment, une perte de maniabilité est observable. La perte de maniabilité dans le temps peut être mesurée en termes d'augmentation du seuil de cisaillement et de l'augmentation également de la viscosité plastique.

D.9. Température

La température a un effet indirect sur la rhéologie du béton. Habituellement, la température joue directement sur la viscosité d'un matériau. Pour le cas du béton frais, la température est une des causes de l'augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment qui provoque la perte de maniabilité rapide dans le temps. La température exerce une influence sur la viscosité de la pâte de ciment et par conséquent sur les propriétés rhéologiques du béton mais cet effet est de beaucoup moindre importance.

I.2.5.2. Propriétés mécaniques d'un BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçant conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons

vibrés. Lors de son étude d'évaluation du retrait, fluage et module d'élasticité des BAP, Persson **[60]** a conclu que les valeurs de ces trois paramètres coïncidents bien avec celles du béton vibré quand la résistance reste constante.

A. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles pour un béton tout comme le BAP car elles offrent généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elles sont directement reliées à la structure de la pâte de ciment hydraté. C'est la meilleure optimisation qui nous permet d'avoir un meilleur BAP avec des résistances qui peuvent aller de 60 à 100 MP à 28 jours.

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux bétons ordinaires. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants car un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable, ainsi qu'il est possible d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolanique des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **[61]**. Les particules fines d'un 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.

Différentes données ont été publiées **[62,63]** sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés soutiennent les affirmations précédentes (Figure I.14).

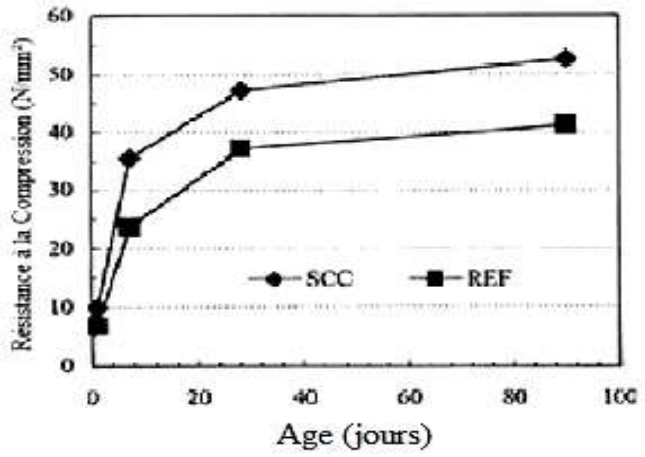


Figure I.14 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant **[62].**

De plus, certains auteurs **[64]** affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande.

L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges **[65]**. 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. Etant 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.

Selon Klug et Holchemacher **[67]**, les résistances mécaniques des BAP et des bétons vibrés sont similaires sous des conditions comparables, mais les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment.

A.1.Résistance à la compression

Un béton Autoplaçant avec un rapport E/L similaire, aura généralement une résistance légèrement plus élevée en comparaison à celle du béton ordinaire à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie **[65]**.

A.2 Résistance à la traction

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de

pâte (ciment + fines + eau) n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction **[48]**.

Selon Klug **[66]** la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferraillage.

Selon Guneyisi et Gesoglu **[67]** la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al. **[68]** ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les règlements de Béton Armé. La relation proposée est :

$$f_s = 0.076 f_{ck} + 0.5582$$

B. Module de Déformation Longitudinal

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton. En choisissant des agrégats ayant un module élevé, on augmentera le module d'élasticité du béton.

Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçant ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires, Assié et al. **[69]** ont trouvé que, d'une part et malgré un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

Nassif et al. **[70]** attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé. Or ceci, d'après les auteurs, ne peut être valable que si le seul paramètre est le rapport eau/poudre. Le module d'élasticité des bétons à haute

performance est influencé par les constituants du mélange. Ainsi à jeune âge le taux de gain du module d'élasticité est plus élevé que celui de la résistance quand le mélange comporte des additions minérales. Le module d'élasticité des BHP utilisant le laitier et la fumée de silice augmente avec l'âge, et le taux d'augmentation devient moindre à l'approche de 28 jours, plus encore l'addition des cendres volantes réduit le taux d'augmentation du module d'élasticité avec l'âge. Avant eux PERSSON **[60]** avait trouvé que le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire quand la résistance est constante.

FELEKOGLU et al. **[71]** ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel. En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

C. Retrait

Plusieurs travaux ont comparé le retrait plastique du BAP et celui du béton vibré Gram et PIPARINEN **[72]**, ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons ordinaires (Figure I.15).

Pour TURCRY l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires (Figure I.16).

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon Song et al. **[73]**, le laitier remplit bien cette condition.

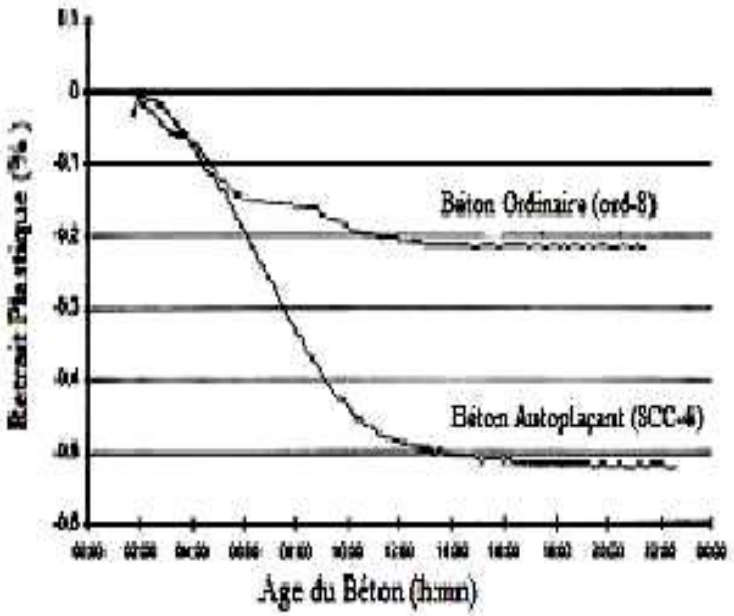


Figure I.15 : Retrait plastique de BAP et de béton ordinaire **[72].**

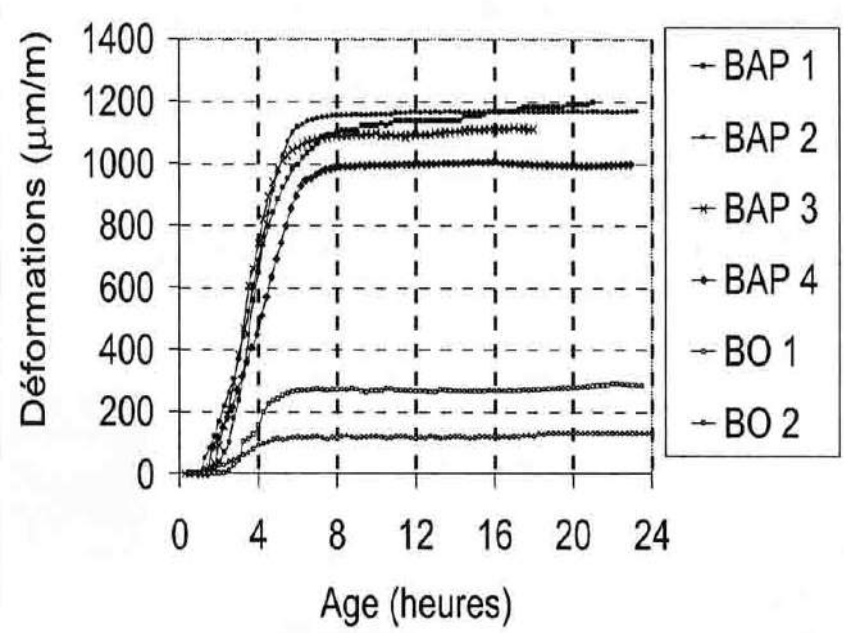


Figure I.16 : Amplitudes maximales des BAP et Bétons ordinaires **[74].**

En ce qui concerne le retrait endogène qui est dû à l'hydratation, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés **[75]**. En effet, même si certains auteurs, Hu et Barbieri **[76]** attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres auteurs tels que VIEIRA et BETTENCOURT **[77]** et Pons et al. **[78]** contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. D'autre part, Lee et al. **[79]** mentionnent que le retrait endogène est plus important dans les

BAP que dans les bétons ordinaires, en raison du retrait chimique élevé ainsi qu'aux fines pores dans les bétons au laitier.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique est directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton est d'autant plus important que son rapport E/C est faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés **[79]**.

Les résultats disponibles de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs **[76]** trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés. Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé. D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante **[60]**. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 µm/m (à 180 jours).

SONEBI et BARTOS **[63]** ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants (Figure 1.17) que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). L'augmentation du volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage **[80]**.

Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates **[81]**. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée.

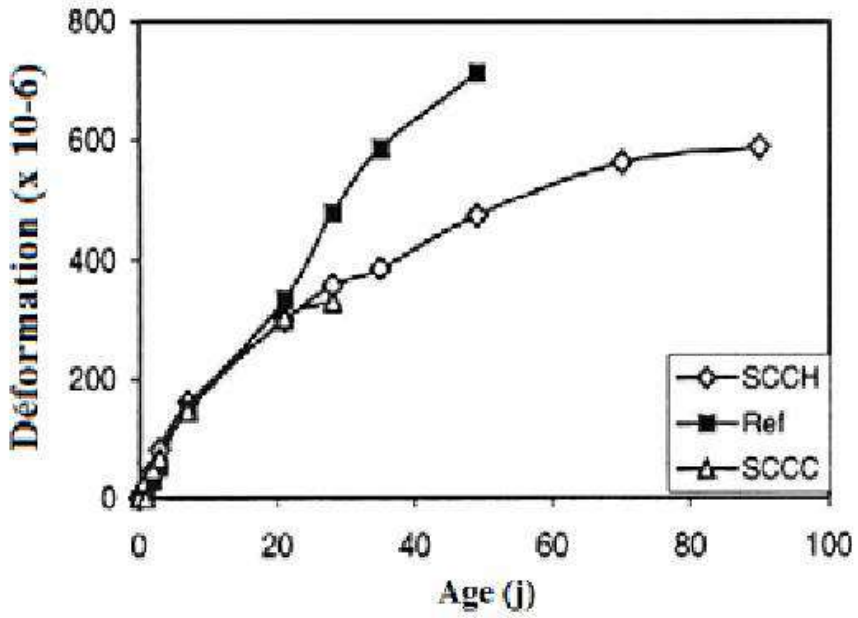


Figure I.17: Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant **[63]**.

D. Fluage

D'après les résultats présentés par Proust **[83]**, les comportements des bétons autoplaçant peuvent différer d'une formulation à l'autre. Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs **[83,77]**. De plus, selon **[60]**, le manque de différence significative entre le fluage des BAP et celui des bétons vibrés est valable pour une gamme de résistances étendue.

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins. L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés.

Selon Song et al. **[73]** l'effet de la finesse du laitier est clair sur le fluage. Ce dernier diminue pour les 28 premiers jours par rapport au béton vibré. Ceci est confirmé par Jianyong et Yan **[84]** qui stipulent que le fluage sera fortement réduit en utilisant un laitier ultrafin. Ils ajoutent aussi que dans les mêmes conditions, le fluage d'un béton à haute performance contenant un laitier ultrafin est beaucoup plus faible que celui d'un béton sans laitier. Ils ont comparé trois mélanges de béton à haute performance, le premier (concrete A) contenant que du ciment, le deuxième (concrete B) contenant 30% de laitier et le troisième (concrete C) contenant 30% de laitier et 10% de fumée de silice. Ils ont trouvé que le fluage des deux derniers mélanges est plus faible que celui du premier mélange (Figure 1.18).

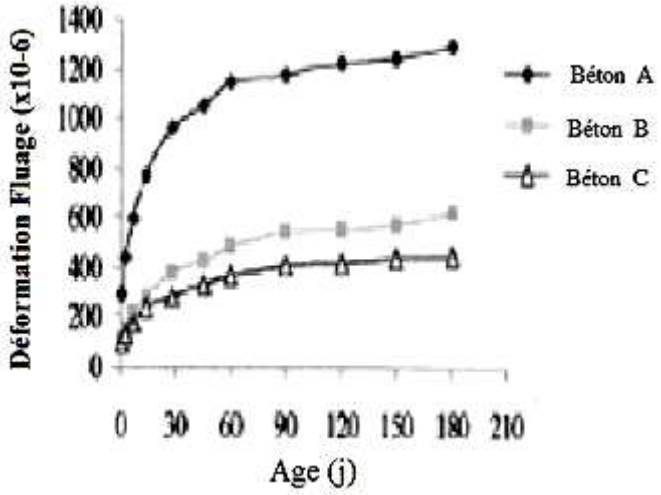


Figure I.18 : Développement du Fluage du Béton **[84].**

E. Adhérence avec le ferraillage

Le béton armé est basé sur une adhérence effective entre le béton et les armatures. L'efficacité de l'adhérence est affectée par la position des bars et la qualité du béton. Un enrobage adéquat est nécessaire pour transférer proprement les contraintes d'adhérence entre l'acier et le béton. Une mauvaise adhérence est généralement le résultat de l'échec du béton à bien enrober l'acier durant la mise en place ou du ressuage et ségrégation du béton avant son durcissement. La fluidité et la cohésion du béton autoplaçant minimisent ces effets négatifs.

Sonebi et Bartos **[63]** ont trouvé que la contrainte d'adhérence dans un BAP est entre 16 et 40% plus élevée que dans un béton ordinaire. Mieux encore, Chan et al. **[85]** ont trouvé que, sans vibration, la contrainte d'adhérence dans un BAP est double á celle

dans un béton ordinaire, et elle est meilleure que celle dans un béton à haute performance même vibré.

Récemment Valcuende et Parra **[86]** ont confirmé cependant le meilleur comportement du BAP en adhérence que le béton ordinaire, Domone **[74]** a trouvé que la contrainte d'adhérence des BAP est très similaire à celle des bétons ordinaires.

F. Résistance au feu

Le béton n'est pas combustible et ne supporte pas l'étalement des flammes. Il ne produit pas de fumée, de gaz toxiques ni d'émissions quand il est exposé au feu. Le béton a un faible seuil de transfert de chaleur et retient la majorité de sa résistance. D'après le rapport de RILEM en 2008 sur la durabilité des BAP **[87]**, la résistance au feu des bétons autoplaçant est similaire à celle des bétons ordinaires. A cause de la faible perméabilité du BAP la résistance au feu peut être considérable. Selon Persson **[88]**, l'utilisation des fibres polypropylène a été très bénéfique aux BAP car ils contiennent des pores qui permettent l'emprisonnement des fumées.

G. Corrosion des armatures

Cheng et al. **[89]** ont effectué des essais sur la corrosion des armatures dans des mélanges de béton contenant du laitier et ils ont trouvé que ce dernier diminue les pores dans le mélange, produit un mélange dense, diminue les risques de fissuration et par conséquent réduit le risque de corrosion dans les armatures. Selon Palet al. **[90]** l'augmentation de la teneur en laitier dans le béton diminue la quantité de corrosion dans ce dernier. Yeau et Kim **[91]** ont trouvé aussi qu'une grande résistance à la corrosion peut être atteinte avec une grande teneur en laitier.

Selon Hou et al. **[92]** l'introduction du laitier dans le mélange de béton assure une faible perméabilité ce qui assure une forte résistance à la corrosion des armatures.

Très récemment Hassan et al. **[93]** ont trouvé qu'en coulant une poutre armée en béton autoplaçant et une autre en béton ordinaire, à échelle réelle, la résistance à la corrosion a été plus élevée dans le cas du BAP que pour le béton ordinaire. Par contre la propagation des fissures a été plus facile et plus étendue dans le cas du BAP. La poutre coulée en BAP a montré une dégradation de l'enrobage, probablement dû au faible volume de gros granulats dans le mélange en BAP. Il a été constaté aussi une certaine

non-uniformité du BAP le long de la poutre tout en s'éloignant de l'extrémité où le coulage est réalisé et par conséquent ils ont proposé que le point de coulage soit mobile le long de la poutre.

I.2.6 Caractérisation de BAP

Les caractéristiques principales des BAP résident dans les propriétés du béton à l'état frais, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La caractérisation de ces propriétés peut être réalisée avec des moyens et un niveau de précision très variable. En effet, il n'existe pas d'essai standard ni de critère associés pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. Pour pallier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur mortier et sur béton **[94] [95]**.

I.2.6.1. Essais sur mortier

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants ;
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile ;
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton ;

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement. Un seuil de cisaillement entre 20 et 50 Pa et une viscosité plastique entre 6 et 12 Pas ont été suggérés comme appropriés **[94] [95]**. La mesure du seuil de cisaillement et de viscosité plastique nécessitent un rhéomètre, dans le cas ou cet appareil est non disponible, des essais alternatifs plus simples sont proposés pour évaluer la fluidité du mortier comme l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs (Figures I.14 et I.15) **[94]**.

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. Dans l'essai de l'entonnoir (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

Nawa et al. **[96]**, ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s **[97]**.

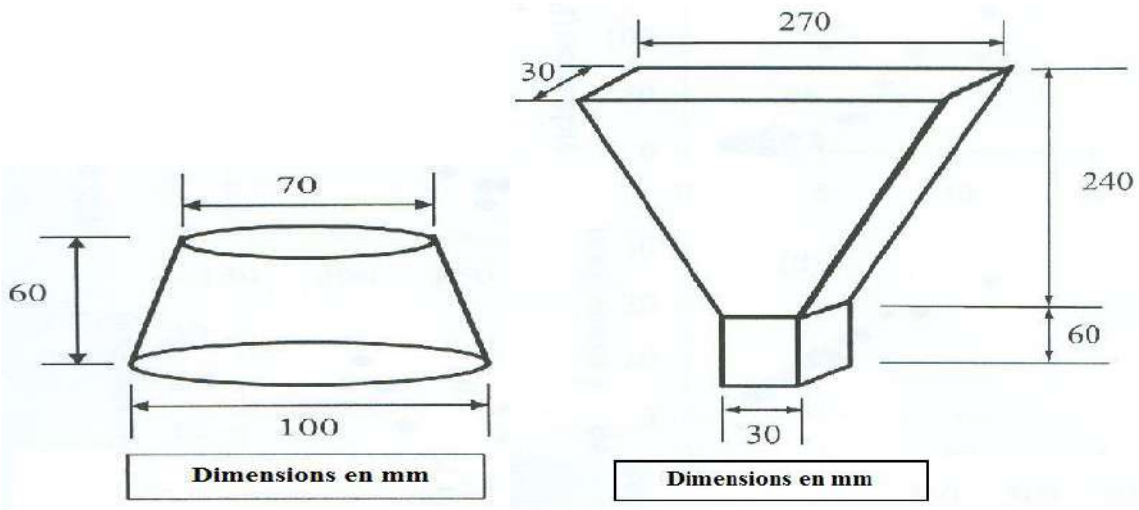


Figure I.19 : Essai d'entonnoir pour les mortiers.

I.2.6.2. Essais sur béton frais

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier en termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. Nous présenterons dans cette partie les principaux tests d'ouvrabilité pour la caractérisation des bétons autoplaçant.

A. Essai de l'étalement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm. L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône, ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm **[98]**.

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton **[99] [100]**.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier) **[59]**. Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Le T50 est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T50, traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le T50 est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes **[101] [102]**. Cependant, centrés avant de relever le cône et observer l'étalement du béton à travers les armatures. Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différents selon les auteurs **[103]**.

Certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçant avec une faible vitesse de déformation **[104] [105]**.

B. Essai d'Etalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est le retenu.



Figure I.20: Essai d'Etalement pour mortier.

C. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.



Figure I.21 : Essai à l'Entonnoir pour mortier.

D. Essai à la Couronne J (J-Ring test)

L'essai à la couronne J (J-ring test) consiste à investiguer les deux propriétés, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50J} et le blocage.

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

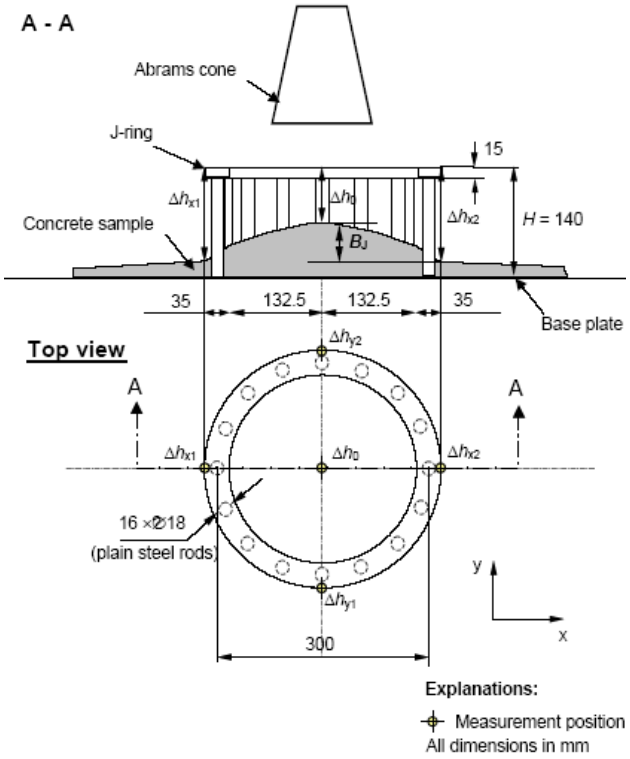


Figure I.22 : Dimensions du J-ring et positions pour mesure de Différence d'Hauteurs.

E. Essai à la boite en L (L-Box test)

Avec l'essai à la boite en L, il est possible de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L. On place le béton dans la « tour » de l'appareil (hauteur de 600 mm), soit environ 12,7 L de béton. On peut éventuellement laisser le béton au repos 1 minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on retire la trappe et on

mesure le temps (en secondes) que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale.

Ce test permet de caractériser la viscosité du mélange. De plus, la présence de barres simulant des armatures d'un coffrage renseigne sur la capacité de remplissage du mélange.

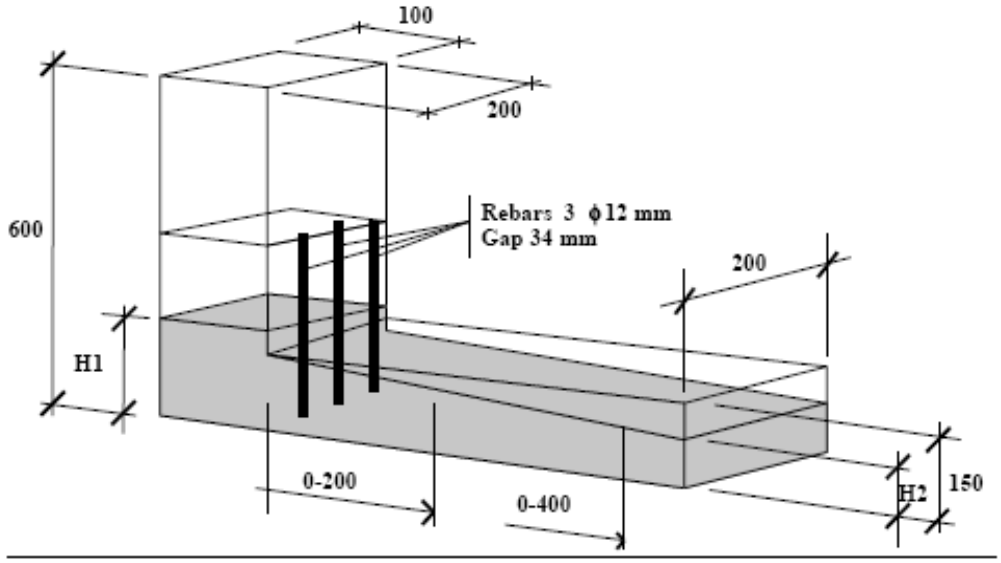


Figure I.23 : La boite en L.

Mesures à prendre

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T_{20} pour arriver à la distance 200 mm (Dans la partie horizontale) ;
- Le temps d'écoulement du béton T_{40} pour arriver à la distance 400 mm (Dans la partie horizontale) ;
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 (Voir figure 1.23) ;

On peut alors calculer le rapport H2/H1. Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. Les deux, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement, si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferraillage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale du L, on pourra dire

que ce béton est homogène.

Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant.

F. Essai à la boite en U (U-Box test)

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (Figure 1. 24) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale (h_2-h_1=0).

Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence d'hauteur se rapproche le plus cette valeur nulle.

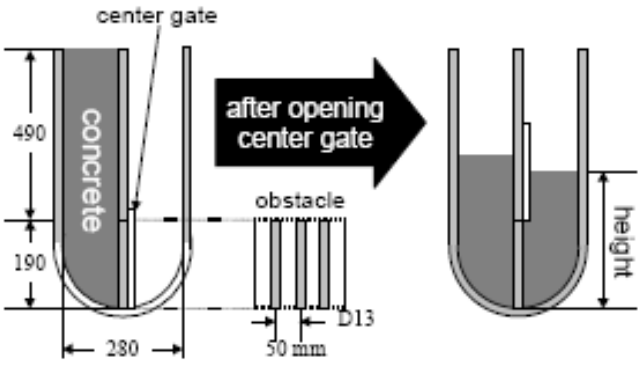


Figure I.24 : Essai à la boite en U.

I.2.7. Formulations et Compositions des BAP

La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un

béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides inters granulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m^3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m^3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP.

Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les différentes propriétés des bétons autoplaçant (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 **[106]**.

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 de ses quelques modifications.

I.2.7.1. 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 **[107]**. 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 :

$$G = \frac{50}{100} G_{\lim}(1 - A) \qquad \text{(équ I.3)}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

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

$$S = \frac{40}{100} \frac{(1 - A - G)}{(1 - K_{sf})} \qquad \text{(équ I.4)}$$

Où: 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 :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \qquad \text{(équ I.5)}$$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes.

La viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \qquad \text{(équ I.6)}$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V est exprimé en secondes

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de Γ_m est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée). Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0{,}1$. 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.

I.2.7.2. Formulations modifiées de la méthode générale

La méthode générale n'est pas adaptée pour formuler des bétons avec des agents de viscosité, pourtant elle conduit à la formulation de bétons très visqueux **[108]**. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. Les modifications ont touché surtout les dosages en gravier et en sable.

A. Kochi University of Technology (Japon)

Edamatsu et al. **[109]** ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) d'augmenter le dosage de sable dans le mortier à plus que 40% et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

B. University of Tokyo (Japon)

Ouchi et al. rapporté par **[107]** ont proposé une méthode plus rationnelle pour déterminer une combinaison satisfaisante du rapport eau/poudre et du dosage en superplastifiant que celle utilisée dans la méthode générale. Chaque paramètre est déterminé indépendamment, afin de minimiser le nombre de tests demandés. Ces tests ont montré que la relation entre l'étalement relatif G_m et la vitesse relative d'écoulement R_m est linéaire pour n'importe quelle val.eur du dosage du superplastifiant (rapport Sp/P en masse) et pour n'importe quel rapport eau sur poudre (E/P en volume), et á la forme :

$$R_m = A \cdot \Gamma_m^{0,4} \qquad \text{(équ I.7)}$$

C. Delft University (Denmark)

Travaillant avec des matériaux locaux, Pelova et al. rapporté par **[107]**, ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total., tout en limitant la dimension maximale des granulats D_{max} à 16 mm, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

D. Méthode de Domone (U.C.L. Grande Bretagne)

Selon **[107]** Domone a proposé les modifications suivantes, sans utilisation d'agent de viscosité:

- Augmenter le volume du sable dans le mortier;
- Introduire des ajouts minéraux dans la pâte de ciment;
- Obtenir le rapport maximum eau/poudre, en utilisant le test d'étalement au cône sur mortier, de manière à assurer la résistance à la ségrégation;
- Déterminer le dosage en superplastifiant de la même manière que la méthode générale;
- Tester le mélange de béton à l'étalement : jusqu'à l'obtention des valeurs entre 650 et 700 mm;

I.2.7.3 Autres formulations

- Formulation CBI (Suède) ;
- Méthode CBI modifiée ;
- Formulation JSCE (Japon) ;
- Formulation LCPC (France) ;
- Formulation de l'Université de Sherbrooke (Canada) ;

I.2.8 Propriétés des mortiers à base des fines et sables recyclés

I.2.8.1. Introduction

Il existe des études expérimentaux a pour objet, d'étudier l'effet de recyclage de déchet des travaux de construction, dans la fabrication d'un mortier de maçonnerie, tel que les déchets de brique et de béton bitumineux sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un mortier de maçonnerie à base des matériaux locaux (Médéa).

I.2.8.2. Le mortier à l'état frais

A. Ouvrabilité

Les déchets de brique influent négativement sur l'ouvrabilité du mortier, si le pourcentage de déchet augmente, le temps d'écoulement du mortier augment aussi **[110].**

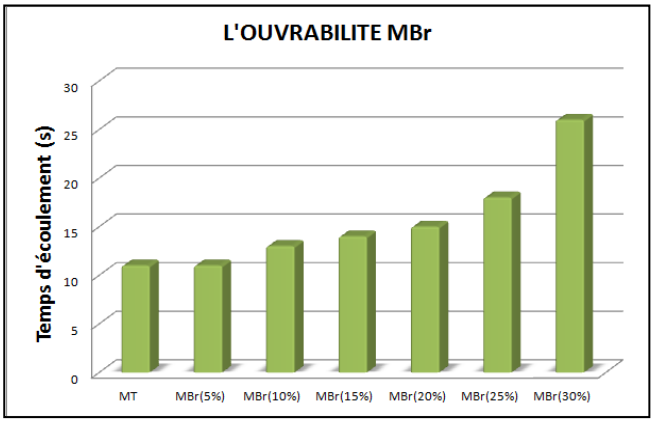


Figure I.25 : Temps d'écoulement des mortiers à base de déchets de brique **[110].**

L'utilisation de l'adjuvant (Medaflow 145) nous a permettez d'avoir une bonne ouvrabilité (11 sec) pour tous les mélanges de mortier à base de fine de brique recyclé **[110].**

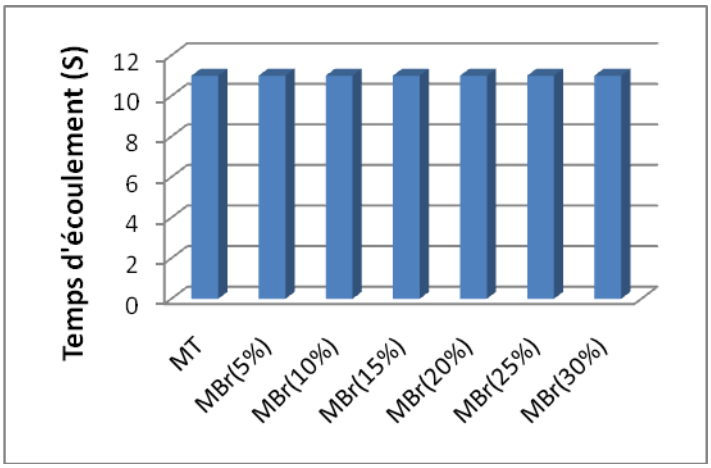


Figure I. 26 : L'ouvrabilité du mortier MBr après l'utilisation de l'adjuvant **[110].**

Le temps d'écoulement des différents mortiers diminue avec l'augmentation du pourcentage en substitution en sable recyclé bitumineux jusqu'à 50 % **[111].**

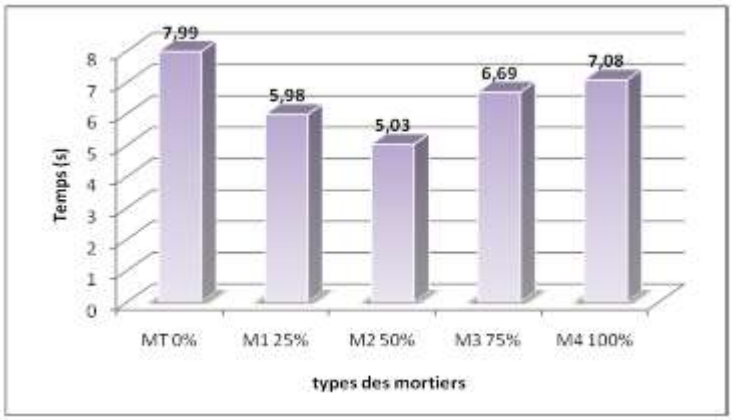


Figure I. 27: Temps d'écoulement des mortiers fabriqués **[111].**

B. Teneur en air

La teneur en air des mortiers à base de sable recyclé bitumineux augmente avec l'augmentation du pourcentage en substitution en sable recyclé par rapport à celle du mortier témoin **[111].**

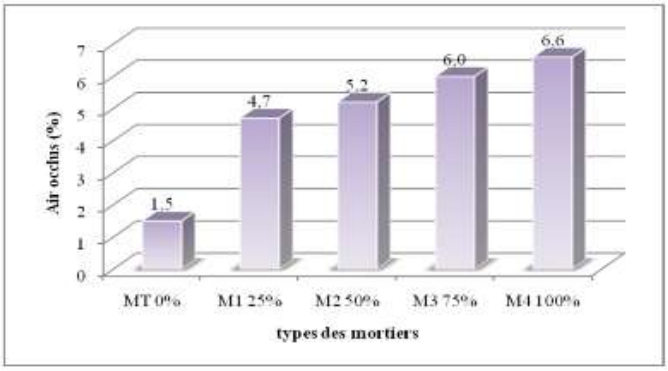


Figure I. 28 : Teneur en air des mortiers fabriqués **[111].**

I.2.8.3.Le mortier à l'état durci

A. Résistance à la compression

À jeune âge les résistances des mortiers à base de déchet de brique diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en déchet. Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. À l'âge de 28 jours, les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15% dépassent celle du mortier de référence **[110].**

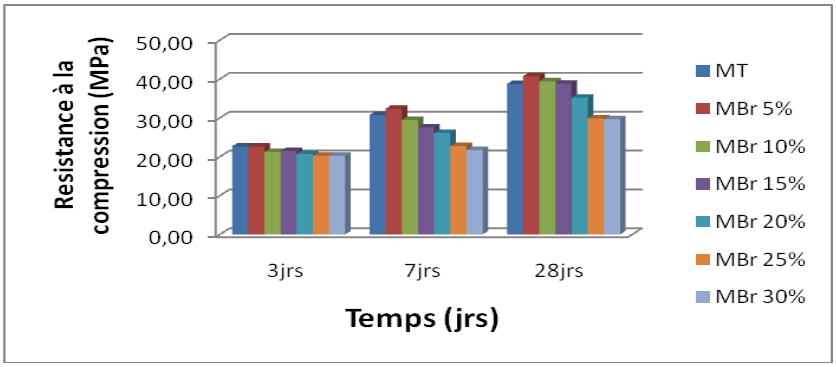


Figure I.29 : Variation de la résistance à la compression des mortiers MBr **[110].**

La résistance à la compression des mortiers recyclés à base de sable recyclé bitumineux augmente en fonction de l'âge et diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage en substitution en sable recyclé, HERIRHRI et al **[111].**

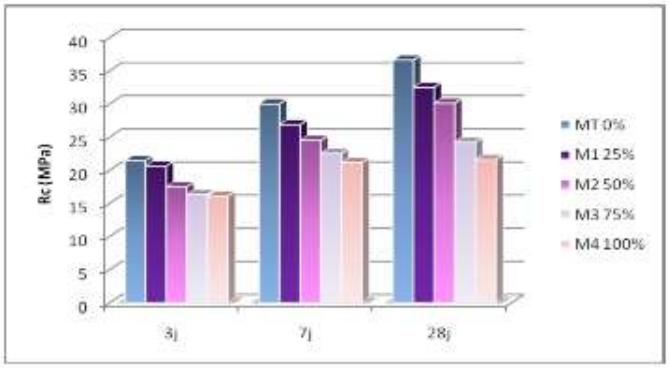


Figure I.30 : Variation de la résistance à la compression des mortiers **[111].**

B. Résistance à la traction par flexion

Les résistances des mortiers MBr 5%, MBr 10% et MBr 15% dépassent celle du mortier témoin pour les trois âges, et la plus faible valeur est remarquée pour le mortier MBr 30% **[110].**

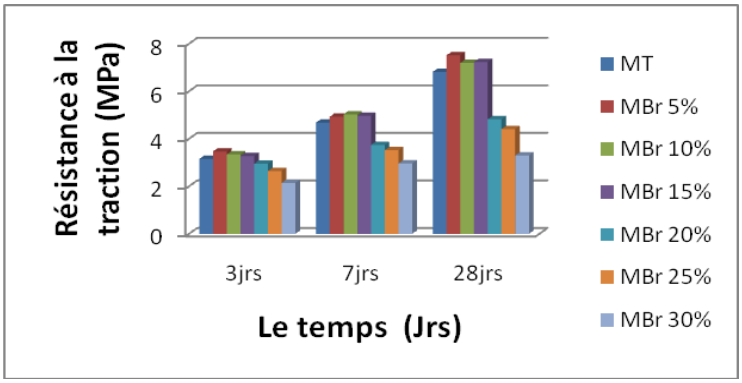


Figure I.31 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers MBr **[110].**

La résistance à la traction des mortiers recyclés à base de sable recyclé bitumineux à l'âge de 3jours est comparable par rapport au mortier témoin, mais à partir de des 7 ème jours de conservation la chute est considérable **[111].**

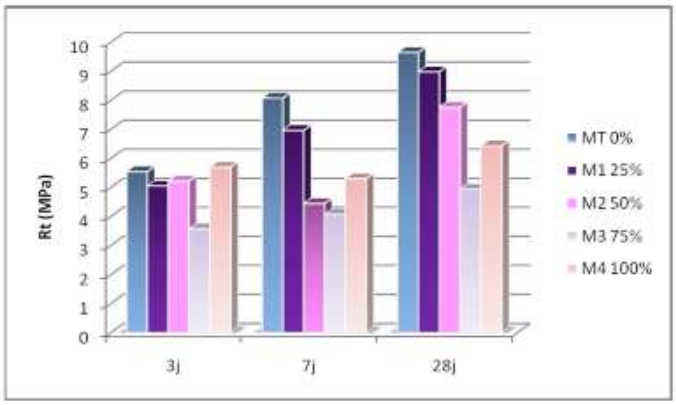


Figure I.32 : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers **[111].**

C. Absorption d'eau par capillarité

Le mortier à base des déchets de brique absorbe moins d'eau par rapport au mortier témoin. Ceci peut être dû aux réactions pouzzolanique des déchets de brique qui ont permettaient l'amélioration de la compacité de ces mortiers **[110].**

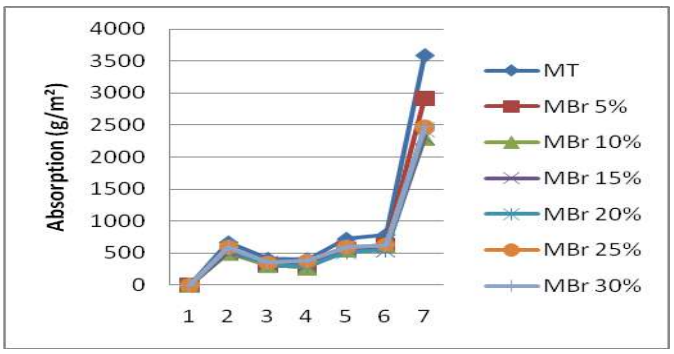


Figure I.33 : Absorption capillaire du mortier à base de déchets de brique **[110].**

D. Retrait et gonflement

Les valeurs du retrait augmentent en fonction du pourcentage de remplacement en déchet de brique **[110].**

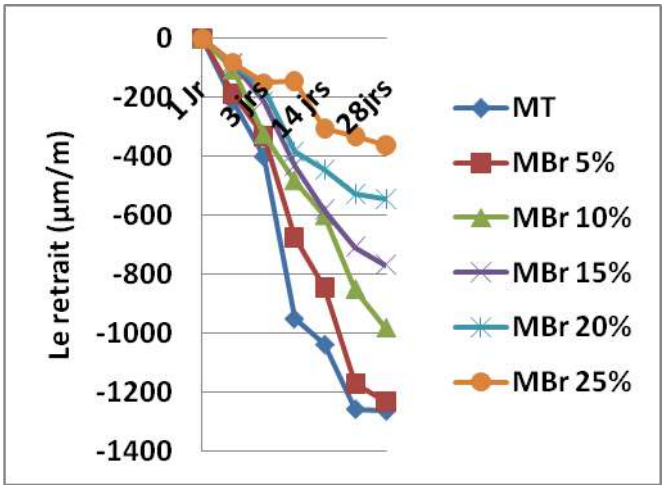


Figure I.34 : Résultats du retrait des mortiers à base de déchet de brique **[110].**

Les valeurs du gonflement augmentent en fonction du pourcentage de remplacement en déchet de brique. Ceci peut être dû au taux d'absorption élevé des grains de déchet de brique. La plus grande valeur observer dans l'essai de gonflement est dans le mortier à base de 25% de déchets de brique **[110].**

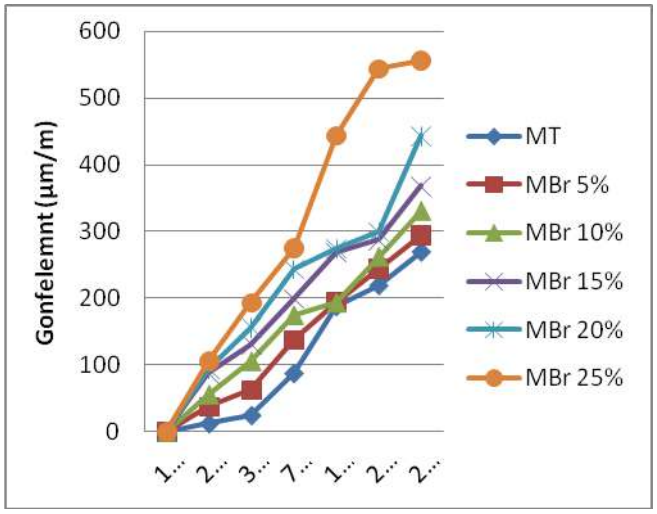


Figure I.35 : Résultats du gonflement des mortiers à base de déchet de brique **[110].**

I.2.9 Propriétés des BAP à base des granulats recyclés

L'utilisation des granulats recyclés est l'une des solutions envisageables. La chute de résistance est de 20 à 35% en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. L'utilisation des granulats recyclés donne un retrait élevé à jeune âge et donc un risque de fissuration plus important réduisant ainsi la durabilité du béton aux agents agressifs. Il est possible de produire un béton à base de granulats de béton ou briques recyclés si on limite le taux de substitution en particulier celui des fines. L'utilisation des granulats contaminés est aussi possible car le type de contamination n'influe pas sur la performance du béton à l'exception de la carbonatation. La substitution totale ou partielle des granulats ordinaires par des granulats recyclés donne un BAP dont les propriétés et les caractéristiques à l'état frais sont comparable à celles du BAP à base de granulats ordinaires **[112].**

I.2.10. Conclusion

L'étude bibliographique sur les BAP est consacrée á la présentation des propriétés physiques, mécaniques et á la durabilité .

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associé à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité.

A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition. Du point de vue mécanique, l'emploi d'additions minéral.es améliorant la résistance au jeune âge. A long terme, le comportement mécanique peut être comparé aux bétons vibrés. Mais, dans certains cas, le volume de pâte élevé peut avoir un effet réel mais limité sur le comportement mécanique entraînant soit une augmentation, soit une diminution de ces propriétés.

Une réflexion a été menée sur les méthodes de formulation des BAP. Différentes méthodes trouvées dans la littérature découlent des trois approches : Optimisation du mortier, optimisation de la quantité de la pâte de ciment, optimisation de squelette granulaire. Ces méthodes demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions.

Les travaux concernant l'effet du sable sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP sont peu nombreux. Généralement les études se focalisent sur l'effet du sable sur la fluidité des BAP et en particulier la fluidité des mortiers, ce qui signifie clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'influence de la qualité des sables sur les propriétés physiques, mécaniques et durabilité des BAP.

Chapitre II

Matériaux et essais



II.1. Introduction

Dans cette partie expérimentale, nous proposons une nouvelle démarche pour formuler un mortier auto plaçant à base de sable recyclé bitumineux (SRB). Avant d'entamer une formulation il est nécessaire de connaitre les matériaux et les méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux. L'objectif de ce chapitre est déterminer les caractéristique des matériaux utilisées au moyen d'un certain nombre d'essais normalisés, ainsi que l'illustration des certaines interprétations ne pourraient possible que si les différents constituent sont bien caractérisés. Pour cela on veut avoir l'influence de SRB sur le comportement d'un mortier auto plaçant à l'état frais et à l'état durci.

II.2.matériaux utilisés :

II.2.1. Ciment

Un seul type de ciment utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie (de Mascara) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[113].**

II.2.1.1. Définition

MATINE est ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO2) à caractère acide.

On trouve également L'aluminium (Al2O3) et le fer (Fe2O3). Ils sont rendus aptes à réagir entre aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises 1300 °C et 1500°C.

En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la normeNA442 **[113]** EN 197-1 **[114]** et à la norme NF P 15-301 **[115]**

II.2.1.2.Domaine d'utilisation

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sols ou de l'eau, ainsi que dans les dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment. Les principales applications de ce ciment sont :

- ✓ Secteur habitat (logement et autre constructions civiles) ;
- ✓ Secteur des travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport ….etc.) ;
- ✓ Secteur hydrauliques (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, station de dessalement ……etc.) ;
- ✓ Secteur industriel ;

A. Analyse et caractérisation

❖ **Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker**

Le tableau II.1 résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment **(Annexe A).**

Tableau II.1 : l'Analyse chimique du ciment et composition du clincker.

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO_3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C_3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	6.00-8.00

❖ **Essais physiques**

➢ **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface

spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476**] [116].**

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[117].**

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme [NF P 15-473] **[118]**. Le tableau II.2 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau II.2 : Essai physiques sur ciment.

Essais	**Norme**
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme [NF P 15-471] **[119]** sur des éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable ordinaire et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

Ages (jours)	**Résistance à la compression (MPa)**
2	>20
28	≥ 42.5 et 62.5



Figure II.1 : Le ciment utilisé.

II.2.2. Granulats ordinaire

Pour les besoin de cette recherche on utilise deux sables ordinaires :

II.2.2.1. Le sable roulé

Le sable roulé utilisé dans cette étude est Hassi Bahbah de la région de Djelfa **[120],** sa classe granulaire est 0/0,315mm, c'est un sable fin (figure II.2) et qui est utilisé pour corriger le sable de concassages utilisé.



Figure II.2 : Le sable roulé.

II.2.2.2. Le sable de concassage

C'est un sable concassé ordinaire, sa classe (0/4) vient de la carrière El - Hachimia.



Figure II.3 : Sable de concassage.

II.2.3. Granulats recyclés bitumineux

Ce type de granulats est obtenu par fraisage des anciennes routes bitumineuses dans la région de Médéa. Pour cette étude on utilise le sable recyclé bitumineux (SRB) seulement de classe granulaire 0/4.



Figure II.4: Le sable bitumineux utilisé **.**

II.2.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau potable de distribution, exempte d'impuretés, conforme à la norme [NF P 18-303] **[121]**.



Figure II.5 : L'eau de gâchage utilisé.

II.2.5. Super plastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un Super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex: MEDAFLOW 145;il est à la base poly carboxylates d'éther, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0, 5% à 2% du poids de ciment **(Annexe B)**

Ses caractéristiques sont:

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Brai clair
- PH 5
- Densité ..... 1.065 ± 0.016

- Teneur en chlore ..... < 1 g/l
- Extrait sec ..... 30 ± 1.5%



Figure II.6. Adjuvant superplastifiant MEDAFLOW 145.

II.3.Préparation des matériaux

✓ Levage du sable de concassage

Le lavage du sable doit se faire afin d'obtenir un constituant propre, exempte d'éléments nocifs et de fines. Le lavage est effectué sous l'eau de robinet en procédant au tamisage de sable avec un tamis de 0.063 mm et la récupération des fines avec le tamis de maille égale 0,063 ensuite on a fait un séchage à 105°C pendant 24 heures**[123].**



Figure II.7: Etape de préparation du sable concassage.

✓ Le sable roulé

Le sable roulé doit être juste séché dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures puis tamisé dans un tamis de maille égale à 0,4 mm pour éliminé les élément nuisibles.

II.4 Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme [EN 196-1] **[123]** :

- Une salle maintenue à une température de 20 °C ± °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 % ;
- Un bac d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à une température de 22 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 90 % ;
- Une étuve maintenue à une température de 35 °C ± 5 °C et à une humidité relative inférieure à 18.5 % ;
- Un four destiné pour les températures élevées ;
- Un frigo destiné pour les températures très bas ;
- Un malaxeur à mortier normalisé avec une cuve de 5 L et pale de malaxage en inox;
- Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (40x40x 160)mm;
- Une table à chocs pour le serrage des éprouvettes, permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s;
- Balances pour la mesure des petites et grandes quantités ;
- Tamiseuse électrique ;
- Les tamis de différentes mailles en inox ;
- Agitatrice ;
- Cône de sable, pour la mesure de la masse volumique apparente du sable ;
- Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées ;
- Spatules flexibles en acier inox ;
- Pinceaux ;

II.5. essais effectués sur les matériaux

a- Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents sables utilisés ont été déterminées selon la norme [NA 451] **[124].**

- **Masse volumique apparente**

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume 1L par le matériau, ensuite on mesure la masse de ce dernier et on applique l'équation suivante on obtient la masse volumique apparente (ρ_{app})**[122].**

$$\rho_{app} = M / 1 \ (kg/m^3) \qquad (équ.\ II.1)$$



Figure II.8: Le cône pour mesurer la masse volumique apparente.

- **Masse volumique absolue**

Cet essai (figure II.9) consiste à mettre dans une éprouvette un volume d'eau de 200 ml puis on verse 100 g du matériau dedans et par le biais de l'équation suivante on calcul la masse volumique absolue**[122].**

$$\rho_{abs} = M / V_2 - V_1 \ (kg/m^3) \qquad (équ.\ II.2)$$

À la fin, on peut tirer les indices suivants: (porosité, compacité, indice des vides).

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \quad ; \quad P = 1-C \quad ; \quad I = P / C \qquad (équ.II.3)$$



Figure II.9: Mesure de la masse volumique absolue.

b- Equivalent de sable

Selon la norme [NF P 18-598] **[125]**, la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit **[126]:**

- ✓ On dispose de trois éprouvettes propres pour chaque sable, puis on prendra la moyenne des trois résultats obtenus ;
- ✓ En versant une quantité de 120 g de sable, jusqu'au premier trait d'une éprouvette normalisée contenant une solution lavante, et on laisse à reposer 10 minutes.
- ✓ On bouche les éprouvettes et on les agite d'une manière automatique à l'aide d'une machine agitatrice pendant 30 secondes ;
- ✓ On lave et on remplit les éprouvettes par la solution lavante jusqu'au trait supérieur, et les laisse à reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;
- ✓ On lit les hauteurs h_1 et h_2 puis à l'aide d'un piston on mesure h_2'.

$$ES = 100.\ (h2' / h1) \qquad \text{(équ.II.4)}$$

$$ESV = 100.\ (h2 / h1) \qquad \text{(équ.II.5)}$$



Figure II.10 : Procédure de mesure de l'équivalent de sable.

C- L'analyse granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme Algérienne NA 2607-1990 **[127]** .où le sable passant à travers une série de maille décroissante dont on pèse le refus de chaque tamis **[126].**

On utilise une quantité de 1000 g pour le sable de concassage et 1400 g pour le sable roulé. On trace les courbes granulométriques pour chaque sable, puis on tire les coefficients suivants :

*Le coefficient d'uniformité Cu

*Le coefficient de courbure Cc

* Le module de finesse MF

D. Module de finesse de sable

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros. La plasticité du mélange sera insuffisante et tendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui –ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35,38. Ce paramètre est en particulier utilise pour Caractériser la finesse des sables à bétons. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable **[127].**

II.6. Formulation de mortier

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire de chaque matériaux pour le gâchée, afin d'obtenir un mortier avec des propriétés souhaitées.

Notre étude est basée sur l'influence du sable recyclé bitumineux sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques des MAP. Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la formulation OKAMURA (La Méthode Générale) qui a été développée par Okamura et Ozawa. En ce qui concerne l'optimisation du dosage en superplastifiant avec la nature du sable utilisé, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement de la galette et le temps d'écoulement du mortier au V- funnel à l'état frais en fonction de la variation des

pourcentages de sable recyclé bitumineux en (0%, 20%, 40% ,60%, 80% ,100%) de la substitution en sable corrigé (concassé+roulé) (MAPS) et de la substitution en sable concassé seulement (MAPC), la teneur en superplastifiant est de 0.7 %. Nous suivons ensuite les résistances mécaniques à l'état durci des différents mortiers autoplaçant fabriqués **(Annexe C).**

II.7. Malaxage du mortier

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité (Figure II.11). La séquence de malaxage du mortier est la suivante :

Malaxer à sec les matériaux (le sable et le ciment) pendant environ 30 secondes dans le but d'homogénéiser le mélange, âpres on ajoute le sable bitumineux recyclée pendant environ 1 minute, ajouter la première quantité d'eau (E_1=70 % de la quantité totale d'eau de gâchage) et malaxer pendant une minute, ajouter par la suite la deuxième quantité d'eau (E_2= 30% de la quantité totale d'eau de gâchage) mélangée avec le superplastifiant et malaxer pendant une autre minute. En fin, malaxer le tout pendant trois minutes. La séquence du malaxage est présentée sur.



Figure II.11 : malaxage du mortier.

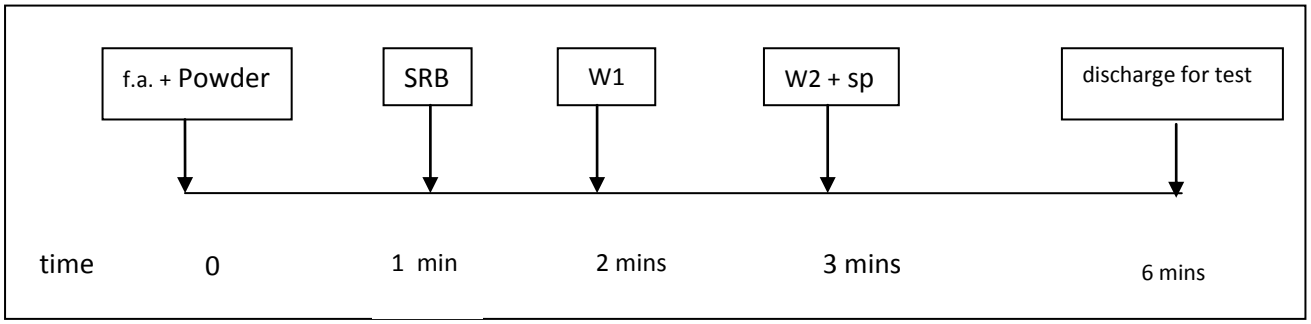


Figure II.12 : procédure de malaxation.

II.8. Préparation et Conservation des Eprouvettes

La préparation des éprouvettes de mortier autoplaçant est effectuée selon une méthodologie inspirée de la norme EN196-1**[128].** Après l'opération de malaxage, les moules (40x40x160) mm^3 sont remplis, après la finition, les moules sont conservés dans les conditions du laboratoire durant 24 h, après, on effectuera l'opération de Démoulage. Et On les place dans un bac de conservation à une température d'environ 20°C et à l'air libre jusqu'à l'échéance de l'essai.

II.9.Essais effectués sur mortier

II.9.1. A l'état frais

II.9.1.1. Densité

La densité du béton frais est déterminée à partir des pesées conformément à la norme (NF P 18-440) **[129]**.



Figure II.13 : Mesure de la densité du MAP à l'état frais.

II.9.1.2.Essais d'étalement au mini-cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure II.14 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

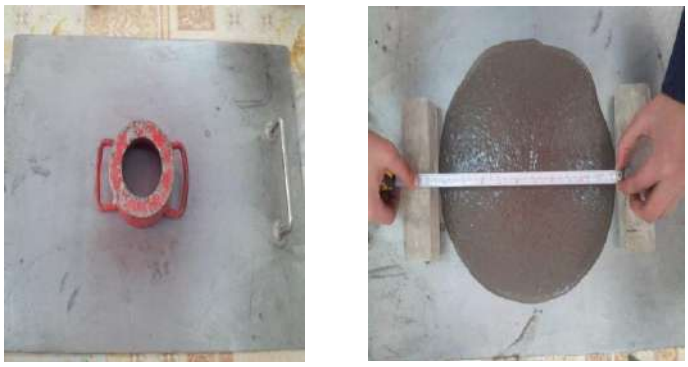


Figure II.14: Essai d'étalement du mortier.

A.1. Matériel nécessaire

* Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 900 mm de côté ;

*Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur ;

* Mètre ou réglet de 900mm ;

B.2. Mode opératoire

* Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
* Placer et centrer le cône d'Abrams sur la plaque ;
* Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône;
* Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
* Une fois que le mortier s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues.
* Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de mortier (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation du sable au centre d'une galette de mortier).

II.9.1.3.Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé 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 (Figure II.15).

B.1 Matériel nécessaire :

* Entonnoir en V (V-funnel)
* Chronomètre ;
* Un seau de capacité de 12 litres.

B.2 Mode opératoire

* Placer le V-funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé ;
* Prélever dans un seau un échantillon de mortier représentatif d'environ de 12 litres ;
* Remplir l'entonnoir avec le mortier ;
* Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet ;
* Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton ;
* Mettre le seau au-dessous de l'orifice de l'entonnoir ;
* Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en déclenchant le chronomètre ;
* Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement TVF;
* Refaire l'essai 3 fois ;
* Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.



Figure II.15 : Essai d'entonnoir en V (V-funnel) pour mortier.

II.9.2. A l'état durci

II.9.2.1. Densité

La densité du béton à l'état durci est déterminée à partir des pesées conformément à la norme (NF P 18-435) **[130]**.



Figure II.16 : Mesure de la densité du MAP à l'état durci.

II.9.2.2. Résistance de traction

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme [EN 196-1] **[128]**. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Figure II.17), une éprouvette prismatique de coté 40 mm et de longueur de 160 mm.

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v \qquad \text{(équ. II.6)}$$

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge :

$$\mathbf{M = \frac{F_f L}{4}} \qquad \text{(équ .II.7)}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $\mathbf{I = \frac{a^4}{12}}$ (équ. II.8)

v : La distance de la fibre la plus éloignée : $\mathbf{v = \frac{a}{2}}$ (équ. II.9)

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\boldsymbol{\sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{a^3}} \qquad \text{(équ. II.10)}$$

$$\mathbf{f_{t28} = 0.9\ Ft.L\ /\ a^3} \qquad \text{(équ. II.11)}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure.



Figure II.17: Dispositif pour l'essai de résistance a la traction.

II.9.2.3.Résistance compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] **[128]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (figure II.18). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de six (06) demi-prismes des trois éprouvettes.
Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture est :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la figure II.18, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad \text{(équ. II.12)}$$



Figure II.18: Dispositif de rupture à la compression.

II.9.2.4. Essai de retrait et gonflement

En l'absence de toute charge, le mortier se déforme instantanément. Ces déformations sont dues 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 [**126]**.

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (40mmx40mmx160 mm) conformément à la norme [NF P 18-404] **[131]**. Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réfractomètre (figure II.19) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 5 semaines) La conservation des éprouvettes est faite dans les trois cures citées d'après avant.



Figure II.19: Rétractomètre et son étalonnage.

a) Mesure 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 de 160 mm 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).

b) Mesure des variations de masse

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1g chaque éprouvette à chacun des temps utilisés pour mesurer de retrait.

c) Expression des résultats

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

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

$\mathbf{L_0}$: Longueur de base, prise égale à 160mm.

$\Delta \mathbf{M}$: Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

d) Conduite de l'essai

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

$$l = L + dl(t) \quad \text{(équ. II.13)}$$

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{(équ .II.14)}$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{(équ .II.15)}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau ou le froid, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement) **[132], [133].**

II.9.2.5.Essai d'absorption par capillarité

Conformément à la norme [NBN NE 13057] **[134]**, 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.20) et pendant chaque intervalle de temps (12min, 30 min ,1 h ,2 h ,4h ,24h) on ressort les morceaux du bac et on les pèse (m_1). Le différent de poids entre m_1 et m_0 est le poids de l'eau absorbée (m_1- m_0).



Figure II.20 : Absorption d'eau par capillarité.

II.9.2.6. Effet feu

Les demis prismes d'éprouvettes (4×4×16) sont préalablement préparées pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°C pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle (figure. II.21) à différentes températures 200°C, 400°C avec une vitesse de chauffe égale à 10°C/min puis maintenues en température dans le four pendant 1 heure conformément à la norme ISO 834**[135].**

Touts les demi-prismes d'éprouvettes sont refroidis à l'air(en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasée. Pour chaque température des mesures de pertes de masse sont effectuées.

Le degré de déshydratation [Perte de masse (%)] est évalué par la relation suivante

Perte de masse [(%)] = [(M1-M2)/M1)] x 100 % (équ. II .16)



Figure II.21: Echauffement de l'éprouvette par le four a moufle.

II.9.2.7 : Effet des sels

Les mortiers ont été confectionnés selon la norme EN 196-1 **[136].** Après malaxage des différents constituants, les mortiers ont été ensuite coulés dans des moules prismatiques 40 x 40 x 160 mm. Après 24 heures, elles ont été démolies et conservées dans l'eau (T = 20°C) pendant 28 jours avant d'être soumises à l'immersion dans une solution de chlorure de sodium de 5% de (NaCl) (Fig. II.22). La solution a été renouvelée chaque semaine.



Figure II.22 : Mise en solution des éprouvettes dans la solution NaCl.

A. Perte de masse :

La mesure de perte en masse des éprouvettes en mortier ont été évaluée par l'expression suivante :

Perte de masse (%)= (M1-M2)/M1x100%

M1:la masse en gramme des éprouvettes avant l'immersion.

M2 : la masse en gramme des éprouvettes après l'immersion.

II.9.2.8 .effet de température

Le MAP préparé, est remplit dans un moule (40x 40 x 160 mm^3), ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans des quatre modes de conservation pour bien définir l'effet de température, le 1ère dans l'eau à 20 C° ± 2 C°, le 2ème dans un climat chaud à 50C° ± 5 C°, le 3ème dans un climat froid à 5C° ± 1 C° et à le 4ème mode on laisse les éprouvettes à l'air libres (24C° ± 2 C°) le matin et d'environ (14C° ± 2 C°) le soir , toutes ces conservation seront pendant les 7 premier jours seulement.

Au jour prévu, les masses des 3 éprouvettes de chaque conservation sont mesurées avant et après la conservation à chaque fois, puis elles sont rompues en compression, figure II.23.



Figure II.23 : les 4 modes de conservation des éprouvettes.

II.10. CONCLUSION :

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien (le ciment, les granulats, les superplastifiant).

Le nombre d'essais qui a été effectué dans le cadre de cette thèse était important, Pour Déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (densité, essais d'étalement au mini cône, d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel)). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (densité, compression, traction, absorption d'eau, retrait et gonflement, résistance au feu, résistance au température, résistance au chlorure). Pour reconnaitre l'effet de sables bitumineux recyclés sur le mortier autoplaçant que se soit à l'état frais ou durci.

Dans le chapitre suivant, On a exposé les résultats obtenus par les différents essais sur le mortier et ainsi suivis par d'interprétations et comparaisons avec ceux que obtenus par Littérature.

Chapitre III

Résultats et interprétation



III.1. Introduction

Les résultats des différents essais qu'on a faits sur les granulats, le mortier frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques de trois résultats d'essais.

III.2. Essais effectués sur granulats

Les granulats sont soumis à différents essais afin d'assurer qu'ils sont conforme aux normes en vigueurs. Les résultats de ces essais sont récapitulés dans les tableaux (III.1 à III.3) suivants.

III.2.1. Analyse granulométrique

Afin de tracer la courbe granulométrique des sables, ils sont soumis au tamisage et les résultats trouvés de module de finesse (MF) de chaque sable sont récapitulés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Analyse granulométrique des différents sables.

	SC $_{0/4}$	SRB $_{0/4}$	S $_{roulé}$
Propriété	3,20	3,18	0,834

Les courbes granulométriques des sables utilisés sont illustrées dans la figure III.1 suivante :

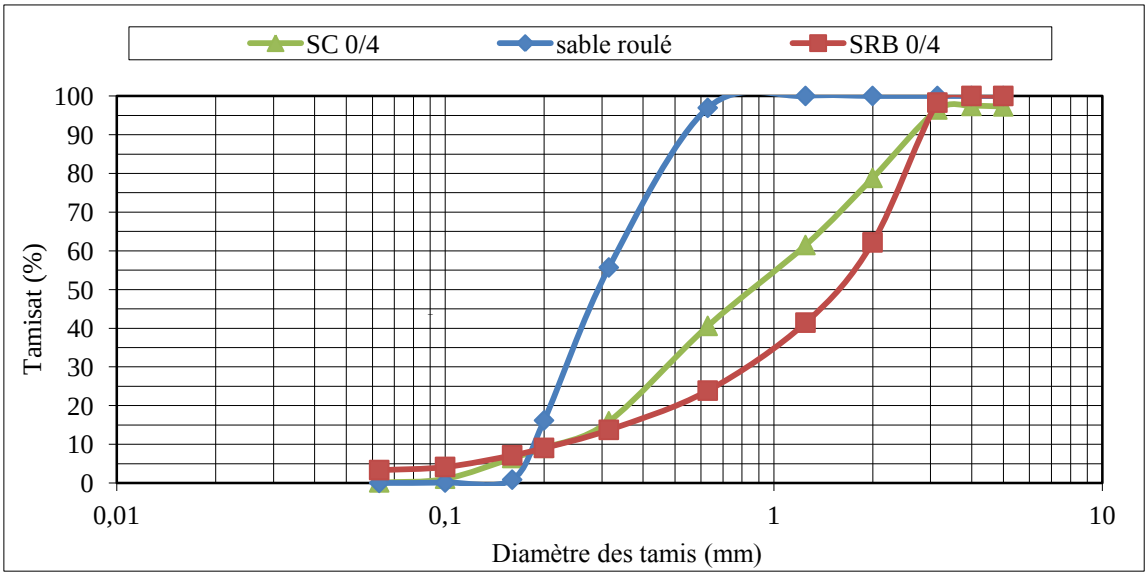


Figure III.1 : Courbe granulométrique des sables ordinaires et recyclés utilisés.

a travers ces résultats trouvés, on a trouvé que les sables ordinaires et recyclés bitumineux ayant un module de finesse élevé ,donc ces deux sables sont grossiers et bien étalés mais d'après le module de finesse du sable roulé, on peut dire que c'est un sable très fin et uniforme.

III.2.2. Masse volumique

Les résultats de densité trouvés sont récapitulés dans le tableau III.2 suivant :

Tableau III.2 : Masses volumiques des granulats utilisés.

Constituants	γ_{app} (kg/m^3)	γ_{abs} (kg/m^3)
SC $_{0/4}$	1500	2640
S $_{roulé}$	1430	2630
SRB $_{0/4}$	1389	1818

On remarque que les masses volumiques du sable recyclé bitumineux sont plus faibles que celles des sables ordinaires utilisés. Cette chute de densité est d'environ 31 %. Cette diminution est comparable aux résultats d'autres recherches **[137, 138, 139, 140, 141, 142].**

III.2.3. Equivalant de sable

Les résultats de propreté obtenus sont récapitulés dans le tableau III.4.

Tableau III.3 : Equivalant de sable.

Constituants	Propreté
	ES (%)
SC $_{0/4}$	91,29
S $_{roulé}$	80,42
SRB $_{0/4}$	76,54

On remarque une diminution de l'équivalent de sable d'environ 16 % pour le sable recyclé par rapport à celui du sable ordinaire, ceci est du sans doute à la poussière de fraisage collée aux particules de grains recyclés. La valeur de l'équivalent de sable dépasse les 70% pour le sable ordinaire et recyclé, selon la même norme utilisée, ces sables sont considérés comme des sables propres.

III.3. Essais effectués sur mortier

III.3.1. Etat frais

III.3.1.1. Densité

Les différentes mesures de densité faites sur les mortiers à l'état frais sont illustrées sur la figure III.2 suivante :

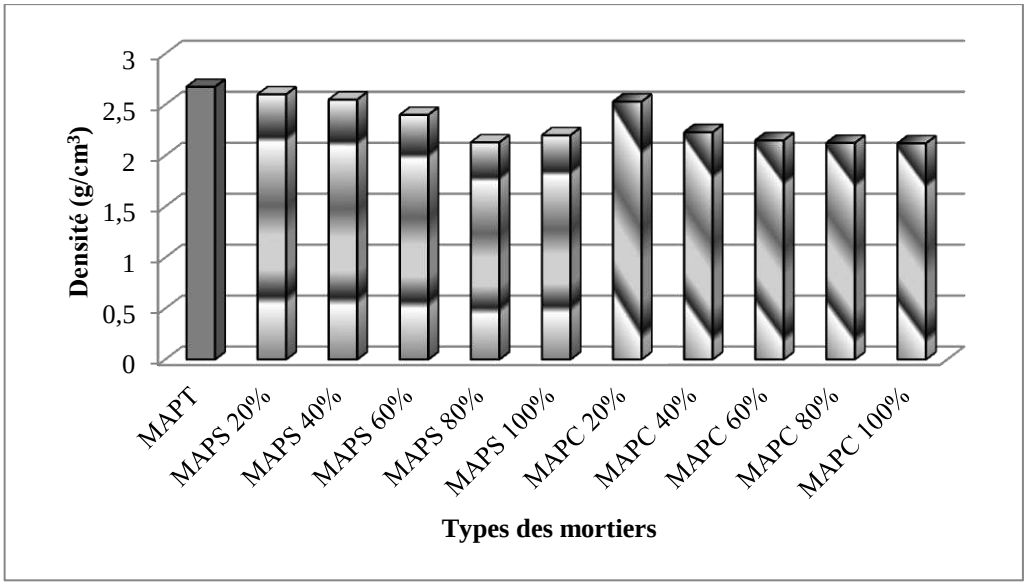


Figure III.2: Densité des mortiers à l'état frais à base de la substitution en SRB.

On remarque d'après la figure III.2 que la densité des MAPS et MAPC recyclés à l'état frais est inférieure à la densité du MAPT et qu'il diminue avec l'augmentation de substitution en SRB. La chute est d'environ 18 % pour les MAPS à base de 100% SRB et de 13 % pour les MAPC à base de 100% SRB.

Donc cette chute de densité ayant une relation directe avec la masse volumique des sables, et puisque la masse volumique du sable recyclé est inférieure aux masses volumiques des granulats ordinaires, alors la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage en sable recyclé. C'est le résultat trouvé par SETTARI **[142]** et DEBIEB **[143].**

III.3.1.2. Etalement au mini cône

Les différentes mesures d'étalement sont illustrées sur la figure III.3 suivante :

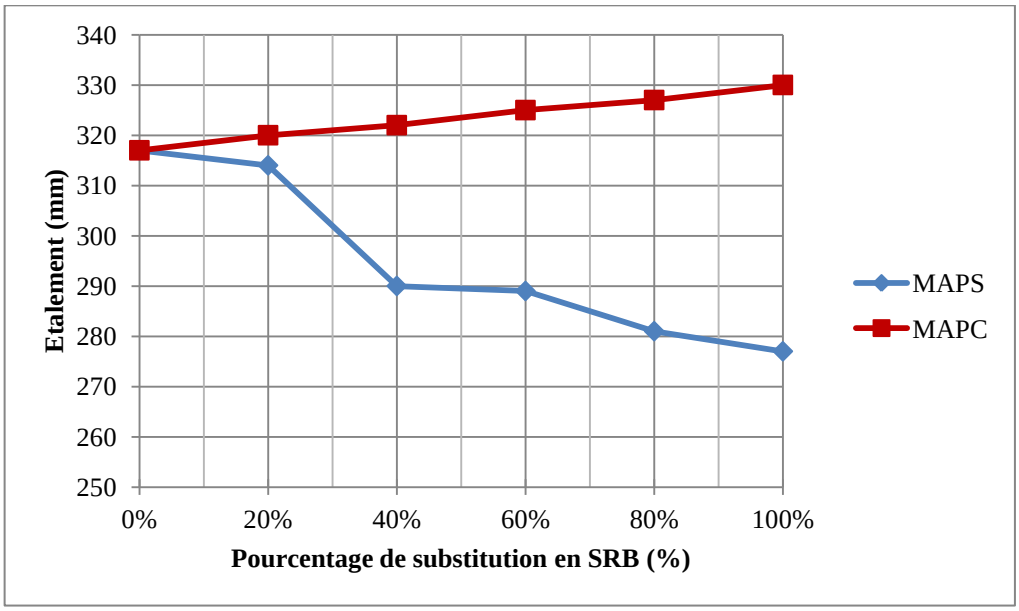


Figure III.3 : Etalement des mortiers à base de la substitution en SRB.

On remarque que l'étalement des MAPS diminue si on augmente le pourcentage en substitution en SRB mais qu'il augmente pour les MAPC. Alors la substitution en sable corrigé par SRB rend le mortier autoplaçant un peu plus ferme mais la substitution en sable concassé seulement rend la MAP un peu plus fluide. Puisque le sable roulé de hassi bahbah dont un résultat trouvé par CHADLI, et al **[144]** dit que ce type de sable seul n'est pas destiné pour la fabrication d'un MAP, donc qu'on a fait la substitution en mélange (concassé et roulé) reste l'effet négatif du sable roulé sur le MAP. Alors que la substitution du sable concassé par SRB donne un meilleur étalement pour un MAP.

III.3.1.3. V- funnel

Les différentes mesures du temps d'écoulement en T-funnel sont illustrées sur la figure III.4 suivante :

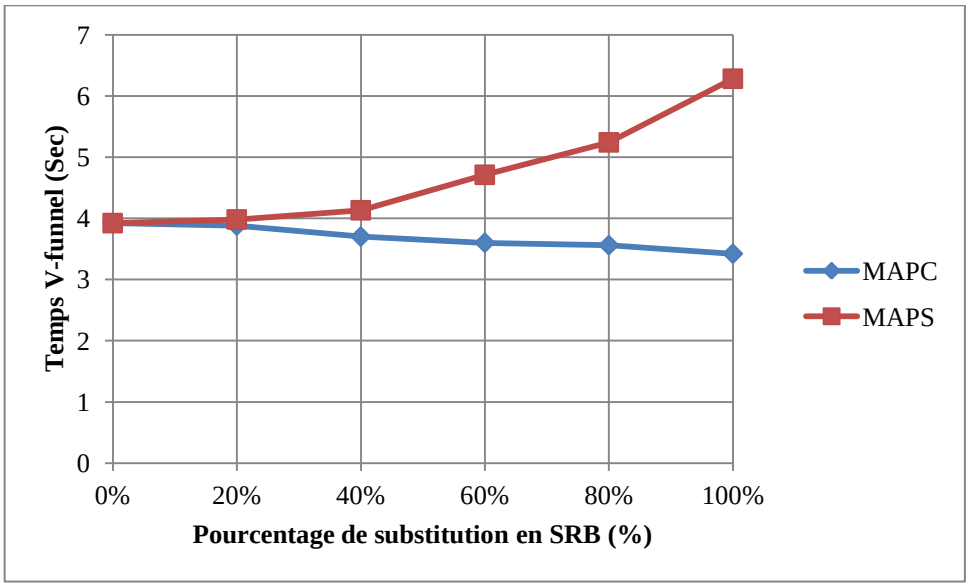


Figure III.4: Temps V-funnel des mortiers à base de la substitution en SRB.

On remarque que le temps d'écoulement des MAPS augmente si on augmente le pourcentage en substitution en SRB mais qu'il diminue pour les MAPC. Ce résultat était prévisible lorsqu'on a mesuré l'étalement.

III.3.2. Etat durci

III.3.2.1. Densité

Les résultats trouvés de densité à l'état durci sont illustrés sur la figure III.5 :

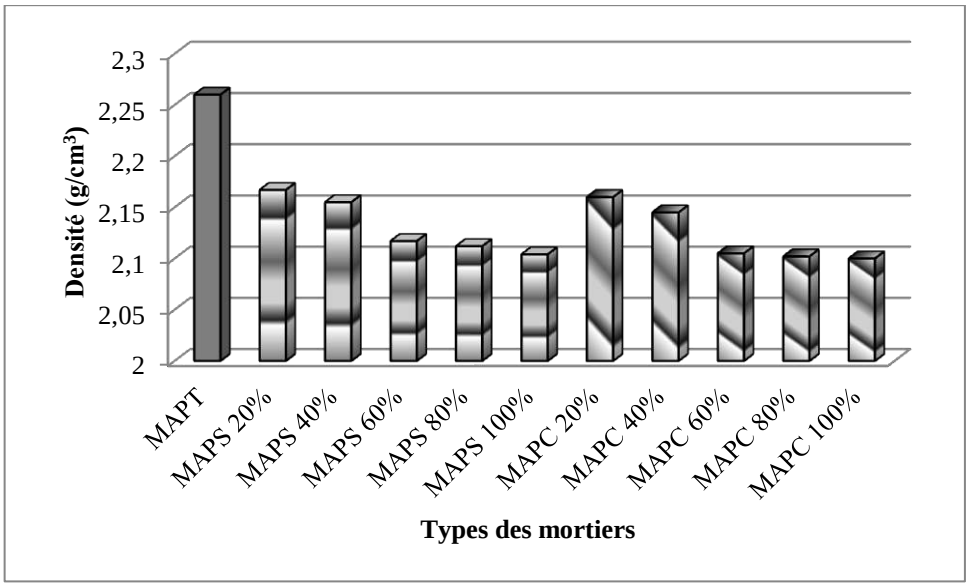


Figure III.5: Densité des mortiers à l'état durci à base de la substitution en SRB.

La même remarque sur la densité du MAP à l'état durci que la densité du MAP à l'état frais, i.e. la densité du MAPS et MAPC reste inférieure à la densité du MAPT. La

chute est d'environ 7 % pour les MAPS et MAPC à base de 100% SRB. Donc la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage en granulats recyclés. C'est le même résultat trouvé par **[142,145, 146,147].**

III.3.2.2. Résistance à la compression

La résistance moyenne en compression à 28 jours est égale à 42 MPa et 43 MPa respectivement des MAPC et MAPS recyclés en comparaison de leur MAP de référence qui est égale à 51 MPa sur des demi prismes (40x40x160 mm^3), à l'âge de 56 jours la résistance du MAP témoin augmente jusqu'à 64 MPa, et concernant les MAPC recyclés l'amélioration est de 11 % et 7 % pour les MAPS recyclés.

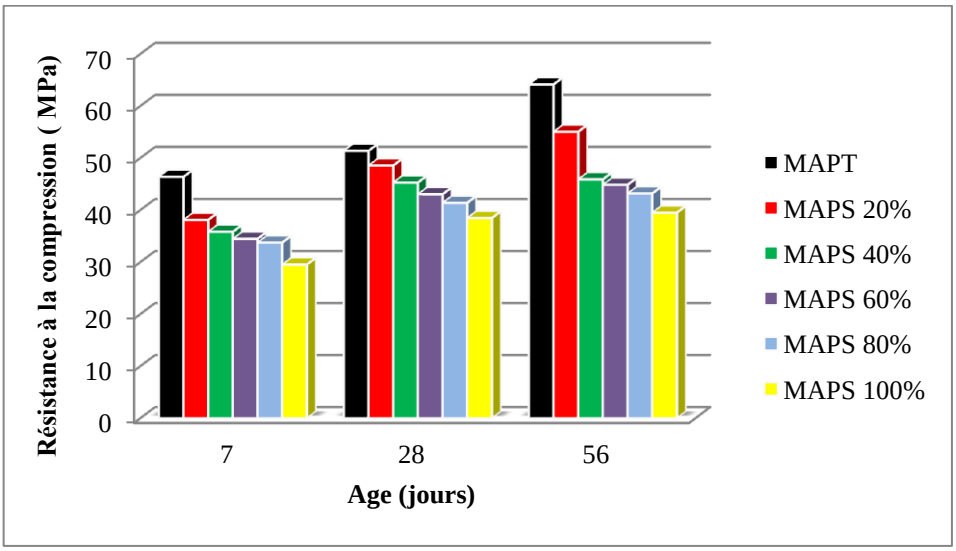


Figure III.6 : Résistance à la compression des mortiers MAPS.

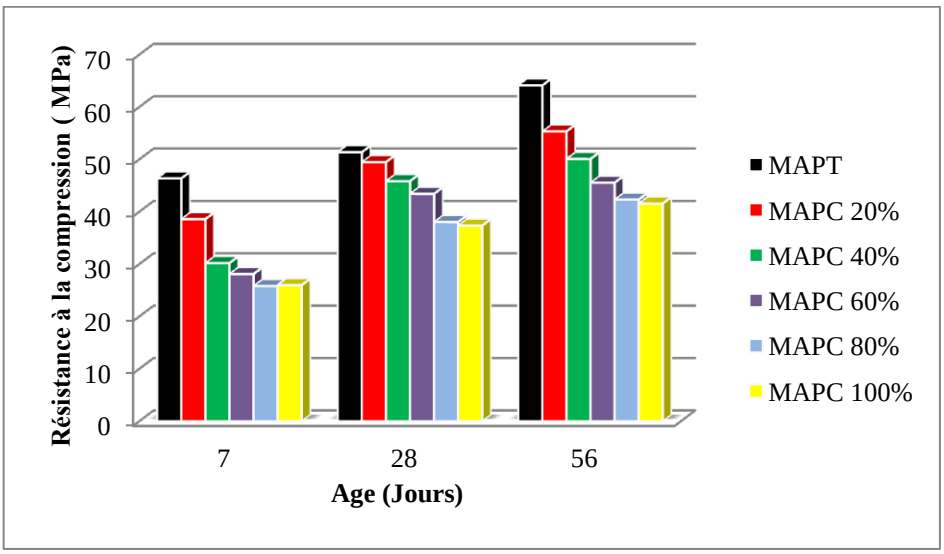


Figure III.7 : Résistance à la compression des mortiers MAPC.

La chute de résistance en compression à 28 jours est d'environ 28 % pour le MAPC réalisé avec 100 % SRB et de 25 % pour le MAPS avec 100 % SRB.

Ceci s'explique qu'il n'y a pas un grand effet de sable sur la chute de résistance en compression (3 % seulement de différence) figures III.8.

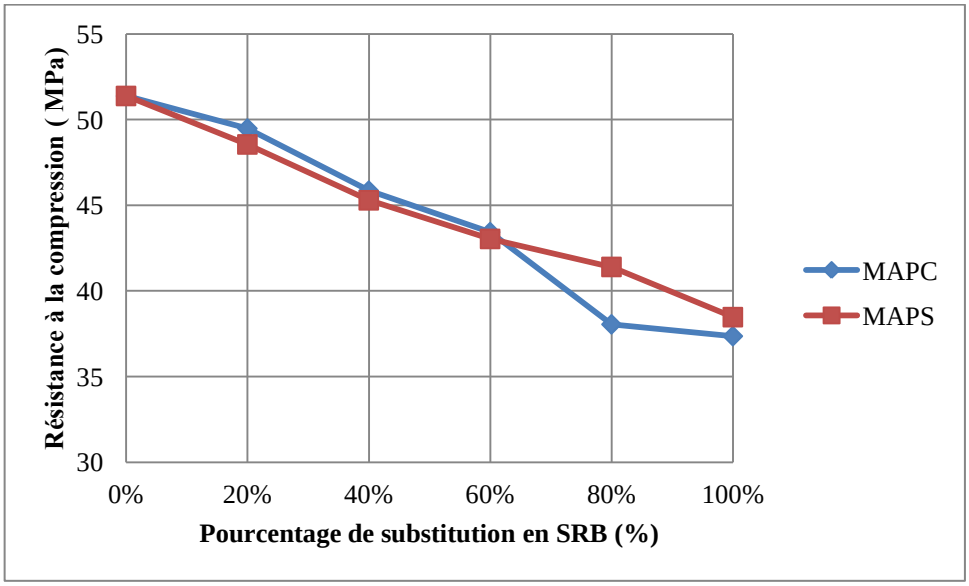


Figure III.8 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en substitution en SRB des mortiers à 28 jours.

D'après la figure III.8, on remarque que jusqu'à 60% de substitution la chute de résistance en compression est similaire des MAPS que celui du MAPC, mais à partir de 80 % de substitution on remarque une légère augmentation de résistance à la compression des MAPS qu'à MAPC. Alors l'effet de la substitution en grand pourcentage de SRB affecte la résistance en compression.

III.3.2.3. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160 mm^3) est présentée dans les figures III.9 et III.10 suivantes :

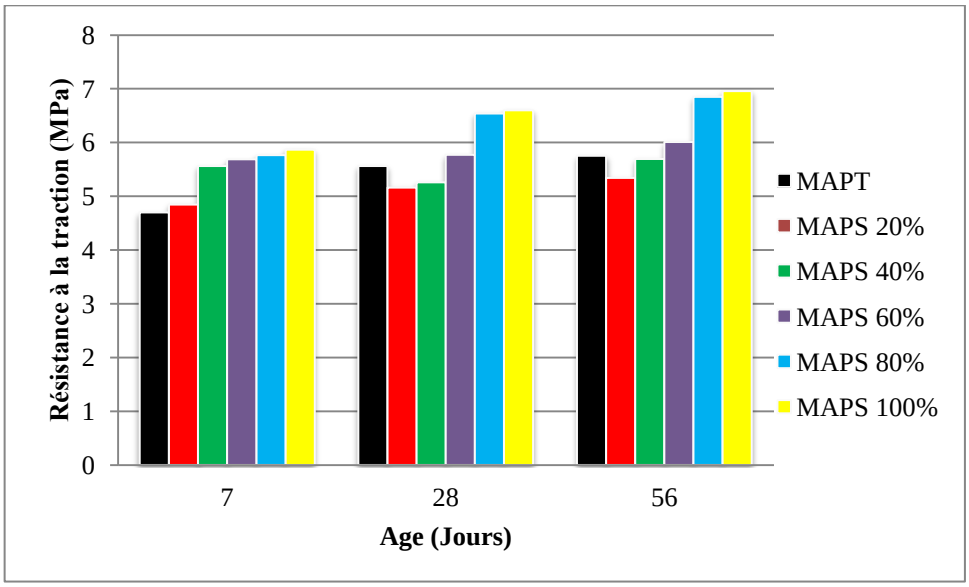


Figure III.9 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPS.

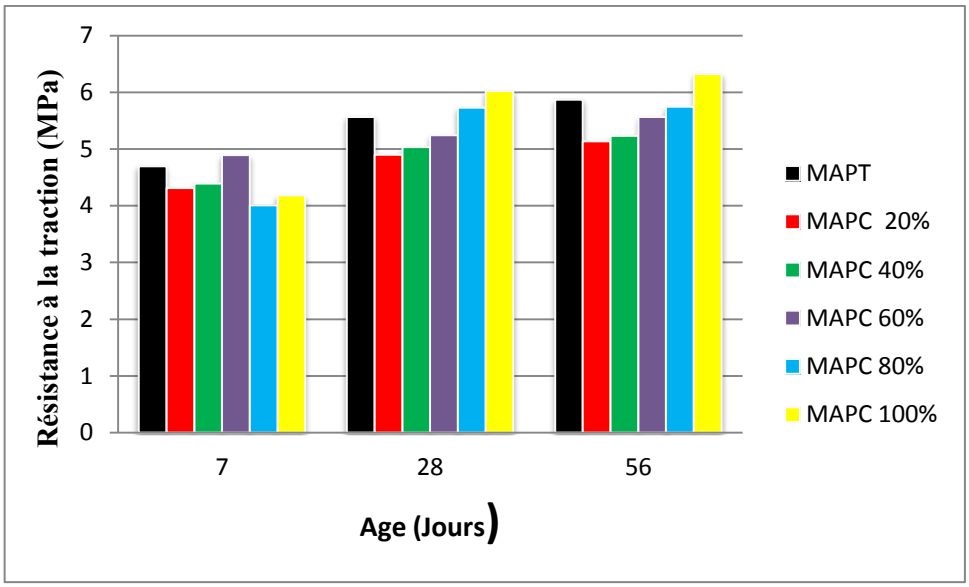


Figure III.10 : Résistance à la traction par flexion des mortiers MAPC.

La résistance à la traction à 28 jours des MAPC et MAPS recyclés ne dépasse pas 7 MPa et augmente à long terme (56 jours) et qu'elle reste presque stable en comparaison avec le MAPT qui est de l'ordre de 5 MPa à 28 jours et atteint 6 MPa à 56 jours.

On remarque que la résistance à la traction des MAPC et MAPS augmente en fonction de l'âge et de l'augmentation du pourcentage en substitution en SRB (figures III.11).

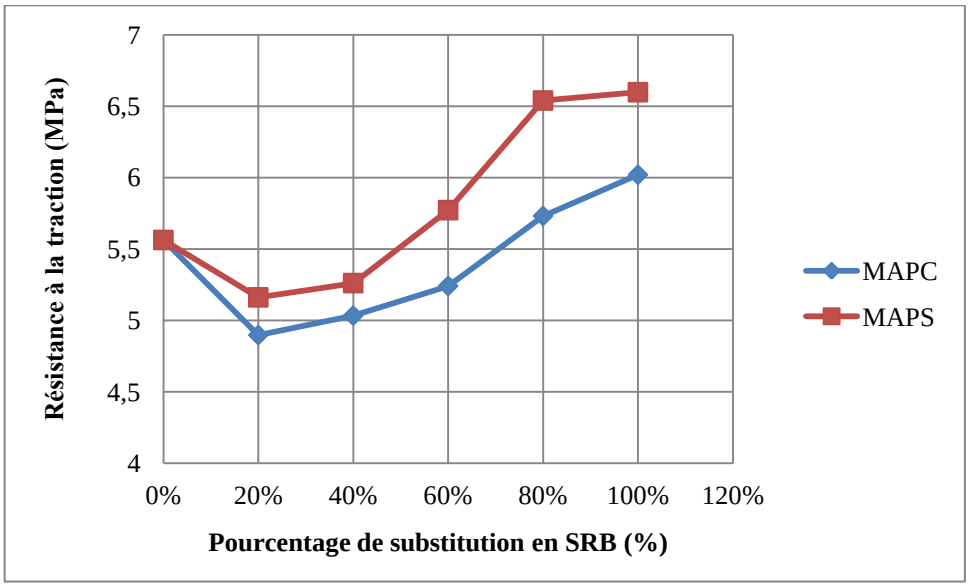


Figure III.11 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage en substitution en SRB des mortiers à 28 jours.

La résistance à la traction par flexion des MAPS et MAPC recyclés présente amélioration à partir de 60 % de substitution en SRB, à 100 % de substitution cette amélioration est de l'ordre de 19 % pour les MAPS, et pour les MAPC, l'amélioration commence à partir de 80 % de substitution en SRB, à 100 % de substitution cette amélioration est de l'ordre de 8 % à l'âge de 28 jours.

En effet de l'ancienne quantité du bitume qui enrobe les grains de sable, c'est la cause principale de cette amélioration de résistance à la traction. Ce résultat est confirmé par SETTARI **[142],** le matériau ici devient très élastique.

III.3.2.4. Absorption d'eau par capillarité

L'évolution de l'absorption d'eau par capillarité dans le temps des différents MAP réalisés, est représentée dans les figures III.12 et III.13.

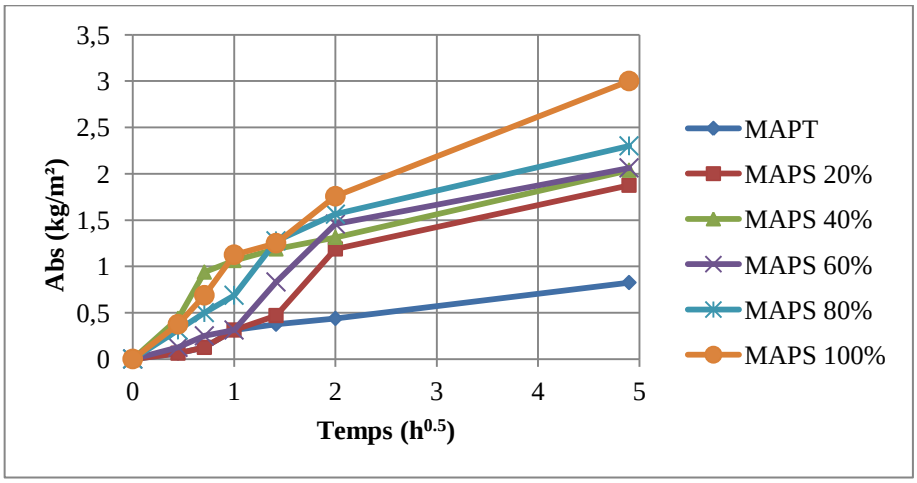


Figure III.12 : Absorption d'eau des mortiers MAPS.

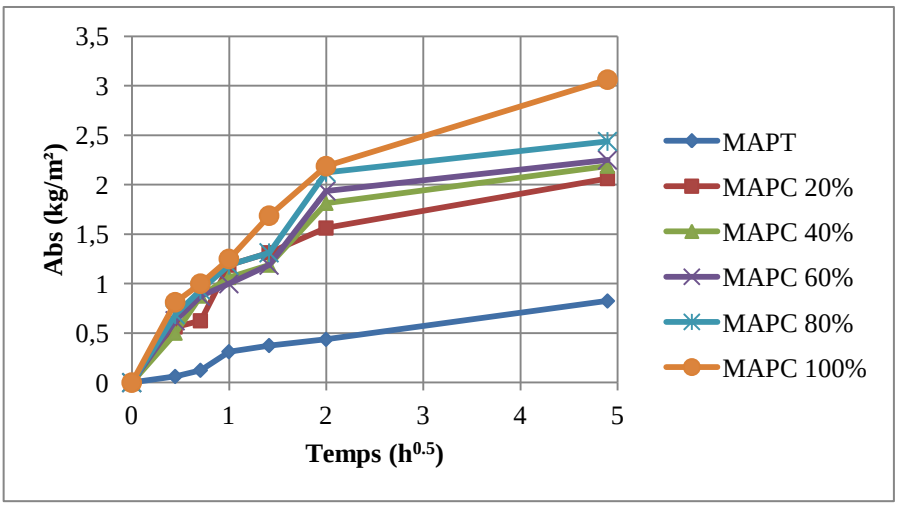


Figure III.13 : Absorption d'eau des mortiers MAPC.

Les résultats d'absorption qui sont présentés ici, obtenus sur des demi-prismes des éprouvettes (40x40x160 mm^3) en contact avec une nappe d'eau de 5 mm, représentent effectivement l'état pyrométrique des premiers millimètres de l'éprouvette, sachant que la porosité du MAP est proportionnelle à la vitesse d'absorption d'eau.

On constate en premier lieu que l'absorption initiale est nettement plus grande pour l'ensemble des MAP recyclés. Ce résultat confirme aussi l'importance de l'absorption d'eau durant les premiers instants pour évaluer la porosité de surface du mortier autoplaçant recyclé par rapport au mortier autoplaçant témoin.

L'absorption d'eau des MAPC et MAPS à base de 100 % SRB est de l'ordre de 28 % par rapport MAPT. C'est le même résultat trouvé par SETTARI **[142]** pour les bétons à base de 100 % SRB. Olorunsogo et al. **[148]**, ont constaté une augmentation de 29%

de l'absorption d'eau du béton à base de 100% de granulats recyclés par rapport à celle d'un béton ordinaire.

III.3.2.5. Retrait et gonflement

A. Retrait et perte de masse

L'évolution du retrait à l'air libre à l'âge de 56 jours, est illustré dans les figures III.14 et III.15.

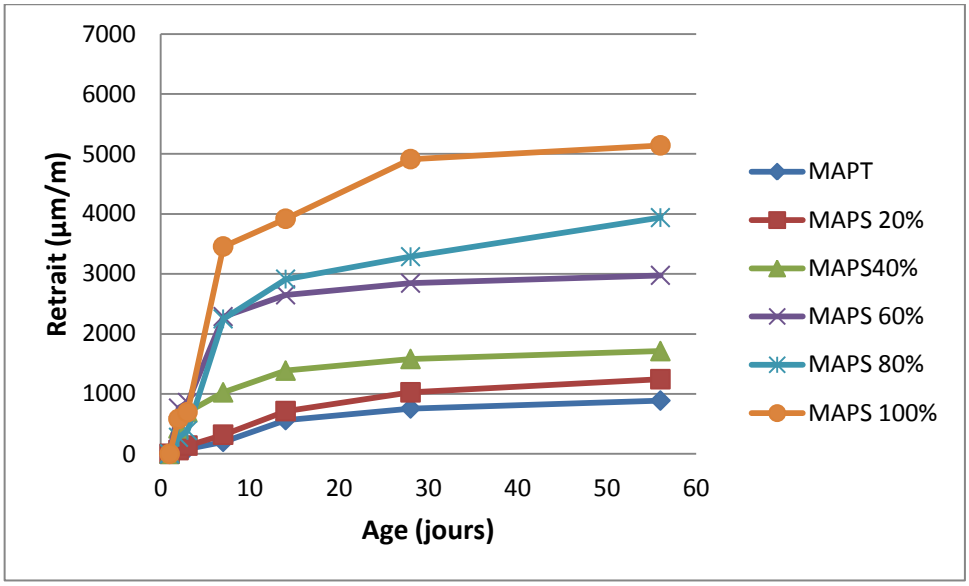


Figure III.14 : Evolution du retrait à l'air libre pendant les 56 jours des MAPS.

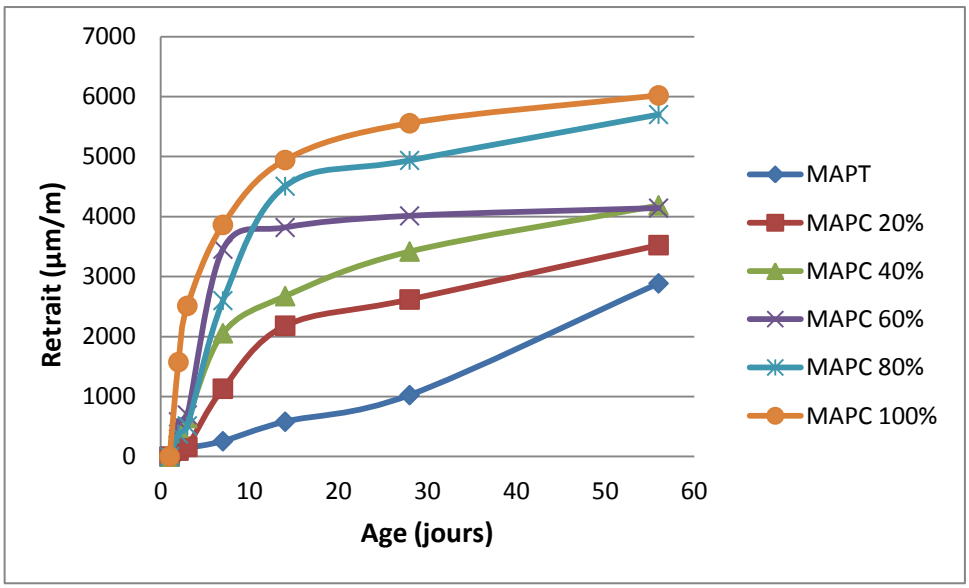


Figure III.15 : Evolution du retrait à l'air libre pendant les 56 jours des MAPC.

D'une façon générale, on remarque que le retrait à l'air libre des MAP recyclés est nettement plus important que celui du MAPT et augmente en fonction de l'âge et en fonction de l'augmentation du pourcentage en substitution en SRB (environ 5000 µm/m pour MAPS avec 100 % SRB et presque 6000 µm/m pour MAPC). L'augmentation est d'environ de 2 fois après 56 jours d'exposition à l'air libre à l'intérieur du laboratoire (15°C et 65% H.R).

Cette augmentation du retrait est confirmée par d'autres chercheurs **[142, 149]**.

La perte de masse pour les MAPS et MAPC est illustrée sur les figure III.16 et III.17 suivants :

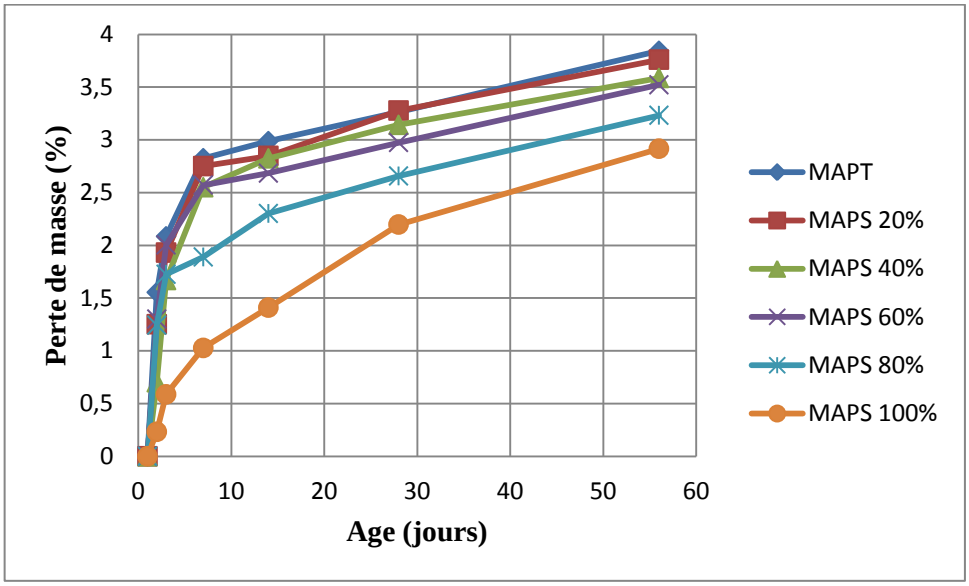


Figure III.16 : Perte de masse en fonction de l'âge des MAPS.

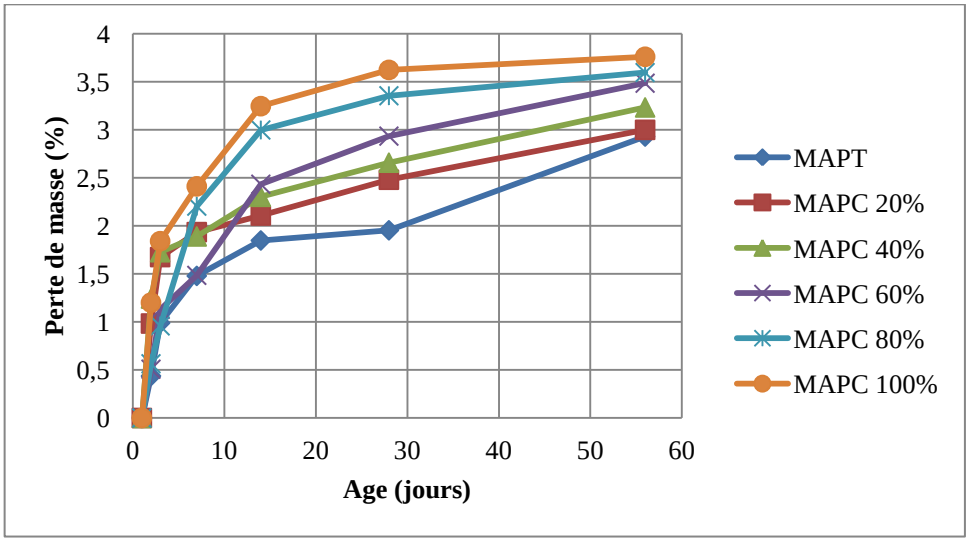


Figure III.17 : Perte de masse en fonction de l'âge des MAPC.

On observe que la perte de masse des deux types du mortier autoplaçant ne dépasse pas les 4 % à 56 jours de conservation à l'air libre pour les MAPS et MAPC jusqu'à 80 % de substitution en SRB mais pour les MAP à base de 100 % SRB diminue et qui est égale sauf 3 %, puisque la quantité de bitume ici augmente et arrête l'évaporation d'eau **[142].**

B. Gonflement et gain de masse

L'évolution du gonflement dans l'eau à 56 jours de conservation, est illustré dans les figures III.18 et III.19.

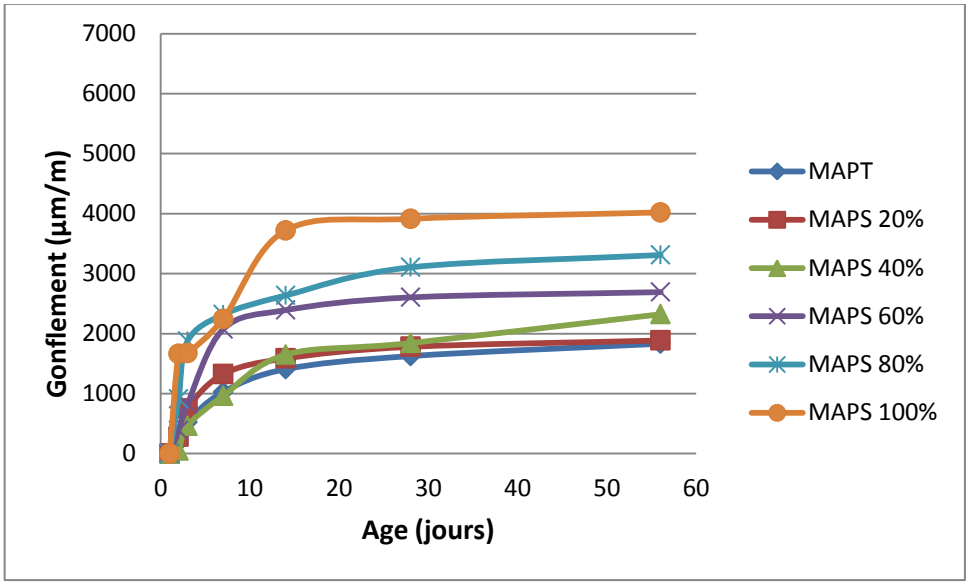


Figure III.18 : Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 56 jours des MAPS.

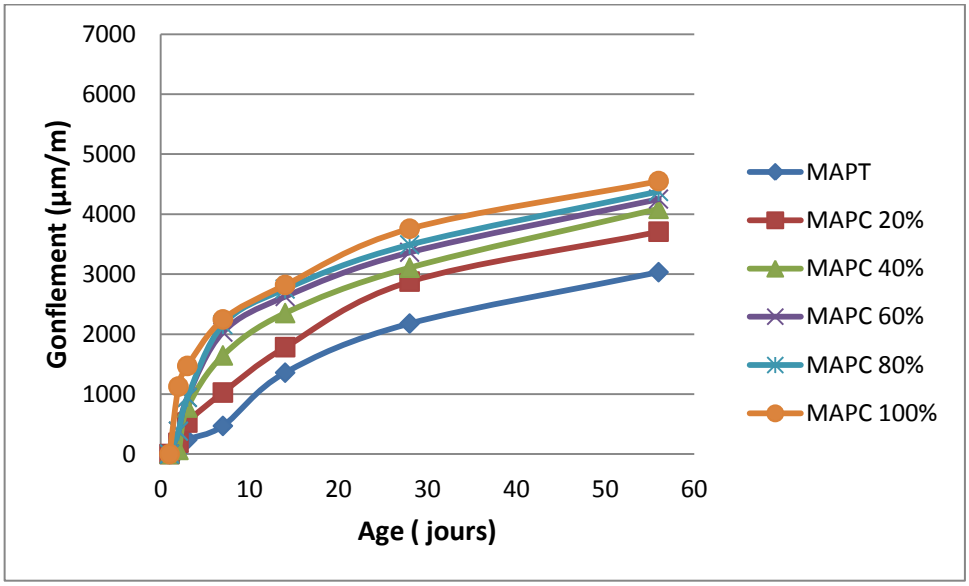


Figure III.19 : Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 56 jours des MAPC.

On observe un gonflement important pour tous les MAP recyclés qui atteint les 4000 (µm/m) et 7000 (µm/m) pour les MAPS et MAPC à base de 100 % SRB respectivement. Ce résultat a été confirmé par SETTARI **[142]**.

D'après les figures III.20 et III.21, on remarque qu'il y a un gain en masse, atteignant 3% pour tous les MAPS et dépasse les 3 % pour les MAPC.

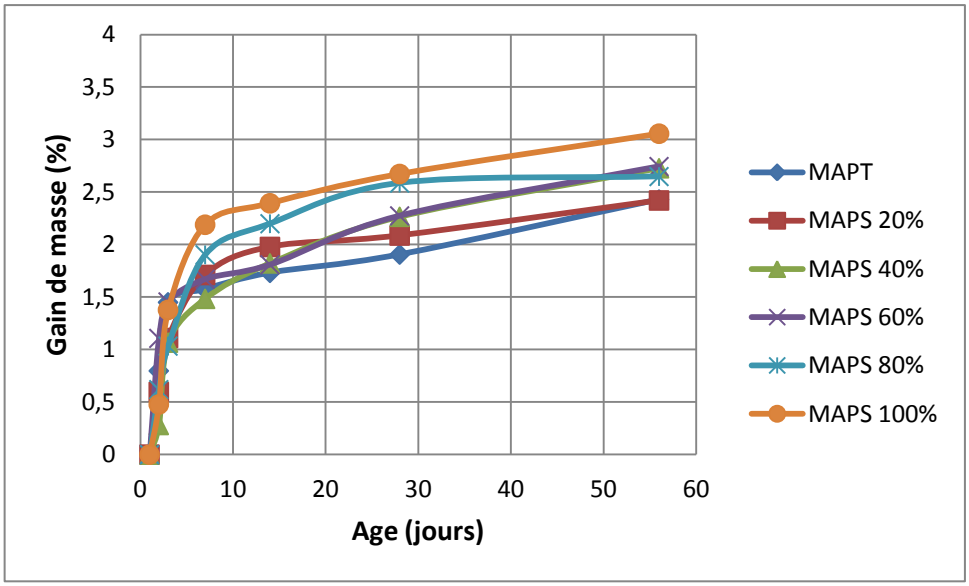


Figure III.20: Gain de masse en fonction de l'âge des MAPS.

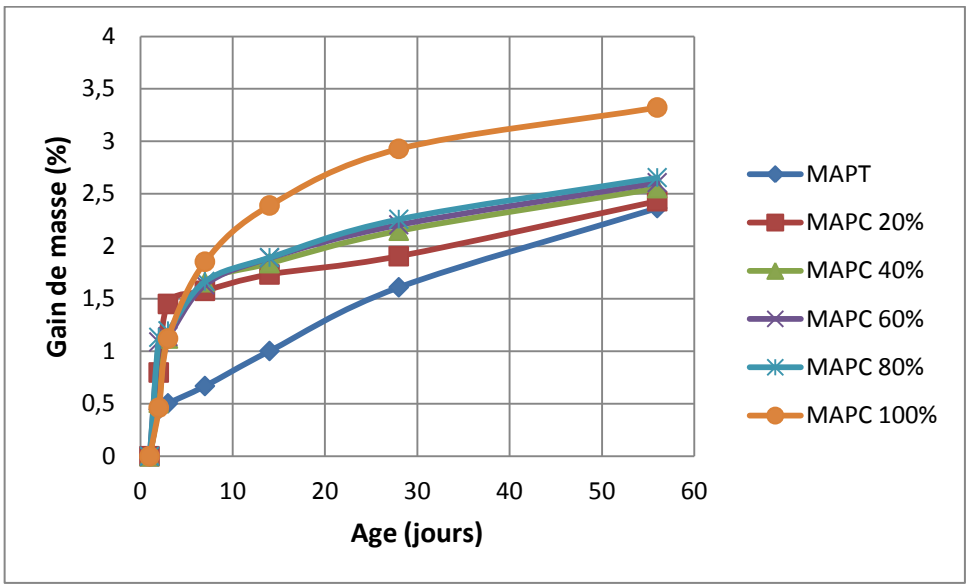


Figure III.21: Gain de masse en fonction de l'âge des MAPC.

III.3.2.6. Effet de température

L'effet de la température sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants recyclés, est illustré dans les figures III.22 et III.23.

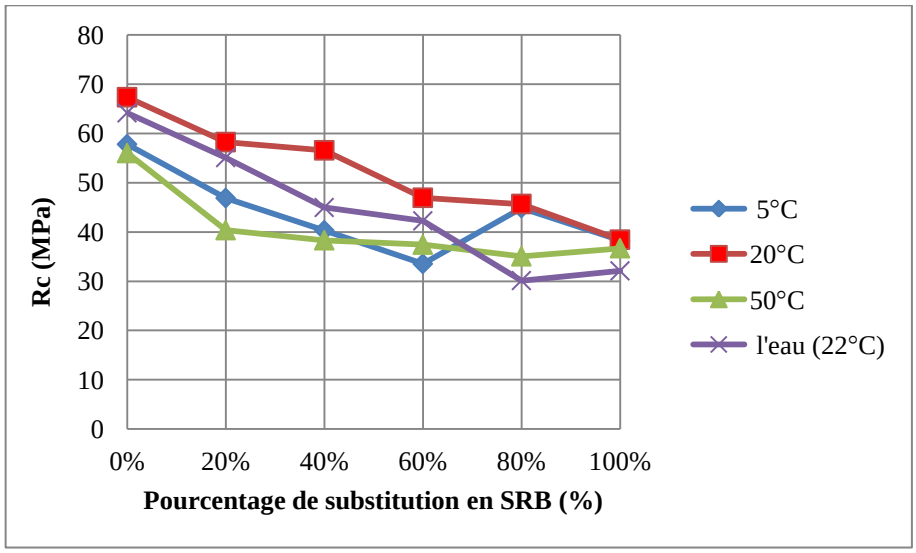


Figure III.22: Effet de la température sur la résistance à la compression des MAPS.

On remarque que le climat sec (50°C) et le climat froid (5°C) affecte négativement sur la résistance à la compression des MAPS à base du SRB par rapport à celle des éprouvettes qui sont conservées dans l'eau jusqu'à 60 % de substitution. La chute de résistance est de l'ordre de 11 % dans un climat sec et de 21 % dans un climat froid, ce résultat est confirmé par SETTARI **[150]** sur l'effet du climat sur un mortier de maçonnerie, mais à partir de 80 % à 100 % de substitution, il existe une amélioration de résistance d'environ 13 % pour un climat chaud et d'environ 16 % pour climat froid.

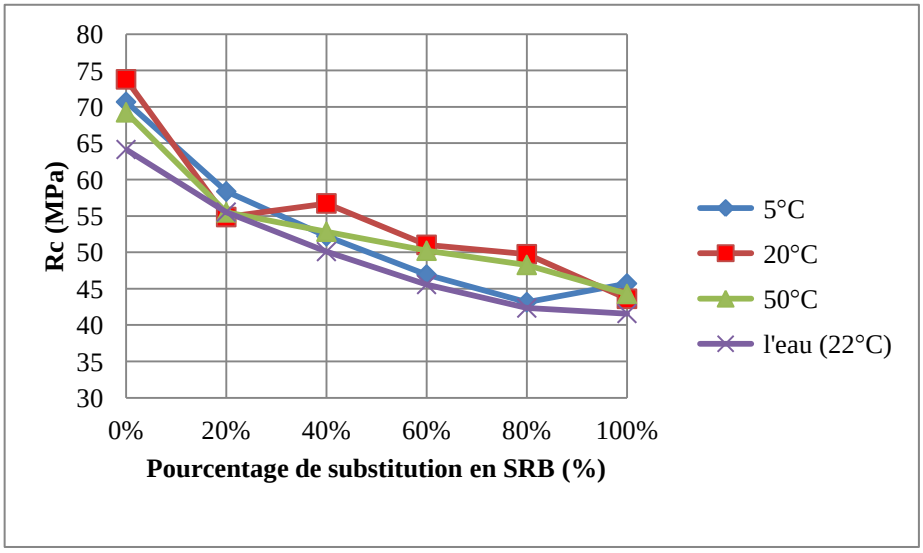


Figure III.23: Effet de la température sur la résistance à la compression des MAPC.

Le cas contraire est remarqué pour les MAPC, le climat froid ainsi que le climat sec améliorent la résistance à la compression des MAPC à base du SRB par rapport à

celle des éprouvettes qui sont conservées dans l'eau. Cette amélioration de résistance est de l'ordre de 6 % dans un climat sec et de 9 % dans un climat froid, ce résultat confirme que le sable recyclé bitumineux dans la fabrication d'un MAP résiste bien aux climats chauds et froids.

La perte de masse sous l'effet de la température des mortiers autoplaçant recyclés, est illustré dans les figures III.24 et III.25.

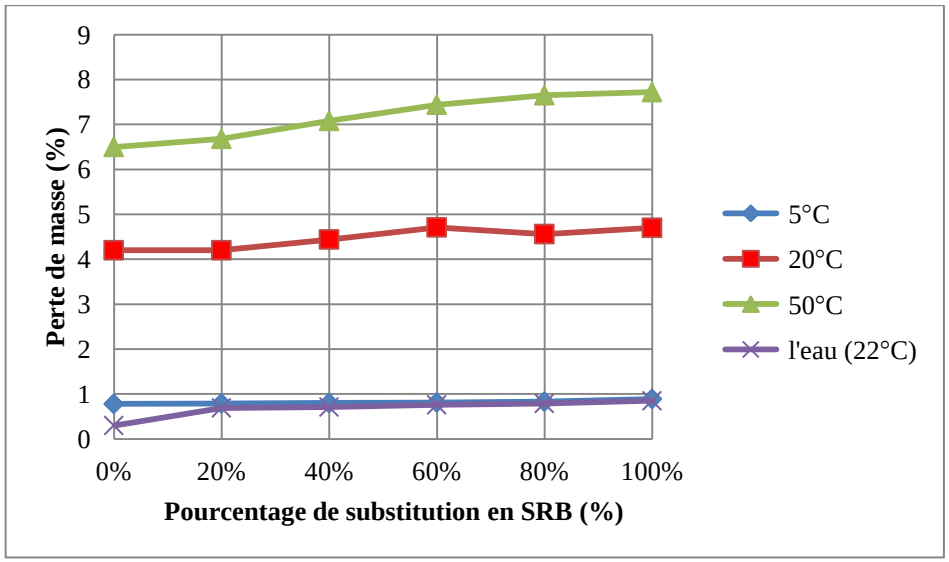


Figure III.24: Effet de la température sur la perte de masse des MAPS.

Les éprouvettes qui sont conservées dans l'eau ou bien dans le froid acceptent presque la même masse et qui ne dépasse pas 1 %. La perte de masse est optimale pour MAPS à base de 100 % SRB et qui est égale à 4,70 % et 7,72 % respectivement à 20°C et 50 °C.

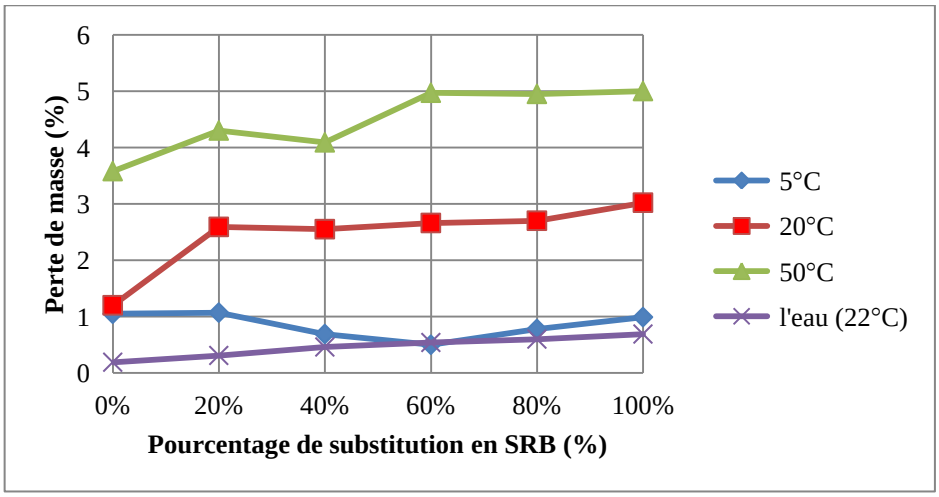


Figure III.25: Effet de la température sur la perte de masse des MAPC.

Le même résultat trouvé des éprouvettes qui sont conservées dans l'eau et dans le froid. La perte de masse est optimale pour MAPC à base de 100 % SRB et qui est égale à 3,02 % et 5 % respectivement à 20°C et 50 °C.

III.3.2.7. Effet de feu

L'effet de feu sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçant recyclés, est illustré dans les figures III.26 et III.27.

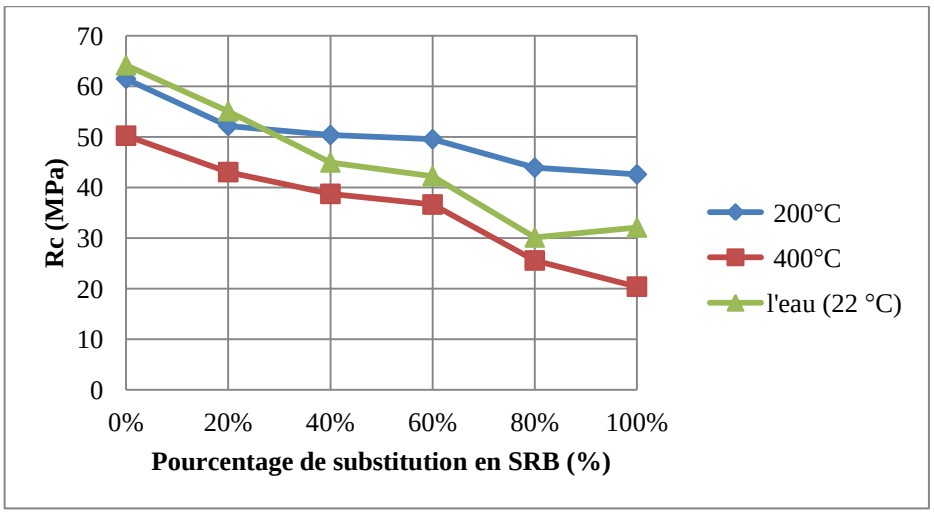


Figure III.26: Effet de feu sur la résistance à la compression des MAPS.

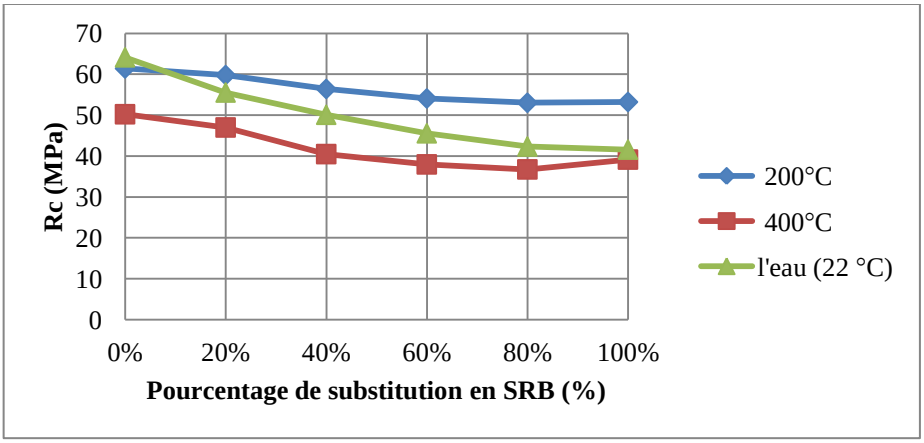


Figure III.27: Effet de feu sur la résistance à la compression des MAPC.

On remarque que si le pourcentage de substitution en SRB augmente à 200 °C, la résistance à la compression est améliorée de 46 % pour les MAPS à base de 100 % SRB et de 22 % pour les MAPC à base de 100 % SRB. On peut dire ici que MAPS ou bien le MAPC prend le comportement des mélanges bitumineux (béton bitumineux) qui est fabriqué généralement à 160°C.

Mais à 400 °C, la résistance à la compression présente une chute de 36 % pour les MAPS à base de 100 % SRB et de 6 % pour les MAPC à base de 100 % SRB et des fissurations sont visibles à l'œil nue (figure III.28).



Figure III.28: Fissurations de l'éprouvette causée par le feu à 400°c.

GUENDOUZ, et al **[151]** a trouvé le même résultat, tous les bétons de sable à base de déchets plastiques présente une pic de résistance à la compression à 200 °C mais cette résistance diminue au-delà de cette valeur de température.

La perte de masse sous l'effet de feu des MAP recyclés, est illustré dans les figures III.29 et III.30.

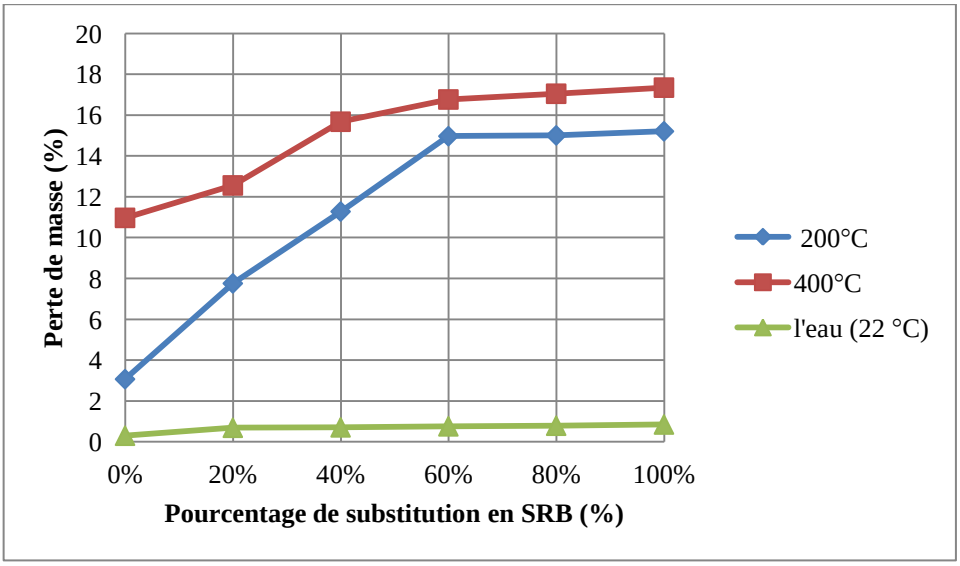


Figure III.29: Effet de feu sur la perte de masse des MAPS.

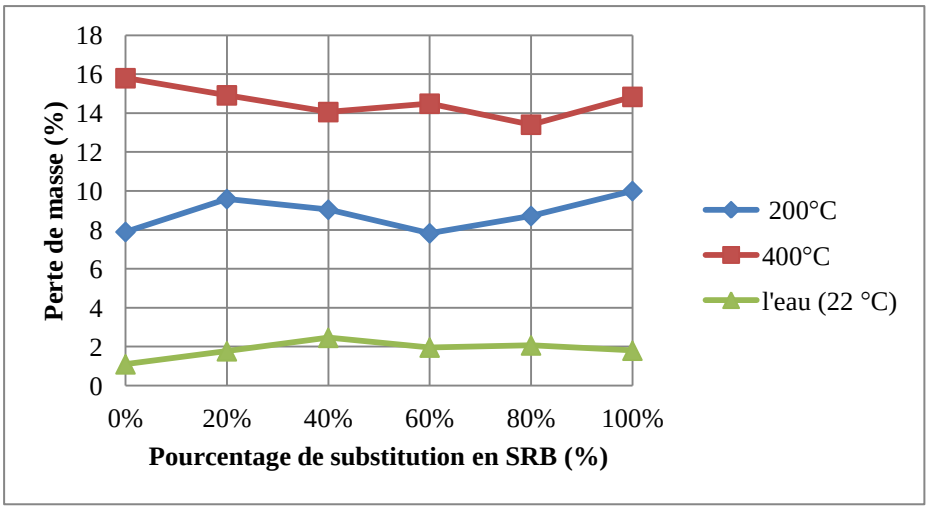


Figure III.30: Effet de feu sur la perte de masse des MAPC.

Remarquons bien que si la température augmente la perte de masse des MAPS et MAPT augmente aussi. La perte de masse est de l'ordre de 15 % pour les MAPS et de 10 % pour les MAPC à base de 100 % de substitution en SRB à 200 °C et de l'ordre de 17 % pour les MAPS et de 15 % pour les MAPC à base de 100 % de substitution en SRB à 400 °C.

GUENDOUZ, al **[151]** trouve que toutes les masses du béton de sable à base de déchets plastique diminuent en augmentant la température jusqu'à 600°C.

III.3.2.8. Effet des sels

L'effet des sels sur la résistance à la compression des MAP recyclés, est illustré dans les figures III.31 et III.32.

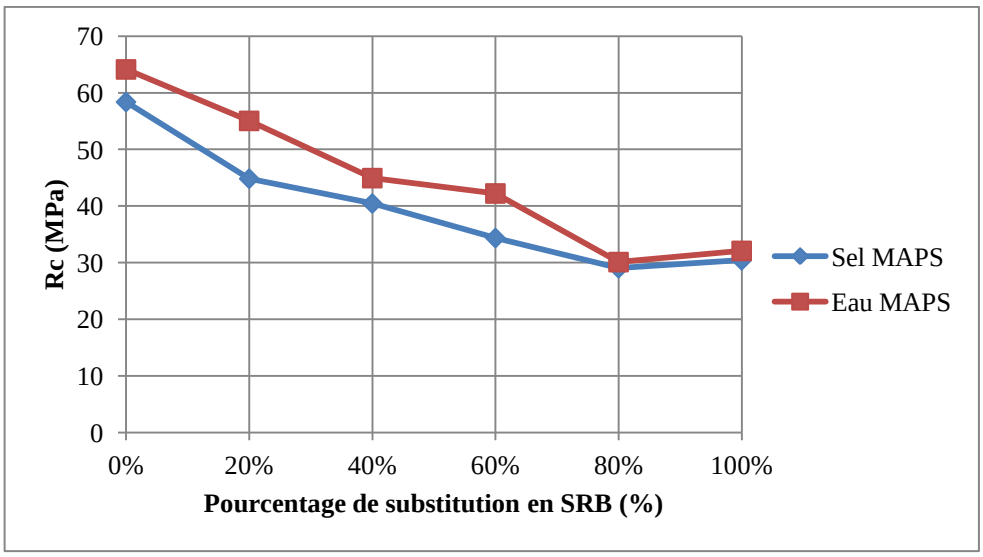


Figure III.31: Effet des sels sur la résistance à la compression des MAPS.

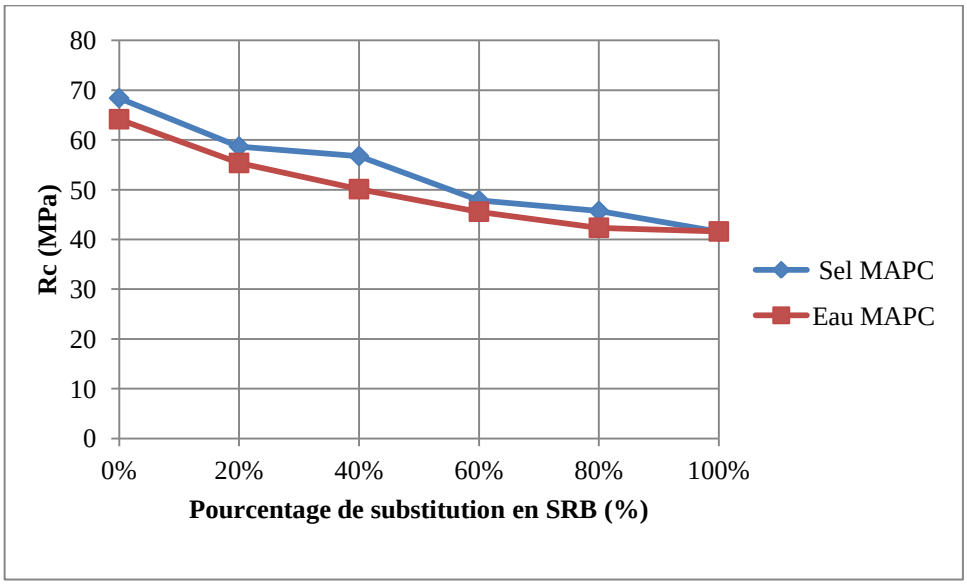


Figure III.32: Effet des sels sur la résistance à la compression des MAPC.

On remarque bien que la résistance à la compression diminuent lorsque on immerge les éprouvettes de MAPS dans les sels par rapport à celles qui sont immergées dans l'eau, à 60 % de substitution en SRB la diminution est environ de 17 % mais à partir de 80 %, ces valeurs de résistance se rapprochent lorsque on augmente le pourcentage en substitution en SRB.

Contrairement au MAPC, on remarque qu'il y a une amélioration de résistance à la compression, cette amélioration est de l'ordre de 6 % et qu'elle est optimale à 40 % de substitution en SRB et tend à diminuer au delà de cette valeur jusqu'à l'arrivée à 100 % de substitution mais quelle reste comparable à la résistance des éprouvettes qui sont immergées dans l'eau. On peut dire que l'introduction du sable recyclé bitumineux évite l'attaque des sels.

Mais visuellement, on remarque la présence des petits pores sur la surface seulement. (Figure III.33).



Figure III.33:création des pores au niveau de surface de l'éprouvette.

CONCLUSION GENERALE



Conclusions générales

L'objectif de ce travail est de déterminer l'effet de l'incorporation du sable recyclé bitumineux issu de fraisage de l'ancienne couche du béton bitumineux sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un mortier autoplaçant.

La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le SRB est un sable grossier et de module de finesse élevé ;
- La masse volumique du sable recyclé bitumineux chute de 31 % par rapport à celles des sables ordinaires ;
- Le SRB semble d'être un sable propre ;
- La densité des MAPS et MAPC recyclés à l'état frais chute de 18 % et 13 % respectivement par rapport à la densité du MAPT et qu'il diminue avec l'augmentation de substitution en SRB ;
- L'étalement des MAPS diminue si on augmente le pourcentage en substitution en SRB mais qu'il augmente pour les MAPC ;
- Le temps d'écoulement des MAPS augmente si on augmente le pourcentage en substitution en SRB mais qu'il diminue pour les MAPC ;
- La densité du MAPS et MAPC chute de 7 % par rapport à la densité du MAPT à l'état durci ;
- La chute de résistance en compression est similaire des MAPS que celui des MAPC, cette chute est d'environ 25 % et 28 % pour les MAPS et MAPC respectivement ;
- La résistance à la traction des MAPC augmente en fonction de l'âge et de l'augmentation du pourcentage en substitution en SRB, cette amélioration est de 19 % et 8 % pour les MAPS et MAPC respectivement ;

- L'absorption d'eau (d'environ 28 %), le retrait et le gonflement des MAP recyclés est nettement plus important que celui du MAPT et augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage en substitution en SRB ;
- La résistance à la compression des MAPS chute de 11 % dans un climat sec et de 21 % dans un climat froid jusqu'à 60 % de substitution, mais à partir de 80 % à 100 % de substitution, il existe une amélioration de résistance de 13 % dans un climat sec et de 16 % dans un climat froid ;
- La résistance à la compression des MAPC est améliorée de 6 % dans un climat sec et de 9 % dans un climat froid ;
- A 200 °C la résistance à la compression est améliorée de 46 % pour les MAPS et 22 % pour les MAPC ;
- La résistance à la compression des MAPS diminuent de 17 % dans les sels par rapport à celles qui sont immergées dans l'eau jusqu'à 60 % de substitution en SRB mais à partir de 80 %, ces valeurs de résistance se rapprochent lorsque on augmente le pourcentage en substitution en SRB.
- La résistance à la compression des MAPC est améliorée d'environ 6 % et qu'elle est optimale à 40 % de substitution en SRB et tend à diminuer au-delà de cette valeur jusqu'à l'arrivée à 100 % de substitution ;
- La meilleure substitution en sable c'est du concassée, i.e. le meilleur MAP c'est MAPC côté fluidité, amélioration de Rt à 8 % et meilleure résistance à la compression dans un climat froid et chaud et dans une solution de sel à 40 % de substitution en SRB, mais côté résistance au feu à 200°C et une meilleure résistance à la traction qui atteint 19 % c'est le MAPS.

Recommandations

- Etude des BAP à base de sable recyclé bitumineux et base du gravier recyclé bitumineux ;
- Des études restent à mener sur d'autres types de bétons (béton prêt à l'emploi, blocs de béton, BHP …etc) à base de granulats recyclés bitumineux et l'optimisation de la composition (utilisation d'autres types de ciment, incorporation de certains types d'adjuvant) afin d'améliorer la résistance et la durabilité du béton recyclé ;
- Les essais de durabilité à savoir le gel dégel, doit être vérifié sur ces MAP recyclés ;
- L'étude de l'effet des sulfates ($MgSO_4$, Na_2SO_4) sur ces MAP ;
- Incorporation de certaines fibres pour améliorer la résistance à la traction du MAP recyclé ;
- Utilisation des ajouts minéraux comme la fumée de silice ou le laitier pour améliorer la résistance à la compression du MAP recyclé ;
- Afin d'encourager l'utilisation des granulats recyclés bitumineux, des essais à l'échelle industrielle utilisant des granulats issus de fraisage des routes sont indispensables, alors des études technico-économiques restent à faire.

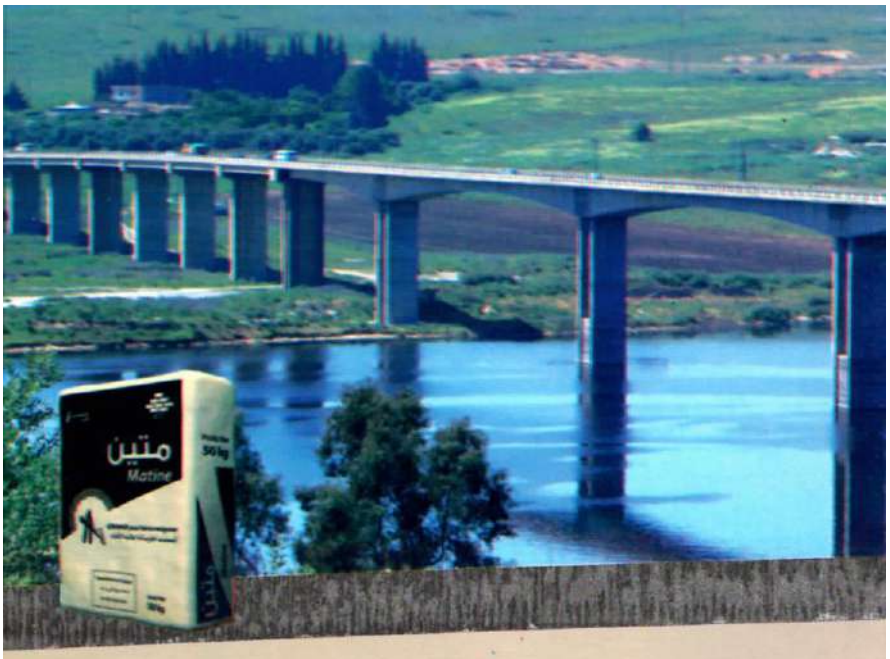
ANNEXES



Références bibiographiques



Annexe A : FICHE TECHNIQUE DU CIMENT UTILISE (MATINE)



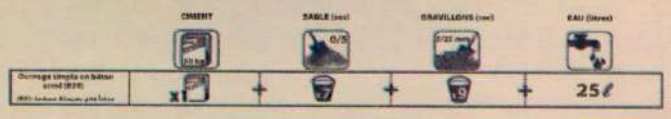
Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.



Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en œuvre.



LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), **(NA 5042)**:	1.5– 3.0
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(NA 5042)**:	2.00 – 2.50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
Teneur en chlorures (%), **(NA 5042)**:	0,01 – 0,03

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Annexe B : FICHE TECHNIQUE DU L'ADJEUVANT UTILISE (MEDAFLOW145)

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

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

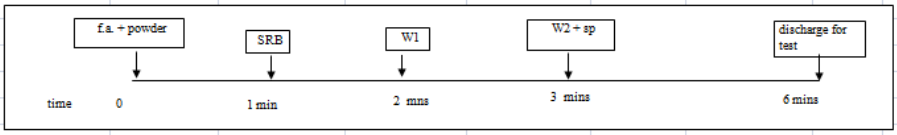
Granitex
Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

Annexe C : PROGRAMME DE CALCULE LES QUANTITES EXIGENCES POUR DES MAP

Essais sur Mortier					entrer data dans cellules en rouge	
					valeurs calculées dans cellules en noir	
Référence du mélange	**Essai 1**	CEM II 42,5 sans ajout			Date	04/02/2016
volume de mortier (litres)	**1,3**					
sable/mortier vol	0,45					
E/P par vol.	1,2600	poudre vol (%)	24,34	Eau volume (%)		30,66
composition Poudre(vol %)		type				
ciment portland	100					
Laitier	0					
Fumée de Silice	0					
Pouzolane	0					
superplast - MEDAFLOW 145	0,7	% (Sp/P)				
humidité sable						
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)		
poids humide (gms)	200	**0,0**	1,2	**-1,2**		
poids sec (gms)	200					

Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		**poid mélange**			
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	**kg**			
ciment	0,316	3150				**0,997**			
	0,000	2857				**0,000**			
						0,000			
						0,000			
Eau	0,399	1000	0,399			0,413	**W1**		**0,248**
			total				**W2**		**0,165**
superplast - MEDAFLOW145		1065	0,007	60	0,004	**0,0070**			
			ssd				**SR**		**0,646**
Sable	0,585	2600	1,521	-1,2	-0,018	**1,503**	**SC**	0,857	**0,685**
bétume							**SB 20**		**0,171**
Total	1,300					2,919			
		w/p bt wt =	**0,4000**						

procédure de malaxation



Références bibliographiques

[1] Fayçal LOUDJANI., « Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimiles », Ministère de l'Aménagement du Territoire de l'Environnement et du Tourisme, Alger, 2011.

[2] M^{lle} SAADANI Sabrina., « Comportement des bétons à base de granulats recycles », mémoire de magister, Constantine Alger 2008.

[3] SETRA ED., « Enrobés bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques », Note d'information n°28, Collection Chaussées, dépendances, CETE de l'EST France 2000.

[4] journal officiel de république française.,« Décret n°20002-450 relative a la classification des déchets », ministère de l'emménagement du territoire et de l'environnement, 18 avril 2002.

[5] Annexes au rapport d'études., « Plan départemental de gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics du Bas Rhin » Avril 2005.

[6] Dossier de presse., « Une solution innovante de granulats recyclés et de services », Paris. Le 3 juillet 2013.

[7] Bulletin officiel du ministère de l'environnement n° 2000/4., « L'aménagement du territoire et de l'environnement dans les domaines de la chasse **»,** complément de la circulaire DNP n° 98-1 du 3 février 1998 »,20 avril 2000.

[8] BONNOT J., « Le réemploi des matériaux bitumineux », Bulletin de liaison des ponts et chaussées, n° 182, novembre-décembre 1992.

[9] Journal Officiel., « Classification des déchets », Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie France 17-03-2002.

[10] MONERON., « Retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale », « Note d'information SETRA n° 98 » 1997.

[11] LEFORT M., « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées avec un liant hydraulique », Note d'information SETRA n° 99, 1997.

[12] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., « Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes », 20, Avenue de Ségur 75302 Paris 07 SP, avril 2001.

[13] Document setra-lcpc., « Guide technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme (GTR) », France, septembre 1992.

[14] ODIE L., « Caractérisation environnementale de fraisât d'enrobés », « Laboratoire régional de Saint Brieuc », 2002.

[15] Claire BRAZILLET- Jérémie DOMAS., « Caractérisation des déchets », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement , Unité Déchets et Sites Pollués Direction des Risques Chroniques, France 31 décembre 2001.

[16] Le président de la communauté de communes Tarn et Dadou., « Règlement communautaire de collecte de déchets ménagers et assimilés » la loi n°75-633,service environnement/règlement de collecte 2001.

[17] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., « LOI no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement »**,** France 14.07.1992.

[18] Article L2213-25 du code de collectivités territoriales., « Loi relative au renforcement de la protection de l'environnement loi n°95-101 du 02/02/1995,05 2005.

[19] Le ministre de l'équipement, des transports et du logement., « Circulaire n° 2001-39 du 18/06/01 relative à la gestion des déchets du réseau routier national », France 13 du 25 juillet 2001.

[20] Journal officiel., « Arrêté du 31 juillet 2002 modifiant les conditions de mise en œuvre de la signalisation routière **»**, Le ministre de l'intérieur, de la sécurité intérieure et des libertés locales et le ministre de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer**,** 21 septembre 2002.

[21] Rapport technique - Bâtiments exemplaires., « L'utilisation de granulats issus du recyclage » , France décembre 2010.

[22] Baron J. Et Ollivier J.P., « Les bétons – Bases et données pour leur formulation » Editions Eyrolles, 1996, 243 p.

[23] OKAMURA H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[24] OKAMURA. H, and M. Ouchi, «Self Compacting Concrete: Development, present use and future», In self compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999..

[25] WALRAVEN « Structural aspect of self- compacting concrete » proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003,Reykjavik, Islande, pp. 15-22.

[26] Association française de Génie Civil (AFGC) « Bétons AutoPlaçants Recommandations provisoires » juillet 2002, 63 pages.

[27] BILLBERG P. « Form Pressure generated by self-compacting concrete »Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 271-280.

[28] H. OKAMURA, K. OZAWA, and M. Ouchi. «Self-compacting concrete». Structural Concrete, 17, March 2000.

[29] Hanaa RARES « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée »07 Décembre 2009

[30] SEDRAN T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, pp. 53-60, marsavril, 1995.

[31] HASNI L., "Bétons autoplaçants - Synthèse bibliographique", rapport de recherche CEBTP, 46 p., juillet 1999.

[**32] Maher EL BARRAK** « contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais »

[33] OZAWA. K, ET. al. «Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989

[34] K. Ozawa, S. Tagtemsirikul, and K .Maekawa, «Role of materials on the filing capacity of fresh concrete», In Proceedings of The Fourth CANMET andACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

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

[36] F. Buyle, Bonin, «Bétons autoplaçants ».

[37] ADAM M.NEVILLE, Michel Pigeon :« Propriétés des bétons », traduit par CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton SHERBOOKEL aval-éditions Eyrolles 2000-paris.

[38] LE LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE POLYNESI, Notice technique : « La durabilité des bétons », 2008.

[39] CIM béton, Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications : « Les ouvrages en béton : durabilité dimensionnement et esthétique », Tome 3, Paris, 12/2008.

[40] Okamura H. and Ouchi M. « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[41] Okamura H. and Ouchi M., "Self-Compacting Concrete. Development, present use and future", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.

[42] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, le béton autoplaçant ou autocompactants, 2000.

[43] Z. ABIB, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », thèse de magister USTHB, 2004

[44] ROUIS F. « formulation et propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant a basse ciment pouzzolanique et (ou) ciment de laitier »

[45] EL BARRAK M. « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.

[46] Bethmont S. « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des interactions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.

[47] Flatt R.J. « Polymeric dispersants in concrete. In Polymers imparticulate systems - Properties and applications » Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.

[48] Efnarc « The European guidelines for self-compacting concrete » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
www.efnarc.org, 2005, 68p

[49] Uchikawa H., Hanehara S., and Sawaki D. « The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture »Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp.37–50.

[50] Neubauer C.M., Yang M. And Jennings H.M. «Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspenions - effects of admixtures » Advanced Cement Based Materials, 1998, vol 8, pp. 17– 27.

[51] Flatt R.J., Houst Y.F., Bowen P., Hofmann H., Widmer J., Sulser U., Maeder U. and Bürge T.A. « Interaction of superplasticizers with model powders in a highly alkaline medium » In Fifth CANMET/ACI International Conference, 1997

[52] Agarwal S.K., Masood I. and Malhotra S.K. « Compatibility of superplasticizers with different cements » Construction and Building Materials, 2000, vol 14, pp. 253-259.

[53] Sonebi M. and Bartos P.J.M. « Filling ability and plastic settlement of selfcompacting concrete » Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.

[54] Couarraze, G. et Grossiord, J.L. « Initiation à la rhéologie » Lavoisier, Paris, 1983, 219 pages

[55] Beaupré D. and Mindess S. « Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurement, and Applications » MateriaI Science of Concrete V edited by JSKALNY, S.MINDESS, 1998, pp. 149-190.

[56] Hwang S.D. and Khayat K.H. « Effect ofmix design on restrained shrinkage of self-consolidating concrete » Materials and Structures, Published on line 27 March 2009

[57] BANFILL P.F.G. « Workability of Flowing Concrete » Magazine of Concrete Research, 1980, Vol.32, No. 110, March, pp.12-27.

[58] Chapdelaine F. « Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais » Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.

[59] Holcim « Le béton autocompactant Recommandation » Suisse, SA, Version 26.11.2004.

[60] Persson B. « A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, p. 193-198.

[61] De Larrard F. "Concrete mixture-proportioning - A scientific approach", Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

[62] Gibbs J.C. and Zhu W. " Strength of hardened self-compacting concrete " Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.199-209.

[63] Sonebi M. and Bartos P.J.M. "Hardened SCC and its bond with reinforcement" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275-289.

[64] PETERSSON Ö. "Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength" Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp.277-284.

[65] FELEKOGLU B., Yardimci M. Y. and Baradan B. "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete", Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp.446-456.

[66] Klug Y. and Holschemacher K. "Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 596-605.

[67] GUNEYISI E. and Gesoglu M. « A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag » Materials and Structures, 2008, vol 41, pp. 479–493.

[68] CHOI Y.W., Kim Y.J., Shin H.C. and Moon H.Y. « An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1595–1602.

[69] ASSIÉ S., Escadeillas G., Marchese G. and Waller V.«Durability properties of low resistance self-compacting concrete » Magazine of Concrete Research, 2006, vol 58, pp.1–7.

[70] NASSIF H.H., Najm H. and Suksawang N.« Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC » Cement & Concrete Composites, 2005, vol 27, pp. 661–670.

[71] FELEKOGLU B., TURKEL S. and Baradan B. « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.

[72] Gram H.E. and Piiparinen P. "Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 211-225.

[73] Song H.W., Byun K.J., Kim S.H. and Choi D.H. "Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS" Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 2001, pp. 413-422.

[74] TURCRY P. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation » Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[75] VITEK J.L. "Long-Term Deformations of Self-Compacting Concrete" 3rdInternational Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 663-671.

[76] Hu C. et Barbieri B., « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 1998, pp. 265-272.

[77] Vieira M. and Bettencourt A. "Deformability of hardened SCC" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 637-644.

[78] Pons G., Proust E. and Assié S. "Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete: A different behavior compared with vibrated concrete?" 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik,Iceland, 2003, pp. 645-654.

[**79] Lee K.M., Lee H.K., Lee S.H. and Kim G.Y.** « Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag » Cement and Concrete Research, 2006, vol 36, pp. 1279–1285.

[80] Neville A. M., " Propriétés des Bétons ", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[81] Van B. K. and Montgomery D. "Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 227-238.

[82] Proust E. « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.

[83] Mortsell E. and Rodum E. "Mechanical and durability aspects of SCC for road structures" Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp. 459-468.

[84] JIANYONG L. et Yan Y. « A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, pp. 1203–1206.

[85] CHAN Y.W., Chen Y.G. et Liu Y.S."Effect of consolidation on bond of reinforcement in Concrete of different workabilities" ACI Materials Journal, July August 2003, vol 100, pp. 294-301.

[86] VALCUENDE M. ET Parra C. « Bond behavior of reinforcement in self-compacting concretes » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 162–170.

[87] RILEM Technical Committee « Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete » Materials and Structures, 2008, vol 41, pp. 225–233.

[88] Persson B. « Fire resistance of self-compacting concrete, SCC » Materials and Structures, November 2004, Vol 37, pp. 575-584.

[89] CHENG A., Huang R., Wu J.K. et Chen C.H. "Influence of GGBS on durability and corrosion behaviour of reinforced concrete" Materials Chemistry and Physics, 2005, vol 93, pp. 404-411.

[90] Pal S.C., Mukherjee A. and Pathak S.R. "Corrosion behaviour of reinforcement in slag concrete" ACI Materials Journal, November-December 2002, vol 99, pp. 521-527.

[91] Yeau K.Y. et Kim E.K. « An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag» Cement and Concrete Research, 2005, vol 35, pp. 1391–1399.

[92] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in high performance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 615–622.

[93] HASSAN A.A.A., Hossain K.M.A. and Lachemi M. « Corrosion resistance of selfconsolidating concrete in full-scale reinforced beams » Cement & Concrete Composites, 2009, vol 31, pp. 29–38.

[94] Botte, Burdin, Zermatten, « SCC Tunnrl Applications » Cleuson Dixence Project Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 13-15 September 1999.

[95] 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.

[96] 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.

[97] H.Chai, « Design and testing of SCC» Ph.D thesis, University of London, April 1998

[98] Association Française de Génie Civil, « Béton auto-plaçants Recommandations provisoires », documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.

[99] Walraven J., «Structural aspects of self-compacting concrete», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp, 15-22, 2003

[100] Projet Région «Amélioration des constructions par l maîtrise des BAP» du conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche « l'homme et sa région », 131 p., 2005

[101] GRÜNEWALD S., Walraven J.C., «Rheological measurements on selfcompacting fibre reinforced concrete », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49 -58, 2003.

[102] NIELSSON I., Wallevick O.H., «Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results», Proceedings of the Third Internationl Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68,2003.

[103] DACZKO J.A., «A comparison of passing ability test methods for selfconsolidating concrete», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 335-344, 2003.

[104] UTSI S., Emborg M., Carlswärd J., «Relation between work ability and rheological parameters», Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003

[105] BUI V.K., Akkaya Y., Shah S.P., «Rheological Model for self consolidating concrete», ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre 2002. [CAL] Calcia, "Mode d'action des adjuvants",Document Calcia.

[106] SEDRAN T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

[107] RILEM "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001

[108] TURCRY P. et Loukili A. "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques" Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.

[109] EDAMATSU Y., Nishida N. and Ouchi M. "A rational mix-design method for self compacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 309-320.

[110] FASI I .et LAMI F. "Formulation d'un béton compacté au rouleau à base de granulats recyclés bitumineux". thèse de master Université de Médea, 2014.

[111] O. HERIHIRI, A.BELLABD, S.BENZIANE . " Etude sur les Performances des composites à base de sable bitumineux recyclés" ,22ème Congrès Français de Mécanique Lyon, 24 au 28 Août 2015.

[112] S. KENAI. " Performance des bétons autoplaçant à base de granulats recyclés " ,Maroc N°112 - Décembre 2013.

[113] NA 442, Normes Algérienne., « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.

[114]EN 197-1 ; Normes Européenne : « Ciments courants »,1994.

[115]NF P 15-301 ; « Liants hydrauliques – définitions, classification et spécification des ciments », Juin 1994.

[116] NF P 15-476, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse », Aout 1990.

[117] NF P 15-431, Normes AFNOR., « Liants hydrauliques – technique des essais-détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[118] NF P 15-473, Normes AFNOR., « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[119] NF P 15-471, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.

[120] **OULD ROUIS Khair-Eddine, OUDJOUADJ Zakaria ;** Thèse d'ingéniorat : « Influence de la combinaison du sable de dunes avec le sable de concassage sur les performances du mortier », Université de Médéa, Juin 2010

[121] NF P 18-303, Normes AFNOR., « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990

[122]Dr. CHERAIT Yacine, Mr NAFA Zahredine : « Eléments de matériaux de construction et essais », Direction de la publication universitaire de Guelma ,2007.

[123] CEN EN 196-1 ; Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15-471) », Aout 1995.

[124] NA 451 ; Normes Algérienne : « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée », 1989.

[125] NF P 18-598, Normes AFNOR., « Granulats – Équivalent de sable », octobre 1991.

[126] DUPAIN.R et all, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.

[127] NA 2607 ; Normes Algérienne : « Granulats - Analyse granulométrique par tamisage », 1990.

[128]NF EN 196-1, 1995, « *Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques* », AFNOR.

[129] NF P 18-440, Normes AFNOR., « Essai pour béton frais - Masse volumique », décembre 1999.

[130] NF P 18-435, Normes AFNOR., « Essai pour béton durci: Masse volumique du béton », septembre 2001.

[131] NF P 18-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules », 1989.

[132]ADAM M.NEVILLE « Propriétés des bétons », Edition Eyrolles, Paris, 2002.

[133] NASR-EDDINE KEDJOUR « Le laboratoire de béton » : office des publications universitaires, Alger, 2003.

[134] NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[135] ISO 834. Fire resistance tests (.1975).Elements of building construction. Genève: International Standards Organisation (ISO).

[136]CEN EN 196-1 : " Méthode d'essais des ciments– partie 6 : détermination de la finesse " AFNOR, Paris 1996

[137] HASEN T.C., « Recycling of demolished concrete and masonry », RILEM Report 06, Published by E and FN Spon, London, 1992.

[138] DEBIEB FARID., « Valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton », Thèse de Magister de l'université de Blida, Algérie, Novembre 1999.

[139] GOMEZ-Sobéron J. M. V., « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – An experimental study », Cement and Concrete Research, 32, 2002.

[140] SAGOE – Centsil K. K., Brown T. and Taylor A. H., « Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate », Cement and Concrete Research, 31, 2001.

[141] RAHAL K., « Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate », Building and Environment, 42, 2007.

[142]SETTARI Ch », thèse de DOCTORAT «caractérisation et comportement du béton à base de déchets de routes (béton bitumineux): application dans le domaine routier», Univ Médea, 2016.

[143] **DEBIEB Farid.,** « Performance et durabilité du béton à base des granulas recyclé contaminés par des chlorures et les sulfates », thèse présenté en vue d'obtention du diplôme de DOCTORAT en Génie Civil ,23/10/2007.

[144] CHADLI et RAHAL , «Effet de la nature et du type de sable sur l'ouvrabilité et résistances d'un mortier autoplaçant», thèse de master Université de Médea, 2014.

[145] Farid DEBIEB, Luc COURARD, Said KENAI, Robert DEGEIMBRE., « Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates», Cement & Concrete Composites, 32, 2010.

[146] GONZALEZ-FONTEBOA B, Martinez-Abella F, Eiras-Lopez J, Seara-Paz S., « Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete », Mater Struct 44(10), 2011.

[147] SOUTSOS M, TANG K, MILLARD S., « Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: concrete paving blocks », Constr Build Mater 25(7), 2011.

[148] OLORUNSOGO F. T. and Padayachee N., « Performance of recycled concrete monitored by durability index », Cement and Concrete research, 32, 2002.

[149] Ravindraradjah R. Loo Y.H. and Tam C. T. « Recycled concrete as fine and coarse aggregate in concrete», Magazine of Concrete research, Vol. 39, 1987.

[150]SETTARI Ch «Etude des effets climatiques sur le comportement du mortier», thèse de master Université de Médea, 2011.

[151] GUENDOUZ M, DEBIEB F , KADRI E«effets de l'elevation de la temperature sur les caracteristiques du béton de sable a base de dechets plastiques», The 1st International WorkShop Risque Feu' 2015.

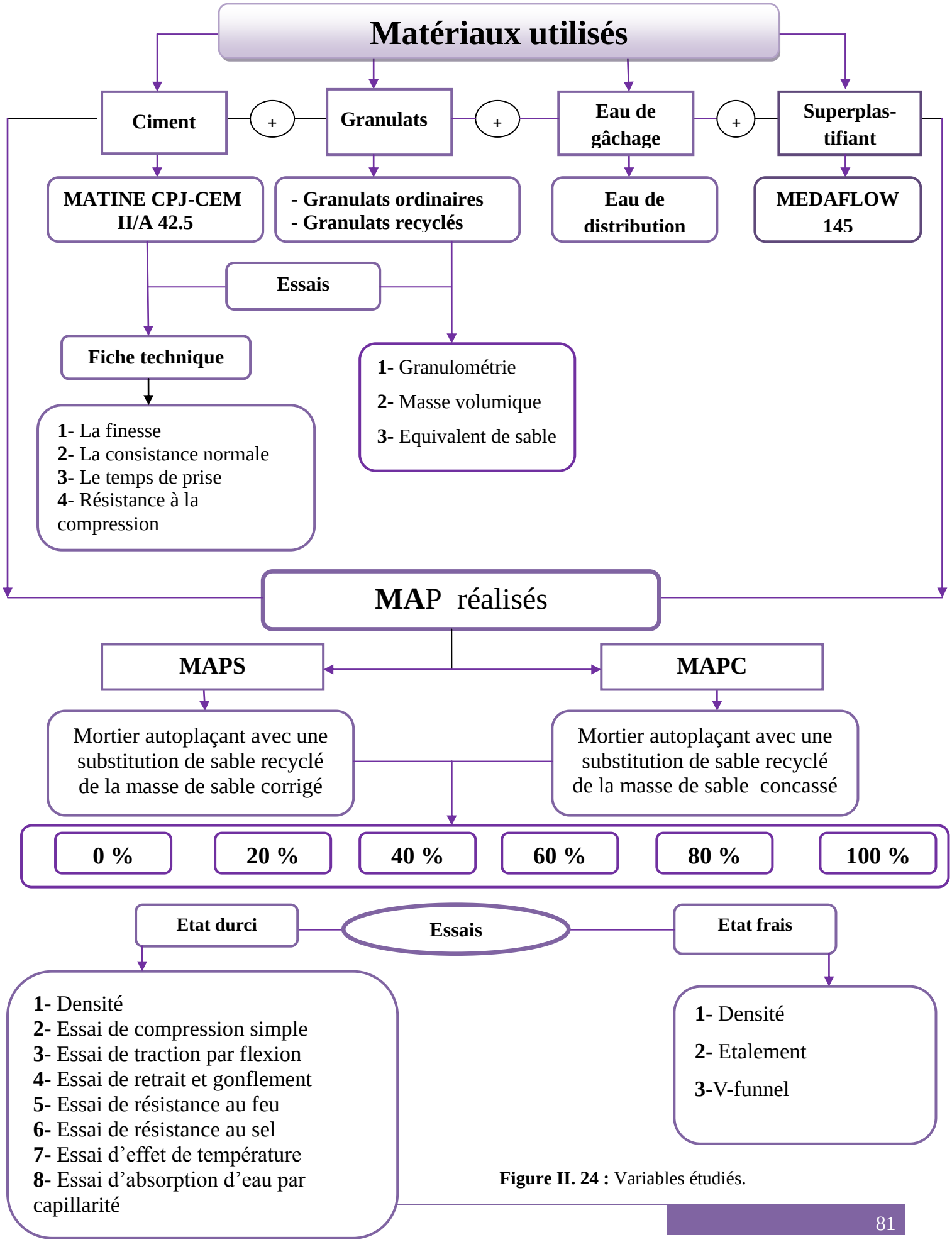


Figure II. 24 : Variables étudiés.