UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Laboratoire Matériaux et Environnement (LME)

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3 ème cycle (LMD)

Spécialité : Génie Civil

Option : Ingénierie de Construction et Risques Géotechniques

Thème

Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base de déchets plastiques : application au béton de sable

Par

Mr. GUENDOUZ Mohamed

Devant le jury composé de:

Mr. Boukendakdji Othmane	**Professeur**	**Université de Médéa**	**Président**
Mr. Debieb Farid	**Professeur**	**Université de Médéa**	**Directeur de thèse**
Mr. Kadri El-Hadj	**Professeur**	**Université de Cergy-Pontoise**	**Co-directeur de thèse**
Mr. Menadi Belkacem	**Professeur**	**Université de Blida**	**Examinateur**
Mr. Benchaa Benabed	**MCA**	**Université de Laghouat**	**Examinateur**
Mr. Belaidi Akram	**MCA**	**Université de Laghouat**	**Examinateur**

Mai 2017

Dédicaces

***J**e dédie ce modeste travail :*

***A** jours veillé sur moi, ma chère mère, qu'a tous*

***A** mon très cher père,*

***A** mes sœurs*

***A** toute ma famille*

***A** tous les enseignants du département `` génie civil ´´*

***A** tous mes amis : Djamila, Karim, Younes, Samir, Salim, Mohamed, Aziz.*

***C**omme je le dédie à mon promoteur Pr. DEBIEB Farid.*

Mr. GUENDOUZ.M

Remerciements

J’exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance à Monsieur DEBIEB Farid, Professeur à l’Université de Médéa, de m’avoir confié cette thèse et de l’avoir encadrée. Ses orientations précieuses, ses conseils scientifiques, son suivi et sa grande disponibilité m’ont permis de mener à bien ce travail. Qu’il trouve ici l’expression de mes remerciements les plus sincères pour la confiance qu’il m’a témoignée, sa patience, son humanisme et la précieuse formation qu’il a su me transmettre. Je lui suis gré de m’avoir pris sous sa direction.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur KADRI El-Hadj, Professeur à l’Université de Cergy-Pontoise, France, d’avoir encadré ce travail, de l’avoir dirigé et de l’avoir accompagné. J’ai beaucoup appris à son contact. Qu’il trouve ici mes plus vifs remerciements pour sa disponibilité, son soutien et pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires à la bonne préparation de cette thèse. La confiance qu’il m’a témoignée, sa patience et son humanisme m’ont permis de supporter les difficultés rencontrées lors de la préparation de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le président de jury BOUKENDAKDJI Othmane, Professeur à l’Université de Médéa, d’avoir accepté d’examiner ce travail et de présider le jury en charge de ma thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur MENADI Belkacem, Professeur à l’université de Blida, Monsieur BENCHAA Benabed, Maître de conférences "A" à l’université de Laghouat, Monsieur BELAIDI Akram, Maître de conférences "A" à l’université de Laghouat, qui ont bien voulu faire partie du jury et y apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Cette thèse s’est déroulée dans le Laboratoire de recherches de Génie Civil, Université de Médéa. Toute ma gratitude à Mademoiselle BOUKHELKHAL Djamila pour son aide appréciable.

Mes plus vifs remerciements vont également au personnel du Laboratoire de L2MGC, Université de Cergy-Pontoise pour sa disponibilité et sa gentillesse.

Je suis très reconnaissant à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu avoir des discussions et échanger des idées, qui m'ont fait avancer dans ce travail de recherches. Qu'elles trouvent dans ces quelques mots mes sincères remerciements.

Je suis très reconnaissant à Monsieur SKENDAR Zakaria, Maître assistant à l'Université de Médéa. Il m'a énormément aidé dans ma bibliographie et on a passé ensemble un agréable moment au laboratoire.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues et amis, dont le soutien m'a été très précieux au cours de la préparation de cette thèse. Que tous ceux dont je n'ai pu citer les noms veuillent bien m'excuser.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma grande famille pour son soutien indéfectible durant les années de préparation de thèse.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تثمين المواد المحلية (الرمال بصفة عامة,ورمال الكثبان بصفة خاصة) وإعادة استعمال النفايات البلاستيكية في الخرسانة. أربعة أنواع من الرمال (ثلاثة رمال مبلورة ورمل مكسر) ونوعين من النفايات البلاستيكية (على شكل مسحوق وألياف) استعملت من أجل صناعة أربعة أنواع من الخرسانة الرملية.

وقد أظهرت النتائج التجريبية أن كثافة خرسانة الرمل تنخفض وفقا لزيادة نسبة المسحوق و الألياف البلاستيكية في خرسانة الرمل.كما أن إضافة النفايات البلاستيكية (على شكل مسحوق وألياف) إلى الخرسانة الرملية تساهم أيضا في التقليل من موصليتها الحرارية وبالتالي المساهمة في تحسين عزلها الحراري,في حين أن الألياف البلاستيكية تساهم بشكل واضح في زيادة قوة شدها و التقليل من حدة تقلصها.كما ينصح باستعمال 20 بالمائة كأعلى نسبة من المسحوق البلاستيكي في رمل الكثبان و 1.5 بالمائة من الألياف البلاستكية مع جميع أنواع الرمال وذلك من أجل تحسين المقاومة الميكانيكية وديمومة الخرسانة الرملية.

Résumé

Ce travail vise la valorisation des matériaux locaux en Algérie (les sables en général, et le sable de dune en particulier) et la réutilisation des déchets plastiques dans le béton.

Quatre types de sables (trois sables roulés et un sable concassé) et deux types de déchets plastiques (sous forme de poudre et de fibres) sont utilisés pour la réalisation de quatre familles de béton de sable.

Les résultats expérimentaux montrent que la densité du béton de sable diminue en fonction de l'augmentation en pourcentage d'ajout en poudre et fibres plastiques. L'incorporation des déchets plastiques (sous forme de poudre ou fibres) dans le béton de sable contribue aussi à la diminution de sa conductivité thermique et par conséquent augmente son pouvoir d'isolation thermique. Les fibres plastiques contribuent nettement à l'amélioration de la résistance à la traction et la diminution du retrait du béton de sable. Un maximum de 20% d'incorporation de la poudre plastique dans le sable de dune et 1.5% maximum de fibres plastiques dans tous les autres types de sable sont conseillés pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité du béton de sable.

Abstract

This work aims at the valorization of local materials in Algeria (in general sand and particularly dune sand) and the reuse of plastic waste in concrete.

Four types of sand (three roller sands and one crushed sand) and two types of plastic waste (in powder and fiber form) are used for made four families of sand concrete.

The experimental results show that the density of sand concrete decrease with the increase of the percentage of plastic powder and fiber. The incorporation of plastic waste (powder and fibers) in sand concrete contributes also in the decrease of its thermal insulation.

The plastic fibers contribute to the improvement in tensile strength and the decrease of sand concrete shrinkage.

20% maximum of plastic powder in dune sand and 1.5% maximum of plastic fibers in all sand are recommended to improve the mechanical resistance and durability of sand concrete.

Sommaire

Dédicaces I

Remerciements II

ملخص IV

Résume V

Abstract VI

Sommaire VII

Liste des tableaux XIV

Liste des figures XV

Listes des symboles et des abréviations XXVI

INTRODUCTION GENERALE……..…….…..……02

CHAPITRE 01 : VALORISATION DES DECHETS ET ACTIVITE DE RECYCLAGE EN CONSTRUCTION.....06

1.1 Introduction 06

1.2 Déchets et sous-produits industriels dans le domaine du génie civil 06

1.2.1 La valorisation des déchets……..……..…….……..…...06

1.2.2 Déchets 06

1.2.3 Constitution chimique de déchets.....07

1.2.4 Types de déchets 07

1.2.5 Différents déchets utilisés en génie civil 09

1.3 Activite du recyclage des dechets en construction 12

1.3.1 Recyclage des déchets 12

1.3.2 Technique de recyclage……..….....13

1.3.3 Type de recyclage 14

1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement 14

1.4 Plastique et dechets plastiques ..... ……15

1.4.1 Matière plastique……..……..…..…..…..15

1.4.1.1 Définition ……...…...……...……15

1.4.1.2 Historique ……..…..…….15

1.4.1.3 Composition ……..……..…….....…..…17

1.4.1.4 Types de matières plastiques…….....……..21

1.4.1.5 Matières plastiques en chiffres ……..30
1.4.1.6 Processus de fabrication des matiéres plastiques…….32
1.4.1.7 Propriétés des matiéres plastiques……..…….39
1.4.1.8 Avantages et les inconvénients des matiéres plastiques……..…….47
1.4.2 Déchets plastiques……..……51
1.4.2.1 Origine des déchets plastiques…….51
1.4.2.2 Déchets plastiques en chiffres……..55
1.4.2.3 Intérêt de la récupération des dèchtes plastiques……..……56
1.4.2.4 Modes de traitement des déchtes plastiques……..……58
1.4.2.5 Recyclage des déchets plastiques en chiffres……..……66
1.5. Conclusion……..……..…70

CHAPITRE 02 : BETON DE SABLE ……..…73

2.1 Introduction…….73
2.2 Définition ……...73
2.3 Spécificité du béton de sable……..……..74
2.4 Historique du béton de sable……..…..74
2.5 Les composant du béton de sable……..…77
2.5.1 Les sables……..……..…77
2.5.2 Les fines d'ajout……..……78
2.5.3 Les ciments……..……..…82
2.5.4 Adjuvant……..……..…82
2.5.5 Eau……..……..…82
2.5.6 Autres ajouts……..……..…83
2.6 Propriétés essentielles du béton de sable……..……..……83
2.6.1 Propriétés générales……..……..…83
2.6.1.1 Granulométrie et maniabilité……..……..…83
2.6.1.2 Granulométrie et résistance……..…….86
2.6.2 Propriétés spécifique……..……..……..……88
2.6.2.1 L'adhérence aux armatures……..……..…88
2.6.2.2 Durabilité des bétons de sable…….90
2.6.2.3 Résistance au gel dégel……..……91
2.6.2.4 Retrait et fluage……..……..……..91
2.6.2.5 Comportement thermique du béton de sable……..…94
2.6.2.6 Phénoméne de ségrégation des constituants……..……..…94
2.6.2.7 Microstructure du béton de sable……..……..…94

2.7 Domaine d'emploi des bétons de sable……..…..……..…95
2.7.1 Fondations profondes…….……..…96
2.7.2 Bâtiments……...…...96
2.7.3 La préfabrication…….……..…96
2.7.4 Route , cahussé et dallage……..……..97
2.7.5 Autres applications…….……...……98
2.7.6 Techniques particulières……..…….……..…….100
2.7.6.1 Béton de sable projeté……...……100
2.7.6.2 Béton de sable fluide……...……..…..…..101
2.8 Intérêt et limites des bétons de sable……..……103
2.8.1 Intérêts des bétons de sable…….....…..…….……..103
2.8.2 Limites des bétons de sable…….……...……103
2.9 Méthodes de formulation des bétons de sable……..…….…….104
2.9.1 Approche théorique de formulation des bétons de sable…….....……..104
2.9.1.1 Dosage en fines d'un béton de sable……..……...…….……105
2.9.1.2 Dosage en eau d'un béton de sable……..…….....…106
2.9.1.3 Dosage en sable…….……...……..108
2.9.1.4 Estimation de la résistance en compression…….……..……109
2.9.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable…….....……112
2.9.2.1 Les différentes étapes de la formulation…….....……...……..112
2.9.2.1.1 Détermination d'une formule de base sans fines d'addition…….....…..112
2.9.2.1.2 Détermination du dosage en fines d'addition……..…….....…114
2.10 Conclusion…….……...…….116

CHAPITRE 03 : VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES…….…….…….....…..118

3.1. Introduction……..118
3.2 Influence de la poudre plastique sur les propriétés des matériaux cimentaires…….…...118
3.2.1 Etats frais……...…....….118
a)L'ouvrabilité……...…....…….....118
b) La densité……..……..…….....……118
c)L'air occlus……...……..……..…….120
3.2.2 Etats durci……...…….……...…….……...…..120
a) La résistance à la compression……...…….120
b) La résistance à la traction par flexion……...……...…..…...…123
c) Le module d'élasticité…….....……...…….125

d) La conductivité thermique……..……..……..…….…....126
3.2.3 Approche de durabilité……...……..……....……....……128
a) Porosité et microstructure……...……....…..128
b) L'absorption capillaire……...……....……...…..129
c) Retrait……...……..……....…..……..130
d) Résistance au feu……....……....……...….131

3.3 Influence des fibres plastiques sur les propriétés des matériaux cimentaires…...…...……...131
3.3.1 Etats frais……...……....……..…...….131
a)L'ouvrabilité……..……..…….131
b) La densité……..……..……133
c)L'air occlus……..……...……..…….133
3.3.2 Etats durci……...……..……....…..……..130
a) La résistance à la compression……..……....…….…..134
b) La résistance à la traction par flexion……..……...……..……....…….……137
c) Le module d'élasticité……..……..…….....…….139
d) La conductivité thermique……..……...…….…..140
3.3.3 Approche de durabilité……...……....……..……..…….……140
a) Porosité et microstructure……..……...……...……...140
b) Absorption capillaire……...……..……...……....……..141
c) Retrait……..……...……....…..……...141
d) Résistance au feu……....……..……..…….143

3.4 Conclusion……....…….144

CHAPITRE 04 : MATERIAUX ET ESSAIS…….....……...145

4.1. Introduction…….……..…..…….146

4.2 Matériaux utilisés ……147
4.2.1 Les sables…….……152
4.2.2 Ciments ……...……....……..152
4.2.3 Fillers……..……..……...……..…...154
4.2.4 Adjuvant…….....……..….156
4.2.5 Eau…….....……..……156
4.2.6 Déchets plastiques……..……..156
4.3 Formulation du béton ……..….....…….160
4.3.1Béton de sable à base de poudre plastique ……..……....……160
4.3.2 Béton de sable à base de fibres plastiques ……...…….……161

4.4 Malaxage et conservation des éprouvettes en béton……163
4.5. Essais réalisés sur béton de sable frais……164
4.5.1 La maniabilité……164
4.5.2 L'air occlus ……164
4.5.3 La densité……164
4.6 Fabrication et confection des éprouvettes ……165
4.7. Essais réalisés sur béton de sable durci……165
4.7.1 Essais de traction par flexion ……166
4.7.2 Essais de compression……166
4.7.3 Module d'élasticité……166
4.7.4 Conductivité thermique……167
4.8.Essais de durabilité……168
4.8.1 Porosité et microstructure……168
4.8.2 Absorption capillaire……169
4.8.3 Variations dimontionnels……170
4.8.4 Résistance au feu……171
4.9.Variable étudiées ……172
4.10 Conclusion……174

CHAPITRE 05 : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS……175

Partie 01 : Béton de sable à base de poudre plastique

5.1 Introduction 177
5.2 Béton frais 177
5.2.1 Maniabilité..... 177
5.2.2 La densité 180
5.2.3 Air occlus 182
5.3 Béton durci 184
5.3.1 Résistances à la compression 184
5.3.2 Résistances à la traction 187
5.3.3 Le module d'élasticité 189
5.3.4 Conductivité thermique……191
5.4 Approche de durabilité ……193
5.4.1 Porosité et microstructure……193
5.4.2 L'absorption capillaire……197
5.4.3 Variations de longueur ……199

a) Retrait……199
b) Gonflement……201
5.4.4 Variations de masse ……203
a) Perte de masse ……203
b) Gain de masse……204
5.4.5 Résistance au feu……206
a) La perte de masse……206
b) Résistance à la compression……208
5.5 Conclusion……212

Partie 02 : Béton de sable à base de fibres plastiques

5.6 Introduction 215
5.7 Béton frais 215
5.7.1 Maniabilité 215
5.7.2 La densité 218
5.7.3 L'air occlus 220
5.8 Béton durci 222
5.8.1 Résistances à la compression : 222
5.8.2 Résistances à la traction 224
5.8.3 Le module d'élasticité 226
5.8.4 Conductivité thermique……228
5.9 Approche de durabilité ……230
5.9.1 Porosité et microstructure……230
5.9.2 Absorption capillaire……233
5.9.3 Variations de longueur ……235
a) Retrait……235
b) Gonflement……238
5.9.4 Variations de masse ……240
a) Perte de masse ……240
b) Gain de masse……241
5.9.5 Résistance au feu……243
a) La perte de masse……243
b) Résistance à la compression……245

5.10 Conclusion……250

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS……252

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES……256

ANNEXE…….....…….267

PUBLICATION……...…….....….276

Liste des tableaux

Tableau. 1.1 Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008 12

Tableau. 1.2 Caractéristiques du comportement (Contrainte - Déformation) des matériaux polymères 45

Tableau. 1.3. Application de polyuréthane dans l'automobile 53

Tableau. 1.4. Pouvoir calorifique de certains polymères et des carburants communs 58

Tableau. 2.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment 79

Tableau .3.1. Coefficient d'absorption capillaire des mortiers à base de déchets plastiques 130

Tableau. 4.1. Caractéristiques physiques des sables utilisés 148

Tableau. 4.2. Composition chimique des ciments utilisés 153

Tableau. 4.3. Composition minéralogique des ciments utilisés 153

Tableau.4.4. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé 154

Tableau. 4.5 Caractéristiques chimiques du laitier utilisé 155

Tableau. 4.6 Caractéristiques physico-mécanique du laitier utilisé 155

Tableau. 4.7. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques de poudre plastique utilisée 158

Tableau. 4.8. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des fibres plastiques utilisées 159

Tableau. 4.9. Nomenclature de bétons de sable à base de déchets de poudre plastique 160

Tableau. 4.10. Compositions de bétons de sable à base de poudre plastique (pour 1 m^3) 161

Tableau. 4.11. Nomenclature de bétons de sable à base de fibres plastiques 162

Tableau. 4.12. Compositions de bétons de sable à base de fibres plastiques (pour 1 m^3) 163

Tableau. 4.13**.** Essais sur bétons de sable durcis 165

Tableau. 5.1. Résumé des propriétés mécaniques et durabilité pourcentages optimums de chaque type de BSPP 213

Tableau 5.2. Résumé des propriétés mécaniques et durabilité pourcentages optimums de chaque type de BSFP 251

Liste des figures

Fig.1.1. Composition des déchets ménagers en Algérie (2014) 11
Fig.1.2. Structure des monomères 18
Fig.1.3. La polymérisation de monomère à un polymère 18
Fig.1.4. La polymérisation d'un Ethylène 18
Fig.1.5. Polymères linéaires 19
Fig.1.6. Chaines ramifiés 19
Fig.1.7. Polymères réticulés 20
Fig.1.8. Déférentes composition des matières plastiques 21
Fig.1.9. Composition chimique du Polyéthylène 23
Fig.1.10. Les emballages en Polyéthylène 23
Fig.1.11. Les citernes en (PEBD) 23
Fig.1.12. Composition chimique du PET 23
Fig.1.13. Bouteilles en PET 23
Fig.1.14. Les tuyaux en PVC 24
Fig.1.15. Composition chimique du PP 25
Fig. 1.16. Les cordes en PP 25
Fig.1.17. Composition chimique du PS 26
Fig.1.18. Les billets du PS 26
Fig.1.19 Composition chimique du PS 26
Fig.1.20 Application du PS 26
Fig.1.21. Application du POM 27
Fig.1.22. Application du PA 27
Fig.1.23. Composition chimiques du polyuréthane 28
Fig1.24. Les polyesters insaturés 29
Fig.1.25. Chaussures fabriqués en élastomère 30
Fig.1.26. Les pneu en caoutchouc synthétique 30
Fig.1.27. Caoutchouc naturel 30
Fig. 1.28. Demande européenne de plastiques vierges par type de résine en 2012 30

Fig.1.29. La demande de matières plastiques par type de résine (kt) 31
Fig.1.30. Le cycle de production des matières plastiques 32
Fig.1.31. La transformation du pétrole vers Monomère 33
Fig.1.32. La polymérisation 34
Fig.1.33. Procédé d'injection des matières plastiques 35
Fig.1.34. Procédé d'injection –soufflage 35
Fig.1.35. Procédé d'extrusion des matières plastiques 36
Fig.1.36. Procédé d'extrusion-soufflage des matières plastiques 37
Fig.1.37. Procédé de soufflage des matières plastiques 37
Fig.1.38. Les plaques plastiques 38
Fig.1.39. Le calandrage 39
Fig.1.40. Courbe générale traction-allongement des matériaux polymères 43
Fig.1.41. Courbes traction-allongement des matériaux polymériques 44
Fig.1.42. La duré de vie de déchets plastiques dans le sol 48
Fig1.43. Différents types de déchets d'emballages en plastique 52
Fig.1.44. Déchets de semelles de chaussure usagée 53
Fig.1.45. Stock de pneus usagés à Campsas, Tarn-et-Garonne en 2007 54
Fig.1.46.Incendie sur le site de stockage de pneus usagés, Stanislaus county, CA 54
Fig.1.47. Les différents aspects de la pollution due aux déchets plastiques 57
Fig.1.48. Le recyclage chimique 60
Fig.1.49. Processus de recyclage mécanique des déchets plastiques 63
Fig.1.50. Exemple des différentes étapes du recyclage des PEBD densité plastiques 64
Fig.1.51. Exemple des différentes étapes du recyclage des PEHD densité plastiques 64
Fig.1.52. Exemple des différentes étapes du recyclage des PET 64
Fig. I.53. Procédure du traitement thermique des déchets plastiques 65
Fig.1.54. Les différents modes du traitement des déchets plastiques 66
Fig.1.55. Les chiffres du recyclage et de la valorisation des plastiques en Europe en 2011 66
Fig.1.56. Taux de valorisation des déchets d'emballages plastiques par pays 67
Fig.1.57. Bilan de la valorisation des matières plastiques en Europe de 1995 à 2014 (graphique établi à partir des données de Plastics Europe ; données pour EU des 28+N/CH en 2014) 68
Fig.1.58 . Modes d'élimination des déchets en Algérie 69

Fig.2.1. Carte de déserts dans le monde 73
Fig.2.2. Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel 74
Fig.2.3. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) 75
Fig.2.4. Métro de Saint-Pétersbourg 76
Fig.2.5. Fines anguleuses 79
Fig.2.6. Fines sphériques 80
Fig. 2.7 . Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) 81
Fig.2.8. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS 84
Fig.2.9. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire) 85
Fig.2.10. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS 86
Fig.2.11. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance 87
Fig.2.12. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance 87
Fig.2.13. Effet de la granularité sur la résistance 88
Fig.2.14. Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation 89
Fig.2.15. Influence de la résistance en traction du BS sur l'adhérence des armatures 89
Fig.2.16. Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores 90
Fig. 2.17. Evolution du retrait dans le béton de sable 92
Fig.2.18. Evolution du fluage du béton de sable 93
Fig. 2.19. Eprouvettes non vibrées non piquées 94
Fig. 2.20. Liaison pâte granulats du Béton de sable de dune 95
Fig.2.21. Aspect du Béton de sable de dune 95
Fig.2.22.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite) 96
Fig. 2.23 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable [39] 97
Fig. 2.24. Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable 97
Fig. 2.25. Ombrelles d'étanchéité en place 97
Fig.2.26. Tunnel du métro de Leningrad 97
Fig. 2.27. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface 98
Fig.2.28. Déroulement d'un film polyane (cure) 98
Fig.2.29. Conduite en béton de sable armé 99

Fig.2.30. Pose de conduite d'assainissement et regards de visite en béton de sable 100

Fig.2.31. Le béton de sable en projection 101

Fig. 2.32. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon) 102

Fig.2.33. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines 106

Fig.2.34.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable 107

Fig.2.35. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée 108

Fig.2.36. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) 110

Fig.2.37. Organigramme de la méthode théorique 111

Fig.2.38. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition 115

Fig.2.39. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition 115

Fig.3.1. Densité des mortiers à base de déchets plastiques (PP et PF) 119

Fig.3.2. La dégression de la densité des mortiers à base de déchets plastiques (PET et PC) 119

Fig.3.3. Densité des mortiers à base de déchets plastiques (PVC, PE et PVC+PE) 120

Fig.3.4. Densité de bétons à base de déchets plastiques (PVC, PE et PVC+PE) 120

Fig.3.5. Résistance à la compression de bétons à base de déchets plastiques (PET) 120

Fig.3.6. La résistance à la compression de bétons à base de déchets plastiques(PEBD) 121

Fig.3.7. Résistance à la compression de bétons à base de déchets plastiques (PEBD) 122

Fig.3.8. Résistance à la compression des mortiers à base de déchets plastiques (PF et PP) 123

Fig.3.9.Résistance à la traction des mortiers à base de déchets plastiques(PVC) 124

Fig.3.10. Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de déchets plastiques (PF et PP) 124

Fig.3.11. Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de déchets plastiques (PET et PC) 125

Fig.3.12. Module d'élasticité de bétons à base de déchets plastiques (PET) 125

Fig.3.13. Module d'élasticité des mortiers à base de déchets plastiques (PET et PC) 126

Fig.3.14. Conductivité thermique des mortiers à base de poudre plastique (PF et PET) 127

Fig.3.15. Conductivité thermique des mortiers à base de poudre plastique (PF et PET) 127

Fig.3.16. La distribution des pores des mortiers à base de déchets plastiques 128

Fig.3.17 Porosité des mortiers à base de déchets plastiques (PVC, PE, PVC+PE) 129

Fig.3.18. La microstructure des mortiers à base de déchets plastiques 130

Fig.3.19.L'affaissement de bétons à base de différents types de fibres plastiques 132

Fig.3.20. Etalement des BAP à base de fibres plastiques (PET) 132

Fig.3.21. Densité des mortiers à base de fibres plastiques en PET 133

Fig.3.22. Densité des BAP à base de fibres plastiques en PET 133

Fig.3.23.L'air occlus de bétons à base de différents types de fibres plastiques 134

Fig.3.24. Résistance à la compression des BAP à base de fibres plastiques 135

Fig.3.25.Résistance à la compression des BAP à base de fibres plastiques 135

Fig.3.26. Résistance à la compression des BAP a base de fibres plastiques 136

Fig.3.27.Résistance à la compression de bétons renforcés par des fibres plastiques 136

Fig.3.28. Résistance à la traction des mortiers à base de fibres plastiques (PET) 137

Fig.3.29 Résistance à la traction des mortiers à base de fibres plastiques (PET) 138

Fig.3.30.Résistance à la flexion des BAP à base de fibres plastiques 138

Fig.3.31.Résistance à la flexion des BAP à base de fibres plastiques 139

Fig.3.32. Gain de résistance à la flexion des BAP à base de fibres plastiques 139

Fig.3.33. Module d'élasticité de bétons à base de fibres plastiques (PET) 140

Fig.3.34. La microstructure de bétons à base de fibres plastiques 141

Fig.3.35. Coefficients d'absorption capillaire des mortiers à base de fibres plastiques 141

Fig.3.36 L'influence d'ajout de fibres plastiques sur le retrait du béton ordinaire 142

Fig. 4.1. Aspect général des sables utilisées 147

Fig. 4.2. Courbes granulométriques des sables et de poudre utilisées 149

Fig. 4.3 Photos MEB de sable de Tamanrasset 149

Fig. 4.4. Photos MEB de sable de BAHBAH 150

Fig. 4.5. Photo MEB de sable de BOUGHEZOUL 150

Fig. 4.6. Photo MEB de sable de Concassage 150

Fig. 4.7. Analyse par DRX de sable de Tamanrasset 151

Fig. 4.8. Analyse par DRX de sable de BAHBAH 151

Fig. 4.9. Analyse par DRX de sable de BOUGHEZOUL 152

Fig. 4.10. Analyse par DRX de sable de Concassage 152

Fig .4.11. Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 CHLEF 153

Fig.4.12. Laitier granulé 154
Fig.4.13. Broyeur à boulet utilisé 155
Fig. 4.14. Le laitier broyé utilisé 155
Fig. 4.15. Analyse par DRX du laitier utilisé 156
Fig.4.16. Aspect général de la poudre plastique utilisé 157
Fig. 4.17 Photo MEB de poudre plastique utilisé 157
Fig. 4.18. Analyse par DRX de poudre plastique utilisé 158
Fig.4.19. L'aspect général des fibres plastiques utilisées 159
Fig.4.20. Diapositive de l'essai traction par flexion 166
Fig.4.21. Diapositive de l'essai résistance à la compression 166
Fig.4.22. Mesure du module d'élasticité en compression 167
Fig.4.23. Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique 167
Fig.4.24. Mesure de la porosité accessible à l'eau 168
Fig.4.25. Observation de l'échantillon par Microscope Electronique à Balayage 169
Fig. 4.26. Absorption d'eau par succion capillaire 169
Fig.4.27. Principe de mesure du retrait et gonflement 170
Fig.4.28. Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle 171
Fig. 4.29. Courbe de chauffage des éprouvettes 172
Fig.4.30. Variables étudiées 172
Fig. 5.1. Temps d'écoulement des BST à base de poudre plastique 177
Fig. 5.2. Temps d'écoulement des BSBH à base de poudre plastique 177
Fig. 5.3. Temps d'écoulement des BSBG à base de poudre plastique 178
Fig.5.4. Temps d'écoulement des BSCN à base de poudre plastique 178
Fig. 5.5. Temps d'écoulement des BST à base de poudre plastique après réglage 179
Fig. 5.6. Temps d'écoulement des BSBH à base de poudre plastique après réglage 179
Fig. 5.7. Temps d'écoulement des BSBG à base de poudre plastique après réglage 179
Fig. 5.8. Temps d'écoulement des BSCN à base de poudre plastique après réglage 180
Fig. 5.9. La densité des BST à base de poudre plastique 180
Fig.5.10. La densité des BSBH à base de poudre plastique 181
Fig. 5.11. La densité des BSBG à base de poudre plastique 181
Fig.5.12. La densité des BSCN à base de poudre plastique 181
Fig. 5.13. L'air occlus des BST à base de poudre plastique 182

Fig. 5.14. L'air occlus des BSBH à base de poudre plastique 182
Fig. 5.15. L'air occlus des BSBG à base de poudre plastique 183
Fig. 5.16. L'air occlus des BSCN à base de poudre plastique 183
Fig. 5.17. La résistance à la compression des BST à base de poudre plastique 184
Fig. 5.18. La résistance à la compression des BSBH à base de poudre plastique 184
Fig. 5.19. La résistance à la compression des BSBG à base de poudre plastique 185
Fig. 5.20. La résistance à la compression des BSCN à base de poudre plastique 185
Fig. 5.21. La résistance à la traction des BST à base de poudre plastique 187
Fig. 5.22. La résistance à la traction des BSBH à base de poudre plastique 187
Fig. 5.23. La résistance à la traction des BSBG à base de poudre plastique 187
Fig. 5.24. La résistance à la traction des BSCN à base de poudre plastique 188
Fig. 5.25. Le module d'élasticité de BST à base de poudre plastique 189
Fig. 5.26. Le module d'élasticité des BSBH à base de poudre plastique 189
Fig. 5.27. Le module d'élasticité des BSBG à base de poudre plastique 190
Fig. 5.28. Le module d'élasticité des BSCN à base de poudre plastique 190
Fig. 5.29. La conductivité thermique des BST à base de poudre plastique 191
Fig. 5.30. La conductivité thermique des BSBH à base de poudre plastique 191
Fig. 5.31. La conductivité thermique des BSBG à base de poudre plastique 192
Fig. 5.32. La conductivité thermique des BSCN à base de poudre plastique 192
Fig. 5.33. La porosité des BST à base de poudre plastique 193
Fig. 5.34. La porosité des BSBH à base de poudre plastique 194
Fig. 5.35. La porosité des BSBG à base de poudre plastique 194
Fig. 5.36. La porosité des BSCN à base de poudre plastique 194
Fig.5.37. Examen au MEB de BSTT et BST à base de poudre plastique 195
Fig.5.38. Examen au MEB de BSBHT et BSBH à base de poudre plastique 195
Fig.5.39. Examen au MEB de BSBGT et BSBG à base de poudre plastique 196
Fig.5.40. Examen au MEB de BSCNT et BSCN à base de poudre plastique 196
Fig. 5.41. Absorption d'eau des BST à base de poudre plastique 197
Fig. 5.42. Absorption d'eau des BSBH à base de poudre plastique 197
Fig. 5.43. Absorption d'eau des BSBG à base de poudre plastique 197
Fig. 5.44. Absorption d'eau des BSCN à base de poudre plastique 198

Fig. 5.45. Retrait des BST à base de poudre plastique 199
Fig. 5.46. Retrait des BSBH à base de poudre plastique 199
Fig. 5.47. Retrait des BSBG à base de poudre plastique 200
Fig. 5.48. Retrait des BSCN à base de poudre plastique 200
Fig. 5.49. Gonflement des BST à base de poudre plastique 201
Fig. 5.50. Gonflement des BSBH à base de poudre plastique 201
Fig. 5.51. Gonflement des BSBG à base de poudre plastique 202
Fig. 5.52. Gonflement des BSCN à base de poudre plastique 202
Fig. 5.53. Perte de masse des BST à base de poudre plastique 203
Fig. 5.54. Perte de masse des BSBH à base de poudre plastique 203
Fig.5.55. Perte de masse des BSBG à base de poudre plastique 203
Fig. 5.56. Perte de masse des BSCN à base de poudre plastique 204
Fig. 5.57. Gain de masse des BST à base de poudre plastique 204
Fig. 5.58. Gain de masse des BSBH à base de poudre plastique 205
Fig. 5.59. Gain de masse des BSBG à base de poudre plastique 205
Fig. 5.60. Gain de masse des BSCN à base de poudre plastique 205
Fig. 5.61. Perte de masse des BST PP en fonction de l'élévation de température 206
Fig. 5.62. Perte de masse des BSBH PP en fonction de l'élévation de température 206
Fig. 5.63. Perte de masse des BSBG PP en fonction de l'élévation de température 207
Fig.5.64. Perte de masse des BSCN PP en fonction de l'élévation de température 207
Fig. 5.65.Résistance à la compression des BST PP en fonction de l'élévation de température 208
Fig. 5.66. Résistance à la compression des BSBH PP en fonction de l'élévation de température 208
Fig. 5.67. Résistance à la compression des BSBG PP en fonction de l'élévation de température 209
Fig. 5.68. Résistance à la compression des BSCN PP en fonction de l'élévation de température 209
Fig.5.69. Examen au MEB de BSTT et BST 40%PP chauffe à 600°C 210
Fig.5.70. Examen au MEB de BSBHT et BSBH 40%PP chauffe à 600°C 211
Fig.5.71. Examen au MEB de BSGT et BSBG 40%PP chauffe à 600°C 211
Fig.5.72. Examen au MEB de BSCNT et BSCN 40%PP chauffe à 600°C 211
Fig. 5.73. Temps d'écoulement des BST à base de fibres plastiques 215

Fig. 5.74. Temps d'écoulement des BSBH à base de fibres plastiques 215
Fig. 5.75. Temps d'écoulement des BSBG à base de fibres plastiques 216
Fig. 5.76. Temps d'écoulement des BSCN à base de fibres plastiques 216
Fig. 5.77. Temps d'écoulement des BST à base de fibres plastiques après réglage 217
Fig. 5.78. Temps d'écoulement des BSBH à base de fibres plastiques après réglage 217
Fig. 5.79. Temps d'écoulement des BSBG à base de fibres plastiques après réglage 218
Fig. 5.80. Temps d'écoulement des BSCN à base de fibres plastiques après réglage 218
Fig. 5.81. La densité des BST à base de fibres plastiques 218
Fig. 5.82. La densité des BSBH à base de fibres plastiques 219
Fig. 5.83. La densité des BSBH à base de fibres plastiques 219
Fig. 5.84. La densité des BSCN à base de fibres plastiques 219
Fig. 5.85. L'air occlus des BST à base de fibres plastiques 220
Fig. 5.86. L'air occlus des BSBH à base de fibres plastiques 220
Fig. 5.87. L'air occlus des BSBG à base de fibres plastiques 220
Fig. 5.88.L'air occlus des BSCN à base de fibres plastiques 221
Fig.5.89. La résistance à la compression des BST à base de fibres plastiques 222
Fig. 5.90. La résistance à la compression des BSBH à base de fibres plastiques 222
Fig. 5.91. La résistance à la compression des BSBG à base de fibres plastiques 223
Fig.5.92. La résistance à la compression des BSCN à base de fibres plastiques 223
Fig. 5.93. La résistance à la traction des BST à base de fibres plastiques 224
Fig. 5.94. La résistance à la traction des BSBH à base de fibres plastiques 224
Fig. 5.95. La résistance à la traction des BSBG à base de fibres plastiques 225
Fig. 5.96. La résistance à la traction des BSCN à base de fibres plastiques 225
Fig. 5.97. Le module d'élasticité des BST à base de fibres plastiques 226
Fig. 5.98. Le module d'élasticité des BSBH à base de fibres plastiques 227
Fig. 5.99. Le module d'élasticité des BSBG à base de fibres plastiques 227
Fig. 5.100. Le module d'élasticité des BSCN à base de fibres plastiques 227
Fig. 5.101. La conductivité thermique des BST à base de fibres plastiques 228
Fig. 5.102. La conductivité thermique des BSBH à base de fibres plastiques 228
Fig. 5.103. La conductivité thermique des BSBG à base de fibres plastiques 229
Fig. 5.104. La conductivité thermique des BSCN à base de fibres plastiques 229

Fig. 5.105. La porosité des BST à base de fibres plastiques 230
Fig. 5.106. La porosité des BSBH à base de fibres plastiques 230
Fig. 5.107. La porosité des BSBG à base de fibres plastiques 231
Fig. 5.108. La porosité des BSCN à base de fibres plastiques 231
Fig.5.109. Examen au MEB de BSTT et BST à base de fibres plastiques 232
Fig.5.110. Examen au MEB de BSTT et BSBH à base de fibres plastiques 232
Fig.5.111. Examen au MEB de BSGT et BSBG à base de fibres plastiques 233
Fig.5.112. Examen au MEB de BSCNT et BSCN à base de fibres plastiques 233
Fig. 5.113. Absorption d'eau des BST à base de fibres plastiques 234
Fig. 5.114. Absorption d'eau des BSBH à base de fibres plastiques 234
Fig. 5.115. Absorption d'eau des BSBG à base de fibres plastiques 234
Fig. 5.116. Absorption d'eau des BSCN à base de fibres plastiques 235
Fig. 5.117. Le retrait des BST à base de fibres plastiques 236
Fig. 5.118. Le retrait des BSBH à base de fibres plastiques 236
Fig. 5.119. Le retrait des BSBG à base de fibres plastiques 236
Fig. 5.120. Le retrait des BSCN à base de fibres plastiques 237
Fig. 5.121. Le gonflement des BST à base de fibres plastiques 238
Fig. 5.122. Le gonflement des BSBH à base de fibres plastiques 238
Fig. 5.123. Le gonflement des BSBG à base de fibres plastiques 239
Fig. 5.124. Le gonflement des BSCN à base de fibres plastiques 239
Fig. 5.125. Perte de masse des BST à base de fibres plastiques 240
Fig. 5.126. Perte de masse des BSBH à base de fibres plastiques 240
Fig. 5.127. Perte de masse des BSBG à base de fibres plastiques 240
Fig. 5.128. Perte de masse des BSCN à base de fibres plastiques 244
Fig. 5.129. Gain de masse des BST à base de fibres plastiques 242
Fig. 5.130. Gain de masse des BSBH à base de fibres plastiques 242
Fig. 5.131. Gain de masse des BSBG à base de fibres plastiques 242
Fig. 5.132. Gain de masse des BSCN à base de fibres plastiques 243
Fig. 5.133. Perte de masse des BST FP en fonction de l'élévation de température 244
Fig. 5.134. Perte de masse des BSBH FP en fonction de l'élévation de température 244
Fig. 5.135. Perte de masse des BSBG FP en fonction de l'élévation de température 244
Fig. 5.136. Perte de masse des BSCN FP en fonction de l'élévation de température 245
Fig. 5.137.Résistance à la compression des BST FP en fonction de l'élévation de température 246

Fig.5.138. Résistance à la compression des BSBH FP en fonction de l'élévation de température 246

Fig. 5.139. Résistance à la compression des BSBG FP en fonction de l'élévation de température 246

Fig. 5.140. Résistance à la compression des BSCN FP en fonction de l'élévation de température 247

Fig.5.141. Examen au MEB de BSTT et BST 40%FP chauffe à 600°C 248

Fig.5.142. Examen au MEB de BSBHT et BSBH 40%FP chauffe à 600°C 248

Fig.5.143. Examen au MEB de BSBGT et BSBG 40%FP chauffe à 600°C 249

Fig.5.144. Examen au MEB de BSCNT et BSCN 40%FP chauffe à 600°C 249

Fig. A.1 : Fonctionnement du Broyeur 270

Fig.B1. La fiche technique ciment de chlef 271

Fig.B.2.La fiche technique de l'adjuvant MEDAFLUID 104 272

Fig .C.1 . Le malaxage du béton de sable à base de poudre plastique 273

Fig.C.2.L'aspect du béton de sable à l'état frais 273

Fig.D.1. Aspect du béton de sable à l'état durci 274

Fig.D.2. Aspect du béton de sable à base de fibres plastiques 274

Fig.D.3. Aspect des éprouvettes du béton de sable FP après l'écrasement 274

Fig.D.4. Aspect des éprouvettes du béton de sable à base de fibres plastiques après l'échauffement 275

Fig.D.5. Aspect des éprouvettes du béton de sable à base de poudre plastique après l'échauffement 275

Liste des Symbole et des Abréviations

FFOM : Fraction fermentescible des ordures ménagères

DIS : Déchets industriels spéciaux

DMS : Déchets ménagers spéciaux

D.I.B. : Les déchets industriels banals

PS : Polystyrène

PVC : Chlorure de polyvinyle

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PEBD : Polyéthylène basse densité

PEHD : Polyéthylène haute densité

PET : polyéthylène téréphtalate

PC : Polycarbonate

POM : Polyacétals ou polyoxyméthylène

PA : Les polyamides

PUR : Polyuréthanes

PF : Phénoplastes

MF : Aminoplastes

PMMA : poly (méthacrylate de méthyle)

PTFE : polytétrafluoréthylène

PCB : polychlorobiphényles

COV : Composés organiques volatils

BS : Béton de sable

E/C : Eau/Ciment

C : Dosage en ciment

C_2S : Silicate bicalcique (belite)

C_3A : Aluminate tricalcique

C_3S : Silicate tricalcique (alite)

C_4AF : Aluminate-ferrite tétracalcique

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

Al_2O_3 : Oxyde d'Aluminium

Fe_2O_3 : Oxyde de fer

Cao : Oxyde de calcium

S_iO_2 : Silicium

MgO : Magnésium

Dmax : Diamètre maximale des granulats

G/S: Gravillons sur sable

ES : Equivalent de sable

R7j : Résistance à 7 jours

R28j : Résistance à 28 jours

R90j : Résistance à 90 jours

DRX : Diffractomètre au rayon X

MEB: Microscope électronique à balayage

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire

M sable: masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction

MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel respectivement

MV sable : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement

CPA CEM I 42.5 : Ciment Portland Artificiel de Classe 42,5

ρ : masse volumique apparente (kg.m-3)

ρs : masse volumique absolue (kg.m-3)

λ : Conductivité thermique (W/m°C)

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

I : Moment d'inertie de la section transversale

ν : La distance de la fibre la plus éloignée

$\mathbf{R_C}$: Résistance à la compression en (MPa)

$\mathbf{F_C}$**:** Charge de rupture en (N);

b: Côte de l'éprouvette

ε : porosité totale (%)

$\boldsymbol{M_{air}}$ **:** La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

$\boldsymbol{M_{sec}}$ **:** La masse d'éprouvette sec

$\boldsymbol{M_{eau}}$ **:** La masse d'éprouvette immergée dans l'eau

BSTT : Béton de sable de TAMANRASSET témoin (sans déchets plastiques)

BST PP : Béton de sable de TAMANRASSET à base de poudre plastique

BST FP : Béton de sable de TAMANRASSET à base de fibres plastiques

BSBHT : Béton de sable de BAHBAH témoin (sans déchets plastiques)

BSBH PP : Béton de sable de BAHBAH à base de poudre plastique.

BSBH FP : Béton de sable de BAHBAH à base de fibres plastiques.

BSBGT : Béton de sable de BOUGHEZOUL témoin (sans déchets plastiques)

BSBG PP : Béton de sable de BOUGHEZOUL à base de poudre plastique.

BSBG FP : Béton de sable de BOUGHEZOUL à base de fibres plastiques.

BSCNT : Béton de sable de Concassage témoin (sans déchets plastiques).

BSCN PP : Béton de sable de Concassage à base de poudre plastique

BSCN FP : Béton de sable de Concassage à base de fibres plastiques.

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

L0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

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

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

Introduction générale

Introduction générale

En Algérie, depuis les années 2000 jusqu'à ce jour, la demande en matériaux de construction connaît une croissance considérable en rapport avec le développement du pays. Cette demande, estimée à des chiffres très élevés, demeure insatisfaite devant une offre insuffisante. Ce déséquilibre, qui semble aller persister pour les prochaines années, ne peut être surmonté qu'en assurant une exploitation rationnelle des matériaux locaux dont dispose notre pays. La valorisation des matériaux locaux, peu ou pas exploités, est devenue actuellement une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays en voie de développement.

Par ailleurs, les grandes quantités de déchets résultant quotidiennement des différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes particulièrement difficiles à résoudre. Parmi ces déchets on peut citer les déchets en matières plastiques, qui représentent une part importante des déchets solides municipaux, et qui posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie élevée et parce que ce sont des déchets voyants. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage. La réutilisation de ces déchets dans la construction pourra résoudre un double problème : d'une part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction. En effet, certains déchets plastiques possèdent des qualités très importantes et leur introduction dans certains matériaux cimentaires de construction améliore certainement leurs propriétés mécaniques ou thermiques.

C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons qui utiliseraient des ressources abondantes, peu ou pas exploitées, et présenteraient soit des caractéristiques comparables à celles des bétons usuels, soit des caractéristiques répondant à certaines exigences mal assurées par ces derniers. La valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes natures comme le plastique font actuellement l'objet de différentes recherches.

Ce travail consiste donc à récupérer des déchets plastiques, plus précisément des bouteilles usagées en PET, des enceintes d'emballage (PEBD) « anciennes citernes usagées des produits chimiques et de l'eau potable », rejetées dans la nature, après avoir été collectés, sont lavées,

compressées, broyées puis extrudées sous forme de poudre et fibres, puis incorporées dans le béton de sable par substitution et par ajouts. Le composite ainsi réalisé est appelé ***''béton de sable à base de déchets plastiques''***. A part le ciment, chaque matériau de base constituant ce béton entre soit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, soit dans le cadre de la réutilisation des déchets industriels.

Pour le besoin de l'étude, les matériaux utilisés sont les suivants :

- Quatre sables de différentes natures : Deux ***sables dunaires, un sable de carrière*** et un ***sable de concassage.***
- Deux déchets industriels d'origines différentes : le ***laitier de haut fourneau*** provenant du complexe sidérurgique d'El-Hadjar et les ***déchets plastiques sous forme de (poudre et fibres)*** provenant de la décharge naturelle.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des cinq chapitres suivants :

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant en général la valorisation des déchets et l'activité de recyclage en construction.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse sur l'état de l'art du béton de sable.

L'influence des déchets plastiques (poudre et fibres) sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais, à l'état durci, et sur la durabilité est présentée dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (maniabilité, densité, air occlus), les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion, module d'élasticité), les propriétés thermiques (conductivité thermique), la durabilité (Porosité et microstructure, absorption d'eau, variations dimensionnelles (retrait et gonflement) et variations massique (perte et gain de masse)) ,et la résistance au feu du béton de sable à base de déchets plastiques.

Le cinquième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Ce chapitre comporte deux parties.

L'influence de la poudre plastique (partie 1) et les fibres plastiques (partie 2) sur le comportement du béton de sable.

Enfin des conclusions générales et des recommandations sont présentées pour achever ce modeste travail de recherche.

Chapitre 01:

Valorisation des déchtes
et
activité de recyclage en construction

1.1. Introduction

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose de plus en plus à l'homme.

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. La récupération et recyclage des déchets touchent deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [1].

1.2. Déchets et sous-produits industriels dans le domaine génie civil

1.2.1. Valorisation des déchets

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances [2].

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».
L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir

1.2.2. Déchets

Tout objet qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé, ou abimé d'une manière ou d'une autre, pour certains, sera qualifié de déchet, mais ne sera pas nécessairement considéré comme tel par les autres [1].
D'après le code française de l'environnement, article L541-1, le déchet est ainsi qualifié de façon essentiellement subjective, où l'acte ou l'intention du détenteur de se

défaire/éliminer/abandonner importe plus que de savoir si l'objet est devenu impropre à l'usage, a perdu toute valeur économique ou présente un danger pour l'environnement [2].

1.2.3. Constitution chimique de déchets

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [3].

1.2.4. Types de déchets

Il existe de nombreux types de déchets fabriqués par une variété de processus. Chaque type de déchets a différentes méthodes de gestion associées.

A. Les déchets biodégradables

Résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires…, qui s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, etc. Selon leur origine. Ils peuvent être revalorisés par différentes filières (bioénergie, biocarburants, Compostage / amendements / engrais…).

B. Les 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. Outre les déchets ultimes : « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment». Eux seuls devraient encore pouvoir être mis en décharge [1].

C. Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux

À la différence du déchet banal peuvent entrer dans la catégorie des déchets dangereux, dont font partie les déchets toxiques et les déchets radioactifs qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité. Parmi les déchets nucléaires, on distingue les déchets radioactifs ultimes [1].

D. Les déchets recyclables

Matériaux de construction, métaux, matières plastiques : ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont hachés et servent de rembourrage ou de combustible …

On s'intéresse sur les déchets de métaux (fer, aluminium, plomb,…) qui possèdent une valeur marchande et qui se présentent sous 3 formes:

1- les chutes de fabrication (rebuts, limailles) [1].

2- les objets métalliques en fin de vie (moteurs, outils, canalisations, câblages...)

3- les composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le métal contenu (catalyseurs de pots d'échappement,…).

D.1 Déchets usuels inertes

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peut dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

D.2 Déchets usuels non inertes

Les plus connus de ces déchets sont les huiles et les peintures. L'incinération avec valorisation énergétique est un des procédés employés pour les recycler. Elle permet la production d'énergie et la destruction des déchets peu combustibles [1].

D.3 Déchets industriels dangereux

L'industrie produit une grande quantité de déchets dangereux. Ce sont pour la plupart des produits comprenant des substances chimiques toxiques ou instables. Les déchets toxiques

sont dangereux pour la santé et pour l'environnement. La manipulation de déchets instables entraîne des risques d'accidents graves [1].

D.4 Déchets toxiques en quantités dispersées

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques.

E. 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 (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.…

F. Déchets dangereux

Ils regroupent deux types de déchets :

F.1 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.…

F.2 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 dispersée.

1.2.5. Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en six catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques [4].

A. Déchets industriels dangereux mais non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement :

- Des déchets de fer, de cuivre, de plomb,
- Des déchets contenant des fibres d'amiante,
- Des produits de préservation du bois,
- Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment à caractère industriel.

B. Déchets inertes

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets. Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages [1].

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel.
- Des déchets solides et inertes de travaux routiers,
- Des éléments en béton, mortier de ciment et béton,
- Des terres de déblais non contaminées.

C. Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques.

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques [2].

D. Déchets industriels dans des conditions spécifiques

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le laitier, etc.) [4].

E. Déchets ménagers et assimilés

Ce type de déchets regroupe :

- Des déchets en matériaux de synthèse,

• Des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.

• Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.

• Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.

• Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.

• Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.

• Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).

• Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques**.**

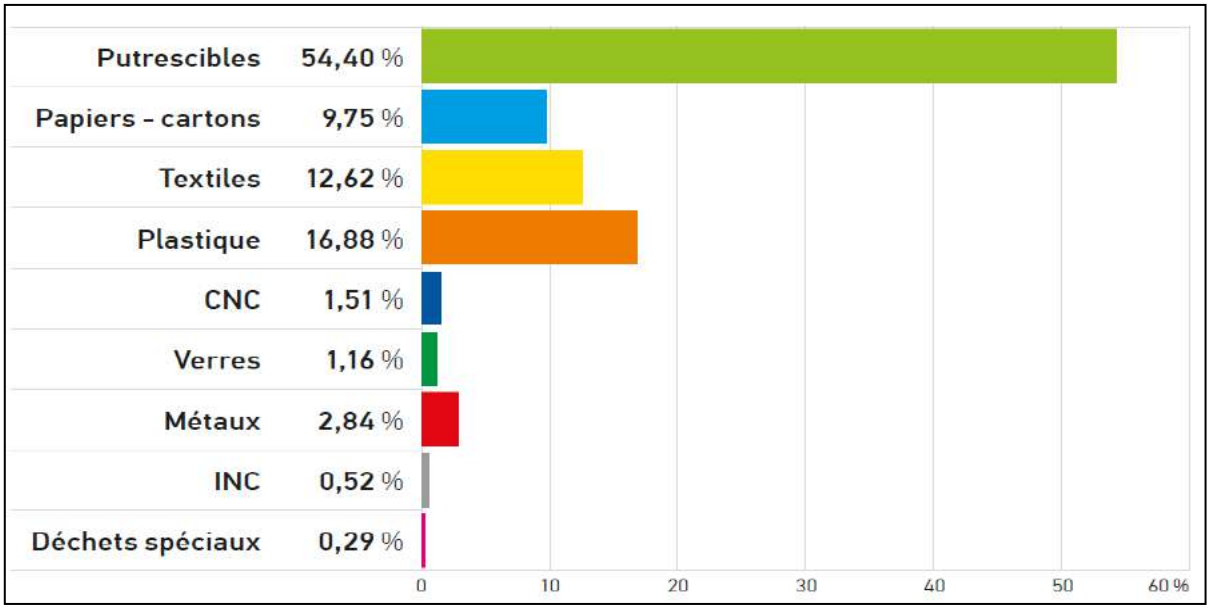


Fig.1.1. Composition des déchets ménagers et assimilés en Algérie (2014) [5]

F. Déchets industriels banals (D.I.B.)

Appelés quelquefois déchets industriels assimilés aux déchets ménagers, sont constitués de déchets non dangereux et non inertes. Ils contiennent effectivement les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différentes.

Tableau. 1.1. Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008 [6]

Catégorie de déchets	Production de déchets en tonnes
bois	5 529 740
métaux	3 960 337
déchets en mélange	2 160 388
papiers cartons	1 997 818
plastiques	467 333
verre	305 495
caoutchouc	81 220
textile	22 877
Total déchets banals	14 525 208

1.3. Activité du recyclage des déchets en construction

1.3.1. Recyclage des déchets

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 naturelles. 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 [7].

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie du 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.

1.3.2. Technique de recyclage

A. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de technique de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « **chimique** » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « **mécanique** » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit« **organique** » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

B. La chaîne du recyclage

B.1 Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement technique.
Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.
À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations [8].

B.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

B.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

1.3.3. Type de recyclage

On peut distinguer trois types de recyclage [9] :

- **le recyclage in situ** : les installations de recyclage sont mobiles et il s'effectue sur le chantier de démolition ;
- **le recyclage sélectif** : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ;
- **le recyclage en site fixe** : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site.

L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles. La nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage-criblage :

- stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;
- prétraitement : réduction des gros éléments, cisaillage des ferraillages ;
- dé ferraillage (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;
- des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.)

1.3.4. Impacts du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [9].

Le recyclage de déchets permet de :

- ✓ Réduire l'extraction des matières premières,
- ✓ Réduire des pollutions et nuisances,
- ✓ Préserver de la diversité biologique et des espaces naturels,
- ✓ Protection des recoures naturels,
- ✓ La protection de l'atmosphère,
- ✓ Contrôler et déduire des déchets dangereux.

Par exemple:

• l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;

• chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;

• le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;

• l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).

• chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

• chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau

1.4. Plastiques et Déchets plastiques

1.4.1. Matière plastique

1.4.1.1. Définition

Une matière plastique ou familièrement un plastique désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un produit semi-fini ou à un objet [10].

Le mot « plastique » dérive de malléabilité ou de plasticité qui est la propriété de la matière de se laisser former (ou déformer) d'une manière durable (par opposition à élasticité : possibilité de déformation temporaire) sous l'action d'une contrainte ou dans certaines conditions de températures [10].

1.4.1.2. Historique

La première des matières plastiques que l'homme a fabriquée est le celluloïd. C'est ainsi qu'en 1863, était paru une annonce dans un journal américain, qu'une forte somme était promise à la

personne qui trouverait un substitut à l'ivoire, pour pouvoir fabriquer des boules de billard. Les frères Hyatt, après plus de sept ans de recherche, vont créer le celluloïd, l'un de ces deux frères était imprimeur à New York. Vers 1880, est apparue la galalithe, c'est L.H. Baekeland, qui a mis au point la bakélite en 1906. Le celluloïd, la galalithe et la bakélite qui sont 3 substances artificielles, elles sont les ancêtres des trois grandes familles de plastiques, mais ces 3 substances ont été obtenues à partir de trois techniques différentes. Le celluloïd, est la résultante du traitement d'une substance animale ou végétale macromoléculaire par un plastifiant. La bakélite, elle s'obtient par la condensation d'éléments moléculaires qui vont être ensuite polymisés, la galalithe, quant à elle, va utiliser tout simplement et uniquement la polumérisation, mais artificiellement car produite par des catalyseurs.

De nos jours les matières plastiques, résultent des progrès spectaculaires de la chimie. La matière plastique provient du charbon et du pétrole, ces matières plastiques ont de nombreuses propriétés inégalables, dans l'industrie de l'automobile, de l'industrie de la construction, de l'industrie pharmaceutique, dans l'industrie alimentaire, industrie vestimentaire, etc. ... Les dérivés du plastique sont : Le chlorure de polyvinyle ou PVC, les silicones, les résines époxy, les polyuréthannes, les polycarbonates, le PTFE- téflon TM, le polystyrène, les acryliques, les polyoléfines, les polyamides, les élastomères etc... Résumons, la matière plastique = résines de base + adjuvants + additifs. En ce qui concerne la matière plastique, le sujet est vaste et la matière est sujette à la créativité du chimiste et aussi de beaucoup d'autres créateurs, car le plastique a beaucoup de qualités. Il est léger, malléable, imperméable, esthétique, résistant, et modulable à souhait.

Les premières matières plastiques ont été réalisées à base de polymères naturels, plus ou moins modifiés chimiquement. Ainsi, en 1847, on commença à utiliser du nitrate de cellulose (cellulose extraite de végétaux modifiée par une réaction de nitratation) pour la fabrication de laques. En 1870, l'Américain Hyatt synthétisa du Celluloïd à partir d'un mélange de camphre et de nitrate de cellulose, en y ajoutant un solvant à base d'alcool. Ce composé fut utilisé par la suite pour la fabrication de films photographiques et cinématographiques. C'est à la même époque que l'on mit au point l'élaboration de matières plastiques à base de résines. L'Américain Leo Hendrik Baekeland fut le premier à préparer une forme de Bakélite, en 1909, à partir de dérivés phénoliques et de formol. D'autres matières plastiques apparurent au même moment, comme la rayonne, fabriquée à partir de la cellulose.

En 1922, le chimiste allemand Hermann Staudinger introduisit la notion de macromolécule, molécule comportant de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'atomes. Cette notion

permit de poser les bases de l'étude des polymères, composants essentiels des matières plastiques et des élastomères. Grâce à cette hypothèse, on put assister au développement d'une nouvelle génération de matières plastiques, y compris de produits totalement synthétiques. Au cours des années 1920 et 1930, un grand nombre de nouveaux produits firent ainsi leur apparition : l'acétate de cellulose, utilisé dans le moulage des résines et dans les fibres ; le chlorure de polyvinyle (PVC), bon isolateur électrique, utilisé dans la fabrication de tuyaux, les revêtements vinyliques et l'isolation des fils électriques ; les résines urée-formol, utilisées dans la vaisselle et les installations électriques ; la résine acrylique, employée comme liant pour le verre feuilleté ; le polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas), qui possède d'excellentes propriétés optiques, employé dans les lunettes, les lentilles photographiques, les éclairages publicitaires ; les résines de polystyrène (PS), commercialisées vers 1937, caractérisées par une grande résistance aux agressions chimiques et mécaniques à basse température, utilisées dans les équipements de réfrigération et les avions de haute altitude ; le polytétrafluoroéthylène (Teflon), apparu en 1938, qui offre une grande résistance à la corrosion et à la chaleur ; le polyamide (Nylon), synthétisé dans les années 1930, qui fut le premier plastique technique à haute performance. Ces recherches sur de nouvelles matières plastiques se poursuivirent au cours de la Seconde Guerre mondiale. Le Nylon devint rapidement la base de nombreux textiles, tandis que les polyesters servirent à fabriquer des blindages et d'autres matériels de guerre [11].

1.4.1.3. Composition

Les matières plastiques sont composées en générale par trois composants qui sont [12] :

- Résine de base (polymères).
- Adjuvants.
- Additifs.

MATIÈRE PLASTIQUE = *résine de base (Polymère) + adjuvants + additifs*

A- Résine de base (Polymère)

Les résines de base qui formées les matières plastiques sont le polymère, qui est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs et qui sont des molécules de faible masse atomique constituées généralement d'atomes de

carbone) et préparées à partir de molécules appelées monomère (Exemple C_2H_4 Fig.1.2). Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs.

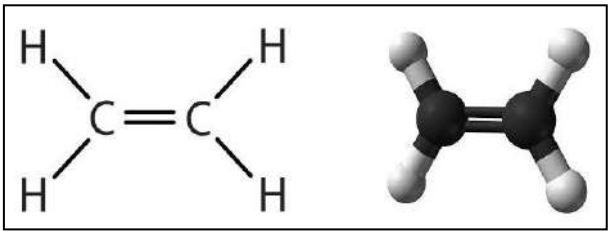


Fig.1.2. Structure des monomères [12]

La Procédé de transformation d'un monomère en un polymère (polymérisation) ou d'un mélange de deux (ou plus) monomères en un copolymère (copolymérisation) est appelé polymérisation (Fig.1.3 et Fig.1.4).

La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison [12]. Il n'y a pas que des doubles liaisons qui forment des polymères :

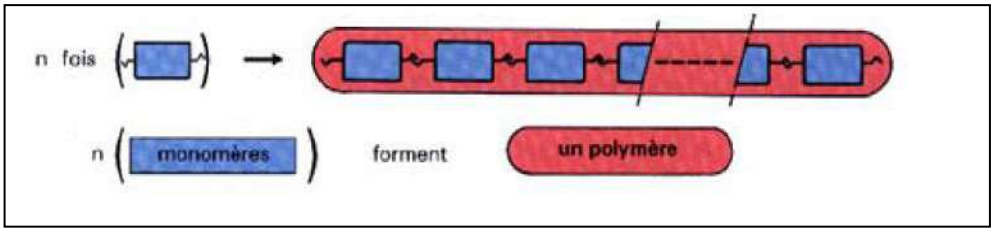


Fig.1.3. La polymérisation de monomère à un polymère [12]

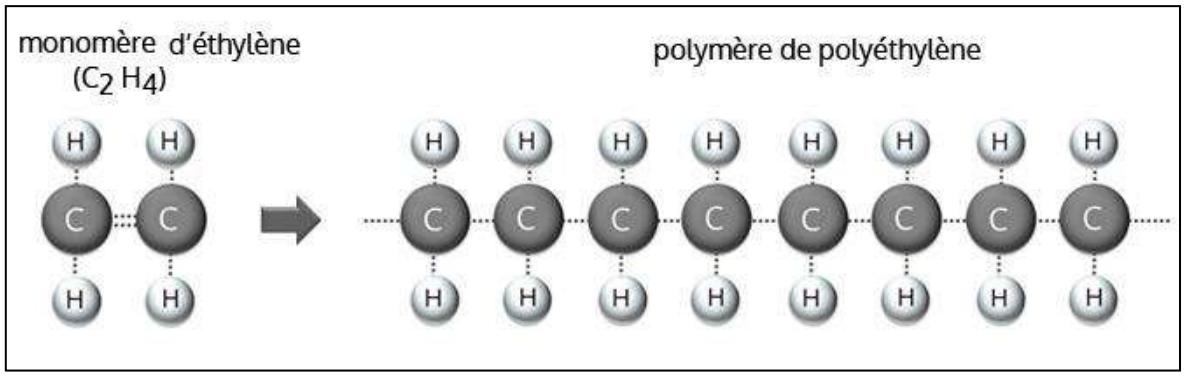


Fig.1.4. La polymérisation d'un Ethylène [12]

La soudure des groupes moléculaires du monomère peut donner naissance à trois types principaux de macromolécules :

- Polymères linéaires.
- Polymères ramifiés.
- Polymères réticulées

- **Polymères linéaires**

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin (Fig.1.5). Exemples : Le polyéthylène (PE), l'alcool polyvinylique et le chlorure de polyvinyle (PVC)

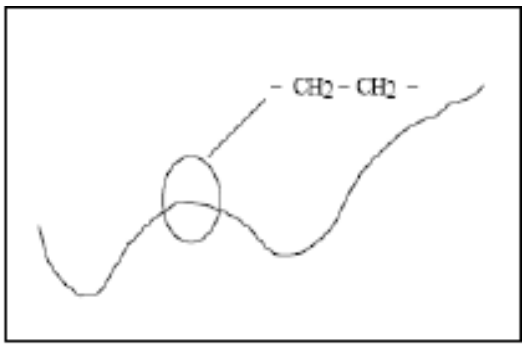


Fig.1.5. Polymères linéaires [12]

- **Polymères ramifiés**

Un polymère linéaire qui, dans certains cas, présente des « accidents » de polymérisation conduisant à des branchements, est qualifié de ramifié (Fig.1.6).

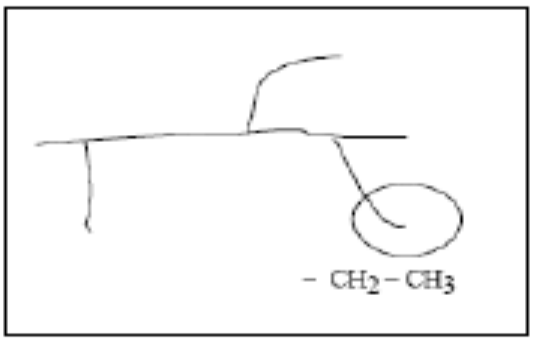


Fig.1.6. Chaines ramifiés [12]

- **Polymères réticulés (tridimensionnels)**

Certaines molécules peuvent se lier entre elles, elles se nomment alors réticulées. Il s'agit d'un pontage entre les chaînes. Le plus souvent, ces liaisons sont tridimensionnelles, c'est-à-

dire qu'elles se développent dans les trois directions de l'espace, donnant une structure en volume (parfois bidimensionnelles, ne se développant que dans un plan) (Fig.1.7).

Il arrive que la totalité de la masse, une pièce entière par exemple, ne forme qu'une seule macromolécule [12].

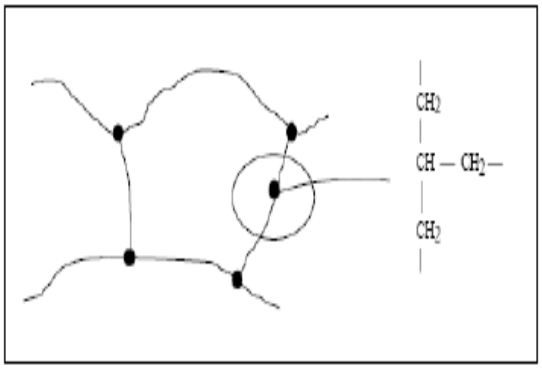


Fig.1.7. Polymères réticulés [12]

B. Adjuvants

B.1 Anti-oxygène

Ils sont utilisés dans la plupart des polymères hydrocarbonés, en particulier PE, PP, caoutchoucs et copolymères divers. Ils sont utilisés en concentration généralement inférieure à 1 % (sauf le noir de carbone) et dans ces conditions, ne modifient pas sensiblement la couleur et les propriétés physiques des polymères. Leur but est de retarder l'oxydation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation.

B.2 Plastifiants

Ils diminuent la rigidité. Ils permettent la mise en forme à des températures inférieures à la température de décomposition de certains polymères linéaires.

B.3 Stabilisants

Ces produits permettent de réduire les phénomènes de vieillissement dus à la chaleur, les UV.

C. Les additifs aux résines

Ce sont en général des produits organiques qui, ajoutés aux polymères, modifient leurs propriétés chimiques et physiques :

C.1 Pigments et colorants

Selon que l'on désire colorer un produit opaque ou transparent, on utilise un pigment insoluble ou soluble.

C.2 Lubrifiants

Ils améliorent l'écoulement des polymères lors de leur mise en forme.

C.3 Ignifugeants

Ils améliorent la résistance au feu.

La figure 1.8 suivante résume toute la composition de la matière plastique :

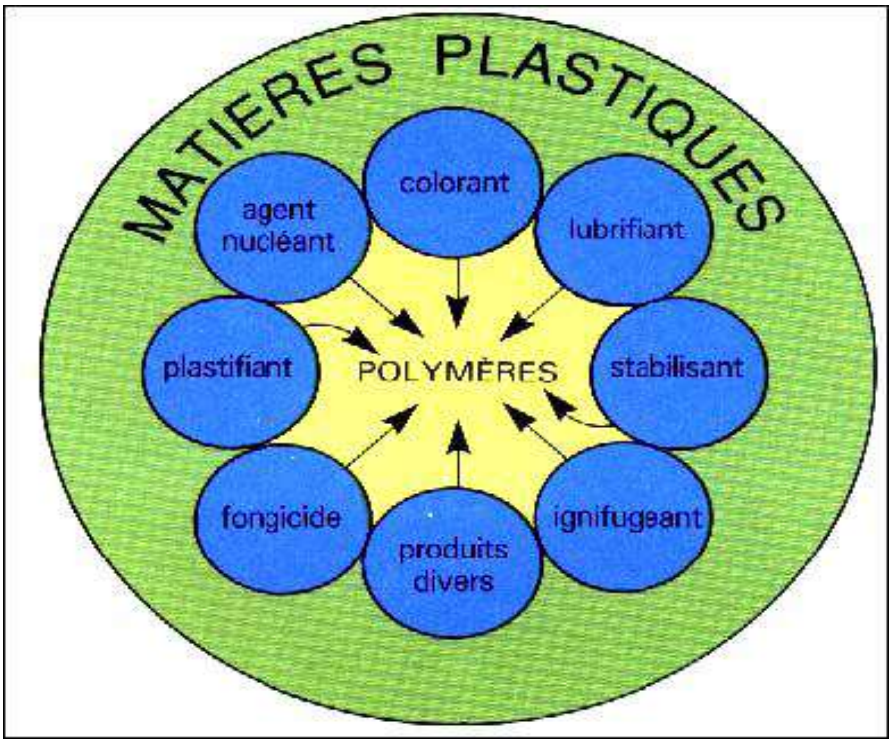


Fig.1.8. Différentes composition des matières plastiques [12]

1.4.1.4. Types de matière plastique

Il existe trois grandes familles de matières plastiques: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les caoutchoucs**.**

A. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent glisser les unes par rapport aux autres sous l'effet de la chaleur, ou de fortes contraintes [13]. Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et

durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.

Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes. Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable [12]. Il existe différents types dont 5 seulement sont particulièrement utilisés dans la fabrication des emballages :

A/ 1. Le polyéthylène (Haute et bas densité (PEHD et PEBD))

Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques. Plusieurs millions de tonnes de polyéthylène sont produites chaque année car c'est un matériau extrêmement polyvalent et important sur le plan économique et écologique. Grâce à sa structure chimique simple (Fig.1.9), le polyéthylène prime sur la plupart des autres matériaux car il peut être réutilisé. Au cours de ces dernières années, le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance : 50% du PE constituant les sacs poubelle sont recyclés. Le polyéthylène est translucide, inerte, facile à manier et résistant au froid. Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau. On distingue deux familles: le PEBD ou polyéthylène basse densité et le PEHD polyéthylène haute densité.

Le PEBD est utilisé dans les domaines les plus divers. Sa densité est inférieure à celle de l'eau (généralement de 0.915 à 0.935 g/cm^3). Il présente une bonne résistance chimique et une bonne résistance thermique jusqu'à 120°C, il est olfactivement, gustativement et chimiquement neutre pour les denrées alimentaires. Il est transparent, peut être facilement transformé et se prête très bien au soudage. Sa durée de vie est très longue à cause de sa grande stabilité mais il se recycle bien. Les principales applications du PEBD sont des

produits souples : sacs, films, sachets, sacs poubelle, récipients (bouteilles de ketchup, de shampoing, tubes de crème cosmétique) (Fig.1.10 et Fig.1.11).

Le PEHD est utilisé pour des objets plastiques rigides. Sa masse volumique est la plus importante de tous les polyéthylènes et varie entre 0.955 et 0.970 g/cm^3. On le trouve par exemple dans des bouteilles et des flacons, des bacs poubelles, des cagettes, des tuyaux, des fûts, des jouets, des ustensiles ménagers, des boîtes type « Tupperware », des jerricans [13].

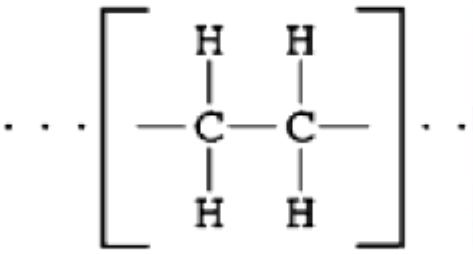


Fig.1.9. Composition chimique du Polyéthylène [13]



Fig.1.10. Les emballages en Polyéthylène [13]



Fig.1.11. Les citernes en (PEBD)

A /2. Le polyéthylène téréphtalate (PET)

C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants : le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol (Fig.1.12). Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes. Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles (Fig.1.13). L'inventeur des bouteilles en PET, Nathaniel Wyeth voulait faire une bouteille incassable. Cependant, ce plastique devient mou à moyenne température et présente une bonne résistance thermique jusqu'à 260 °C. Cette propriété empêche de consigner les bouteilles en PET car il faut les laver à une température trop haute. Pour cette même raison, on ne peut pas l'utiliser pour les confitures qui sont coulées chaudes dans les pots [13].

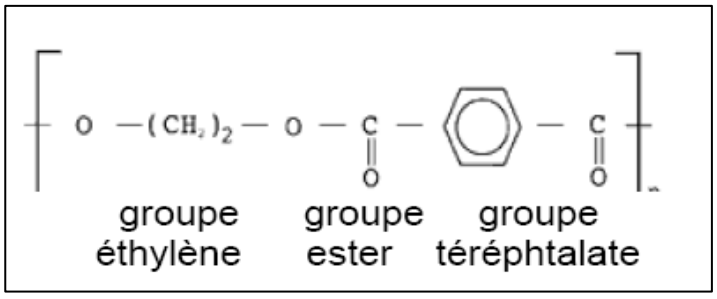


Fig.1.12. Composition chimique du PET [13]



Fig.1.13. Bouteilles en PET [13]

A/ 3.Le polychlorure de vinyle (PVC)

Il est obtenu par la polymérisation des monomères de chlorure de vinyle $CH{=}CH{-}Cl_2$. Ce polymère de formule $-(CH-CH-Cl)-2n$ est issu d'une réaction chimique entre de l'éthylène et de l'acide chlorhydrique, en présence d'oxygène, Il peut être soit rigide soit souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. Le PVC rigide qui a un aspect lisse et dur est utilisé pour les tuyaux de canalisation (Fig.1.14).

Le PVC souple qui recouvre certaines pièces comme les manches de pinces a un aspect brillant. C'est après le PE, le plastique le plus utilisé au monde. Il est largement employé dans l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil [13].



Fig.1.14. Les tuyaux en PVC [13]

A/ 4- Le polypropylène (PP)

C'est aussi un polymère très polyvalent qui sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre. Il est très facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. On le trouve beaucoup sous forme de pièces moulées dans les équipements automobiles (pare-chocs tableaux de bord, habillage de l'habitacle) et dans le mobilier de jardin. Ce matériau sert à fabriquer des boîtes à aliments qui polypropylène résistent au lave-vaisselle parce qu'il ne fond pas en dessous de 160°C (Fig.1.15). Le polypropylène est aussi utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (tapis, moquettes, cordes, ficelles (Fig.1.16)) mais aussi pour les emballages alimentaires en raison de son aspect brillant et de sa résistance (flacons, films, pots). Cependant, le PP film est un des plastiques usuels les plus difficiles à recycler surtout s'il est imprimé. Le contrôle de la polymérisation par catalyse permet de jouer sur la structure enfin de produire du polypropylène élastomère [13].

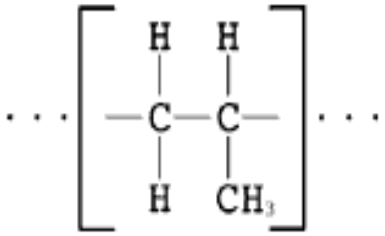


Fig.1.15. Composition chimique du PP [13]



Fig. 1.16. Les cordes en PP [13]

A /5. Le polystyrène (PS)

Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel courant largement diffusé, offrant de très nombreux usages. Sa composition chimique est représentée sur la figure 1.17. La figure 1.18 présente l'aspect usuel de polystyrène. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion. On l'utilise pour fabriquer du mobilier, des emballages, des grilles de ventilation, des jouets, des verres plastiques… On distingue trois types de polystyrènes :

- le polystyrène "cristal" n'a pas une structure cristalline mais porte ce nom en raison de son aspect transparent.

- le polystyrène "choc" ou HIPS (high-impact polystyrène) ou acrylonitrile butadiène styrène est un copolymère formé par du styrène et du polybutadiène. C'est le plus commun de la famille des plastiques styréniques car il est résistant, capable de supporter des impacts plus forts que le polystyrène normal. Cet ABS est employé par l'industrie pour des produits rigides, légers et moulés (bacs à douche). Le polybutadiène a été un des premiers élastomères synthétiques à être inventé car il est très similaire au caoutchouc naturel.

- Le matériau le plus connu de la gamme est le polystyrène expansé (PSE.) Ce polystyrène est solide à 20°C, pâteux à 120°C et fondant à 160°C. C'est sorte de mousse blanche compacte inflammable et combustible. Enfin, on les expansé et on les moule à la vapeur dans la forme voulue. C'est un matériau qui sert à emballer les appareils sensibles aux chocs et qui est un très bon isolant thermique pour les plaques de doublage des murs [13].

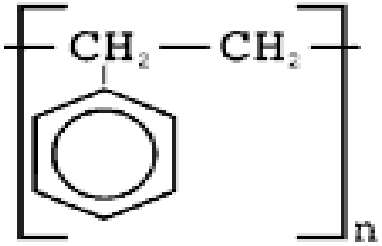


Fig.1.17. Composition chimique du PS [13]

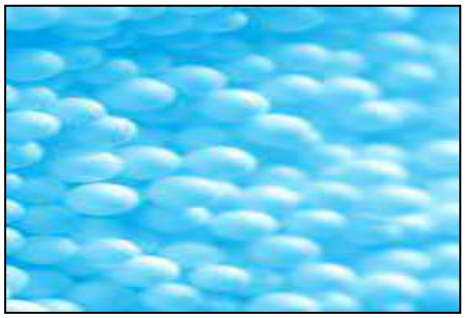


Fig.1.18. Les billets du PS [13]

A /6. Le polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est un matériau qui présente d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance thermique jusqu'à 120°C. On l'utilise pour la fabrication des casques de moto ou des boucliers de police. Comme il est très transparent, il sert aussi à la fabrication des CD et des DVD, des vitrages des guichets à l'épreuve des balles et des phares, feux arrière et clignotants de voitures. Enfin, sa neutralité physiologique permet son utilisation dans le domaine médical pour la fabrication de matériel et de prothèses. Par contre, il résiste mal aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets [13].

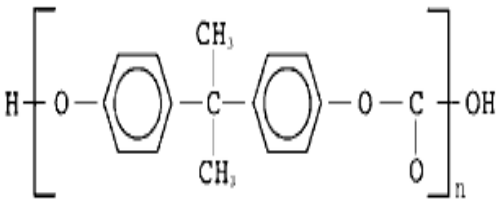


Fig.1.19 Composition chimique du PS [13]

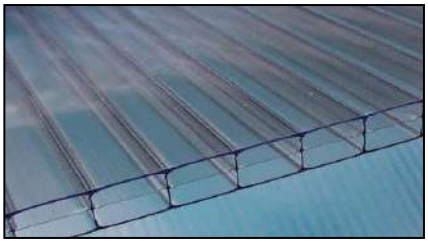


Fig.1.20 Application du PS [13]

A/7. Les polyacétals ou polyoxyméthylène (POM)

Les polyacétals ont des propriétés qui les rendent irremplaçables pour des pièces à fortes exigences mécaniques comme les engrenages et les poulies (Fig.1.21). Ils sont solides, présentent les qualités de métaux tels que l'acier, l'aluminium ou le zinc. Ils résistent à la plupart des agents chimiques et ont un faible coefficient de frottement. Par contre, ils ont une densité élevée et une assez faible résistance à la température. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces [13].



Fig.1.21. Application du POM [13]

A/8. Les polyamides (PA)

C'est la première matière plastique à avoir été découverte en 1938. Selon la longueur des chaînes, on obtient différents types de PA que l'on distingue par des chiffres : par exemple le PA 6.6 est le nylon. Ce sont des polymères qui offrent un bon compromis entre des qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Les polyamides sont utilisés pour réaliser des pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, des tapis et des maquettes, de la robinetterie, de la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages) (Fig.1.22).
L'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles ce qui limite leur usage pour certaines pièces mécaniques [13].



Fig.1.22. Application du PA [13]

B. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation) [13]. Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa

forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes. Les thermodurcissables représentent 20% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit environ 10 millions de tonnes. Les plus connus sont les polyuréthannes, les polyesters, les phénoplastes, les aminoplastes, les élastomères, les résines époxydes et phénoliques .Au départ, les thermodurcissables se présentent sous forme de poudres ou de résines qui subissent une transformation chimique au cours de leur chauffage, de leur refroidissement ou par l'action de durcisseurs [13].

B/1 Les polyuréthanes (PUR)

Ce sont des matériaux dont les caractéristiques sont très variées avec une grande diversité de textures et de duretés. Les polyuréthanes sont les polymères les plus utilisés pour faire les mousses. Ils sont formés par l'association d'un isocyanate (composé organique comprenant la séquence : -N=C=O) et par un alcool (composé organique dont l'un des carbones est lié à un ou plusieurs groupements hydroxyle -OH) (Fig.1.23). En fonction des associations chimiques réalisées avec différents monomères on peut obtenir des colles, des élastomères, des fibres (Licra), des mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, des polyuréthanes solides et compacts que l'on peut renforcer par la fibre de verre. On les utilise pour fabriquer des matelas, des sièges de voiture, des tableaux de bord, des roues de patins à roulettes ou des chaussures de ski [13].

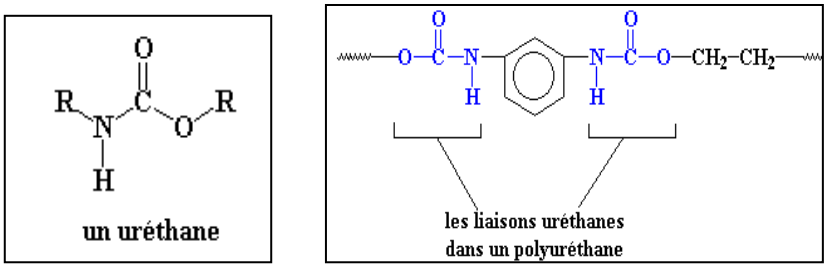


Fig.1.23. Composition chimiques du polyuréthane [13]

B/2 Les polyesters insaturés

Les polyesters insaturés sont obtenus par réaction de condensation entre différents polyacides et des glycols (éthylène glycol, propylène glycol). Ces produits appelés époxydes sont des substances chimiques comportant un oxygène ponté sur une liaison carbone-carbone.

Le polyester sert surtout à fabriquer des fibres textiles artificielles, les tissus produits sont brevetés sous les noms de Dacron, de Tergal ou de Térylène. La fibre polyester est la plus produite dans le monde car son utilisation très répandue dans l'habillement [13]. Ses applications se sont aussi diversifiées dans l'industrie, notamment sous forme de films

destinés à l'agriculture, aux travaux publics, aux coques et cabines de bateaux, aux carrosseries d'automobiles, aux piscines (Fig.1.24).

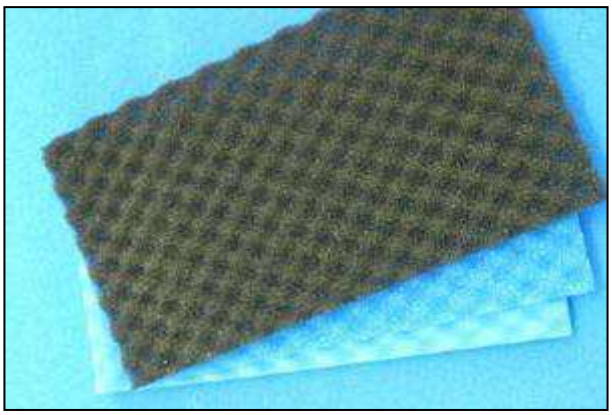


Fig1.24. Les polyesters insaturés [13]

B/3 Les phénoplastes (PF)

Dans ce groupe, une des plus anciennes matières plastiques connue est la Bakélite. Ce matériau providentiel a eu d'innombrables applications dans les domaines scientifiques et dans la réalisation d'objets: téléphones, postes de radio.

Ces résines thermodurcissables résistent très bien aux produits chimiques et à la chaleur. Elles sont également électriquement isolantes. On peut les transformer par moulage et par compression pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement [13].

B/4 Les aminoplastes (MF)

Ces produits résineux sont essentiellement utilisés en stratification sur des textiles plastifiés, les panneaux de bois agglomérés pour le mobilier de cuisine et les plans de travail [13].

C. Les Caoutchoucs (élastomère)

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques. Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue

d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou des pneus. On peut distinguer deux types de caoutchouc : caoutchouc naturel et caoutchouc synthétique (Fig.1.25 - 1.27).



Fig.1.25. Chaussures fabriqués en élastomère [13]



Fig.1.26. Les pneus en caoutchouc synthétique [13]



Fig.1.27. Caoutchouc naturel [13]

1.4.1.5. Matière plastiques en chiffres

La demande en matières plastiques vierges est d'environ 47 millions de tonnes en Europe et 4,5 millions de tonnes en France. Parmi les plastiques, les six types les plus couramment utilisés (PE, PP, PVC, PUR, PET, PS) représentent 80% de la demande totale en Europe. Les principaux secteurs utilisateurs des plastiques sont les suivants : emballages (40%), BTP (20%), Automobile (8%) et Equipements Electriques et Electroniques (5%) [14]. La figure 1.28, donne une idée sur la Demande européenne de plastiques vierges par type de résine en 2012 [14].

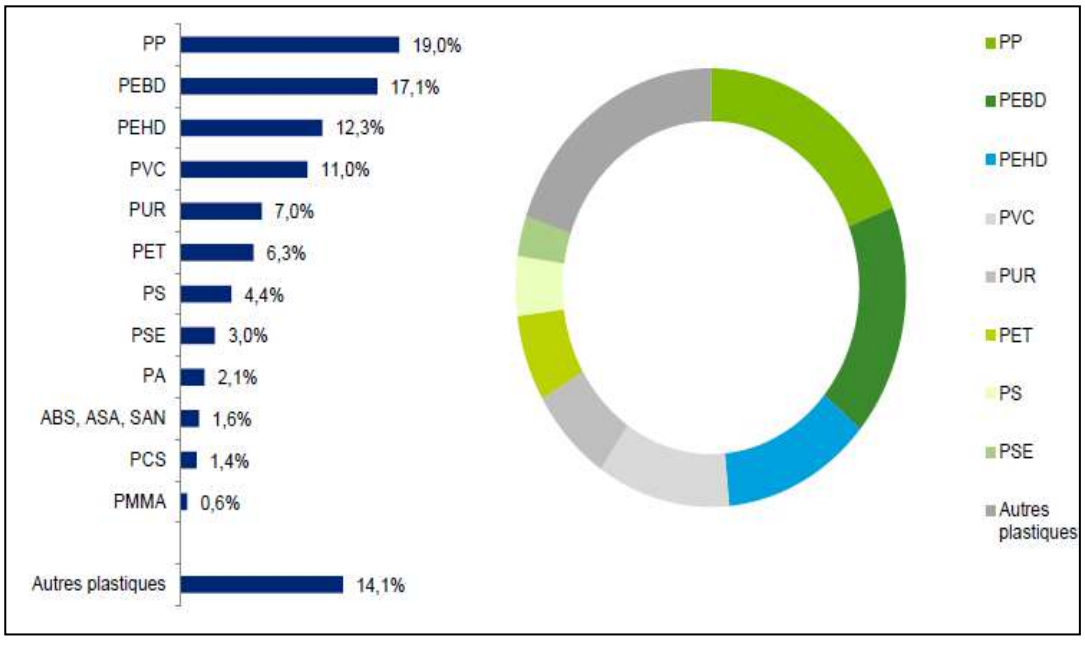


Fig. 1.28. Demande européenne de plastiques vierges par type de résine en 2012[14]

- En 2010, la demande de matières plastiques en France a été de 4,7 Mt [14].
- Par rapport à 2009, la demande a progressé de 5,6% en 2010 (-10,1% entre 2008 et 2009)[14].
- En France, comme en Europe, 5 types de résine couvrent environ les ¾ de la demande (PE, PP, PVC, PS et PET) (Fig.1.29).

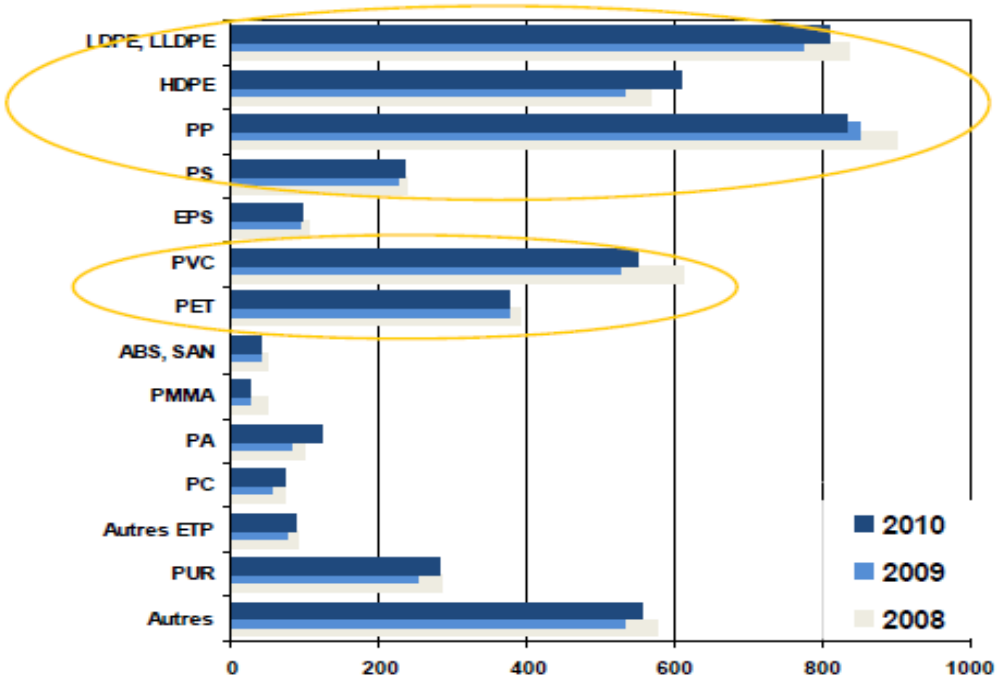


Fig.1.29. La demande en matières plastiques par type de résine (kt) [14]

1.4.1.6. Processus de fabrication des matières plastiques

La matière première généralement utilisée est le **Pétrole** duquel sont extraites des molécules d'hydrocarbure. Elles sont ensuite unies entre elles pour former des molécules de masse plus importante : c'est les **Polymères.** 4% du pétrole est utilisé pour fabriquer des matières plastiques [14]. En sus de la résine, les additifs et adjuvants sont là pour améliorer les propriétés chimiques et physiques du matériau, notamment la résistance aux chocs, la couleur, la plasticité, la résistance au vieillissement, etc.

Le schéma 1.30 suivant illustre l'importance et la structure sommaire de la filière des matières plastiques:

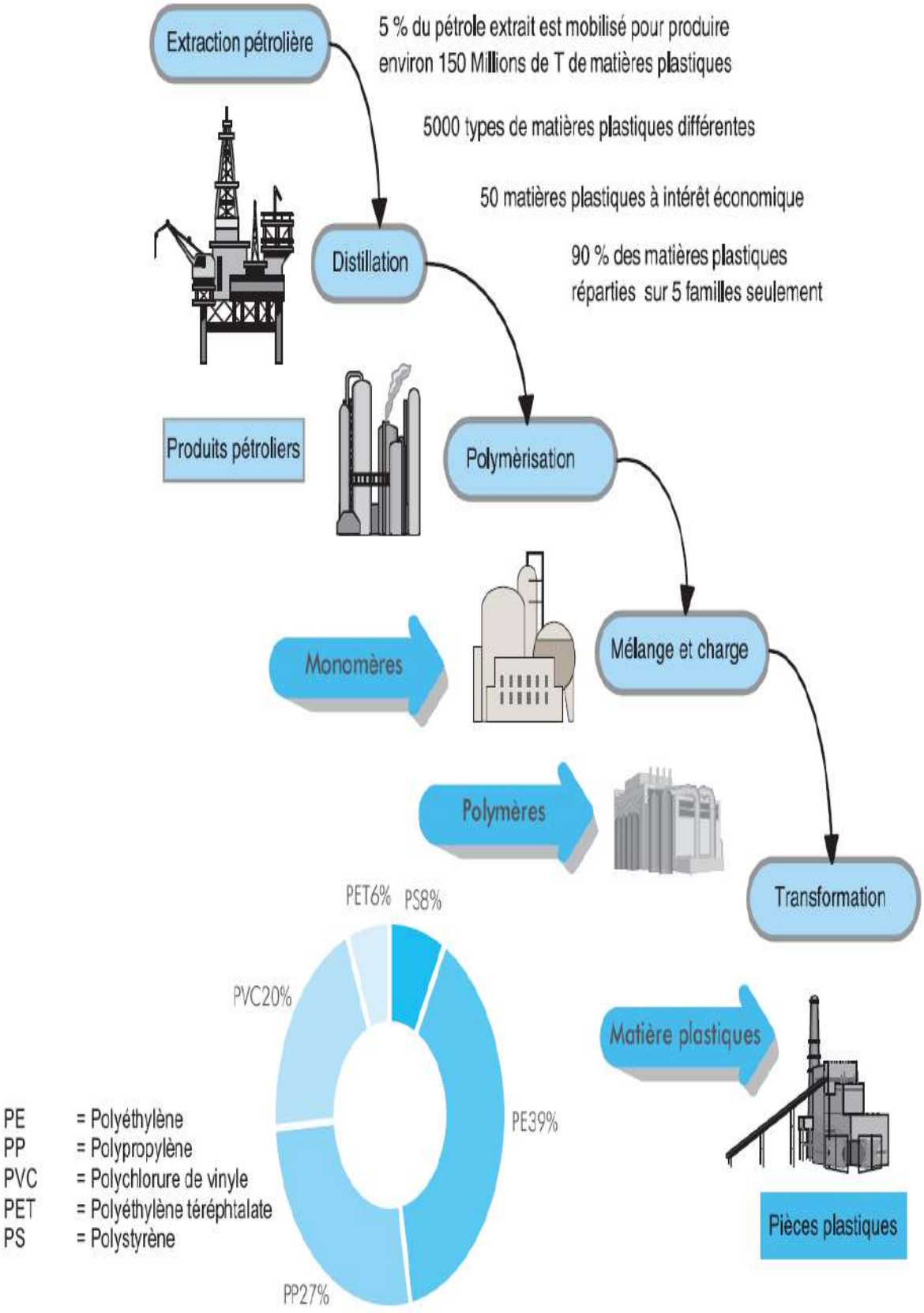


Fig.1.30. Le cycle de production des matières plastiques [15]

A. Du pétrole au monomère

Le pétrole est préalablement chauffé dans un four à environ 400°C [15]. A cette température, la plupart des fractions constituant le pétrole sont sous forme de gaz. Lorsqu'elles pénètrent dans la colonne, elles s'élèvent à l'intérieur en se refroidissant au fur et à mesure de leur ascension. Chacune des fractions obtenues lors de la distillation fractionnée ne peut être utilisée directement car il ne s'agit pas de produits purs. Ce sont encore des mélanges qu'il faudra traiter pour obtenir les hydrocarbures utilisés dans différents secteurs (gas-oil, essence, produits de base de la pétrochimie).

En particulier, l'une des coupes obtenue est le naphta qui va être à la base de plusieurs polymères. Nous allons examiner le traitement réalisé sur cette coupe naphta qui est le plus souvent le vapocraquage. En sortie du raffinage, le naphta va donc subir plusieurs transformations jusqu'à l'obtention de monomères (Fig.1.31).

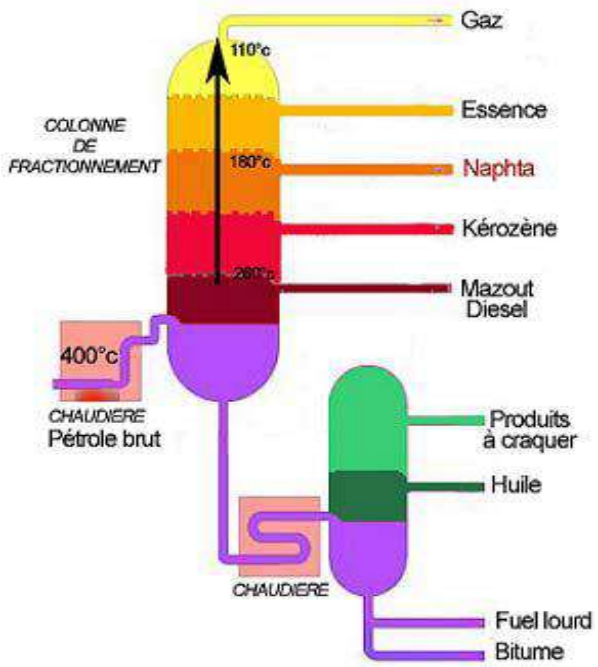


Fig.1.31. La transformation du pétrole vers Monomère [13]

B. Du monomère au polymère

A partir de petites molécules appelées monomères**,** on obtient de grosses molécules appelées polymères ou macromolécules, par assemblage de ces monomères sous forme de chaînes.

L'opération qui permet de passer du monomère au polymère est la polymérisation (Fig.1.32). Cette opération peut être considérée comme l'assemblage de particules de monomères pour former une chaîne qui constituera le polymère : Cette opération n'est possible que grâce à la structure particulière des monomères et sous certaines conditions: Pression - Température – catalyseurs.

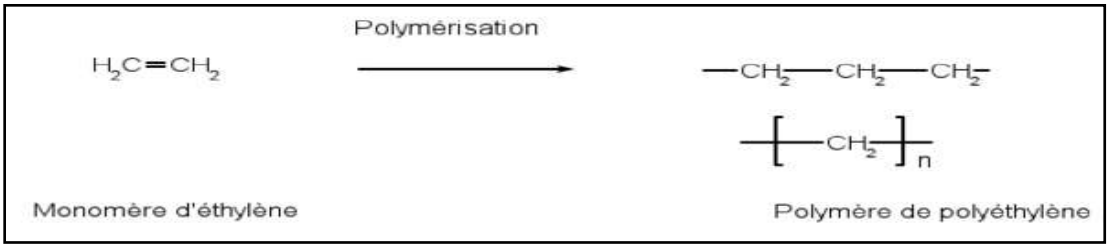


Fig.1.32. La polymérisation [13]

C. Du polymère à la matière plastique

De manière à améliorer les propriétés physiques, mécaniques, thermiques, les propriétés chimiques et la mise en œuvre, on introduit des additifs dans les polymères.

D. Les transformations des plastiques

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Quelques méthodes sont régulièrement utilisées pour la fabrication des pièces et des objets en polymère. Les principaux procédés de fabrication industrielle sont : l'injection, l'injection soufflage, l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, l'expansion moulage, le calandrage, le rotomoulage.

D.1. L'injection

La matière plastique sous forme de granulés, est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube chauffé (Fig.1.33). Elle y est comprimée, malaxée et chauffée. Ce traitement mécanique et thermique fournit une pâte fondante et homogène sans bulle qui est poussée par la vis en rotation vers un orifice. La matière expulsée sous pression par la vis d'injection à travers ce trou vient remplir un moule fermé et refroidi. Au contact des parois froides, elle prend la forme du moule et se solidifie. Le moule s'ouvre ensuite pour faire sortir la pièce. Pour changer la forme de la pièce, il suffit de changer de moule.

Ce procédé permet une transformation en discontinu des thermoplastiques. On obtient après démoulage des produits finis ou semi-finis de formes complexes en une seule opération. C'est une méthode de production très rapide pour produire des objets en très grande quantité. La

technique de fabrication est fréquente pour fabriquer des objets moulés de qualité, parfois de forme compliquée dans le domaine de l'automobile, du jouet ou de l'électronique [13].

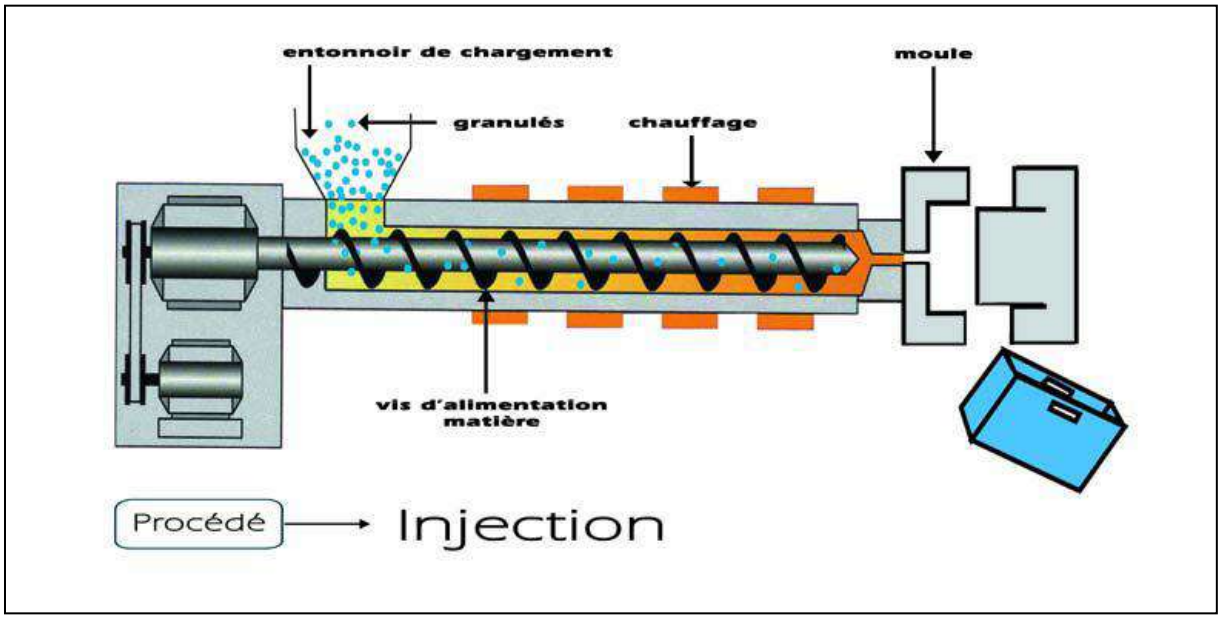


Fig.1.33. Procédé d'injection des matières plastiques [13]

L'injection –soufflage est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons (Fig.1.34). On utilise des pièces semi-finies obtenues par injection. Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé. Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule. Enfin, un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille. Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule [13].

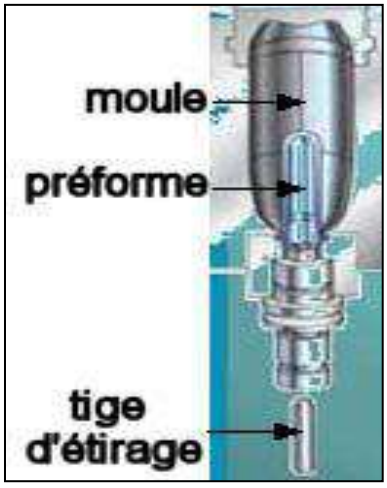


Fig.1.34. Procédé d'injection –soufflage [13]

D.2. l'extrusion

L'extrusion est un procédé de transformation en continu (Fig.1.35). Comme pour l'injection, le granulé entre dans un tube chauffé muni d'une vis sans fin. La matière molle homogénéisée est poussée, comprimée, puis passe à travers une filière pour être mise à la forme souhaitée. C'est une sorte de « machine à chichis » qui permet obtenir des produits semi-finis de formes diverses. On fabrique avec cette technique de transformation des produits de grande longueur comme des profilés pour les portes et les fenêtres, des canalisations, des câbles, des fibres optiques, des grillages, des plaques et des feuilles plastique… Le tube ou le profilé sort en continu, il est refroidi pour être ensuite coupé à la longueur voulue. En additionnant plusieurs couches de matière on peut réaliser des produits ayant des propriétés combinées [13].

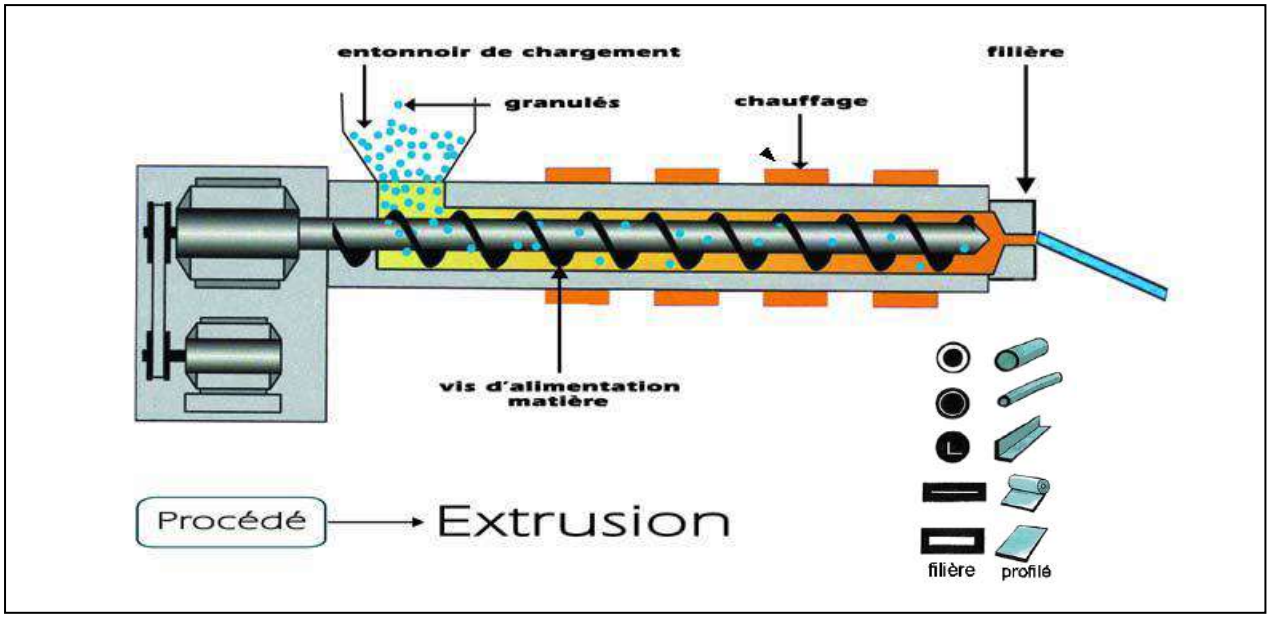


Fig.1.35. Procédé d'extrusion des matières plastiques [13]

L'extrusion soufflage permet de fabriquer des corps creux (Fig.1.36). Cela commence par l'extrusion d'un tube plein appelé la paraison. Ce tube de plastique encore chaud sortant de la filière est coupé et un moule froid en deux parties se referme autour de lui. Ensuite, de l'air est injecté dans la matière par une canne de soufflage et le polymère vient se plaquer sur les parois intérieures du moule qui est rapidement refroidit. Le procédé se termine par le démoulage, le décarottage et l'élimination des déchets de moulage de la pièce [13].

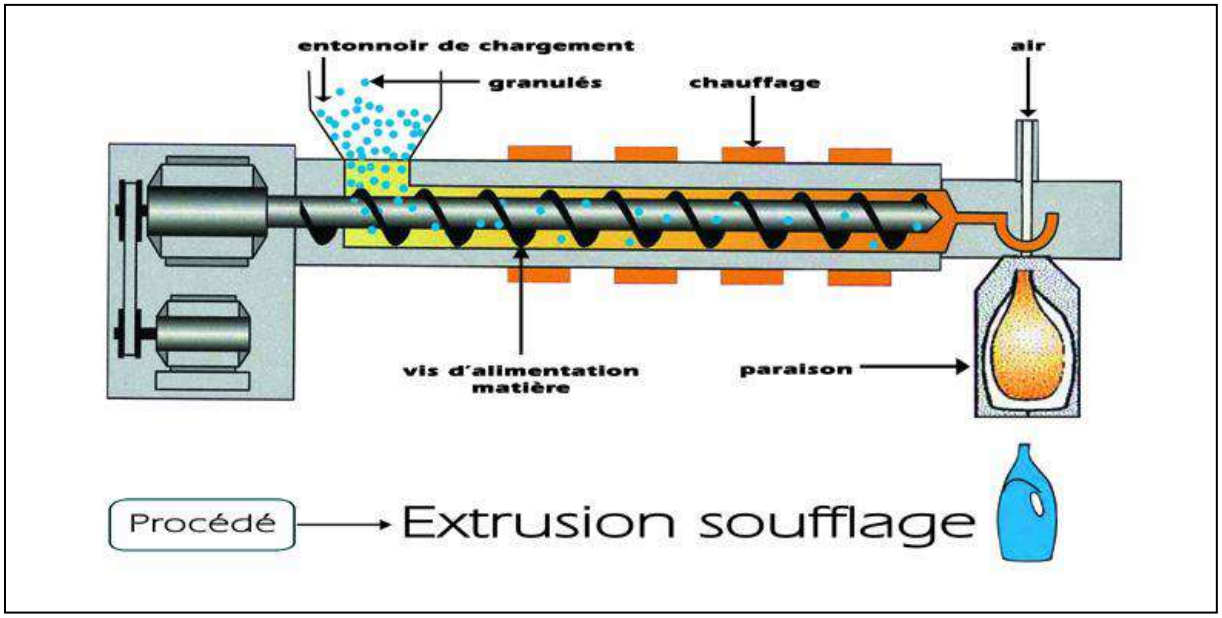


Fig.1.36. Procédé d'extrusion-soufflage des matières plastiques [13]

L'extrusion gonflage : C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques (Fig.1.37). Ce procédé consiste en sortie de l'extrudeuse à dilater avec de l'air comprimé une gaine polymère précédemment formée. La sortie de l'extrudeuse est verticale, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement, des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines. On fabrique ainsi des films utilisés dans la fabrication d'emballages, de sacs-poubelles, de sacs de congélation, des poches médicales pour perfusion et des feuilles souples et fines de revêtements pour serres horticoles [13].

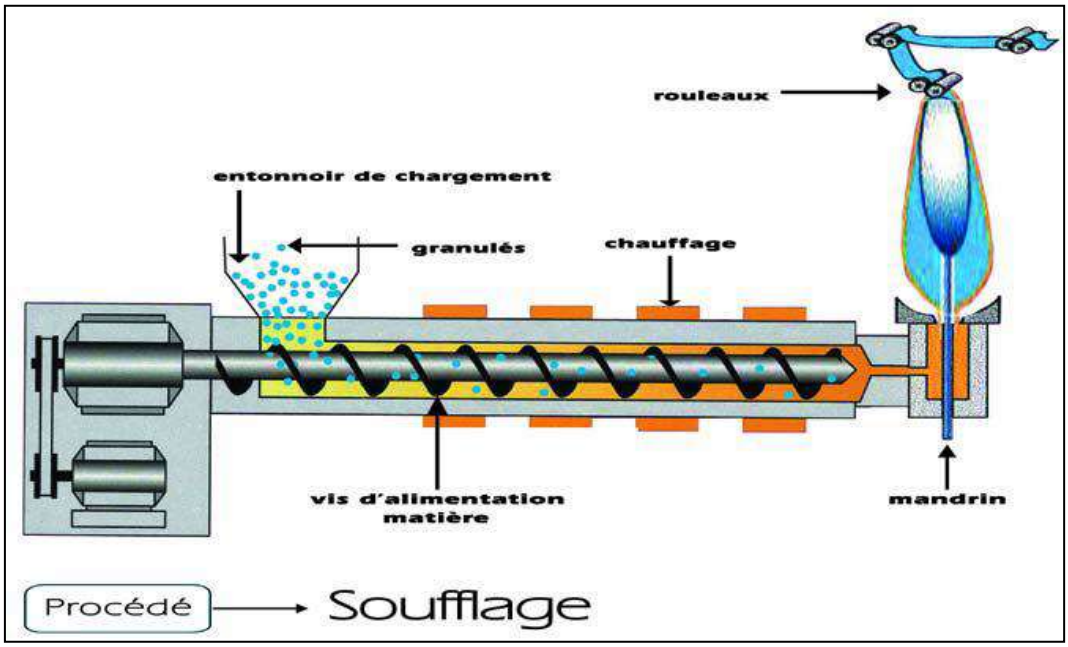


Fig.1.37. Procédé de soufflage des matières plastiques [14]

D.3. Le formage ou le thermoformage

C'est un procédé de seconde transformation dans lequel la matière arrive sous forme de plaques, de tubes ou de profilés. Le matériau est ramolli par chauffage avant d'être déformé et mis en forme par un moule métallique. La parfaite adhésion du polymère sur le moule se fait par aspiration sous vide ou par plaquage par injection d'air. Il est possible de réaliser des pièces dont les parois sont fines et des pièces de grande taille. Les plaques de polystyrène ou d'ABS sont particulièrement adaptées à ce type de transformation (Fig.1.38). Cette technique est utilisée pour produire des objets aux formes géométriques simples comme des pots de yaourts, des cabines de douche, des baignoires, des éléments de carrosserie [13].

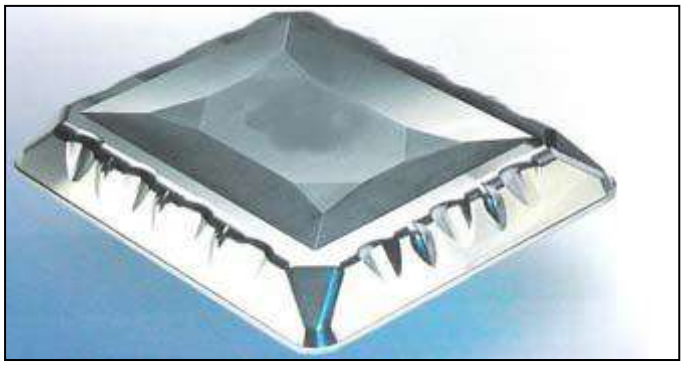


Fig.1.38. Les plaques plastiques [13]

D.4. Le moulage et l'expansion moulage.

Le polystyrène est un polymère qui se présente avant transformation sous forme de petites billes non expansées. Elles renferment des micro-inclusions à l'état liquide qui se transforment en gaz lors de l'expansion. Dans une chaudière, en présence de vapeur d'eau, la matière se ramollit et le gaz qu'elle contient se dilate. Les petites billes gonflent, comme du pop-corn, en gardant une forme sphérique régulière. Cette première expansion est réalisée dans de grandes cuves en inox et permet d'obtenir jusqu'à 30 fois le volume initial du polystyrène non expansé. Dans un deuxième temps, après séchage, les billes pré-expansées sont introduites dans un moule fermé et sont soumises à une nouvelle expansion grâce à l'injection de vapeur d'eau. Les billes augmentent de volume et collent les unes aux autres dans le volume intérieur du moule. Cette technique est utilisée pour fabriquer toutes sortes d'emballages en polystyrène expansé : emballages de protection pour appareils fragiles, caisses à poissons, barquettes alimentaires [13].

D.5. Le calandrage

Le calandrage est un procédé de laminage utilisé pour la production de feuilles et de films plastiques (Fig.1.39). La résine thermoplastique chauffée et fondue est placée entre des rouleaux chauffants qui opèrent comme les anciennes essoreuses. Les rouleaux sont de plusieurs tailles et tournent donc à des vitesses légèrement différentes pour transformer le plastique en feuilles ou en fine pellicule. Le film est ensuite refroidi puis enroulé sur de grosses bobines. Ce procédé est souvent utilisé pour transformer le PVC en produits plats de grande largeur comme des nappes, des revêtements d'ameublement ou de maroquinerie car on peut donner par exemple une texture sur des matériaux synthétiques qui imitent le cuir [13].

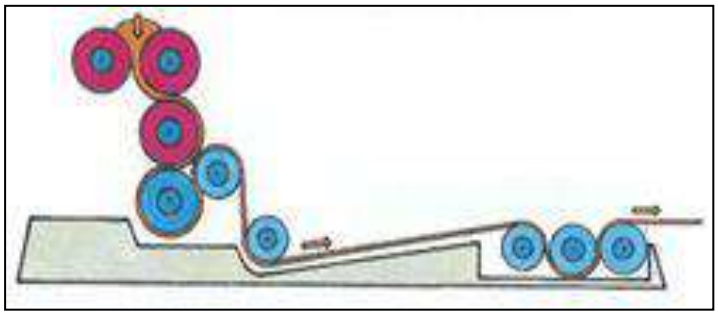


Fig.1.39. Le calandrage [13]

D.6. Le rotomoulage :

Une fine poudre thermoplastique est enfermée dans un moule chauffant et fermé qui tourne sur lui-même. Le matériau se répartit uniformément sur les parois du moule par centrifugation. Cette technique permet de produire des objets creux comme des kayaks, des planches à voiles, des cuves ou des containers [13].

1.4.1.7. Propriétés des matières plastiques

L'emploi des matières plastiques comme matériaux de construction est relativement récent. Leurs propriétés sont très différentes de celles des matériaux traditionnels comme le béton et les métaux. Il est donc nécessaire que les projeteurs et les utilisateurs comprennent leurs caractéristiques afin d'assurer leur performance adéquate dans des nouvelles applications. Le présent digest traite de leurs propriétés générales et de leur comportement mécanique [11].

- ***Masse spécifique***

La masse spécifique de la plupart des plastiques est bien plus faible que celle des métaux, ce qui est très utile lorsqu'on veut obtenir une diminution du poids car certains plastiques sont, à poids égal, plus résistants que les métaux. Cependant, à volume égal, c'est habituellement le

contraire qui se produit. La masse spécifique des polymères et des plastiques se situe normalement entre 0.83 et 2.50 g/cm³. Pour les plastiques alvéolaires elle peut descendre jusqu'à 0.01 g/cm³ et pour les plastiques contenant des charges, elle peut atteindre 3.50 g/cm³.

- ***Propriétés thermiques et électriques***

En tant que matériaux organiques, les polymères et les plastiques ont, à quelques exceptions près, une stabilité thermique bien plus faible que celle des métaux, surtout au contact de l'oxygène. Le tétrafluoréthylène, qui fait exception parmi les polymères communs, possède une stabilité thermique très élevée, car il n'a que des liaisons C-C et C-F, toutes les deux sont très stables. Lorsqu'ils sont chauffés à des températures de plus en plus élevées, les matériaux thermoplastiques passent lentement de l'état solide plus ou moins rigide à l'état de liquide très visqueux. Même si sous l'effet de la chaleur les matériaux thermodurcissables ne perdent pas leur rigidité de façon appréciable, un chauffage trop intense ou prolongé provoque un durcissement excessif, une contraction, une carbonisation ou une désintégration. Les coefficients de dilatation thermique des plastiques (de 4 à 20 x 10-5/°C; de 2 à 11 x 10-5/°F) sont beaucoup plus élevés que ceux des métaux ordinaires (de 1.0 à 2.5 x 10-5/°C; de 0.6 à 1.4 x 10-5/°F). En général, les polymères et les plastiques dérivés sont de bons isolants électriques; certains excellents même, comme le polytétrafluoréthylène [11].

- ***Résistance au feu***

Les plastiques se comportent différemment sous l'action du feu: certains s'enflamment, d'autres brûlent rapidement ou lentement, et d'autres sont auto-extinguibles. La nature des polymères et des substances comme les charges, les matériaux de renforcement, les plastifiants ou les adjuvants ignifugeants, déterminent le degré d'inflammabilité.

Les polymères halogénés, tel que le PVC ou le PVC chloruré, sont naturellement ignifuges; lors qu'ils sont chauffés, ils libèrent des gaz halogènes qui interrompent la réaction d'oxydation en chaîne par radicaux libres. Cependant, si l'on ajoute des plastifiants, le PVC devient inflammable. La résistance au feu des plastiques peut être améliorée par l'adjonction d'adjuvants appropriés ou par l'emploi de polymères naturellement ignifugeants [11].

- ***Apparence***

Plusieurs polymères sont naturellement transparents, d'autres translucides, quelques-uns opaques. Il en est de même pour les plastiques dérivés, qui selon la nature des constituants, offrent tout un éventail de propriétés optiques. Les polymères amorphes rigides exempts de

charges et autres impuretés sont isotropes à la lumière visible; leur forte transparence se rapproche de celle du verre, surtout lorsqu'ils sont fabriqués de façon à éviter l'orientation des molécules et l'écoulement. Le poly (méthacrylate de méthyle) est un exemple typique d'un tel polymère.

Les mélanges de plastiques résistant au choc, et les plastiques à base de polymères cristallins sont habituellement formés à partir de phases solides de densités différentes: ils ont ainsi une apparence allant du translucide à opaque. Par exemple, dans le cas de certains produits en polyéthylène épais, la matière cristalline a une densité bien plus forte (environ 1.01) que les parties amorphes (de 0.84 à 0.85), ce qui rend le produit opaque. L'adjonction en quantité appropriée de certains pigments ou de certaines charges peut aussi rendre translucides ou opaques les polymères et les plastiques [11].

- **Comportement mécanique**

Les matériaux polymères sont utiles principalement en raison de leurs propriétés mécaniques. Par rapport aux métaux, les polymères et les plastiques ont un faible module d'élasticité et leur rapport résistance/poids est plus élevé. Les objets et structures en plastique ont des degrés de résistance au choc très variables, allant de très fragile à très tenace.

Le comportement des polymères à la déformation diffère de celui des métaux de construction en ce qu'il n'est pas seulement fonction de l'ordre de grandeur de la contrainte, mais également de la durée d'application. Le fluage des polymères et des plastiques peut être important, même à la température ambiante, alors que pour les métaux, il ne l'est jamais au-dessous de 500°C. De plus, la température et le mode d'application de la contrainte affectent beaucoup plus les propriétés mécaniques des polymères et des plastiques que celles des métaux. Ces propriétés peuvent aussi être influencées par le procédé de fabrication, un traitement ultérieur et l'âge du produit fini.

Les polymères n'obéissent pas à la loi de Hooke, mais ont un comportement dit viscoélastique. Le préfixe "visco" veut dire que le matériau possède certaines des caractéristiques des liquides visqueux, ce qui implique une dépendance du facteur temps. Suivant ce comportement, les polymères amorphes peuvent avoir 3 types de réaction à la déformation par contraintes non destructives (relativement faibles), selon la durée de l'application de celles-ci: élasticité instantanée (ou de Hooke), élasticité retardée ou différée (haute élasticité) et écoulement visqueux [11].

- ***Élasticité instantanée***:

Le matériau se comporte comme un solide élastique à la suite d'applications rapides de la contrainte; c'est pourquoi le rapport contrainte; déformation est constant et indépendant du temps. Au niveau moléculaire, l'élasticité instantanée peut s'expliquer par une légère déformation des liaisons de valence par étirement ou distorsion ou par des changements de distance entre chaînes voisines. Ceci se produit à des températures inférieures à celles du point de transition vitreuse (Tv), températures auxquelles la chaîne de polymères est fixée dans une de ses nombreuses conformations possibles [11].

- ***Élasticité retardée***

Lorsque l'application des forces se fait plus lentement, le rapport contrainte - déformation est fonction du temps. La déformation peut devenir considérable, mais si on supprime la force, elle disparaît. Le comportement élastique retardé correspond à des changements de la conformation des molécules et se produit au voisinage ou au-dessus du point de transition vitreuse (Tv). Au-dessus de Tv, le polymère est caoutchouteux. Normalement, les molécules se répartissent au hasard, en forme d'hélice ou zigzag par rotation libre autour des liaisons simples de la chaîne principale. Si une contrainte est exercée, les molécules ont tendance à se dérouler ou à se déplier et en l'absence de cristallisation, le polymère peut s'étirer jusqu'à ce que les molécules adoptent une conformation complètement allongée. Avec certains polymères caoutchouteux soumis à un effort de traction, il peut se produire des allongements de 1200%. Si la contrainte cesse d'être exercée, les molécules reprennent leur forme d'hélice ou de zigzag. L'allongement et la recouvrance de la déformation ne sont pas instantanés [11].

- ***Écoulement visqueux***

Si le taux d'application des forces est très lent, la déformation peut être permanente, dénotant ainsi que le matériau s'est déformé en partie comme un liquide visqueux plutôt qu'un solide. L'écoulement visqueux provient du déplacement lent de chaînes entières de polymères par rapport aux chaînes voisines. Les polymères réticulés ne subissent pas l'écoulement visqueux, en raison des liaisons chimiques entre les chaînes.

Le comportement des polymères cristallins à la déformation est beaucoup plus complexe que celui des polymères amorphes. La plupart des polymères cristallins renferment des parties amorphes qui ont un comportement visco-élastique (Fig.1.40). La mobilité moléculaire du polymère cristallin disparaît bien au-dessous de Tv. Le matériau adoptera alors le

comportement d'un solide élastique dur. Au-dessus du point de fusion (Tf), le polymère n'est plus cristallin et se comporte comme un liquide visco-élastique amorphe. Entre Tv et Tf et un peu au-dessous de Tv, c'est-à-dire à la température d'utilisation des matériaux, le comportement sous l'effet d'une contrainte est complexe [11].

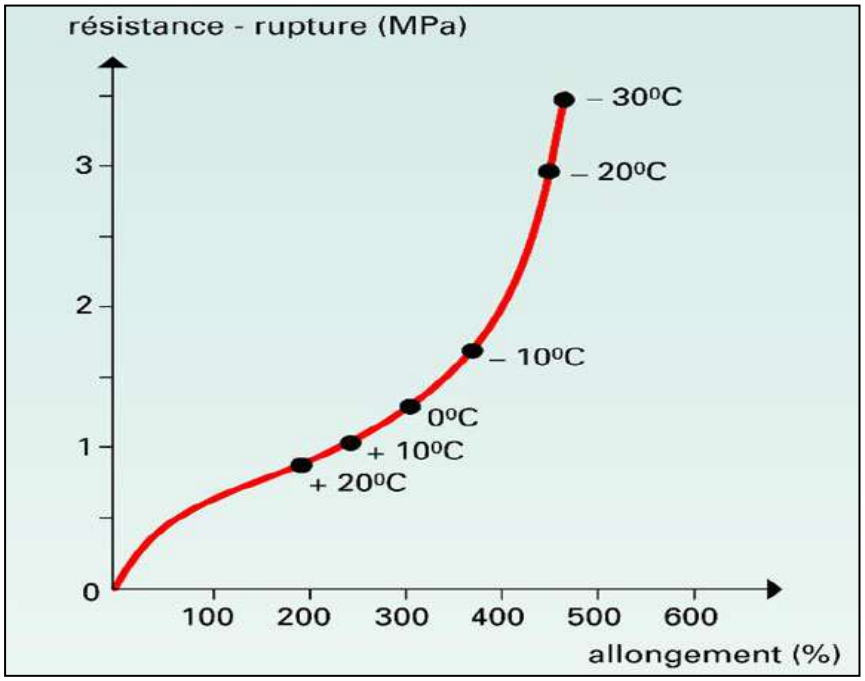


Fig.1.40. Courbe générale traction-allongement des matériaux polymères [11]

❖ ***Propriétés mécaniques aux limites***

Dans des applications techniques, la déformation est un facteur bien plus important pour les plastiques que pour les autres matériaux. Le projeteur doit donc bien connaître le comportement mécanique des matériaux polymères pour ne pas dépasser les contraintes maximales permises afin d'éviter des ruptures. Comme pour la plupart des matériaux, une simple courbe traction-allongement constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique de tel plastique ou de tel polymère. Cette courbe est habituellement établie à partir des mesures successives des forces exercées sur l'éprouvette, lorsqu'on soumet celle-ci à une traction à vitesse constante d'allongement jusqu'à la rupture. Les différents domaines de la courbe (Fig. 1.41) représentent la relation contrainte-déformation (en traction) de n'importe quel plastique et permettent de déterminer plusieurs quantités utiles. La pente initiale de la courbe permet de déterminer une valeur du module de Young (module d'élasticité) qui est une mesure de rigidité. La courbe permet aussi de connaître la contrainte à la limite élastique du matériau, sa résistance et son degré d'allongement à la rupture. L'aire

située entre la courbe et l'axe de déformation (allongement) représente l'énergie à la rupture et donne une mesure de la ténacité du matériau polymère. La contrainte appliquée au coude de la courbe permet de mesurer la résistance du matériau et sa capacité de résister à la déformation permanente. La contrainte au point de rupture donne une mesure de la force nécessaire pour rompre le matériau, communément désignée charge de rupture [11].

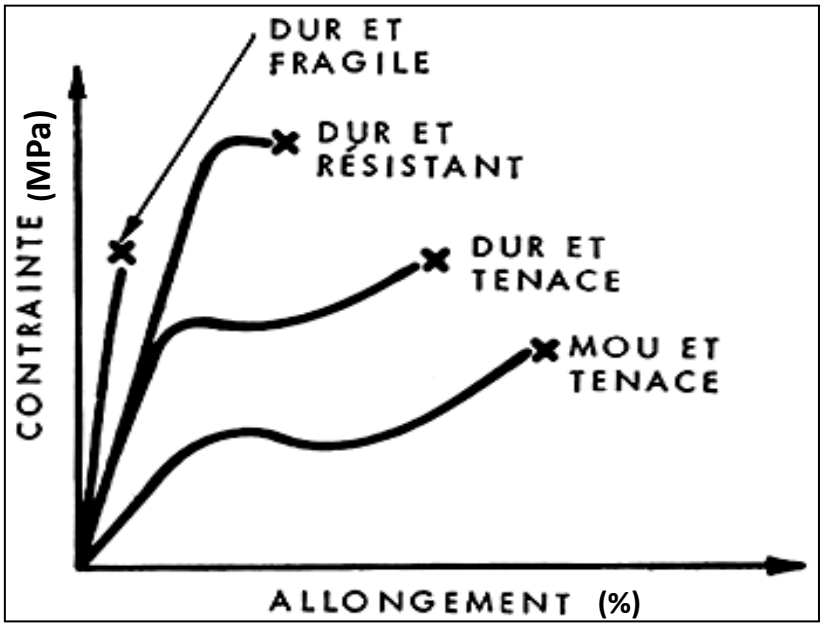


Fig.1.41. Courbes traction-allongement des matériaux polymériques [11]

La courbe d'un matériau dur et fragile tel qu'un polymère amorphe à une température bien inférieure à Tv présente habituellement une pente initiale qui indique un module d'élasticité très élevé, une résistance modérée, un faible allongement à la rupture et une aire minime en-dessous de la courbe contrainte - allongement (Fig. 1.42). Les valeurs caractéristiques du module d'élasticité et de la résistance à la traction sont 500,000 et 10,000 lb/po² respectivement, tandis que l'allongement typique est de 2%. En général, la déformation de ces matériaux est élastique jusqu'à la rupture, qui est une cassure fragile. Le polystyrène, le poly (méthacrylate de méthyle) et de nombreuses résines phénol-formol sont des exemples de matériaux polymères durs et fragiles à la température ambiante ou au-dessous.

Le module d'élasticité et la résistance des polymères durs et résistants sont élevés. Leur allongement à la rupture est de 5%. La forme de la courbe permet souvent d'affirmer que la rupture du matériau s'est produite à un endroit où on pouvait s'attendre à une limite d'écoulement plastique. Ce type de courbe caractérise certains composés rigides de poly (chlorure de vinyle) et des mélanges de polystyrènes. Certains polymères, comme l'acétate de cellulose, le nitrate de cellulose et les nylons, ont un comportement dur et tenace. Leur

contrainte à la limite élastique, module d'élasticité, résistance et leur allongement sont élevés. Sous l'effet d'un étirage, la plupart des polymères de ce groupe subissent un écoulement à froid qui produit une striction dans l'éprouvette. L'étirage à froid améliore la résistance et constitue donc un procédé très important de la technologie des fibres synthétiques.

Les polymères mous et tenaces ont un faible module d'élasticité, des contraintes à la limite élastique peu élevées, une résistance à la rupture modérée et un allongement pouvant aller de 20 à 1000%. Les courbes contrainte - déformation de ce type caractérisent le PVC plastifié et les caoutchoucs (élastomères) [11]. Le tableau 1.2 résume le comportement (contrainte - déformation) des différents groupes de polymères.

Tableau. 1.2. Caractéristiques du comportement (Contrainte - Déformation) des matériaux polymères [11]

Caractéristiques des matériaux polymères	**Type de matériaux polymères**			
	Dur et fragile	Dur et résistant	Dur et tenace	Mou et tenace
	PS, PMMA, Phénoliques	PVC rigide, Mélanges de PS	PE, PTFE	PVC plastifié, Caoutchoucs
Module d'élasticité	Élevé	Élevé	Élevé	Faible
Contrainte à la limite élastique	Nulle	Élevée	Élevée	Faible
Résistance à la rupture	Modeste	Élevée	Élevée	Modeste
Allongement à la rupture	Faible	Modeste	Élevé	Élevé

PS = polystyrène

PMMA = poly (méthacrylate de méthyle)

PVC = poly(chlorure de vinyle)

PE = polyéthylène

PTFE = polytétrafluoréthylène

- ***Résistance au choc***

La résistance au choc donne une mesure de la ténacité ou de la capacité du matériau de résister à la rupture sous l'effet d'un impact à grande vitesse. Dans des conditions normales d'utilisation, les polymères peuvent être soit fragiles soit tenaces. Par exemple, le polystyrène, le poly (méthacrylate de méthyle) ainsi que le PVC non modifié et non plastifié sont habituellement fragiles; ils se cassent brusquement. Les PVC plastifiés sont considérés

comme des matériaux tenaces. Selon la température d'utilisation et l'intensité du choc (c'est-à-dire le taux de déformation), un matériau polymère aura un comportement fragile ou tenace. La résistance au choc des polymères et des plastiques correspondants dépend de l'écart entre leur température de transition vitreuse (Tv) et la température d'utilisation ainsi que de leur taux de cristallinité. Bien au-dessous du Tv, les polymères amorphes sont cassants, mais ils deviennent plus tenaces lorsque la température s'approche du Tv. Au-dessus du Tv, les polymères amorphes deviennent caoutchouteux, et on ne peut plus parler de choc [11].

- ***Résistance aux agents chimiques et aux intempéries***

La résistance aux agents chimiques des matériaux polymères dépend de la nature du polymère ainsi que des autres constituants du prémix (ou "compound"). Les acides fortement oxydants peuvent s'attaquer aux plastiques et les décolorer ou les rendre fragiles. Les liquides organiques attaquent la plupart des polymères et des plastiques. Par exemple, les fuel-oils, les huiles et divers solvants organiques peuvent attaquer les plastiques et occasionner leur gonflement, leur amollissement ou les dissoudre. La température et la composition des plastiques déterminent leur résistance à ces agents chimiques. La plupart des plastiques peuvent être utilisés comme matériaux de protection contre la corrosion. Cependant, en raison de leur résistance variable en fonction du milieu, il convient de bien choisir le plastique qui résiste le mieux à la corrosion dans les conditions particulières. La résistance des polymères aux intempéries, surtout à l'action du soleil varie considérablement. Par exemple, certains polymères et les plastiques correspondants ont fait preuve d'une très grande résistance aux intempéries, contrairement à d'autres dont la résistance s'est révélée très faible. Cependant, la plupart des "compounds" plastiques commerciaux peuvent être formulés de façon à offrir une bonne résistance aux intempéries [11].

- ***La densité***

Les plastiques ont tous une densité différente ce qui permet aussi de les identifier partiellement.

Pour pouvoir faire l'expérience, découpez des fragments d'emballage dans des parties pleines (les poches d'air fausseraient la densité) et disposez-les dans un verre transparent rempli d'eau. Les plastiques qui flottent sont le PP et le PE car ils ont une densité inférieure à 1. Le PS expansé flotte également grâce aux nombreuses bulles d'air qui y sont incluses.

Lorsqu'on ajoute du sel à l'eau, on remarque que les autres bouts de plastique s'élèvent progressivement : dans l'ordre on a le polystyrène (non expansé), le PVC et le PET [11].

1.4.1.8. Les avantages et les inconvénients des matières plastiques

a/ Les avantages

- ✓ ***La liberté des formes***

La mise en œuvre des métaux passe par l'emboutissage, alors que la mise en œuvre des plastiques passe par le moulage. Il est facile de comprendre que la seconde technique autorise des formes infiniment plus complexes. Le fait que des stylistes trouvent une nouvelle liberté de créer, est déjà un résultat appréciable. Mais lors du choix d'un profil de voiture, ce peut être un avantage déterminant dans la recherche du meilleur Cx qui entraînera lui même une économie de consommation en carburant [11].

- ✓ ***Des prototypes peu coûteux***

Certains plastiques ont acquis depuis longtemps la réputation de matériaux peu coûteux dans les petites séries et les prototypes. C'est même une place que les plus sceptiques à leur égard leur ont toujours reconnue.

- ✓ ***Une large gamme d'utilisation***

La multiplicité des matières mises en œuvre conduit à l'obtention de matériaux fort différents en aspect, caractéristiques et usage final. C'est ce qui explique qu'on les retrouve en carrosserie mais aussi pour les pièces sous capot, l'aménagement intérieur et les pièces de structure.

- ✓ ***La protection contre la corrosion***

Les plastiques ne rouillent pas, c'est bien connu ! Leur grande inertie chimique les rend précieux à plus d'un titre : en effet l'environnement est agressif, certaines voitures sont soumises 24/24 h aux attaques climatiques, à la pollution atmosphérique, à l'emploi du sel sur les routes enneigées [11].

Cette qualité se révèle pourtant un problème lorsque les plastiques sont abandonnés dans la nature. Il leur faut alors plusieurs décennies pour se décomposer.

- ✓ ***La réduction du nombre de pièces***

Deux facteurs interviennent en ce domaine : d'une part, les méthodes de moulage qui autorisent l'obtention en une seule opération de formes compliquées ; d'autre part, la multifonctionnalité qui permet à une seule pièce en composite de jouer plusieurs rôles à la

fois. Dans ces conditions, le nombre de pièces à assembler est beaucoup plus faible qu'avec les matériaux traditionnels, ce qui entraîne une simplification au montage et au démontage. Par conséquent, ces gains de temps entraînent des économies [11].

- ✓ ***La lutte contre le bruit***

Le silence est un élément important du confort d'une voiture. Les matériaux plastiques ne sont pas source de ces vibrations qui, à certains régimes moteurs, viennent perturber l'ouïe du conducteur et des passagers. Au contraire ils atténuent ces bruits. De plus, moins d'assemblages sont autant d'occasions supprimées pour ces bruits divers auxquels on parvient peut-être à s'habituer, mais qui n'en sont pas moins désagréables. Ces bruits augmentent également la fatigue et le stress, ce qui au volant est pour le moins gênant [11].

- ✓ ***La duré de vie***

La durée de vie des plastiques est différente d'un produit à un autre par exemple. La durée de vie des sacs en plastique est de 450 ans, les Bouteille en plastique entre 100 à 1 000 ans et les Polystyrène expansé 1 000 ans (Fig. 1.42) [11].

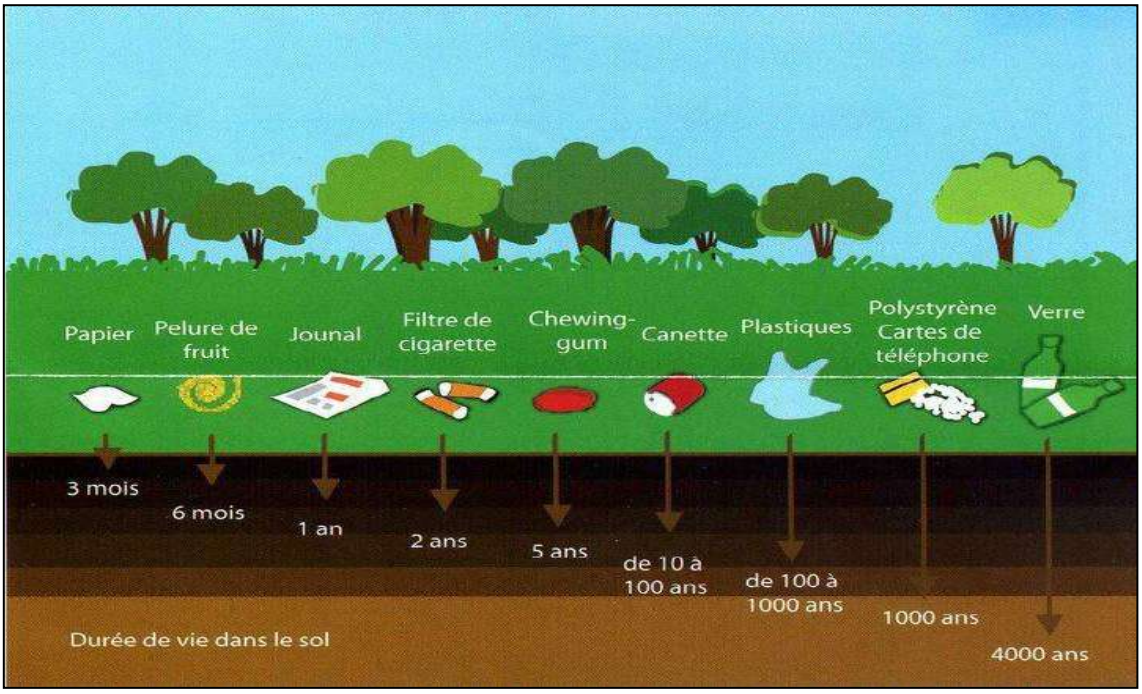


Fig.1.42. La durée de vie des déchets plastiques dans le sol [16].

- ✓ ***Des coûts compétitifs***

Les coûts des matières plastiques sont devenus compétitifs sous l'influence de plusieurs facteurs [11] :

- le perfectionnement des matières et des procédés, allié à l'augmentation des séries a fait baisser le prix du produit fini ;
- la multifonctionnalité et le moulage de formes complexes entraînent de sérieuses économies d'assemblage ;
- le dérivé des prix est plus faible dans le cas des matières plastiques que dans celui des métaux. En prenant l'indice 100 pour le prix de 1970, on relève les indices suivants en 1979 : polyamides renforcées 180, tôle d'aluminium 235, tôle d'acier 305.

b/ Les inconvénients

Avant de faire le choix de telle ou telle matière plastique, il faut tout de même connaître certaines de leurs limites [11].

✓ **Principaux impacts sur l'environnement et/ou la santé**

Les impacts découlant de la production du plastique se situent essentiellement au niveau de l'importante consommation de ressources fossiles (pétrole et gaz naturel) nécessaires à la fabrication. La production d'un kilogramme de PET, par exemple, nécessite l'équivalent de 1,9 kg de pétrole brut. La pétrochimie est un secteur qui émet directement du dioxyde de carbone (CO_2), un gaz à effet de serre impliqué dans le changement climatique. Il ne faut pas oublier non plus que toutes les ressources pétrolières concentrées dans les plastiques produits et utilisés seront elles aussi transformées en émissions de CO_2 lors de l'élimination.
Pour certains plastiques, on utilise des additifs chimiques s'avérant parfois toxiques au stade de la production.
D'autres additifs deviennent nocifs lors de l'utilisation (les phtalates contenus dans des récipients en plastique peuvent migrer dans les aliments à leur contact, etc.) ou lors de l'élimination du plastique [11].

➢ ***Exemple du chlorure de polyvinyle (PVC)***

Le PVC dégage de nombreuses molécules nocives durant les diverses phases de son cycle de vie, à additifs : chlore, phtalates, plomb, cadmium, mercure. A coproduits : substances organochlorées, polychlorobiphényles (PCB). A éléments émis lors de la combustion : dioxines et furanes, PCB, composés organiques volatils (COV).
Lors de la production, les additifs et coproduits se répandent dans les eaux souterraines, les sols et l'air depuis les sites d'extraction des matières premières et les usines. Ces substances

se dégradent partiellement dans l'environnement, mais elles donnent naissance à d'autres sous-produits écotoxiques. Selon les conditions d'utilisation, les objets peuvent libérer des substances cancérogènes ou nocives pour l'être humain, comme le chlorure de vinyl, les phtalates ou d'autres additifs. Lorsqu'il est incinéré, le PVC peut libérer des furanes et des dioxines, hautement cancérogènes. Mis en décharge, il rejette des substances comme les PCB qui se retrouvent dans les eaux souterraines, les sols, etc. Certaines sont persistantes (ne se dégradent pas) et se bioaccumulent dans l'environnement le long des chaînes alimentaires, dans les tissus des êtres vivants [11].

- ✓ ***Toxicité des gaz de combustion***

Il est à noter que les produits de la combustion (opacité des fumées, corrosivité et toxicité) doivent faire l'objet de nombreux essais [11].

- ✓ ***Résistance à la chaleur***

Chaque matière est caractérisée par une plage de température d'utilisation. Mais on aura seulement une approximation qui devra être vérifiée sur pièces en utilisation réelle.

- ✓ ***Résistance aux produits chimiques***

Certains matériaux plastiques sont sensibles aux produits chimiques. Ils sont caractérisés par des échelons d'appréciation : Résistant - Résistance limitée - Non résistant.

- ✓ ***Electricité statique***

Les plastiques peuvent se charger en électricité statique. Il existe pourtant des additifs et des traitements susceptibles de réduire ces effets.

- ✓ ***Rayures***

Les plastiques présentent des résistances plus ou moins prononcées à l'abrasion. Un test permet de mesurer cette résistance.

- ✓ ***Vieillissement***

Il est influencé par de nombreux facteurs que l'on classe en deux catégories :

- les conditions de service : contraintes mécaniques, thermiques et chimiques,
- les conditions atmosphériques : oxygène, ozone, intempéries, rayons ultraviolets.

Tous ces facteurs n'agissent pas séparément mais se combinent pour entraîner la dégradation de la matière [11].

1.4.2. Déchets plastiques

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie, leur quantité et parce que se sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social.

La consommation des matières plastiques ne cessent d'augmenter dans le mondes y compris dans l'Algérie, et cela à cause de leur utilisation dans divers domaines : emballage, automobiles, construction…etc. Ces matières génèrent après utilisation un grand volume de déchets dans les décharges.

1.4.2.1 Origine des déchets plastiques

Les déchets plastiques se repartissent en 5 grandes familles [17] :

a) Déchets d'emballages

Ce domaine représente la plus grandes partie des déchets, la durée de vie de ces produits à l'utilisation est courte et varie de quelques jours à quelques mois. Les différentes résines utilisées dans le domaine d'emballage sont :

- Polyéthylène basse densité (PEBD) : Le PEBD est très utilisé pour la fabrication des produits souples tels que les sacs, sachets, sacs poubelles, bouteilles (ketchup, shampoing). Les principaux producteurs de ces emballages sont : Soummam Plast, Multiplast, All plast et EURL Plastimeral.
- Polyéthylène hautes densité (PEHD) : les différents emballages à base de PEHD sont produits par Akbou plastiques, Soummam plast, ENCG et Meriplast. Le PEHD est utilisé pour des objets plastiques rigides on le trouve par exemple sous forme de bouteilles (lait, yaourt), flacons (lessives, détergents, huiles) et des bacs poubelles.
- Polystyrène (PS) très utilisé pour l'emballage des pots de yaourt, les verres en plastiques, ce type d'emballage est produit par Soummam, Danone, Batelec et All plast.
- Polyéthylène téréphtalate (PET) : Ce polymère est tés utilisé pour l'emballage des boissons (eau minérale, jus, soda, huiles), les principaux producteurs sont : Toudja, Ifri, Cevital.

- Polypropylène : en raison de son aspect brillant et de sa résistance le PP est utilisé pour les emballages alimentaires tels que les films, barquettes de margarine et caisse pour fruit et légumes qui sont fabriqués par All plast et Betelec.

La figure 1.43 ci-dessous donne un aspect général sur les différents types d'emballage plastiques



Fig. 1.43. Différents types de déchets d'emballages en plastique [18]

b) Déchets automobiles

Les principaux polymères utilisés dans l'automobile sont : le polypropylène (PP) et les polyuréthanes (PU). Le polypropylène est utilisé pour fabriquer les pare-chocs, les tableaux de bord et habillage de l'habitacle.Comme le PP, le polyuréthane est très appliqué dans le

domaine automobile, il peut se trouvé sous plusieurs forme selon son utilisation (mousse souple, mousse rigide et mousse semi rigide). Le tableau suivant résume les différentes formes du PU et ses applications dans l'automobile.

Tableau. 1.3. Application de polyuréthane dans l'automobile [17]

Désignation	**Applications**
Mousse souple	-Matelassures de sièges-Insonorisant
Mousse semi-rigide	-Remplissage de planches de bord- Accoudoirs
Mousse rigide	-Tablettes arrière (sous tissus)-Panneaux de porte - Remplissage de corps creux

c) Déchets de l'industrie des chaussures et pneu usagé

Le marché de la chaussure dans le monde est un marché porteur. La consommation de chaussures par les ménages français par exemple atteignait 350 millions de paires, soit une moyenne de plus de 5 paires de chaussures par an et par habitant. L'Algérie importe annuellement une moyenne de 70 millions des paires de chaussures et ne produit qu'un million de paires. Ces produits ayant une durée de vie très variable, dépendant de leur utilisation, mais aussi en grande partie des effets de mode, représentent en fin de vie un gisement annuel de déchets potentiels énorme qui reste à ce jour un chiffre inconnu (Fig.1.44).



Fig.1.44. Déchets de semelles de chaussure usagée [19]

L'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année. On peut citer quelque cas : la France, en 2008, plus de 366.000 tonnes de pneumatiques ont été collectés ce qui constitue une progression de 36% par rapport à 2004; la Thaïlande, un pays asiatique, le bilan de la seule année 2000 indique une consommation d'environ 94.000 tonnes de pneus [19].

Ces chiffres continuent à augmenter chaque année avec le nombre de véhicules dans tous les pays [20].

L'expérience montre que l'incendie des pneumatiques devient rapidement non maîtrisable. Ainsi, les sites de stockage constituent un risque pour l'eau en surface, ainsi que pour l'eau souterraine. Ils représentent aussi un danger sanitaire car ils constituent un habitat privilégié des insectes.

En général, la moins chère et la plus simple des solutions pour décomposer les déchets ou les pneus usagés est de les brûler. Cependant, la pollution et la quantité énorme de fumée produites par cette méthode est inacceptable et, dans certains pays il est interdit par des lois de procéder ainsi.

En conséquence, la valorisation de pneus usagés est un sujet important pour la planète entière [21]. La figure 1.45 montre que le stockage est important, ce qui peut entraîner les risques associés (incendie, (Fig.1.46)). Malgré une valorisation énergétique, les stocks de pneus usagés et le risque qu'ils représentent restent élevés.



Fig.1.45. Stock de pneus usagés à Campsas, Tarn-et-Garonne en 2007 [19]

Fig.1.46.Incendie sur le site de stockage de pneus usagés, Stanislaus county, CA [22]

d) Déchets de constructions et bâtiments

Ce secteur est le second plus gros consommateur de plastique après le secteur d'emballage et conditionnement. Ces produits sont caractérisés par des durées de vie importantes (30 à 50 ans). Les plastiques les plus utilisés sont le polychlorure de vinyle, le polystyrène, le

polystyrène expansé, le polyéthylène et le polyuréthane. Ces produits sont essentiellement utilisés pour l'isolation des bâtiments, fabrication de revêtement de sols et de murs, fabrication de tuyaux et conduites.

e) Déchets de l'agriculture

Les matières plastiques occupent une place importante dans l'agriculture algérienne. Dans la région de Bejaia d'après le service agricole, environ 70 à 100 hectares en moyennes sont exploitées chaque année depuis 1990, ce qui correspond à environ 1750 à 2500 serres (année 2006). Le principal polymère utilisé dans la production des films agricoles est le PEBD. La majeure partie des films agricoles utilisée est produites par l'ENPC de Sétif et les unités de production de Jijel et Biskra [17].

1.4.2.2. Déchets plastiques en chiffres

Les matières plastiques sont des matériaux relativement nouveaux qui n'ont été introduits dans la production industrielle qu'en 1907[23]. Ils sont actuellement omniprésents dans les produits industriels et les biens de consommation, et la vie moderne est inimaginable sans eux. Dans le même temps, les caractéristiques qui rendent les matières plastiques si utiles, tels que leur durabilité, leur légèreté et leur faible coût, compliquent leur élimination [24].
280 millions de tonnes de plastique sont produits dans le monde en 2012, soit plus près de 8.880 kilos de plastique par seconde (compteur), consommant 8% environ de la production mondiale de pétrole. 25 millions de tonnes de déchets plastiques collectés en Europe chaque année dont seulement 25% sont recyclés [25].

La production des matières plastiques croît avec le PIB12 et s'accompagne d'une augmentation globale du volume de déchets plastiques de 5,7 Mt (23 %) entre 2008 et 2015. Cela est dû principalement à une hausse de 24 % dans le secteur de l'emballage, et s'inscrit dans un accroissement continu du volume de déchets plastiques en Europe. Sans une meilleure conception des produits et une meilleure gestion des déchets, les déchets plastiques ne feront qu'augmenter dans l'Union, au même rythme que la production [25].

1.4.2.3 Intérêt de la récupération des déchets plastiques

L'intérêt croissant porté à la récupération et à la valorisation des déchets plastiques est lié à leurs grandes quantités, à l'augmentation des couts d'énergie et des matières premières, et à la législation de plus en plus sévère régissant la protection de la nature et de l'environnement contre les pollutions[17].

Les plastiques jetés dans la nature ne sont pas biodégradables et peuvent présenter divers dangers pour l'environnement (Fig.1.47). Donc il est nécessaire de récupérer les déchets plastiques pour les recyclés afin de faire des économies d'énergie et de protéger l'environnement.

a) ***Intérêt économique***

La récupération et le traitement des déchets plastiques peuvent porter beaucoup d'intérêt sur le plan économiques, car cela permet :

- ✓ Préserver les ressources des matières premières (pétrole).
- ✓ Créations des entreprises de traitement et de recyclage
- ✓ Les usines de recyclage peuvent dans l'avenir, être créatrices d'emploi, si elles viennent à se multiplier en créant un nouveau secteur économique : transports, tris optique magnétique, manuel, stockages, conditionnements...). Aussi, la matière obtenue a un coût moins élevé que la matière première
- ✓ Récupération de l'énergie par l'incinération des déchets.

b) Intérêt écologique

Le besoin de protéger l'environnement a connu un grand intérêt ces dernières années, la limitation de la dissémination des plastiques dans la nature fait partie des problèmes à résoudre. En effet les polymères tels que les polyoléfines résistent bien à la biodégradation du fait de leur structure. Ils s'accumulent en tant que déchets lorsqu'ils sont abandonnés dans la nature et causent beaucoup de problèmes sur l'environnement et sur les organismes vivants (humains et animaux).

- ✓ Les déchets plastiques non récoltés se propagent dans la nature, sur les cotes…etc et dégradent l'aspect esthétique qui entraine des percussions sur l'économie touristiques. D'autre coté ces déchets créent l'encombrement des canaux, des égouts et des canalisations.
- ✓ Les déchets plastiques incinérés provoquent des fumées toxiques telles que les vapeurs d'HCl dégagées par l'incinération du PVC qui sont néfaste sur les poumons et les voies respiratoires de l'homme.
- ✓ Les sacs plastiques peuvent être avalés par les animaux en entiers ou sous forme de débris. Ils peuvent obstruer l'appareil digestif de l'animal. Les sacs plastiques peuvent

provoquer le mort par famine en limitant la circulation des aliments dans le tube digestif ou en entretenant une sensation de satiété par le fait que l'estomac reste plein d'un volume non dégradable.

- ✓ Les plastiques contiennent des stabilisants tel que le plomb ou cadmium dans les PVC, et des colorants ou divers additifs toxiques qui sont libérés dans l'eau (mer) par photo dégradation ou migrés au cours du temps, pénétrés dans les sols et entrainés par les eaux de ruissèlement. Par conséquent, ils peuvent causer des nuisances par leur toxicité vis-à-vis des organismes vivants.



Fig.1.47. Les différents aspects de la pollution due aux déchets plastiques [18]

1.4.2.4 Modes de traitement des déchets plastiques

La diversité des plastiques (on compte une centaine de familles de polymères, chacune déclinée en de nombreux grades de propriétés et représentant au total mille produits commerciaux) entraîne souvent des difficultés techniques dans les opérations de recyclage ou de régénération, on distingue trois mode de recyclage ou traitement des déchets plastiques :

a) Enfouissement contrôlé

Une grande part des ordures ménagères et les plastiques qu'elles contiennent est encore éliminée par l'enfouissement contrôlé qui est la forme la plus aisée de se débarrasser de ces résidus. Celui-ci a cependant, l'inconvénient d'être ni esthétique, ni valorisant.
On peut même parler d'un véritable gâchis de matière plastiques puisqu'une tonne de ces matériaux est énergétiquement équivalente à deux tonne de pétrole [26, 27].

b) Incinération sans récupération d'énergie

C'est encore pour le moment, la façon la plus efficace et la plus rapide pour faire disparaitre les résidus urbains dont le volume est croissante. Elle reste la méthode la plus utilisés pour les petites collectivités [26, 27].

c) Incinération avec récupération d'énergie ou valorisation énergétique

Les matériaux plastiques possèdent un très grand pouvoir calorifique. Le tableau 1.4 illustre le pouvoir calorifique d'un certain nombre de polymères, comparativement à celui des carburants communs [28].

Tableau.1.4. Pouvoir calorifique de certains polymères et des carburants communs [28]

L'article	**Valeurs calorifiques (Mj Kg^{-1})**
Polyéthylène	43,3-46,5
Polypropylène	46,50
Polystyrène	41,90
Kérosène	46,50
Gazole	45,20
Pétrole lourd	42,50
Mélanges de déchets plastiques ménagers	31,80

La valorisation énergétique se fait par l'incinération des déchets pour la production d'énergie sous forme de chaleur, vapeur et d'électricité [28]. En général, l'incinération des déchets plastiques permet une réduction de volume de 90 à 99% dans les décharges [29]. Les déchets sont tout d'abord déchiquetés, puis acheminés dans une zone de combustion de manière à assurer une alimentation continue et uniforme du foyer. On peut à tout moment régler la quantité d'air nécessaire pour assurer la combustion optimale des déchets solides et pour réaliser une postcombustion efficace au sein des effluents gazeux.
La combustion donne naissance d'une part à des gaz chauds dont on va chercher à récupérer l'énergie et d'autre part à des résidus de combustion qu'il faudra traiter pour les éliminer. On récupère de l'électricité et de la vapeur basse pression pour le chauffage [30].

e) Le recyclage chimique

Le recyclage chimique consiste à décomposer les macromolécules constitutives des polymères en matières premières réutilisables. Les matières plastiques sont dépolymérisées sous l'effet de la chaleur et/ou d'un composé chimique. Selon le procédé utilisé, la valorisation permet de revenir au monomère de départ ou aux produits pétrochimiques de base.

Les techniques de dissolution présentent l'avantage de s'appliquer, à priori, à tous les types de plastiques et même aux mélanges. Les conditions technico-économiques sont meilleures que celles régissant les procédés thermiques et on obtient des produits de meilleure qualité que ceux issus du recyclage mécanique [31].

La figure ci-dessous résume les différentes étapes du recyclage chimiques

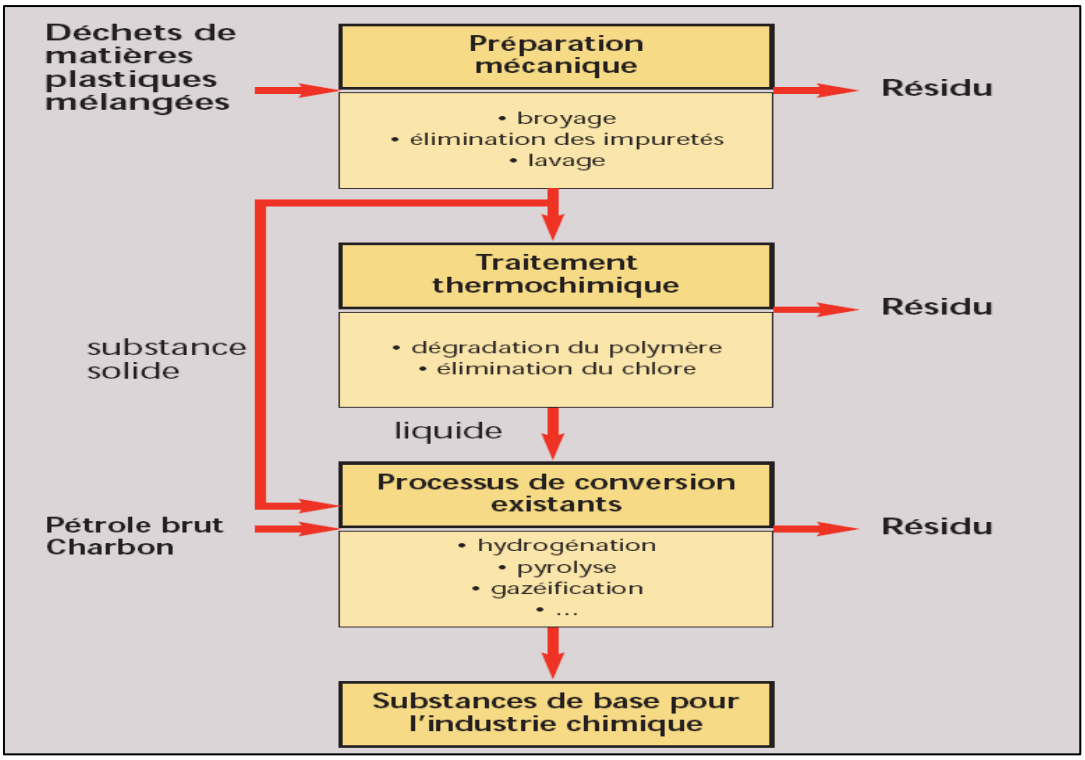


Fig.1.48. Le recyclage chimique [31]

f) Le recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est un processus de récupération des déchets plastiques pour une réutilisation dans la fabrication de nouveaux produits plastiques.

Le recyclage mécanique des déchets plastiques implique un certain nombre de traitements et des étapes de préparation. Généralement la première étape consiste à réduire la taille de ces plastiques (pastilles, poudre ou flocons), ceci est généralement accompli par un broyage et un déchiquetage [17]. Tout d'abord, deux étapes principales sont à considérées, la collecte et le tri.

f.1 La collecte

La collecte des déchets est une étape obligatoire quelque soit le type de traitement envisagé derrière. Celle-ci peut être sélective ou globale mais présente dans toutes les filières.

- La collecte globale : C'est une opération effectuée par le service public consistant à enlever les déchets présentés dans des récipients prévus à cet effet pour les acheminer vers un lieu d'élimination. C'est une collecte multi matériaux où la phase organique des ordures ménagères est mélangée avec les autres déchets des ménages (emballages, etc.).

- La collecte sélective : la collecte sélective consiste à séparer et à trier les déchets et à les répartir sur divers récipients pouvant être des conteneurs, des poubelles ou des sacs. On distingue deux types de collecte pour le tri sélectif :
- La collecte par apport volontaire : Les objets doivent être triés par l'usager et apportés dans des conteneurs prévus à cet effet dans les communes ou dans des centres de récupération du type déchetterie.
- La collecte en porte à porte : c'est la municipalité qui organise la collecte des déchets déposés par les producteurs sur la voie publique, une à 4 fois par semaine.

f.2 Le tri

Cette opération vise à séparer la fraction plastique des autres fractions à savoir : le papier, les textiles, les métaux et les verres et de séparer ensuite les différents types de matières plastiques. Le tri s'effectue par plusieurs méthodes :

- Le tri manuel : En centre de tri, la séparation des différentes matières plastiques se fait manuellement par des opérateurs selon des catégories : le PEHD, le PET clair (transparent ou légèrement bleuté), le PEBD…etc.
- Séparation par flottation : La technique de séparation par voie humide est basée sur le principe de flottation ou sédimentation. Dans l'eau (d=1g/cm3), en fonction de leurs densités, les matériaux légers de densité inferieures à 1 flottent, les matériaux lourds de densité supérieure à 1 coulent.
- Séparation par fluide supercritique : C'est une technique mettant en œuvre des fluides dans des conditions de température et de pression supercritiques tels que le CO_2 supercritique ou l'éthylène glycol à 194C°.
- Tri magnétique : Fait intervenir les capacités d'aimantation des particules, elle concerne la séparation plastiques /métaux.
- Tri électrostatique : C'est une technique basée sur le phénomène répulsion/attraction des particules entre elles.
- Tri par détection infra rouge : La technique d'infrarouge est appliquée pour le tri des bouteilles plastiques, elle permet l'identification rapide du PE, PP, PVC, PS et PET
- Tri par détection à rayon X : Technique bien établie pour la séparation du PVC, elle est appliquée uniquement pour la séparation du PVC du PET.

f.3. Broyage

Il consiste à couper ou déchiqueter les déchets plastiques en paillettes, on pourra ensuite séparer les différentes matières plastiques.

f.4. Lavage

Le lavage s'effectue en plusieurs étapes, son but étant d'éliminer un maximum d'impuretés comme les adhésifs, le papier…etc. afin d'obtenir un produit exempt de toute contamination.
Le lavage peut se faire par l'eau, par la soude, par détergent ou encore par solvant.

- Lavage par l'eau et détergent: Se fait pour tous les plastiques, films, bouteilles...etc. Il permet d'éliminer certaines impuretés comme la poussière.
- Lavage avec une eau basique : il s'effectue pour les bouteilles en PET, l'eau est légèrement basique (80C°, 2% de NaOH). Il est suivi d'un lavage à froid permettant d'éliminer les traces de NaOH présentes dans le polymère et susceptibles de catalyser le processus de dégradation hydrolytique du PET.
- Lavage par solvant : il permet d'éliminer toute trace d'adhésif ou d'impuretés organiques. Dans le cas du PET le solvant le plus utilisé est le tétrachloroéthylène (TCE).

Il existe d'autres catégories d'emballage ou le lavage à l'eau seule ne suffit pas pour s'en débarrasser des contaminants et d'impuretés, c'est le cas du polyéthylène (PE) utilisé comme emballage de pochette de lait ou le désencrage est une étape indispensable avant toute opération du recyclage. G. AIT CHERIF [21] a étudié le désencrage du PE utilisé en emballage pour lait en utilisant un tensioactif cationique qui est l'aliquat 336, cette dernière a constaté que l'aliquat 336 est un très bon tensioactif pour les désencrage en plus il nécessite des conditions raisonnables de température (< 50°C), de concentration de 5 à10*CMC et PH=11.

f.5 Séchage et conditionnement

Le séchage se fait sur une sole perforée (tamis à barreaux, surfaces spéciale) ou ils sont traversés par l'air chaud, les paillettes ainsi réchauffées sont fluidisées et avancent par l'effet des vibrations. Elles sont ensuite conditionnées dans des conteneurs pour être acheminées vers les usines de recyclage.

F.6. Extrusion - granulation

Pour certains plastiques, comme le PEHD, et en fonction des applications de recyclage, les paillettes de plastiques sont fondues et passent à travers une filière donnant des joncs de plastiques qui sont ensuite coupés et refroidis dans l'eau pour former des granulés, semblables à des résines de plastique vierge [32].

La figure suivant résume les différentes étapes de recyclage mécanique des déchets plastiques ainsi que les figures 1.49-1.52 donnent une idée sur le recyclage mécanique des déchets de PEHD, PEBD et PET respectivement.



Fig.1.49. Processus de recyclage mécanique des déchets plastiques [31]

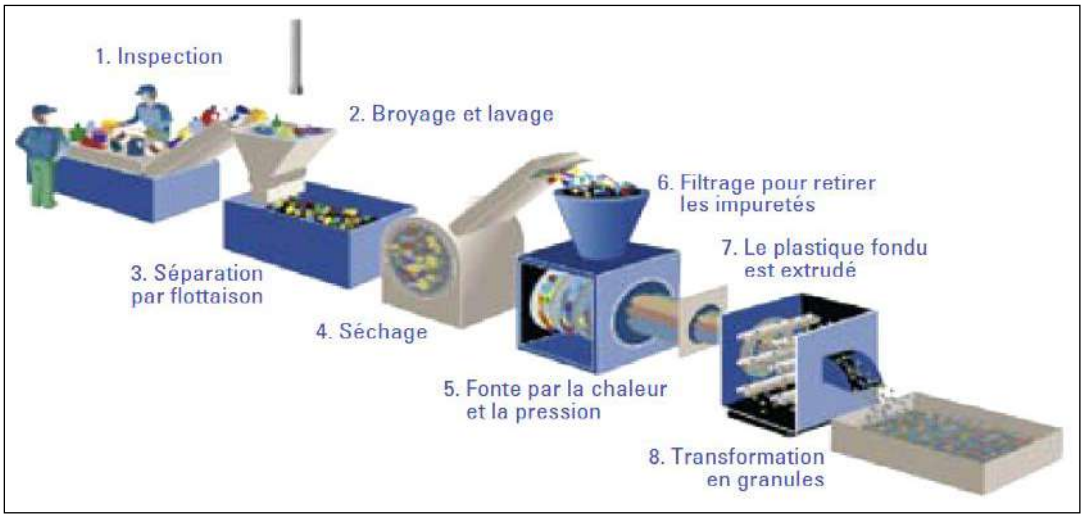


Fig.1.50. Exemple des différentes étapes du recyclage des PEBD densité plastiques [33]

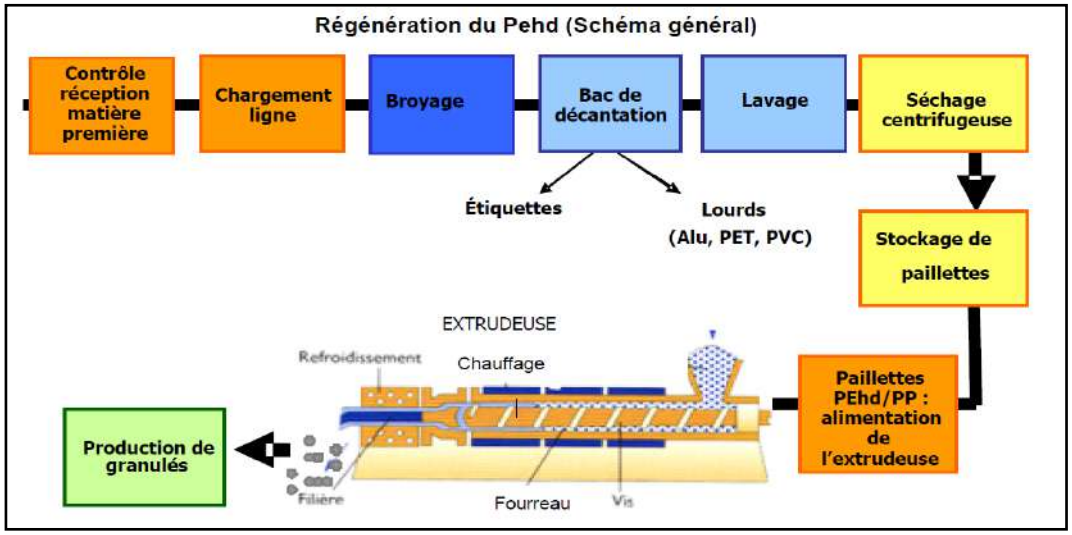


Fig.1.51. Exemple des différentes étapes du recyclage des PEHD densité plastiques [33]

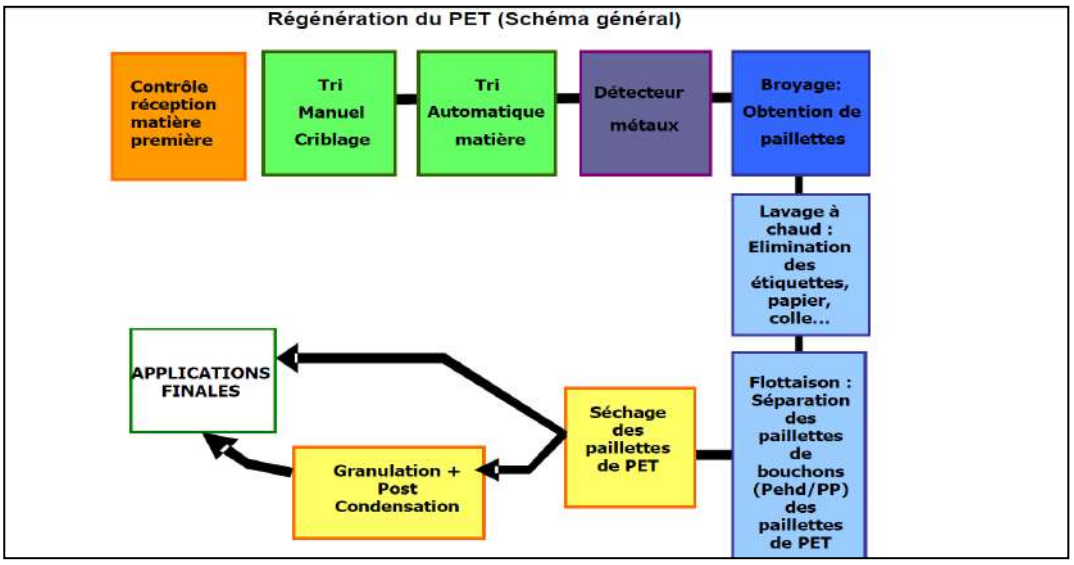


Fig.1.52. Exemple des différentes étapes du recyclage des PET [33]

j) Le retraitement thermique

Le retraitement thermique consiste de chauffer un thermoplastique à températures très élevées, de ce fait faisant l'écoulement plastique. Le plastique est alors converti dans un nouveau produit comme il se refroidit [31].

Le recyclage matière d'un kg d'emballages plastiques mélangés réduit la production de gaz à effet de serre de 0,95 kg (Fig.1.53). La valorisation énergétique par incinération d'un kg d'emballages plastiques mélangés émet 1,13 kg.

L'enfouissement d'1 kg d'emballages plastiques mélangés émet 0,13 kg .Le recyclage matière est donc sans conteste la solution la plus efficace en termes de plus value environnementale [31].

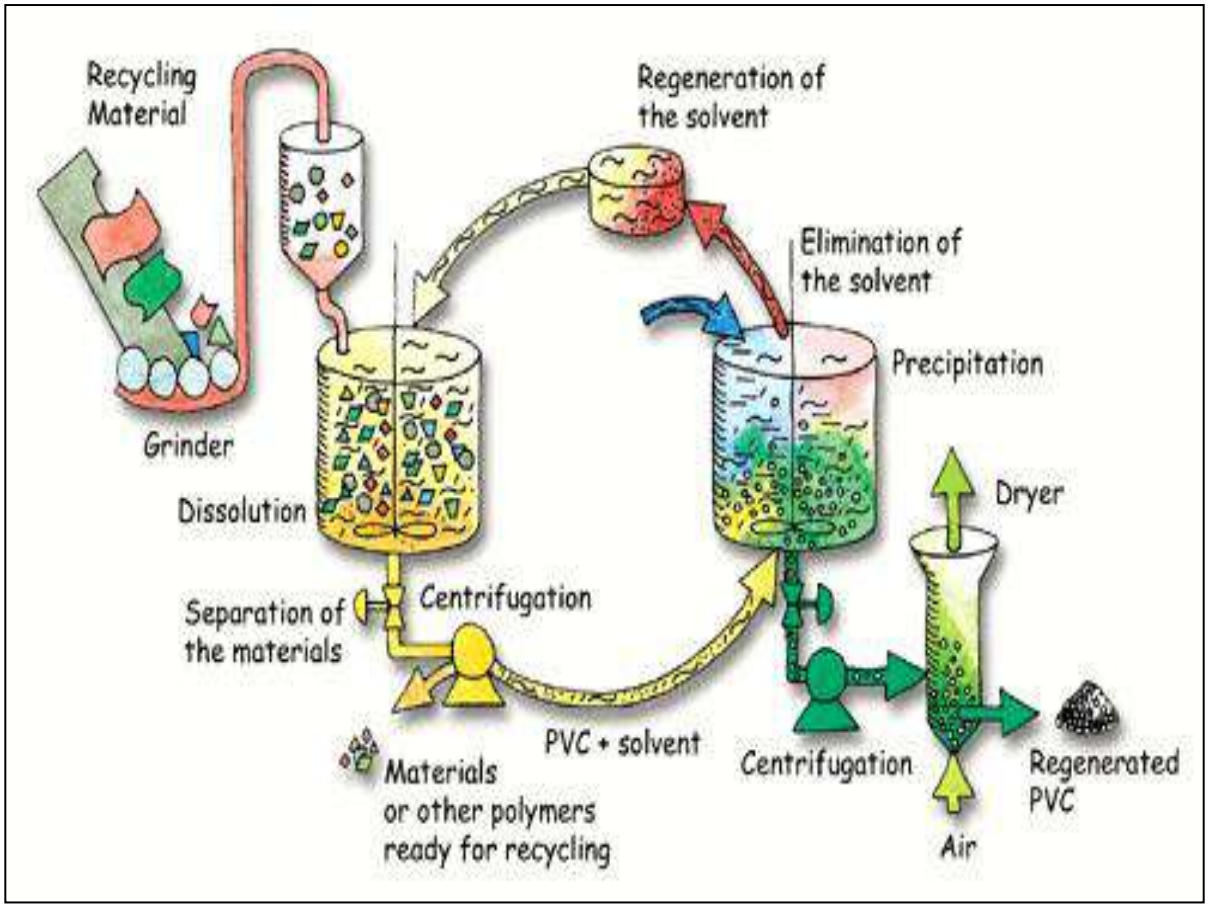


Fig. I.53. Procédure du traitement thermique des déchets plastiques [31]

La figure suivante résume tous les modes existes de traitement des déchets plastiques

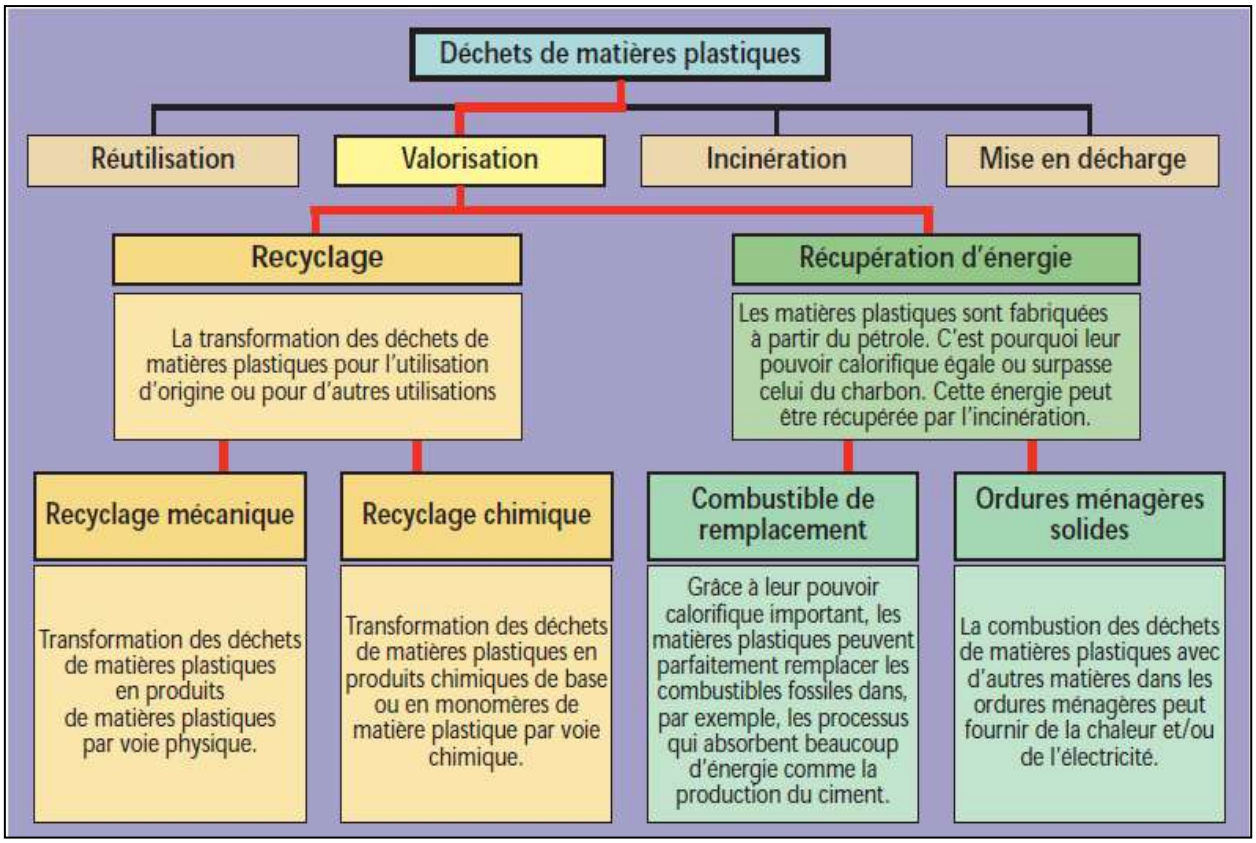


Fig.1.54. Les différents modes du traitement des déchets plastiques [31]

1.4.2.5. Recyclage des déchets plastiques en chiffres

La consommation en plastiques par les plasturgistes par secteur en Europe est estimée à 4.7 Mt en 2011 ,25.1 Mt seulement à été recyclé [14] (Fig.1.55).

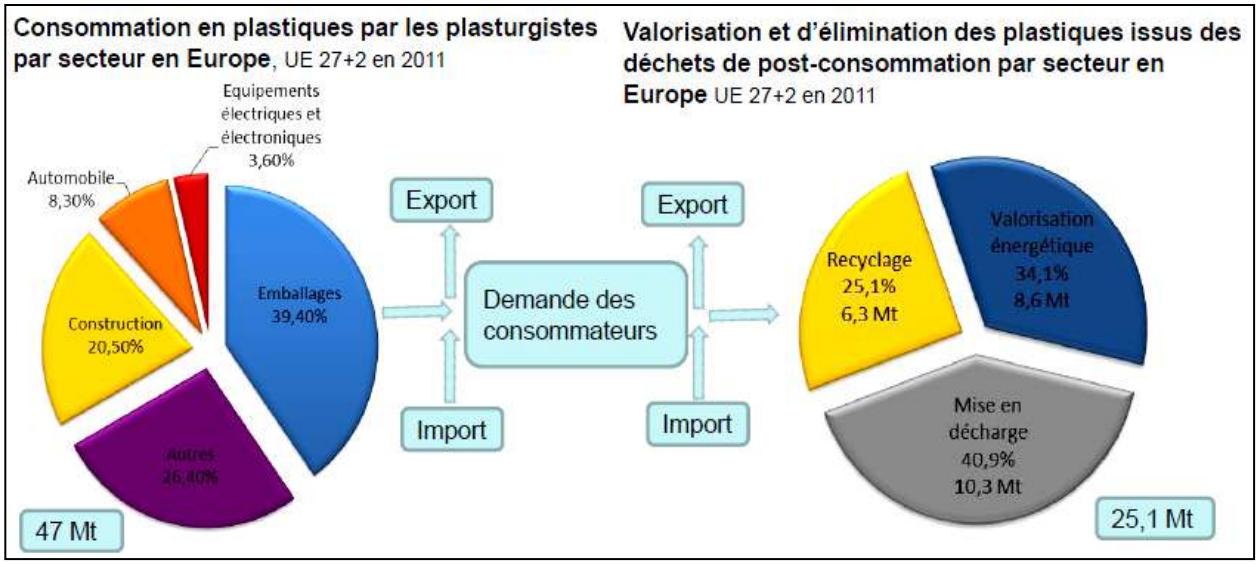


Fig.1.55. Les chiffres du recyclage et de la valorisation des plastiques en Europe en 2011[14]

Les taux de valorisation des déchets d'emballages du plastique en Europe varient énormément d'un pays à l'autre de l'UE .Le taux moyen de valorisation est de 57,9Mt [14].

Certains pays ont des taux de valorisation totale supérieurs à 90% (Allemagne, Autriche, Pays- Bas, Belgique, Suède) (Fig.1.56) .Ces pays sont à la pointe de la valorisation énergétique et du recyclage .Ils ont également mis en place des interdictions ou des contraintes dissuasives concernant la décharge [14].

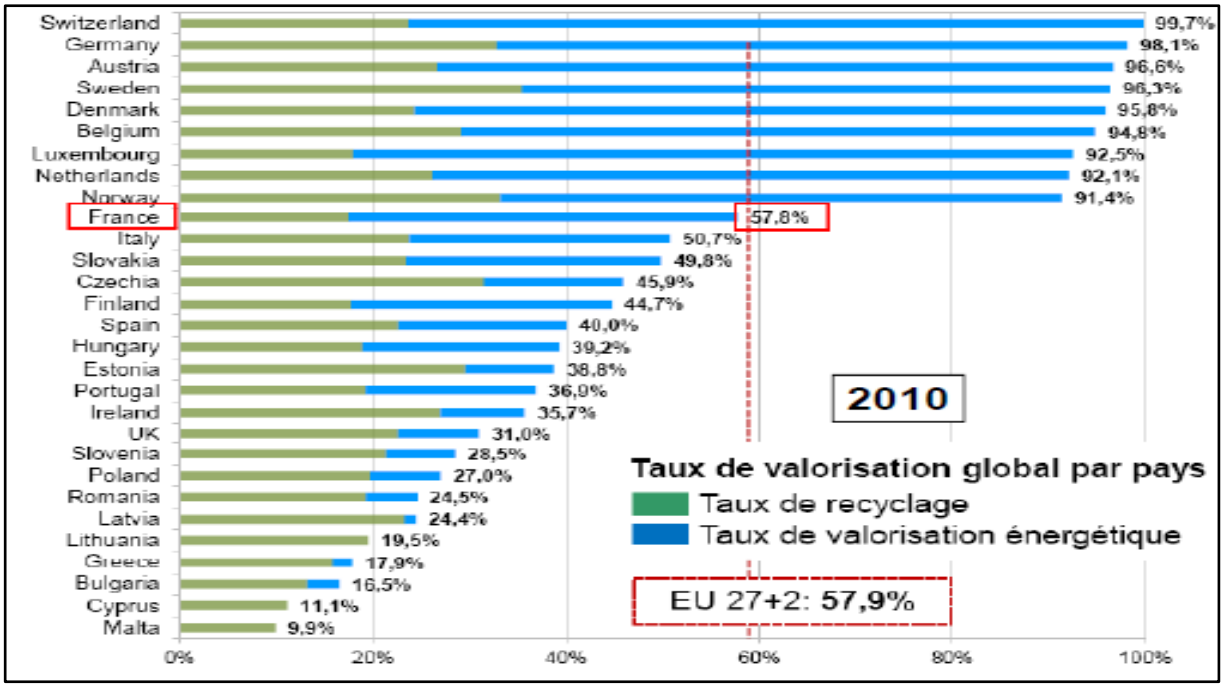


Fig.1.56. Taux de valorisation des déchets d'emballages plastiques par pays [14]

Selon une étude de Plastics Europe [14], le taux de recyclage des matières plastiques dans l'Europe des 28 (plus la Norvège et la Suisse) s'élève à 29,7 % et la valorisation énergétique (ceci correspond à l'incinération de déchets avec récupération d'énergie) à 39,5 %. Ces vingt dernières années, on constate une augmentation de la part de plastiques destinés au recyclage (voir la figure 1.57 ci-dessous), mais ce taux est loin d'être suffisant.

Il existe de grandes disparités entre les pays. En France, par exemple, le taux de recyclage est de l'ordre de 22 % et la valorisation énergétique de 42 %, contre respectivement 38 % et 60 % en Allemagne. Cette différence s'explique notamment par l'interdiction depuis 2005 en Allemagne de mettre en décharge tout produit à fort pouvoir calorifique [14].

Les emballages représentent les principaux déchets plastiques recyclés – à hauteur de 40 % pour l'Allemagne, 26 % pour la France et 36 % au Royaume-Uni. Ce sont des produits à

courte durée de vie, généralement mono matière, et soumis à une réglementation sur la responsabilité élargie des producteurs. Pour des produits plus complexes et à plus longue durée de vie, comme les voitures ou le gros électroménager, ce taux varie entre 8 et 15 % en fonction de la source et du périmètre de calcul (le taux pouvant être calculé à partir de la quantité de déchets plastiques arrivant en fin de vie ou bien à partir de la quantité de plastique collectée). Il reste ainsi une grande marge de progression dans le traitement des matières plastiques.

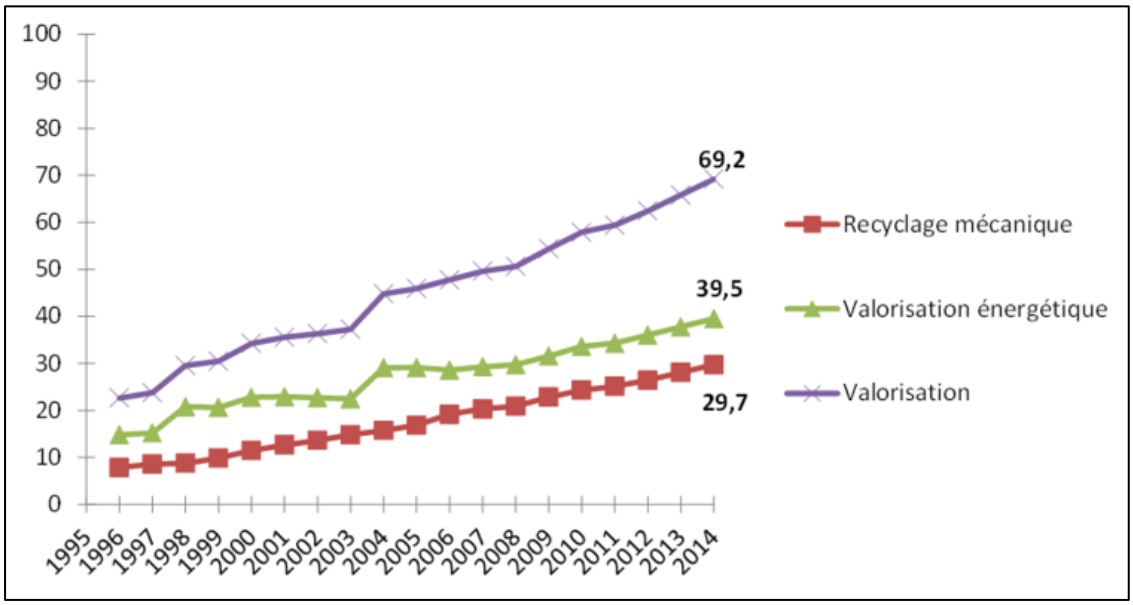


Fig.1.57. Bilan de la valorisation des matières plastiques en Europe de 1995 à 2014 (graphique établi à partir des données de Plastics Europe ; données pour EU des 28+N/CH en 2014)[14].

La récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes/an, soit un kilogramme par habitant par jour, dont près de la moitié peut être récupérée. Environ "45 % de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes, sont recyclables", dit-il. "Parmi ces 6,1 millions de tonnes, il y a 1,22 millions de tonnes de plastiques [34].

L'élimination reste la solution appliquée à 97 % des déchets produits en Algérie (Fig.1.58). Les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharges sauvages à 57 %, brûlés à l'air libre dans des décharges publiques ou communales non contrôlées (à raison de 30 %), en décharge contrôlée et dans les CET (10 %). Le nombre de décharges sauvages est passé de 2 000 en 1980 à 3 130 en 2007. Par contre, les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles : seulement 2 % par recyclage et 1 % par compostage [35].

L'objectif pour 2020 est d'augmenter le taux de recyclage global et par matière, d'éradiquer les décharges sauvages. Depuis 2001, le gouvernement a opté pour l'enfouissement comme mode le plus adéquat à l'élimination des déchets municipaux. Ces derniers aspects seront traités avec plus de détails un peu plus loin. MATE (2004), Atelier international sur le nouveau mode de gestion des déchets municipaux : Le centre d'enfouissement technique (CET), janvier 2004.

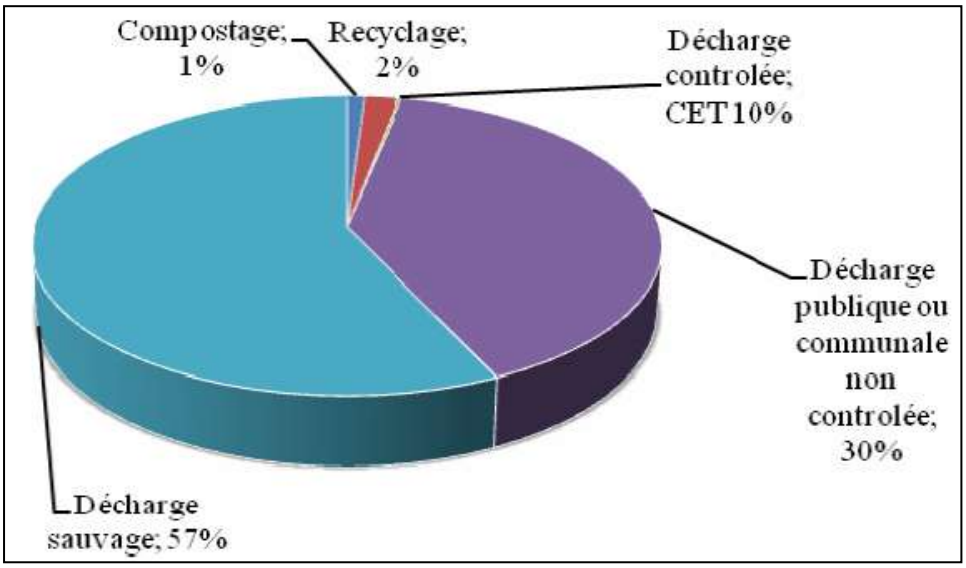


Fig.1.58 . Modes d'élimination des déchets en Algérie [35]

Seuls 5% des 13,5 millions de tonnes de déchets produits annuellement sont recyclés, essentiellement pour récupérer du plastique, alors que 60% sont potentiellement recyclables [34].

En 2014, ce taux devrait passer à 17%, selon le ministre de l'Environnement, avant de dépasser le seuil des 40% en 2016. A voir ce qui se fait sur le terrain, ces objectifs semblent toutefois difficilement réalisables, tant les progrès paraissent lents, alors que le recyclage des déchets est devenu « un impératif économique, sociétal et environnemental », de l'aveu même du ministre [34].

Le gouvernement affiche pourtant la volonté d'aller vite et de travailler sur tous les tableaux. Un premier pas a été franchi avec les différents dispositifs mis en place pour maîtriser les déchets industriels et inciter à la création d'entreprises spécialisées dans leur gestion et leur recyclage.

D'ores et déjà, la récupération et le recyclage des déchets commencent à devenir une activité économique comme une autre. 39 déchetteries ont été créées et 247 micro-entreprises sont

recensées dans le secteur, qui compte seulement 16 grosses entreprises spécialisés dans la récupération. 124 centres d'enfouissement techniques existent, avec tout le système de traitement, pour remplacer progressivement les décharges publiques, appelées progressivement à disparaître. La plus emblématique de ces décharges est celle de Oued-Smar, dans la wilaya d'Alger, remplacée par celle d'Ouled Fayet, fermée à son tour. Les deux sites ont été symboliquement transformés en espaces verts pour marquer la transition. Mais de là à développer un secteur économique performant, employant 1,5 million de personnes en 2025, le pas semble énorme à franchir [34].

Le dispositif mis en place englobe aussi des mesures incitatives destinées aux entreprises, avec un recours au principe de base du « pollueur-payeur », afin d'offrir une source de financement qui s'ajoute à l'effort de l'Etat.

En plus de l'introduction de contrats de « performance environnementale », déjà signés par 300 entreprises, une étude d'impact sur l'environnement est désormais requise pour tout nouvel investissement industriel, selon la ministre qui s'est montrée intraitable. « Aucun industriel ne peut s'installer sans étude d'impact environnemental », a-t-elle prévenu. Une taxe est également prévue, calculée en fonction de « la charge de pollution ». Celle-ci est actuellement payée par 85 à 90% des entreprises qui y sont soumises. Il s'agit essentiellement de celles ayant une activité considérée comme « dangereuse ou polluante » [34].

1.5 Conclusion

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter. Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances. Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

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 ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des déchets usagés non réutilisables, ainsi que de leurs recyclage et valorisations. Puis on a donné une généralité sur la matière plastique et les déchets plastiques. Ces derniers présentent une gêne environnementale et sanitaire de leurs durées de vie et de leurs grandes quantités. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les matériaux de construction peuvent représenter un débouché intéressant.

Chapitre 02 :
Béton de sable

2.1 Introduction

Le besoin en granulats connaît, en Algérie, une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés dans cette dernière décennie. Dans le sud d'Algérie, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire [36].

Etant donné l'abondance de sable de dunes, particulièrement dans les déserts de Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien (Fig. 2.1), l'idée de promouvoir sa valorisation dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique. En Algérie, l'intérêt à la valorisation du sable de dunes dans les bétons, notamment dans le béton de sable (BS) est apparu dans la fin des années 80.

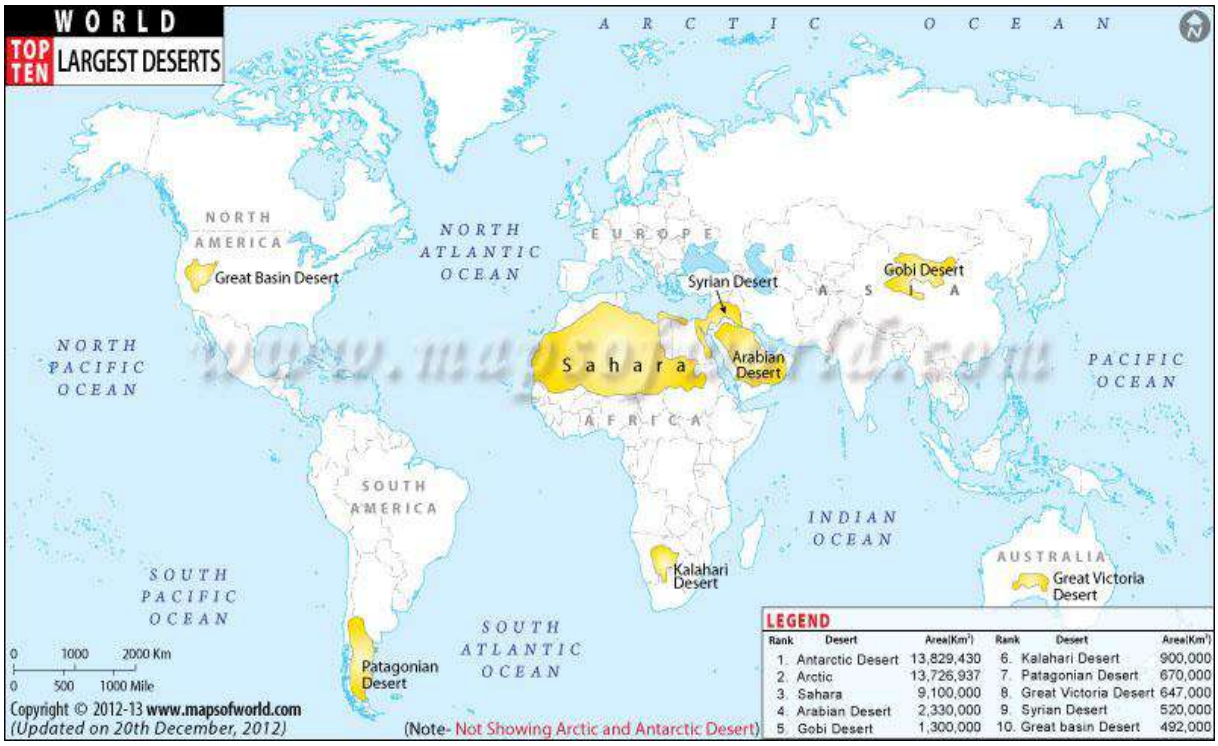


Fig.2.1. Carte de déserts dans le monde [37]

2.2 Définition

Selon la norme française NF P 18-500 [38], le béton de sable est un béton fin constitué par un mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; outre ces composants de base, le BS comporte habituellement un (ou plusieurs) adjuvant.

Les ajouts (fibres, colorants, ...) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange.

L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation «béton de sable» tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7 (G = gravillon ; S = sable) : on parle alors de béton de sable chargé (Fig. 2.2).

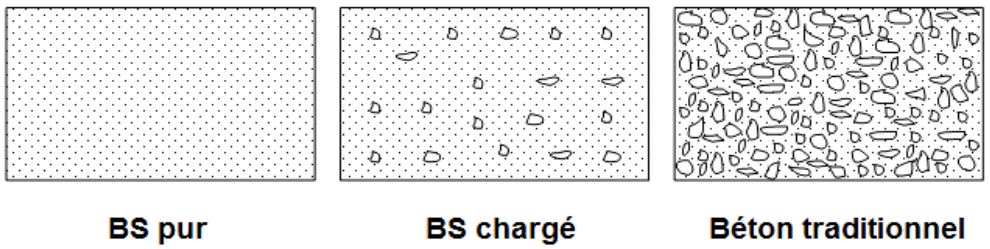


Fig.2.2. Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel [39]

On peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0 mm à un maximum de 8 mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 4 mm et les éléments inférieurs à 4 mm reste également inférieur à 0,7 [38].

2.3 Spécificité du béton de sable

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable(s), l'absence ou le faible dosage de gravillons et l'incorporation d'addition(s) [38].

Le béton de sable se distingue d'un mortier par sa composition, le mortier est en général fortement dosé en ciment et ne comporte pas systématiquement d'addition, et surtout par la destination : les bétons de sable sont essentiellement destinés aux usages traditionnels du béton [38].

2.4 Historique des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19ème siècle, c'est à dire au début du développement du ciment armé. En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité [39] Il construit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifié en béton aggloméré. En 1869, le phare de Port-Saïd en

Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France. (Fig. 2.3).

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m3; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers [39].

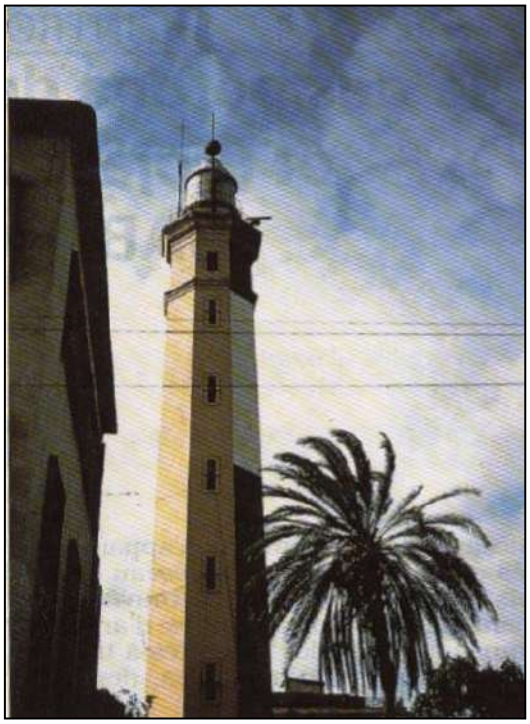


Fig.2.3. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) [39]

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré. En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie). Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable. La figure 2.4 montre l'illustration de métro de Saint- Petersbourg. Voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.

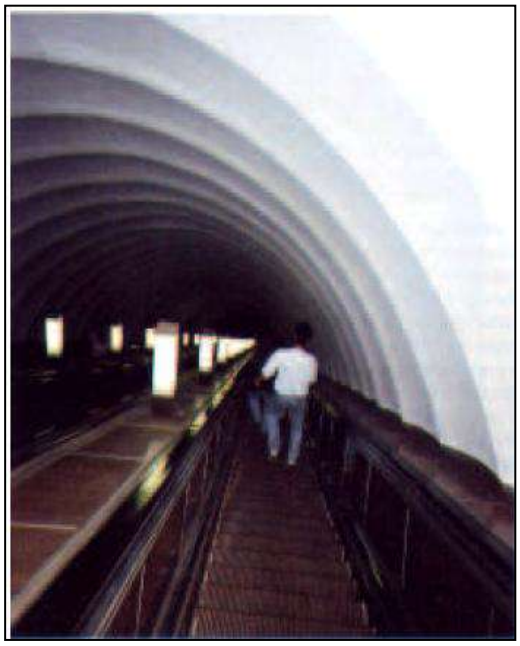


Fig.2.4. Métro de Saint-Pétersbourg [39]

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants. Dans les années soixante dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels. A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRETE [39], pour la promotion et le développement de ce matériau. Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre. Dans les dernières décennies, et vu l'insuffisance des résultats de son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple

: CNERIB et ENPA en Algérie, CEBTP et LRPC en France, Des laboratoires en URSS. Au début, les recherches se limitèrent à un béton de sable ordinaire sans aucune correction granulaire et sans adjuvants, puis elles s'étendent à la recherche d'une meilleure correction granulaire du sable dans sa partie fine par l'utilisation de filler (généralement calcaire) et à l'utilisation des adjuvants (plastifiant, réducteur d'eau). Plusieurs compositions de base ont été données, mais pour des matériaux bien déterminés. D'autres études ont essayé d'approfondir le sujet (retrait, fluage, adhérence aux armatures) mais les résultats obtenus restent toujours insuffisants.

2.5 Les composants du béton de sable

Le béton de sable est un béton constitué principalement de sable, de ciment, d'eau et de fines d'ajouts. D'autres ajouts (fibres, adjuvants, … etc.) peuvent êtres ajoutés a cette composition de base selon les besoins d'usage. La compacité optimale du béton de sable est liée directement à la teneur en fines du ciment et du sable utilisé [39].

2.5.1 Les sables

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. La propreté du sable est une restriction exigée pour réaliser un béton de sable. Par contre, aucun critère granulaire n'est exigé pour faire un béton de sable et sur la base ont peut utiliser aussi bien un sable fin (type de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou même de type concassé. Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres et on peut distinguer deux types de sables : Les sables naturels et ceux issus d'une chaîne d'élaboration (artificiels). La résistance du béton de sable dépend de la granulométrie du sable utilisé et de ses fines. Plus le sable est riche en fines naturelles, plus il absorbe de l'eau et automatiquement le béton perd en résistance. [39]

2.5.1.1 Le Sable naturel :

C'est un matériau qui existe, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Il est le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Sa formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les sables naturels les plus rencontrés et connus dans la construction sont :

a- Sables de mer :

Les sables de la plage utilisés dans le domaine de la construction ont fait l'objet d'importants prélèvements et exploitation anarchique durant les dernières années, ce qui a engendré la dégradation et l'épuisement de plusieurs sablières causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages ce qui a fait apparaître deux décrets ministériels, approuvés en 1991 et 1999 par le ministère de l'équipement et du logement et le gouvernement; interdisant l'exploitation de sable de mer et de sable d'alluvions [36].

b. Sables de dune :

Les sables des dunes sont les formations détritiques, les plus répandus dans le sud (Sahara) de l'Algérie avec une couleur qui varie du jaune orangée au rouge suivant leur degré d'altération.

c. Sables de rivière :

En Algérie, les sables de rivière rencontrés se trouvent soit dans des oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (dépôts actuels), soit dans des lits d'anciens oueds dont l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures.

2.5.1.2 Les sables issus d'une chaîne d'élaboration

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats et peuvent être soit:

- des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant ;
- des sables de concassage qui sont très souvent l'excèdent de la production d'une carrière ou d'une ballastière, ces derniers sont de plus en plus utilisés en technique routière.

2.5.2 Les fines d'ajout (ou addition)

Les fines d'ajout (fillers) sont des matières minérales, naturelles ou artificielles, qui agissent par leur granulométrie (D<0.08 mm) sur la compacité du béton de sable. Ils sont utilisés pour combler les vides et augmenter la compacité du béton. Leur utilisation réduit donc le besoin en ciment qui est très coûteux. Selon leur nature et leur finesse, les fillers améliorent la maniabilité et la résistance du béton. La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la granulométrie différente des granulats utilisés. Dans le cas d'un béton classique, les macros vides créées par les éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) se remplissent par des sables et les vides du sable par des fines du ciment pour

obtenir la bonne compacité du béton. Cette concordance entre le besoin en fines et le dosage en ciment est interprétée par la règle suivante donnant le dosage minimum en ciment (C) en fonction du diamètre (D) du granulat employé. Le tableau 2.1 suivant récapitule la relation entre la granulométrie et le dosage en ciment d'un béton ou d'un mortier [39].

$$C = 550/\sqrt[5]{D} \quad \text{ou} \quad C = 700/\sqrt[5]{D} \text{(selon l'usage du béton)}$$

Tableau. 2.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [39]

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1.904	290	370	
0/20	1.821	300	385	
0/16	1.741	315	400	BETON
0/8	1.516	360	460	
0/6.3	1.445	380	480	
0/4	1.320	415	530	
0/2	1.149	480	610	MORTIER
0/1	1.000	550	700	

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci (Fig. 2.5 et 2.6). On distingue des fines actives (laitiers moulus et cendres volantes) et des fines passives, résultant du broyage de roches massives (fillers calcaires et fillers siliceux) [39].

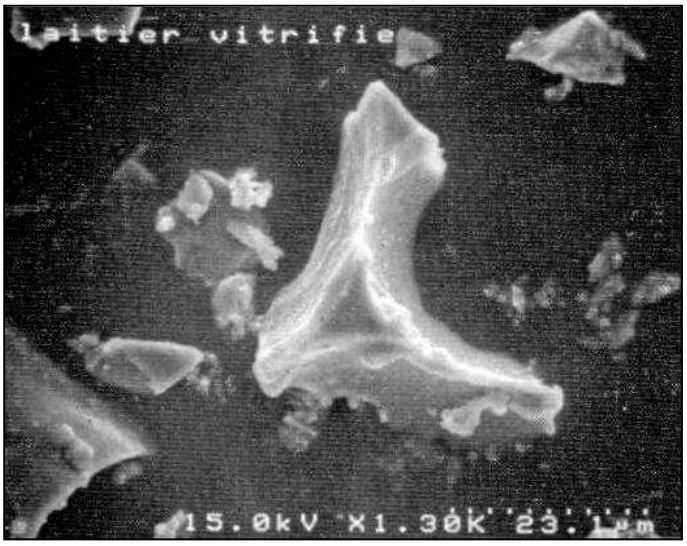


Fig.2.5. Fines anguleuses [39]

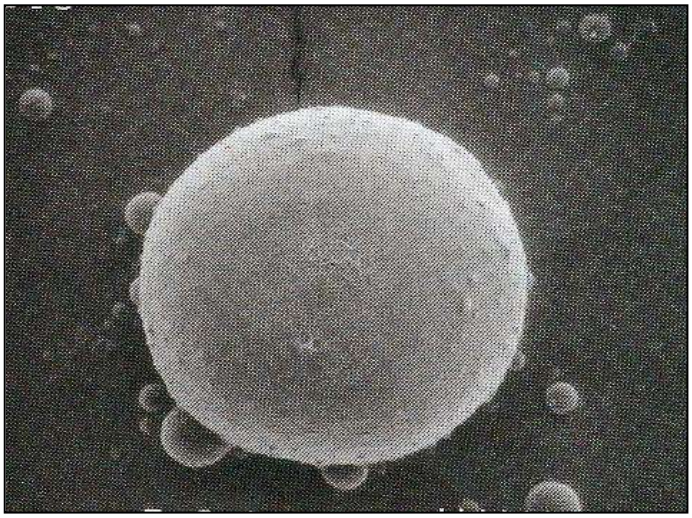


Fig.2.6. Fines sphériques [39]

En matière de maniabilité et de résistance, la morphologie et la texture sont des paramètres très importants. Les fines sphériques peuvent conduire à une réduction d'eau alors que celles anguleuses en nécessitent beaucoup plus. L'agglomération des éléments les plus fins sur les plus grossiers ou l'existence d'éléments alvéolés avides d'eau conduisent à une mauvaise correction granulométrique et à une surconsommation d'eau [40].

Les normes françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, cendres volantes…) naturelles ou non. Ce mot filler provient de l'anglais « **to fil** » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2 mm. L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse [40], [41]. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

2.5.2.1 Les fillers calcaire

Le fillers calcaire est un matériau à finesse presque identique du ciment dont le plus gros grain ne dépassant pas les 80 μm. Le fillers calcaire est considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif et comme avantage, sa finesse peut être utilisée pour optimiser la granulométrie du béton. Les fillers ont d'excellentes affinités avec le ciment lui même de nature calcaire [42, 43].

2.5.2.2 Fumée de silice

La fumée de silice est une matière ultra fine (surface spécifique de l'ordre de 20 à 25 m_2/g), composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1µm (Fig.2.7). Il s'agit d'un coproduit, recueilli sur des filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de ferro-silicium. La fumée de silice est un produit très réactif à cause de sa grande finesse et sa structure vitreuse [43 ,44].

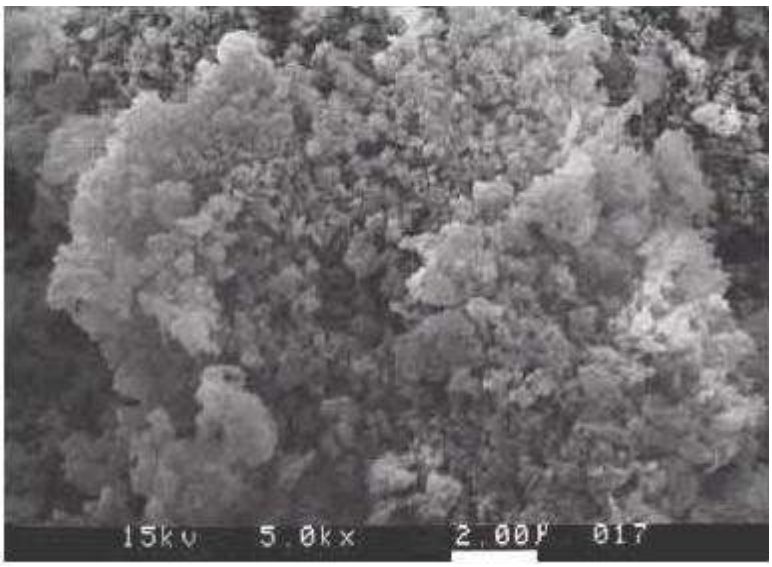


Fig. 2.7 . Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) [44]

L'utilisation de fumées de silice à des dosages de 7 à 15% par rapport a la masse de ciment, permet au béton d'atteindre des résistances mécaniques élevées, et permet aussi d'avoir des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durable. Cependant, étant donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée. Par son effet filler et par la formation d'une phase liante, la fumée de silice contribue donc au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci. Les caractéristiques des interfaces pâte- granulat (zone de transition poreuse) en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte -granulat. L'augmentation de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration.

2.5.2.3 Laitier

Ce sont des résidus minéraux résultant du refroidissement rapide des scories provenant de la fusion de minerais de fer en haut fourneau. Ce sont des combinaisons d'oxydes de calcium (CaO), de silicium (S_iO_2) et de magnésium(MgO).Les ciment en laitier offrent une meilleure résistance chimique aux environnements agressifs (eau sulfatées, milieu marin) et permettent l'obtention d'une bonne durabilité du béton. Il existe deux types de laitiers :

- **Le laitier granulé** : sable friable de couleur claire utilisé souvent comme liant hydraulique ;
- **Le laitier solidifié à l'air libre** : se présente sous forme de roches prêtes au concassage à la granulométrie voulue. Ce laitier est employé comme granulats dans les chaussées.

2.5.2.4 Cendres volantes

Ce sont des produits pulvérulents provenant du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz brûlés des chaudières industrielles alimentées en charbon pulvérisé. Essentiellement siliceuses, parfois calciques, elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

2.5.3 Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine [39].

2.5.4 L'eau

A cause de la grande surface spécifique des grains, le béton de sable nécessite plus d'eau qu'un béton ordinaire. En plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables sont nécessaires pour l'eau efficace [39].

2.5.5 Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires.

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui on été utilisés dans cette étude. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 [39].

2.5.6 Autres ajouts

2.5.6.1 Les fibres

Les fibres sont utilisées comme renfort au sein d'une matrice afin de contribuer à l'amélioration de la résistance à la traction et pour diminuer le phénomène du retrait au jeune âge. Pour limiter les effets de retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte dans le béton de sable, les fibres organiques (polyester, polypropylène…etc.) sont utilisés dans la plus part des cas. Les fibres d'acier ou de fonte amorphe sont généralement utilisées pour améliorer la ductilité du béton de sable [39].

2.5.7. Les gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70 (**G/S< 0,70*)* [39].

2.5.8 Les colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps [39].

2.6 Propriétés essentielles du béton de sable

2.6.1 Propriétés générales

2.6.1.1. Granulométrie et maniabilité

Une des particularités du béton de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport *E/ C* systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport est généralement compris entre 0,6 et 0.8 par rapport à un *E/ C* de 0,5 à 0,6 pour le béton ordinaire avec des maniabilités comparables ; cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui a besoin d'être mouillée [39]

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la figure 2.8 qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité. La figure 2.9 montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport *E/C* augmente. Cependant pour un rapport *E*/*C* fixe, la maniabilité dépend da la nature des fines d'ajout. La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

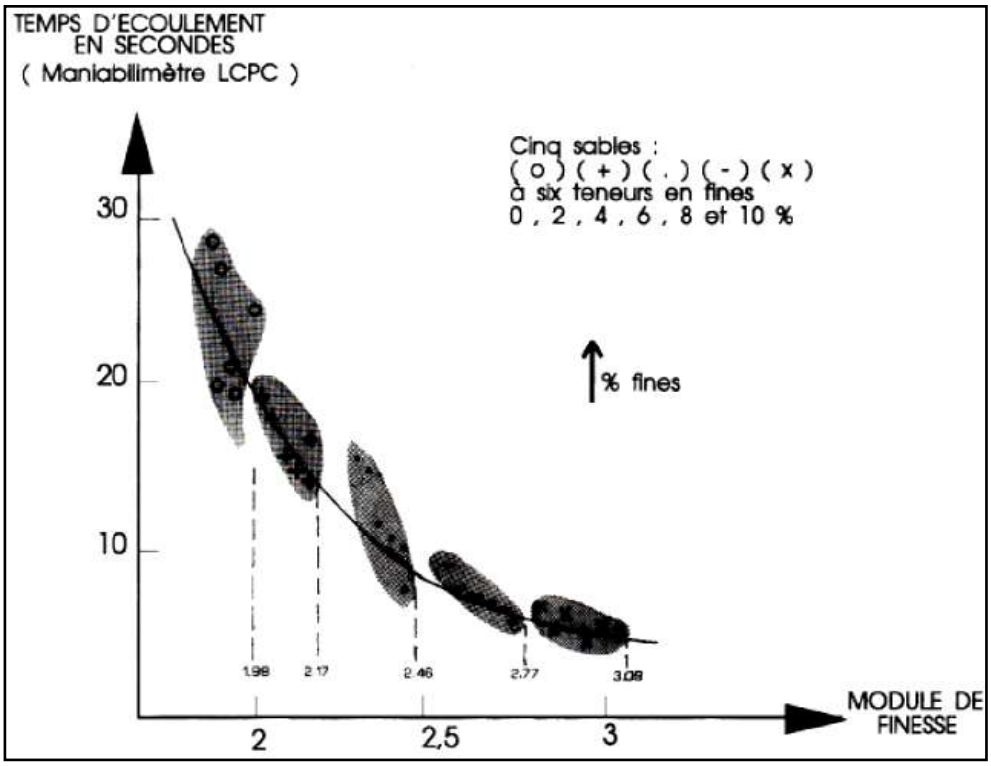


Fig.2.8. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS [39]

De la figure 2.9, il est clair que la maniabilité dépend de la nature et de la proportion des fines incorporées. Généralement, si on augmente le dosage en fines d'ajout, la compacité s'améliore. Dans ces conditions pour le cas des bétons de sable, au lieu du rapport E/C utilisé habituellement, on emploie le rapport E/(C+A) qui intègre le dosage en fines (A), ce qui nécessite l'augmentation du dosage en eau. Aussi, selon la porosité du sable, on pourra avoir un dosage optimal en filler qui nous donnera une meilleure maniabilité [39].

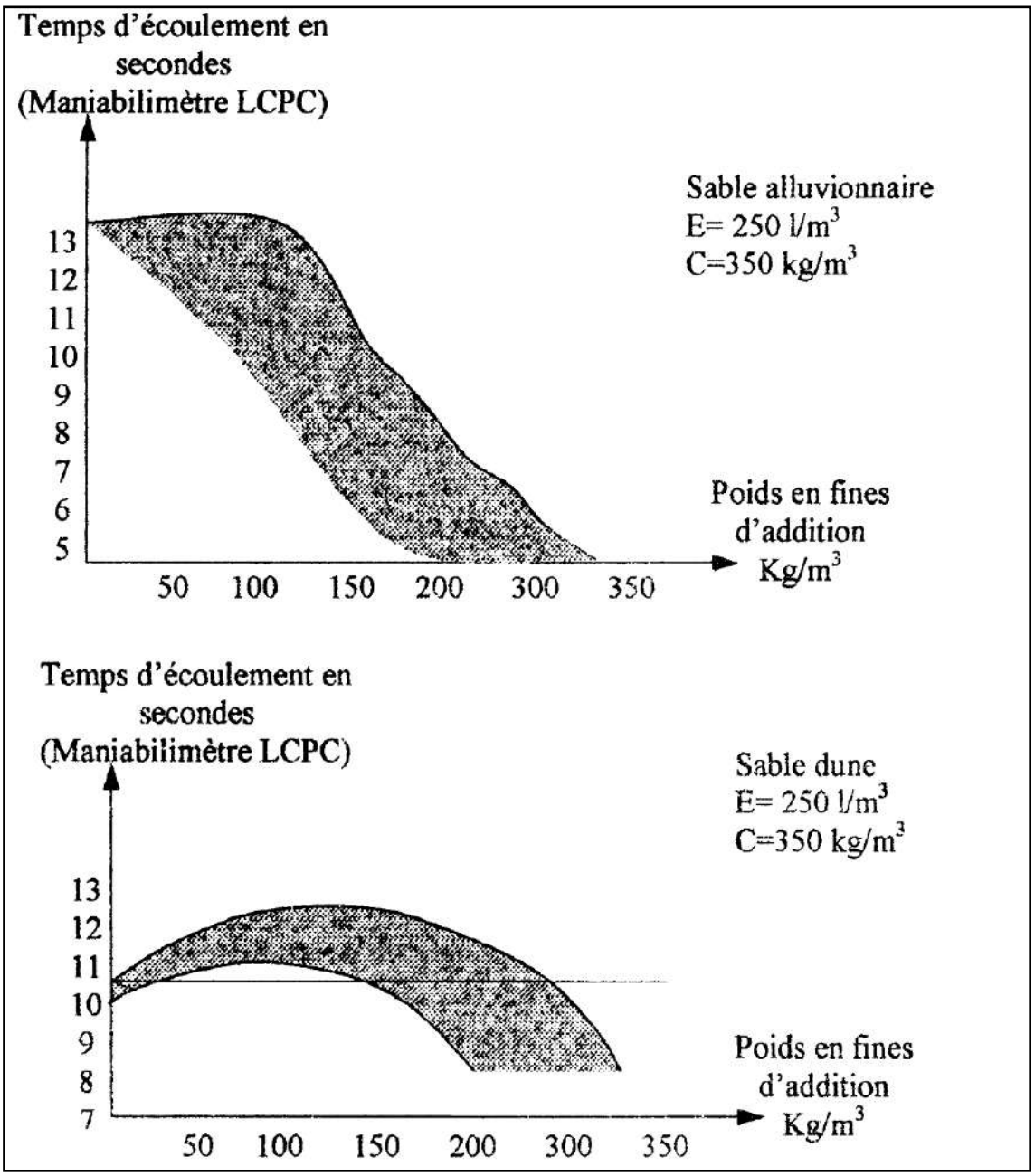


Fig.2.9. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire) [39]

Un BS se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans le cas du BS est élevée et par conséquence le dosage nécessaire du ciment sera très important. L'utilisation du ciment seul n'est pas économique et en plus le BS ne sera finalement qu'un mortier. A cet effet, l'introduction de fines d'ajout est indispensable dans le cas des BS. L'ajout de fines entraîne une amélioration de la compacité du squelette granulaire et améliore par conséquence la maniabilité du BS [45]. La figure 2.10 montre l'effet de fillers calcaires sur la densité des sables sable alluvionnaire RS, sable de dune DS et le mélange RDS.

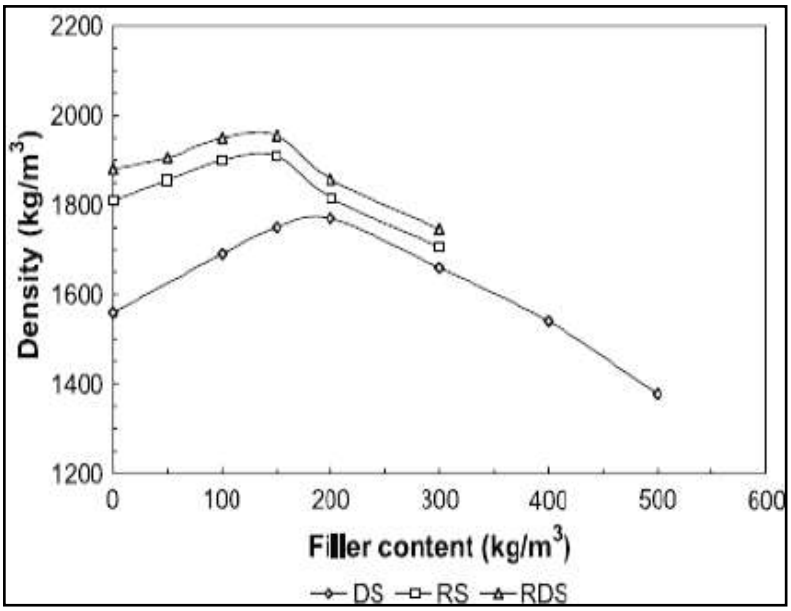


Fig.2.10. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS [45]

D'après la figure 2.10, on remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

2.6.1.2. Granulométrie et résistance

La résistance mécanique du béton de sable avec un dosage en ciment constant, varie en fonction de plusieurs paramètres à s'avoir la finesse d'ajouts, la nature d'ajouts et la dimension maximale des granulats [39].

a) Finesse d'ajout

La compacité du béton de sable dépend de la finesse des additions utilisées et augmente en fonction de l'augmentation de cette dernière et cela quelque soit la granulométrie du sable utilisé. Ce résultat est illustré clairement dans la figure 2.11 suivante [39].

b) Nature d'ajout

D'après des recherches antérieures, Les fines d'ajout les plus efficaces pour le béton de sable sont ceux qui sont actifs hydrauliquement. On peut constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler (Fig.2.12); si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable [39].

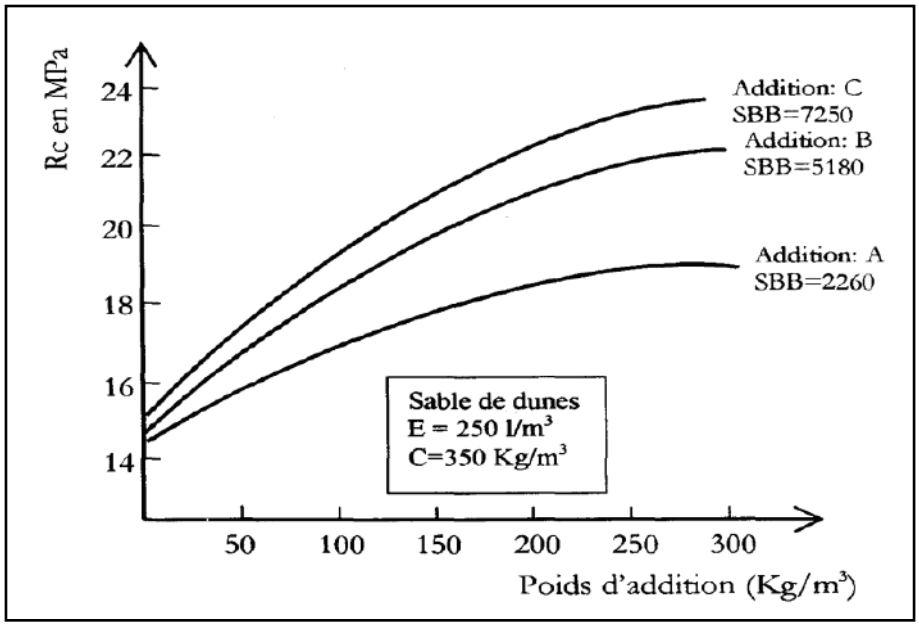


Fig.2.11. Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [39]

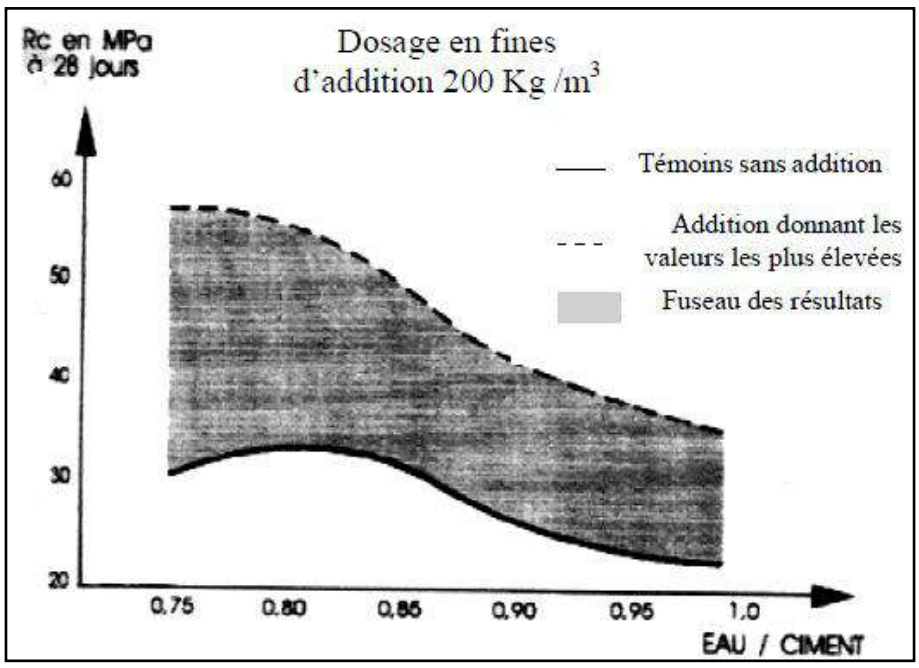


Fig.2.12: Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [39]

❖ **La dimension maximale D_{max} (0/D)**

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate (Fig. 2.13) que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu**.**

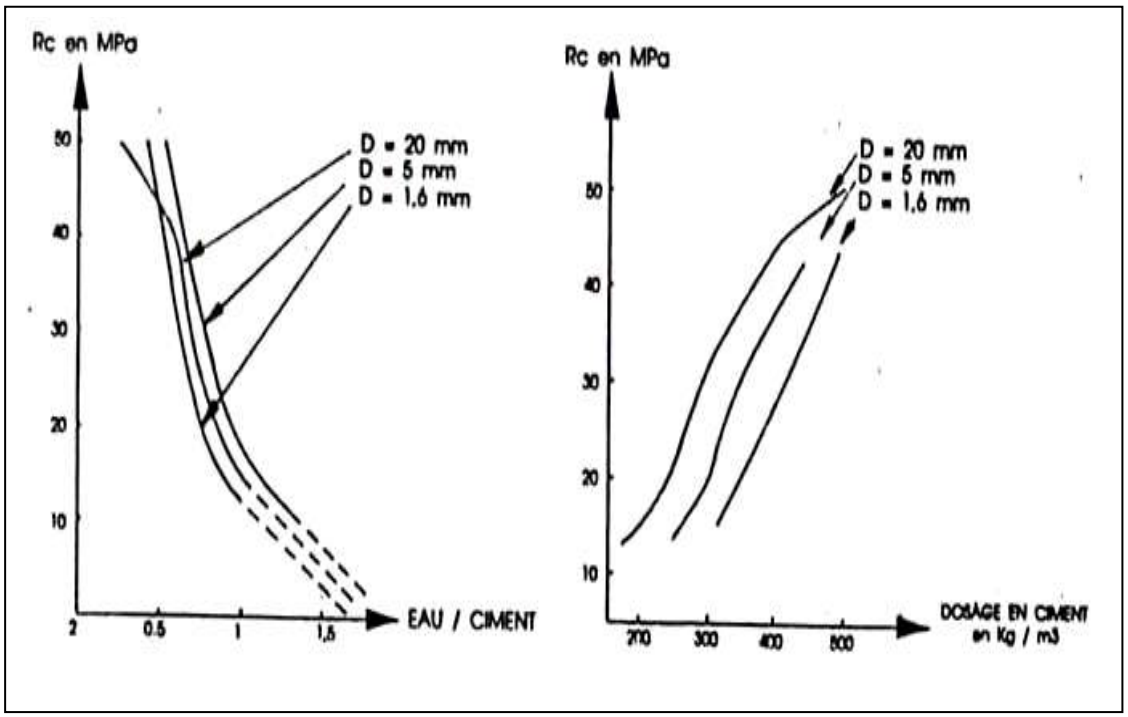


Fig.2.13. Effet de la granularité sur la résistance [39]

2.6.2 Propriétés spécifique

2.6.2.1. L'adhérence aux armatures

Le béton de sable adhère bien aux armatures. La contrainte d'adhérence moyenne se situe en une bonne position par rapport à celles des bétons traditionnels. La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel puisque à même niveau de résistance, l'adhérence mesurée pour un sable dunaire (très fin) est supérieure à celle obtenue pour un sable alluvionnaire. Quelques résultats de la variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation du béton de sable sont résumés dans la figure 2.14 suivante. Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels et l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de

structure. Les études antérieures (Fig. 2.15) ont trouvé que plus la résistance en traction du béton de sable est élevée, moins sont les déformations (au environ des microns) [39].

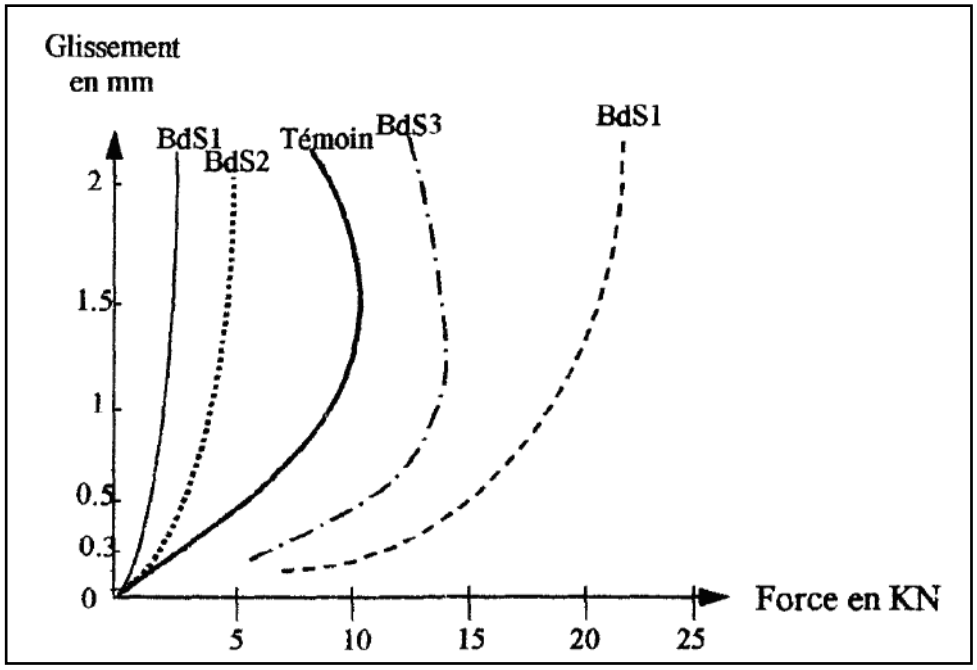


Fig.2.14. Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [39]

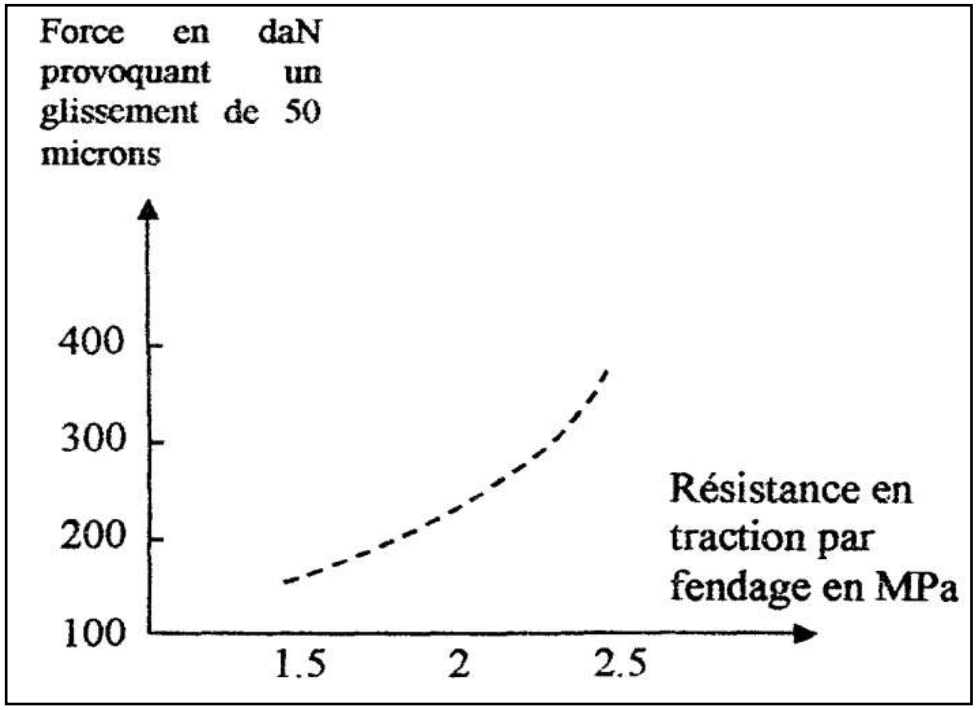


Fig.2.15. Influence de la résistance en traction du BS sur l'adhérence des armatures [39]

2.6.2.2 Durabilité des bétons de sable

La durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres : porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons ordinaires (Fig. 2.16). Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Les paramètres: porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilité [39].

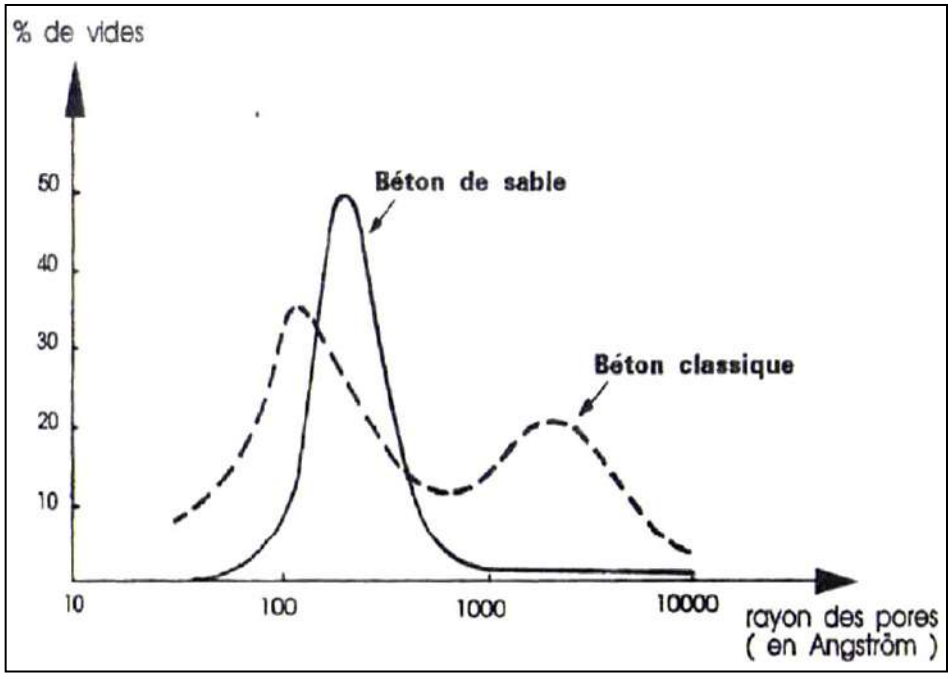


Fig.2.16. Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores [39]

La perméabilité à l'eau de béton de sable est plus faible qu'un béton ordinaire ($2{,}5x10^{-12}$ contre $1x10^{-10}$ m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés. La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores (<10μm) et de l'absorption initiale. Le comportement à la pénétration des ions chlores est comparable à celui des bétons traditionnels [39]

2.6.2.3 Résistance au gel et au dégel

La tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalent aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores [39].

2.6.2.4 Retrait et Fluage

2.6.2.4.1 Le retrait

Pour le béton de sable On distingue deux types de retrait. Un retrait d'auto dessiccation (se fait sans contact avec le milieu extérieur et est voisin de celui des bétons ordinaires) et un retrait de séchage (a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons. En comparaison avec un béton classique, des études antérieures (Fig. 2.17) montrent que le retrait total du béton de sable peut atteindre le double de celui d'un béton classique [44-48].

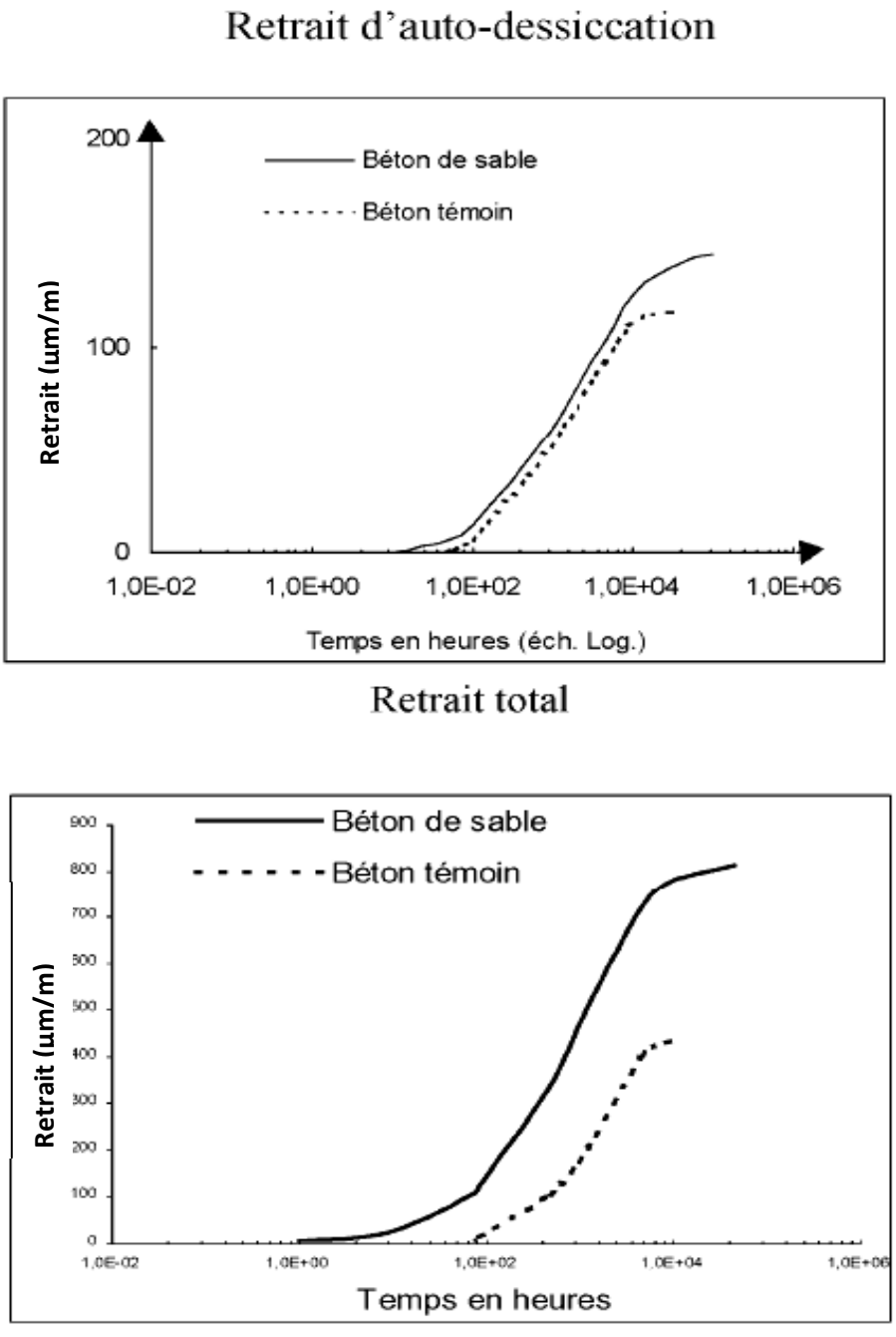
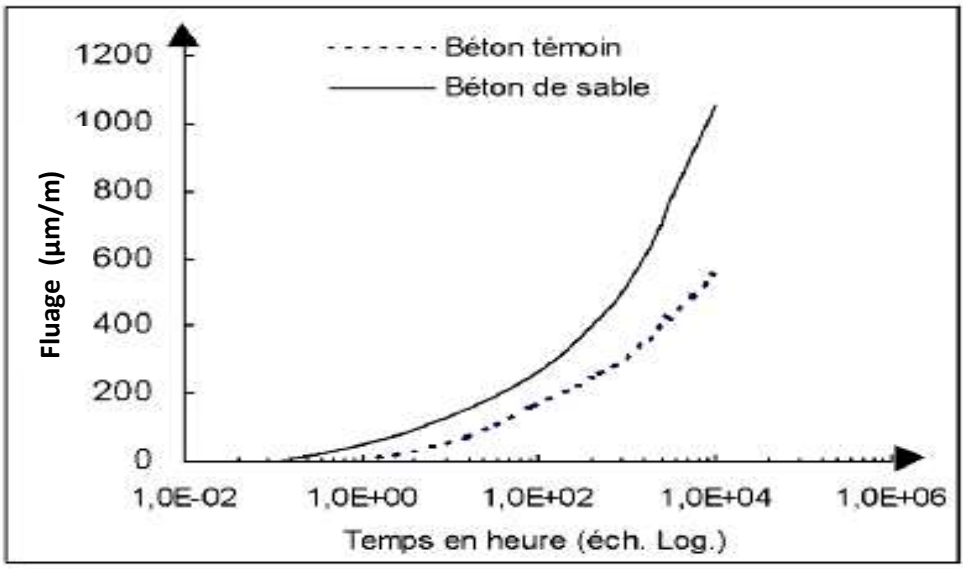


Fig. 2.17. Evolution du retrait dans le béton de sable [48]

2.6.2.4.2 Le fluage

La cinétique du fluage du béton de sable est plus rapide que celle du béton ordinaire (Fig.2.18). Les valeurs du fluage du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton ordinaire. Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en

compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement et son fluage deviendra plus faible [47-48].



Fluage d'auto-dessiccation

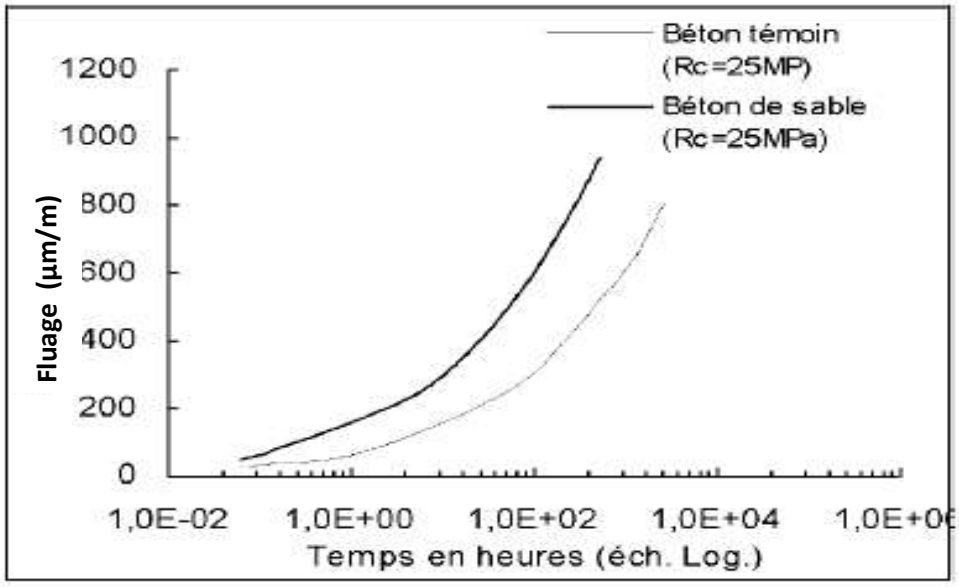


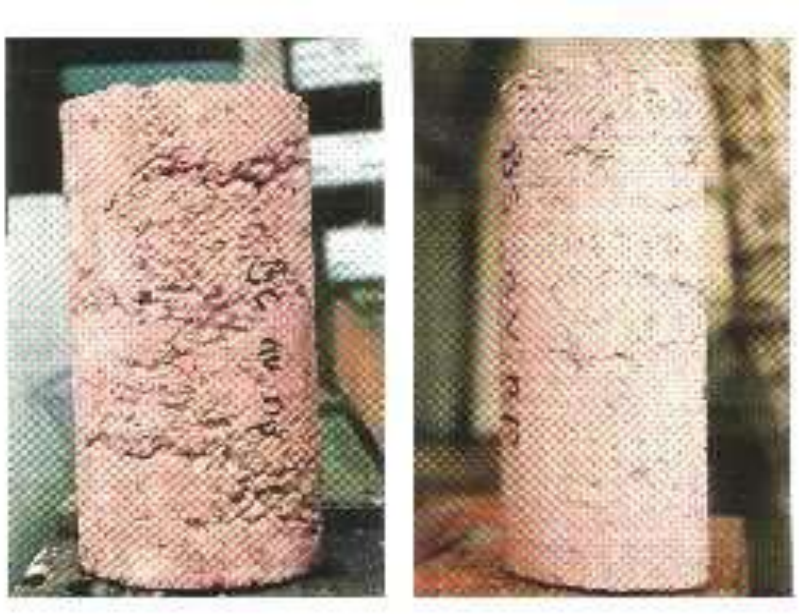
Fig.2.18. Evolution du fluage du béton de sable [48]

2.6.2.5 Comportement thermique du béton de sable

La conductivité thermique des bétons traditionnels varie de 1.4 à 1.8 W/m°C. Les conductivités thermiques mesurées sur bétons de sable sont légèrement inférieurs. Le béton de sable est donc plus isolant. Ce résultat s'explique par la porosité plus importante du béton de sable [39].

2.6.2.6 Phénomène de ségrégation des constituants

La quantité élevée d'éléments fins dans un béton de sable et l'absence de gravillons, et donc sa plus grande homogénéité, confèrent à ce dernier un meilleur comportement que les bétons traditionnels vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables. La figure 2.19 suivante montre la différence d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cône de 14 cm)[39].



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Fig. 2.19. Eprouvettes non vibrées non piquées [39]

2.6.2.7 Microstructure du béton de sable

L'observation de fragments durcis du béton de sable au microscope électronique à balayage (MEB), permet de décrire le matériau comme étant dépourvue de fissures notables, avec une bonne homogénéité d'ensemble et une bonne adhérence pâte de ciment-grains de sable. Des essais ont été effectués par Mr.Bederina. M [49], basée sur l'observation par microscope électronique à balayage (MEB), sur trois types de béton de sable, a montré qu'une pâte de ciment durcie plus ou moins compacte homogène (Fig. 2.20 et 2.21) on constate de nombreux hydrates avec forme d'aiguilles et de cristaux vu la taille des pores très petites, et peu de microfissures courtes et non connectées, ces microfissures résultent de l'important retrait

d'auto-dessiccation et la nature de séchage qui est uniforme en surface qu'à l'intérieure de l'éprouvette (le séchage atteint 80% entre le 3^{e} et 5e jour et 100% avant le 10e jour).

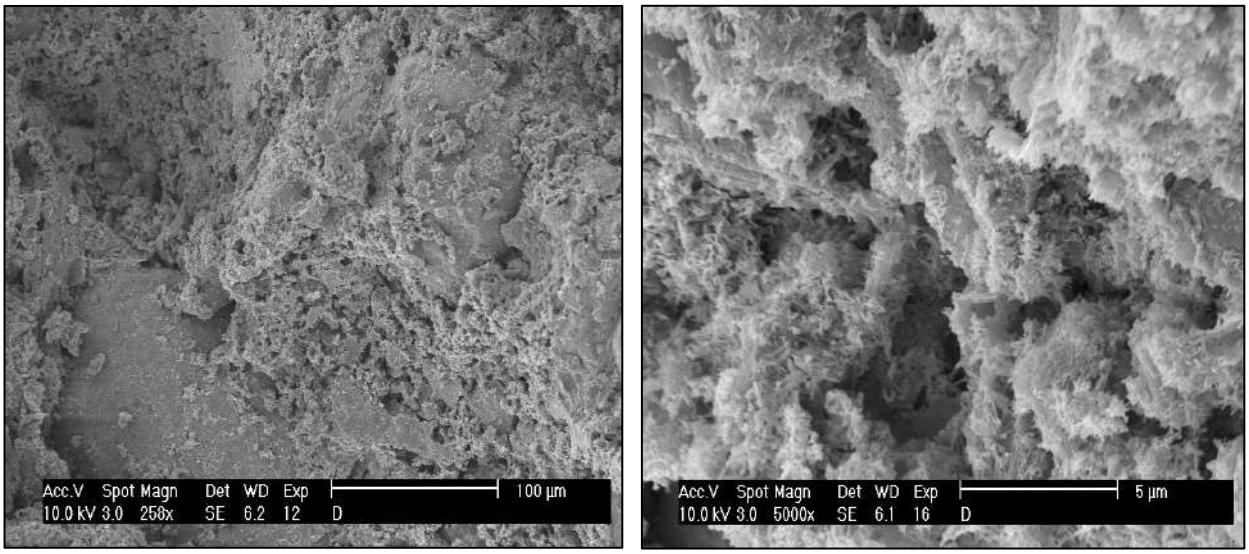


Fig. 2.20. Liaison pâte granulats du Béton de sable de dune [49]

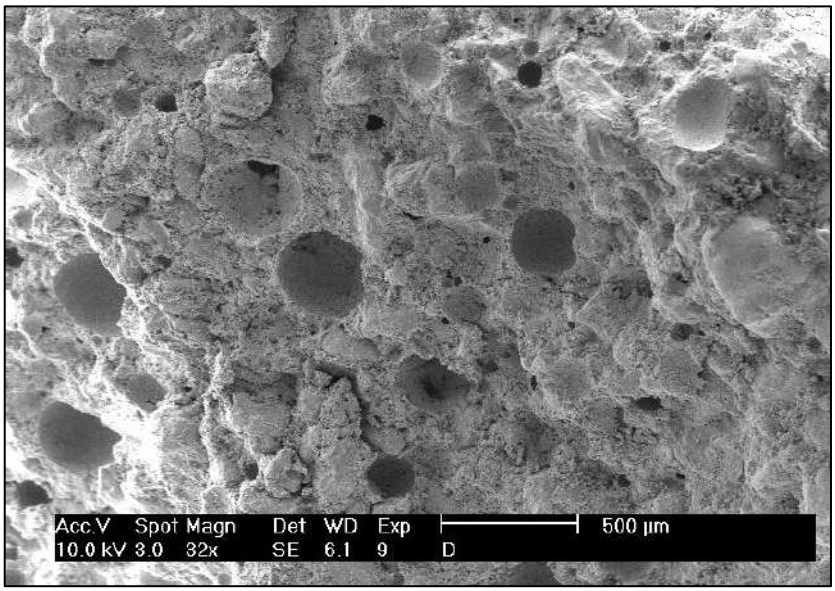


Fig.2.21. Aspect du Béton de sable de dune [49]

2.7 Domaines d'emploi des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé bien avant le béton traditionnel et présente sous sa forme actuelle certaines propriétés spécifiques par rapport au béton classique, et peut procurer des économies dans certaines régions et pour certains usages.

Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable, établis sur ces données sont les suivants :

2.7 .1 Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place [39].



Fig.2.22.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré
en béton de sable (sous bentonite)[39]

2.7.2 Bâtiment

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique [39].

2.7.3 La préfabrication

Le béton de sable est plus adapté à la préfabrication, on constate que les performances recherchées en préfabrication sont réunies dans le béton de sable (facilité en moulage, la montée en résistance, démoulage rapide, aspect de surface exceptionnel) [39].

- **Toiture à plis**

Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m (Fig.2.23 et 2.24).

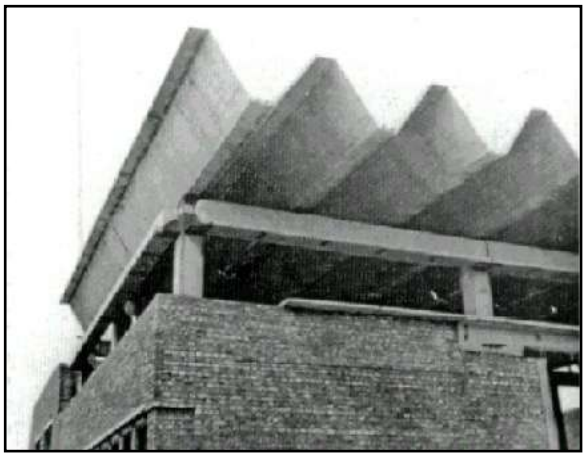


Fig .2.23 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable [39]

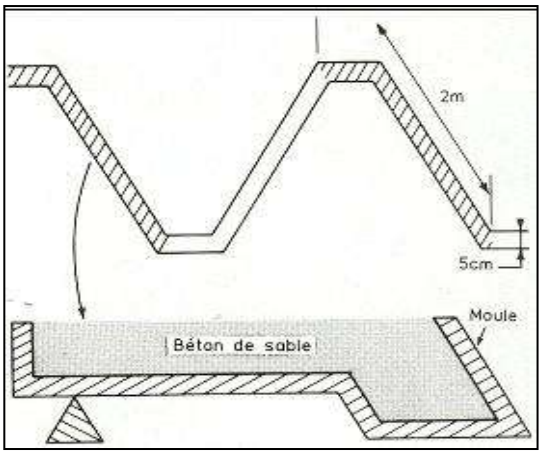


Fig. 2.24. Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable [39]

- **Ombrelles d'étanchéité**

La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité (Fig.2.25) ; il s'agit d'une voûte à caractère autoporteur constituée de plusieurs éléments (généralement trois) assemblés sur place et réalisés dans une usine de préfabrication (Fig.2.26).

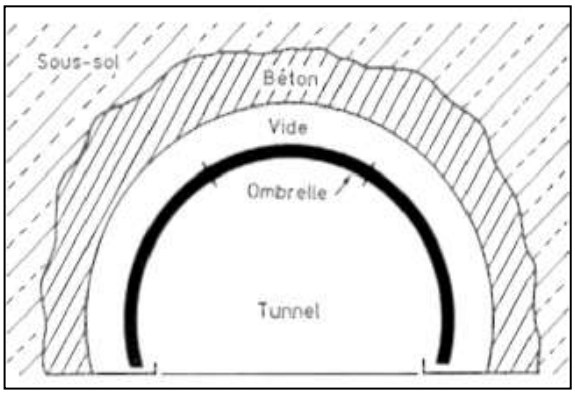


Fig. 2.25. Ombrelles d'étanchéité en place [39]



Fig.2.26. Tunnel du métro de Leningrad [39]

2.7.4 Routes, chaussé et dallage

Dans le domaine des routes et autoroutes (Fig.2.27 et 2.28), dans les aérodromes et en bâtiment, les BS peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.)[39].

L'utilisation de BS dans ces domaines se trouve en premier lieu justifiée par l'économie sur le coût des matériaux, la facilité de mise en œuvre et la qualité esthétique des produits. Dans le cas des structures de chaussées ou des dallages utilisant le BS, une étude de dimensionnement est nécessaire. Les calculs doivent être réalisés en respectant les normes et les règles en vigueur, notamment celles des performances mécaniques.



Fig. 2.27. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface [39]

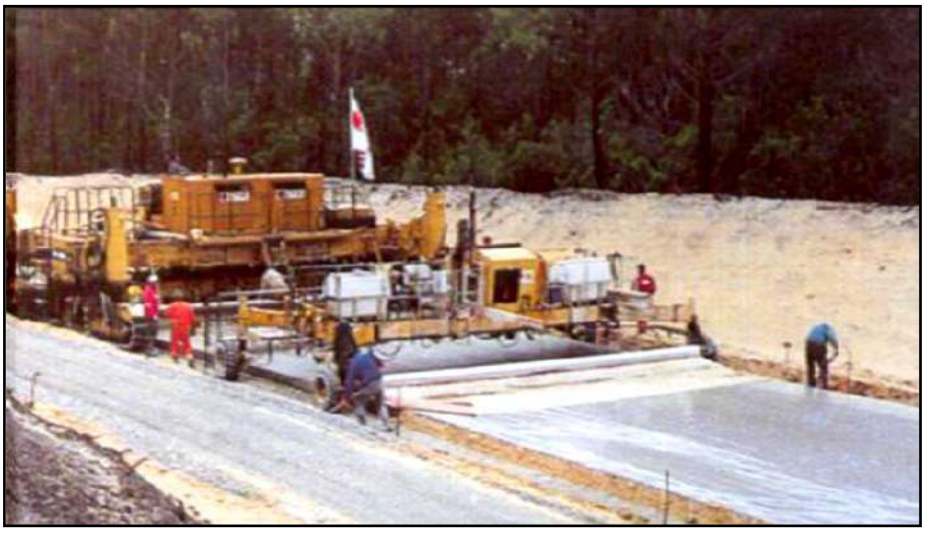


Fig.2.28. Déroulement d'un film polyane (cure) [39]

2.7.5 Autres applications

L'utilisation du BS peut s'étaler aux applications spéciales telles que : les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel et les accessoires de VRD (Voiries, Routes et Divers). Le BS peut constituer une réponse technique et économique avantageuse pour certains domaines

d'ouvrages d'art privilégiant les qualités de maniabilité et d'esthétique. La réalisation des ouvrages d'art nécessite des bétons de hautes performances et très hautes performances. Formuler un BS de hautes performances est évidemment contrarié par l'absence partielle ou totale de gravillons. Mais on peut optimiser le squelette granulaire des granulats du BS par l'utilisation des éléments fins, qui limitent en même temps le rapport eau/ciment sans affecter d'une manière considérable la maniabilité [50].

Dans le domaine de préfabrication d'accessoires de VRD, le BS est plus convenable notamment dans la préfabrication de tuyaux (Fig.2.29), de regards et tout accessoires utilisés dans les canalisations étanches d'assainissement destinés à l'évacuation des eaux usées ou des eaux pluviales (Fig. 2.30). Toutefois, il existe encore d'autres applications qui pourraient trouver intérêt à utiliser le BS tels que : les travaux souterrains (tunnels, galeries, collecteurs,..), les barrages et les travaux portuaires [39].

Cependant, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en BS. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

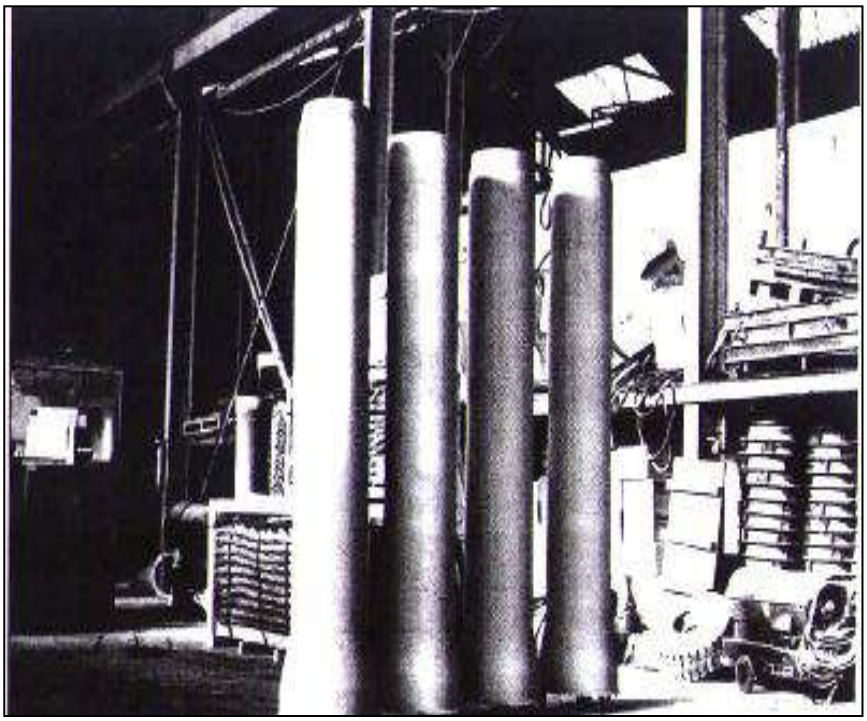


Fig.2.29. Conduite en béton de sable armé [39]

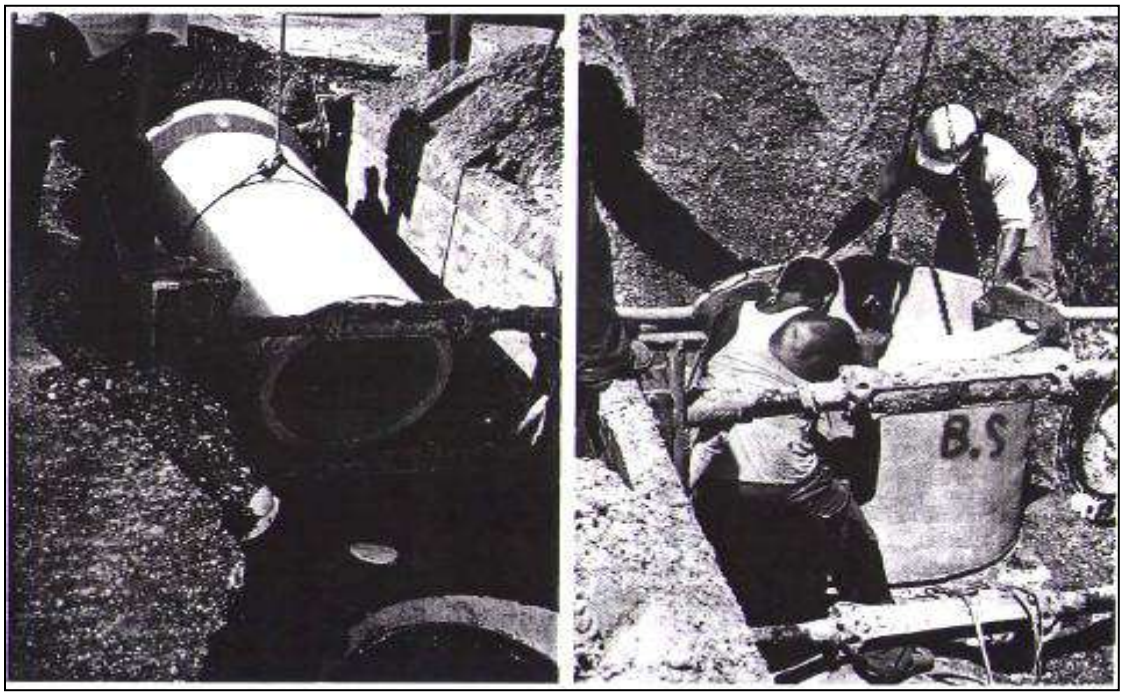


Fig.2.30. Pose de conduite d'assainissement et regards de visite en béton de sable [39]

2.7.6 Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des BS par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du BS répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

2.7.6.1 Béton de sable projeté

La technique de la projection de béton est apparue au début de vingtième siècle aux Etats-Unis et en France. Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes [39].

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (Fig.2.31). Par sa finesse granulométrique, le BS représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillages denses. Le faible taux de perte liée à l'utilisation de BS 20 projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilité en fait du BS projeté une solution adapté à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels [39].

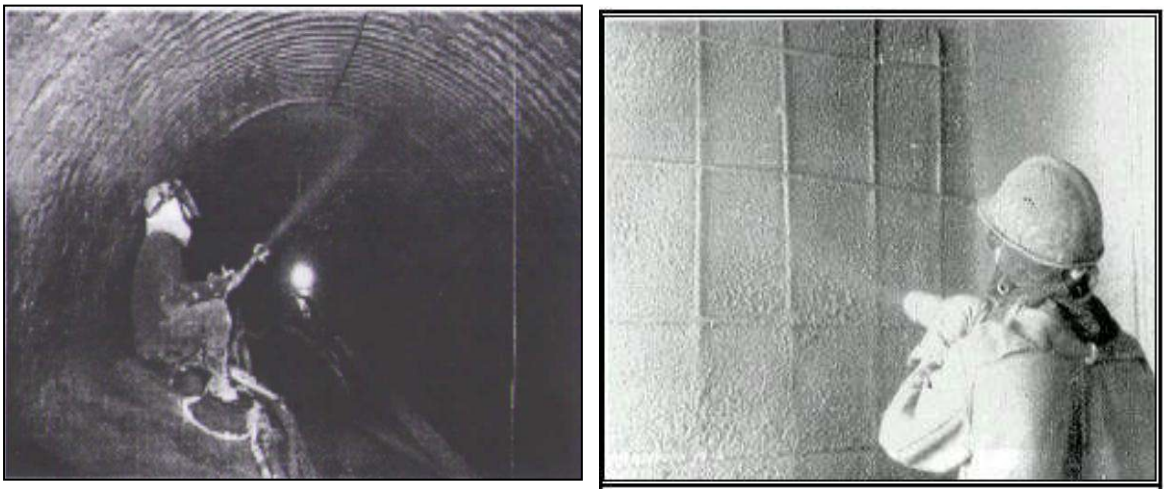


Fig.2.31. Le béton de sable en projection [39]

2.7.6.2 Bétons de sable fluides

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation [51].

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants afin d'éviter l'ajout excessive et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire.

Les bétons de sable fluides sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous-œuvre. Les bétons de sable fluides sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'auto-nivellement est un atout considérable. L'intérêt réside dans les avantages suivants :

- Rapidité et simplicité d'exécution ;
- Limitation des moyens en personnel et en matériels ;
- Nuisances réduites (absence de vibration).

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétons), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de BS.

Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des BS, il pourra être mieux adapté aux cas suivants :

- Risques de ségrégation préjudiciables ;

- Forte densité de ferraillages ;

- Recherche d'un produit fini.

Le BS fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BS nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques [51].

Indépendamment à l'aspect économique et aux gains de productivité, le BS fluidifié peut être une meilleure adaptation aux plusieurs applications mal assurées par les bétons traditionnels.

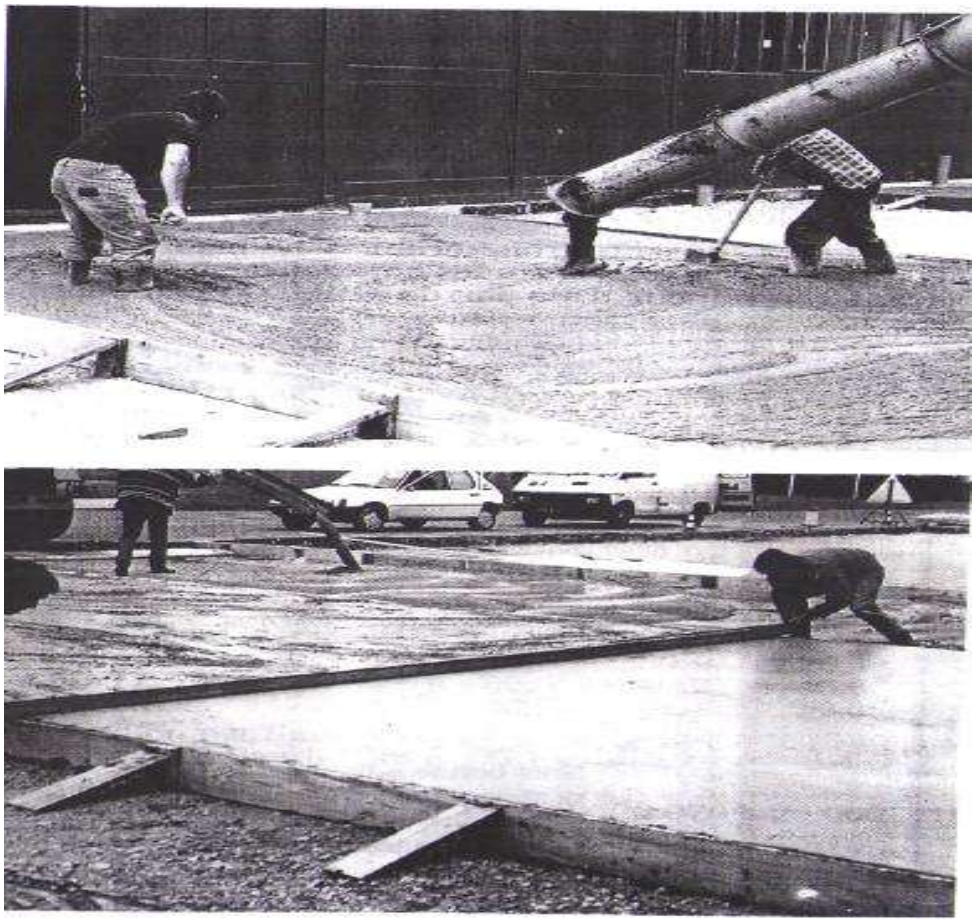


Fig. 2.32. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon) [39]

2.8 Intérêts et limites des bétons de sable

2.8.1 Intérêt des bétons de sable

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Cependant il exige, parfois, des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques :

- ✓ **La maniabilité** : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.
- ✓ **La cohésion et l'absence de ségrégation**: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.
- ✓ **La petite granulométrie et la faible dimension des grains** : le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en oeuvre des structures à fortes densités de ferraillage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.
- ✓ **Le transport** : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport faibles ce qui permet son transport à des distances lointaines.
- ✓ **L'aspect de surface**: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines.

2.8.2 Limites des bétons de sable

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques [52].

- **Raisons économiques :** l'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

- **Raisons techniques :** On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

2.9 Méthodes de formulation des bétons de sable

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques. [39]

Dans le cas du BS (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment.

Deux types d'approches de formulation sont présentées : une approche théorique, basée essentiellement sur l'optimisation de la compacité du BS en partant de la relation de Caquot et une méthode expérimentale, basée sur la réalisation de gâchées.

2.9.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc

diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [53] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/Dmax).

$$V=V_0 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/5} \text{.....(Equation 2.1)}$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

D_{max} : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

2.9.1.1 Dosage en fines d'un béton de sable

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 m m et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.
2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80m m et le diamètre maximal du sable Dmax , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 mm. provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80m m et l'étendue du sable comprise entre 80 m m et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V= 0.75\ (0.08/D)^{1/5} \text{ .....(Equation 2.2)}$$

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80m m et Dmax

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7÷0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80m m, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires. En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80m m) et le volume des vides associé a l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/D_{max})^{1/5} \quad \text{(Equation 2.3)}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente (Fig.2.33).

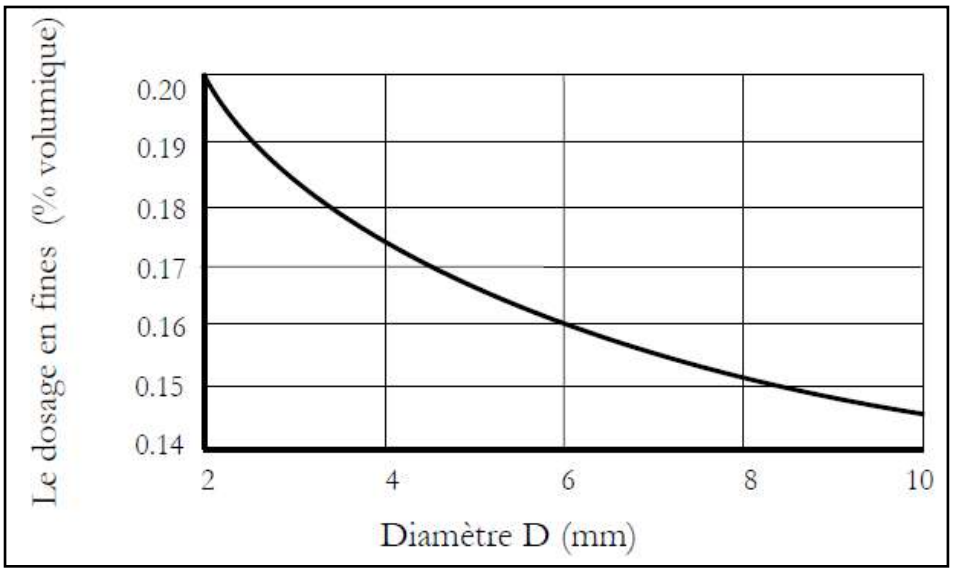


Fig.2.33. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [39]

2.9.1.2 Dosage en eau d'un béton de sable

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v

$$(e + v)_{min} = 0.8\ (d/D_{max})^{1/5} \quad \text{(Equation 2.4)}$$

Cette formule exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60 / (f)) \text{ mm} \times \rho \quad \text{.....(Equation 2.5)}$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

ρ : Densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la figure 2.34 le montre :

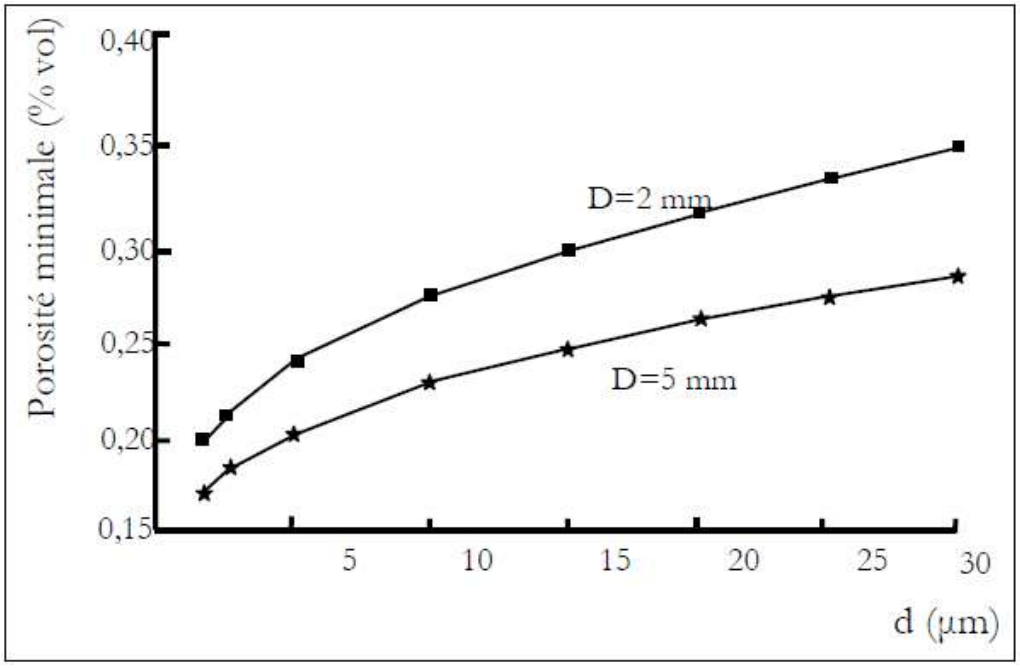


Fig.2.34.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [39]

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v).

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure 2.35 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

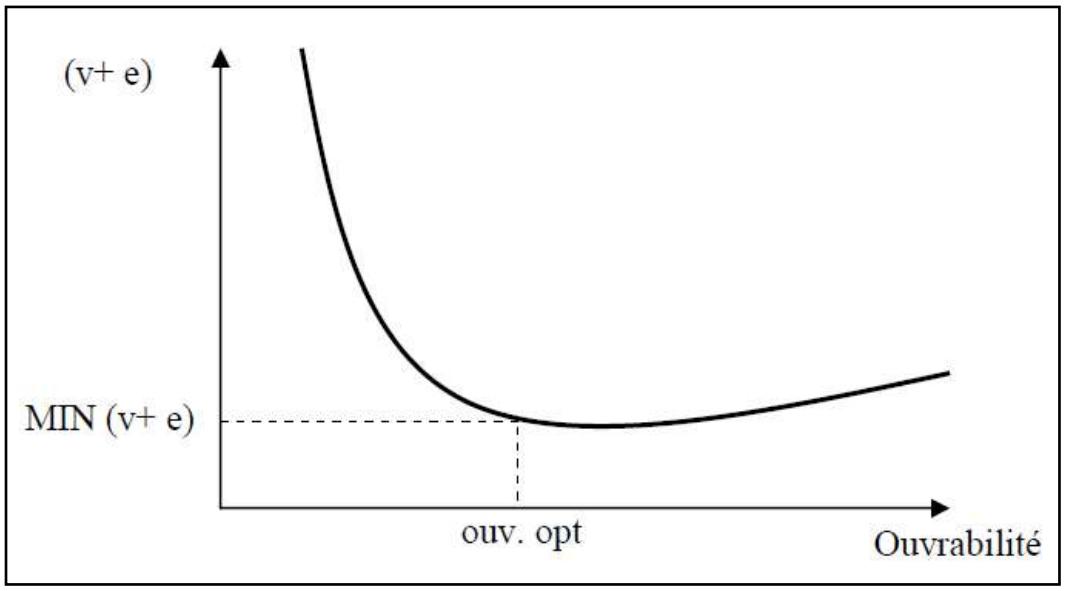


Fig.2.35. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [39]

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à (e+v)min, alors pour des quantités d'eau supérieures à celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée.

Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

[Vides] = K [eau] …… (Equation 2.6)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

2.9.1.3 Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, ($1m^3$), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide).

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m^3).

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80mm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

2.9.1.4 Estimation de la résistance en compression

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.
Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [53] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf \times Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad \text{……. (Equation 2.7)}$$

Avec:

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;
E : dosage en eau total (l/m^3) ;
V : air piégé (l/m^3) ;
C : dosage en ciment (kg/m^3) ;
Rb : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).
Avec :
K1 = Kcv (CV/C)+Kfs (FS/C) ;

0.2< Kcv<0.4 2< Kfs<3.3 K1 £ 0.5
K2= Kfil (Fil/C) ;
0< Kfil £ 0.4 K1<0.2
K1 : coefficient pouzzolanique
K2 : coefficient d'activité du filler calcaire. (Présenté sur la figure 2.36 suivante)
Kcv, Kfs, Kfill : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.
CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents

coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente [53], alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

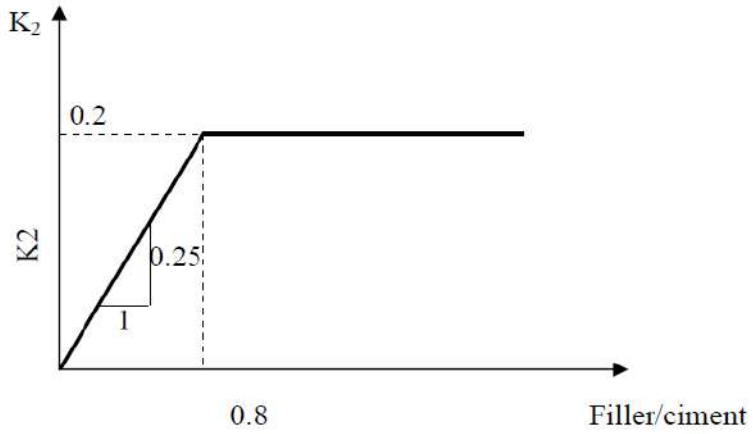


Fig.2.36. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [39]

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples

· Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.

· Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

La figure 2.37 suivante résume les différentes étapes possibles d'un organigramme utilisé pour l'estimation de la résistance à la compression du béton de sable [39]

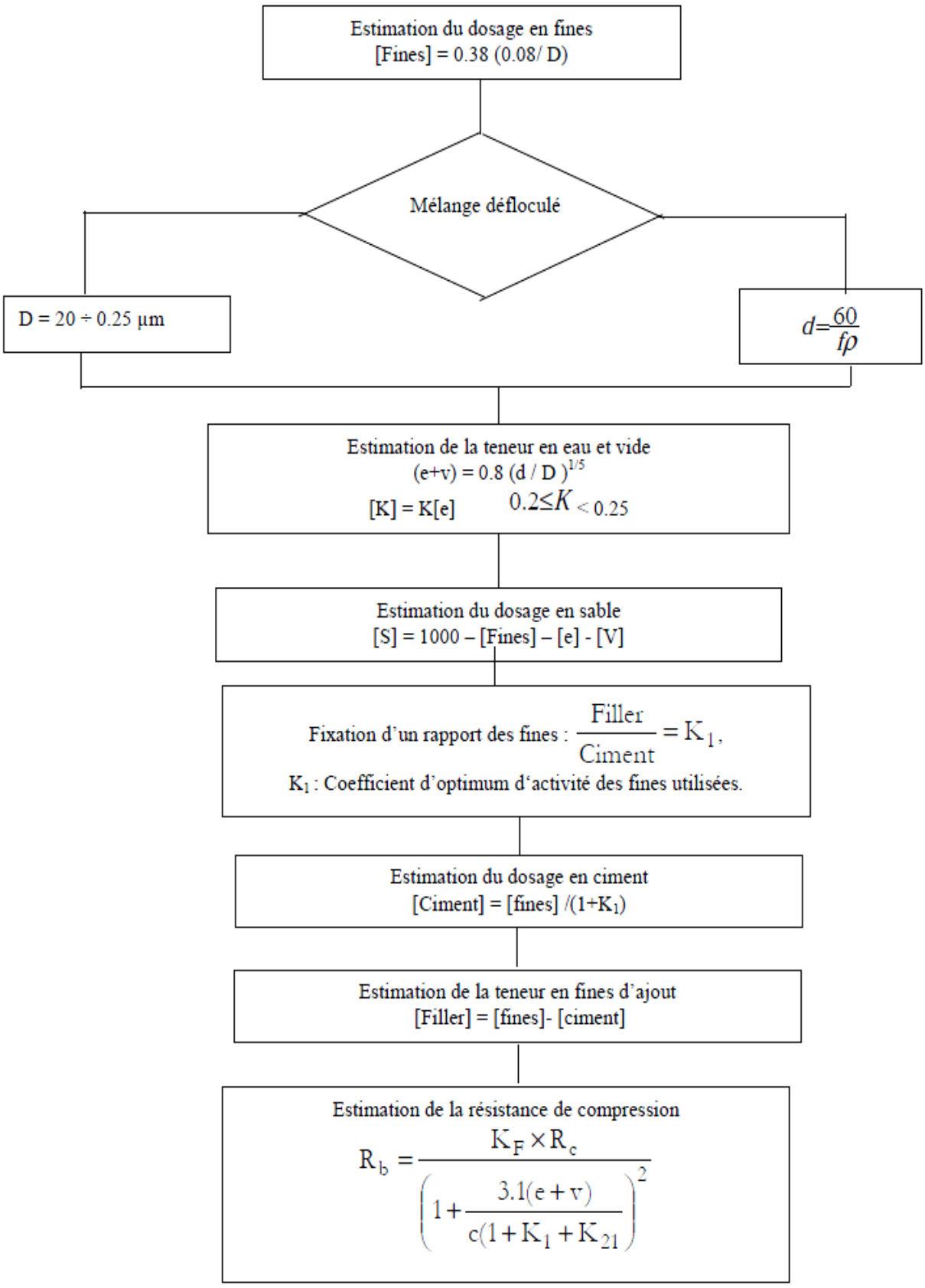


Fig.2.37. Organigramme de la méthode théorique pour l'estimation de la résistance à la compression du béton de sable [39]

2.9.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction [39] .

2.9.2.1 Les différentes étapes de la formulation

2.9.2.1.1 Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

a) Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m^3).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton; on aboutit à la relation suivante :

$$V_{air} + V_C + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litres). } \ldots\ldots \text{ (Equation 2.8)}$$

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$Msable = MVA * Vsable\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.9)}$$

Msable: masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V sable : volume du sable. Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m^3).

$$MVAT = m_{ciment} + m_{eau} + m_{adj} + m_{sable} \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.10)}$$

d) Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (1)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à10 S.

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{sable}\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.11)}$$

Où

S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 2). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 2) Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable.

2.9.2.1.2 Détermination du dosage en fines d'addition

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1}\text{-}(MVAT_{i-1}\text{-}MVAR_{i-1}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées:

- Fine d'addition N° 1 : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m^3 de fines. (Figures 2.38 et 2.39)

- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.
- **Fine d'addition N° 3 :** Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m3de fines.

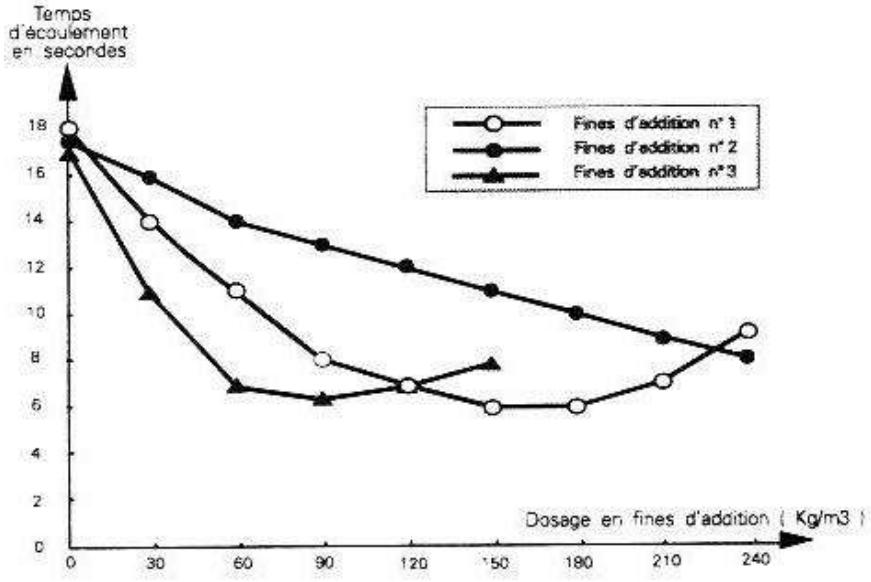


Fig.2.38. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [39]

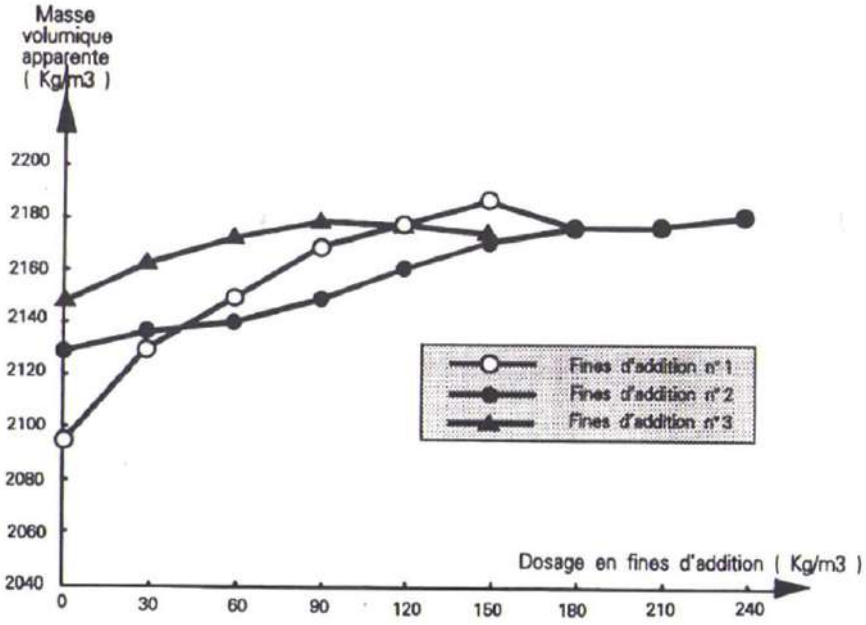


Fig.2.39. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [39]

2.10 Conclusion

Malgré l'insuffisance des résultats auxquels ont aboutissent les différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans certains éléments porteurs. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance.

De même il faut veiller à ce que le béton soit le plus compact possible pour qu'il puisse manifester de bonnes performances. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire et allante au plus gros diamètre possible. Pour combler les vides intergranulaires, il faut prévoir des fines de bonne nature, de finesse élevée et avec des dosages convenables.

L'augmentation de la compacité par ajout diminue la maniabilité, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la maniabilité et sa compacité.

Pour des dosages en ciment compris entre 250 et 400 kg/m_3, la résistance à la compression atteinte à 28 jours se situe entre 12 et 45 MPa selon la composition, l'adjuvant et le mode de la mise en œuvre.

D'autres essais tels que le retrait, le fluage, l'adhérence aux armatures, la microstructure et la durabilité ont été entreprises mais ils n'ont fait pratiquement l'objet que de peu d'études récentes. Les résultats obtenus sont limités à des matériaux bien déterminés et à des compositions bien précises.

En ce qui concerne la fissuration, nous n'avons rencontré que des études faites sur des bétons ordinaires, mais comme nous l'avons vu, les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de tailles différentes et avec compositions diverses, ce qui explique les différences trouvées entre les résultats, sans oublier l'hétérogénéité du matériau.

Enfin, nous pouvons dire que le développement de ce matériau nécessite cependant des connaissances plus approfondies.

Chapitre 03:
Valorisation des déchets plastiques dans les matériaux cimentaires

3.1. Introduction

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets d'emballages plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage. Les matériaux de construction peuvent représenter un débouché intéressant. En effet, des études antérieures [55-57] ont montré qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons et même d'autres types de déchets comme les granulats recyclés de démolition et/ou de construction [57, 58].

3.2 Influence de la poudre plastique sur les propriétés des matériaux cimentaire

3.2.1Etats frais

a) L'ouvrabilité

A.M .Da Silva et al. [59] ont étudié l'influence de substitution du sable par déchets plastiques fins (PET, polyfilin et polypropylène) sur la maniabilité du mortier de ciment. Ils ont trouvé que la maniabilité du mortier est augmentée en fonction d'augmentation de pourcentages de déchets plastiques.

Al-Hachemi et al. [60] ont trouvé aussi que la substitution du sable par un pourcentage de 80% de polyéthylène et 20% de polystyrène induit une augmentation de la maniabilité du béton.

b) La densité

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des déchets plastiques en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire.
Iucolano et al. [61] ont trouvé que la densité du mortier est diminuée d'une façon considérable en fonction de substitution de 10%, 15% , 20% , 25% et 50 % du sable par la poudre en plastique recyclé (type polyéthylène et polypropylène)(Fig.3.1).

A.M. Da Silva et al. [59] ont étudié l'influence de substitution du sable par déchets plastiques fins (polyfilin et polypropylène) sur la densité du mortier de ciment. Ils ont trouvé que la densité du mortier est diminuée en fonction d'augmentation de tous les pourcentages du plastique (Fig.3.1). Hannawi et al.[62] ont aussi trouvé que la substitution du 3% ,10% ,20% et 50% du sable par des déchets de grains plastiques (PET et Polycarbonate)induit une diminution considérable de la densité du mortier (Fig.3.2).

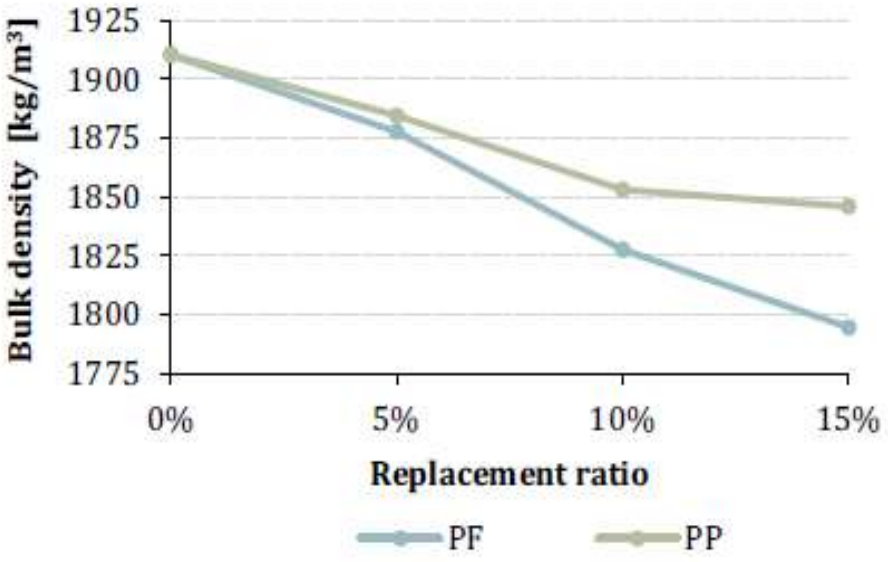


Fig.3.1. Densité des mortiers à base de déchets plastiques (PP et PF)[59]

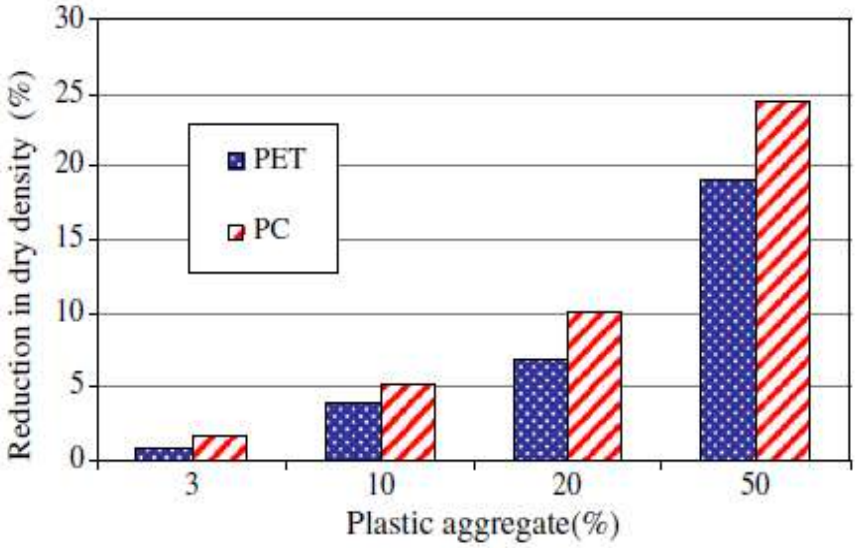


Fig.3.2. La dégression de la densité des mortiers à base de déchets plastiques (PET et PC) [61]

Ruiz-Herrero et al. [63] ont étudié l'influence de 2.5%,5%,10%, et 20% de déchets plastiques recyclés (PVC, PE et PVC+PE sous forme de poudre) sur la densité du mortier et béton cellulaire. Ils ont constaté que quelque soit le type de déchets plastiques incorporés, les densités du mortier et du béton est diminuer considérablement en fonction de l'augmentation du pourcentage de déchets (Fig.3.3, Fig.3.4).

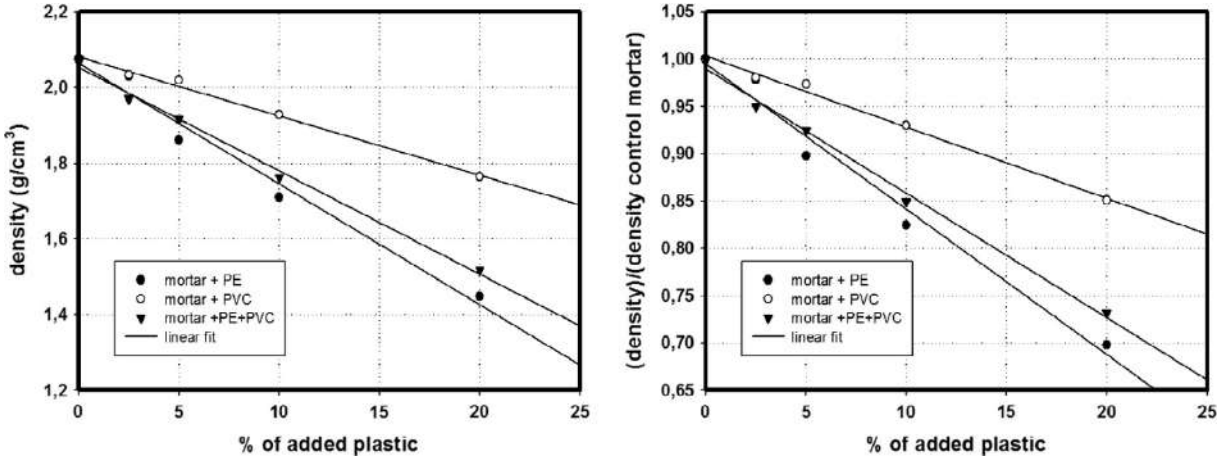


Fig.3.3. Densité des mortiers à base de déchets plastiques (PVC, PE et PVC+PE) [63]

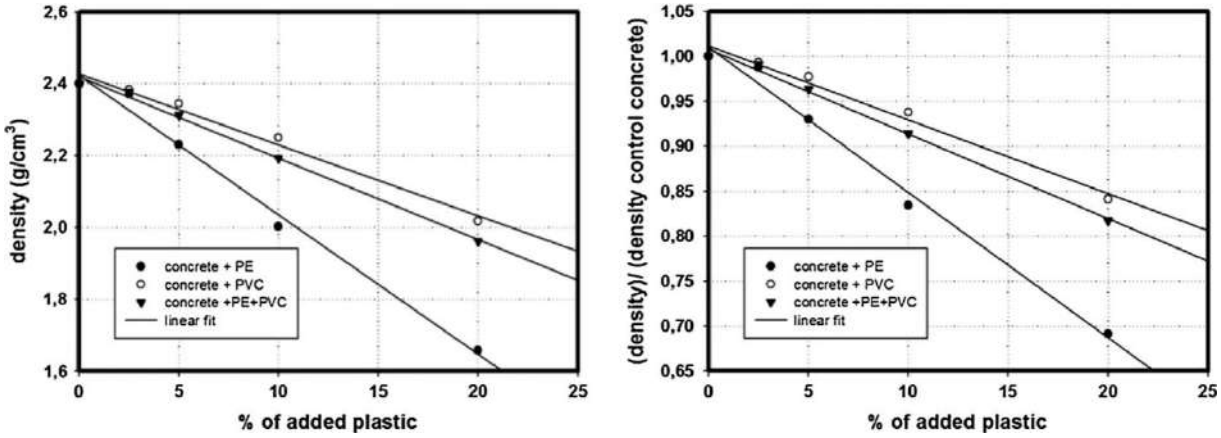


Fig.3.4. Densité de bétons à base de déchets plastiques (PVC, PE et PVC+PE) [63]

c) L'air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange.

Siddique et al. [64] ont trouvé que les bétons à base de déchets plastiques (sous forme d'une poudre) contient plus d'air occlus que celle du béton de référence même sans l'utilisation de l'adjuvant entraîneur d'air (AEA). Ces chercheurs pensent que la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de déchets plastiques sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des déchets plastiques.

3.2.2 Etats durci

a) La résistance à la compression

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis, est la résistance en compression à un âge donné. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, l'étude de cette résistance en compression peut permettre d'avoir une idée globale sur la qualité du béton. On verra que la résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc.

Rahmani et al. [65] ont étudié l'influence des déchets plastiques (PET) sur la résistance à la compression du béton .Ils ont observé une augmentation de la résistance à la compression en fonction de substitution de 5 % de PET par le sable (Fig. 3.5).

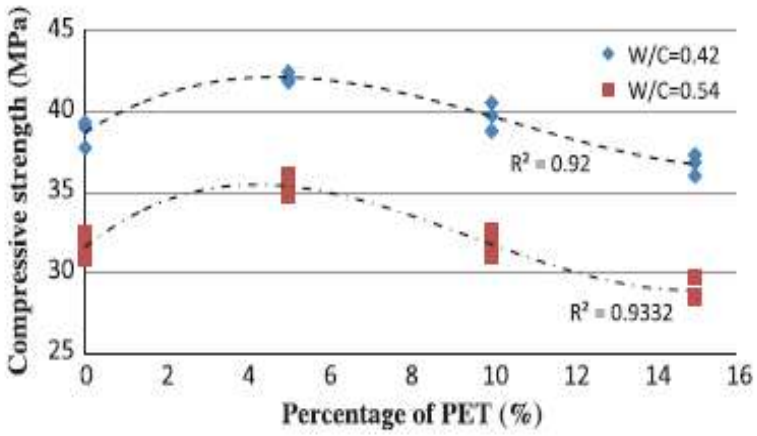


Fig.3.5. Résistance à la compression de bétons à base de déchets plastiques (PET) [65]

Galvão et al. [66] ont étudié l'effet de substitution de 0.5%, 1%, 2.5%, 5% et 7.5% du sable par PEBD sur la résistance à la compression du béton. Ils ont trouvé que le béton à base de 0.5%,1% et 2.5% présente des résistances plus importantes que celles du béton témoin. Par contre les résistances à un pourcentage de 5% et 7.5% de substitution sont diminuées par rapport au béton de référence (Fig. 3.6).

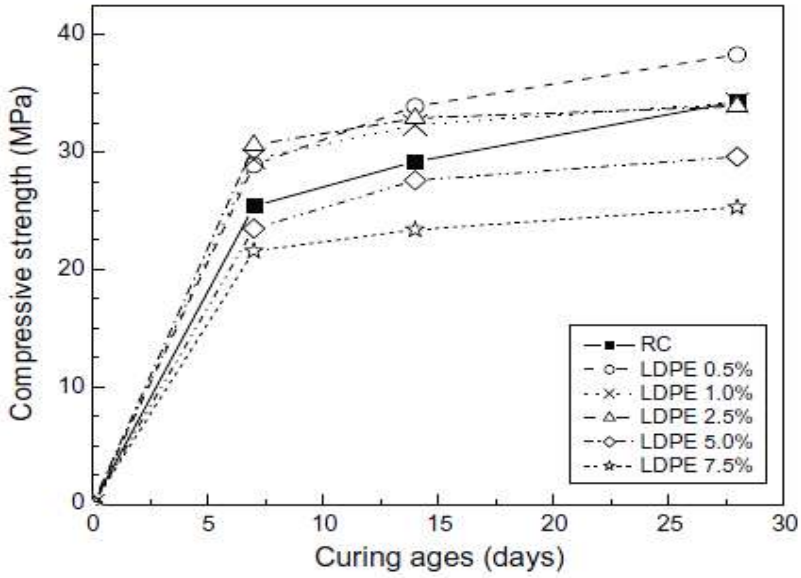


Fig.3.6. Résistance à la compression de bétons à base de déchets plastiques (PEBD) [66]

Ruiz-Herrero et al. [63] ont étudié l'influence de 2.5%, 5%, 10% et 20% de déchets plastiques recyclés (PVC, PE et PVC+PE sous forme poudre) sur la résistance à la compression du mortier et béton cellulaire. Ils ont constaté que la résistance à la compression du mortier et du béton est diminuée considérablement en fonction de l'augmentation du pourcentage de déchets plastiques (Fig.3.7).

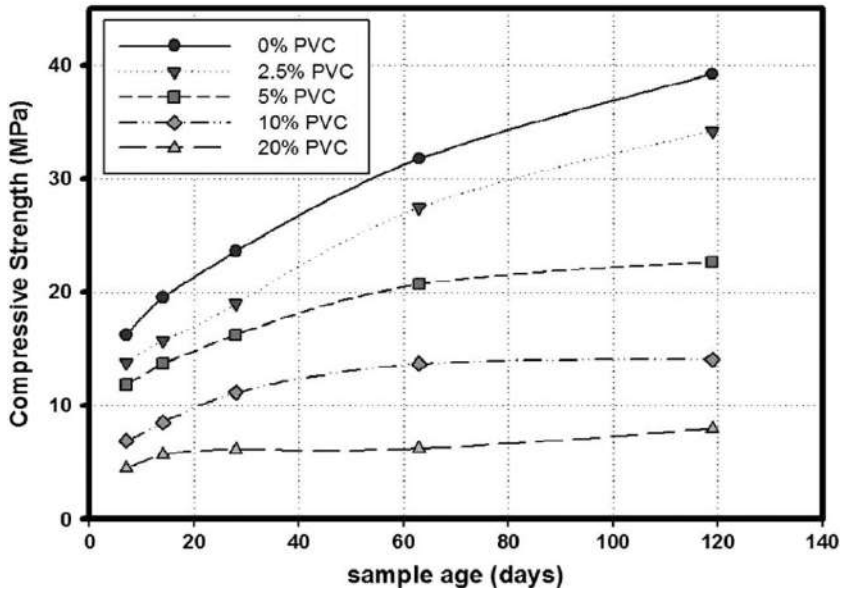


Fig.3.7. Résistance à la compression des bétons à base de déchets plastiques (PEBD) [63]

Comme le montre la figure 3.8, A.M. Da Silva et al. [59] ont observé une chute de résistance à la compression du mortier à base de 5%, 10% et 15 % de déchets plastiques fins (polyfilin et polypropylène).

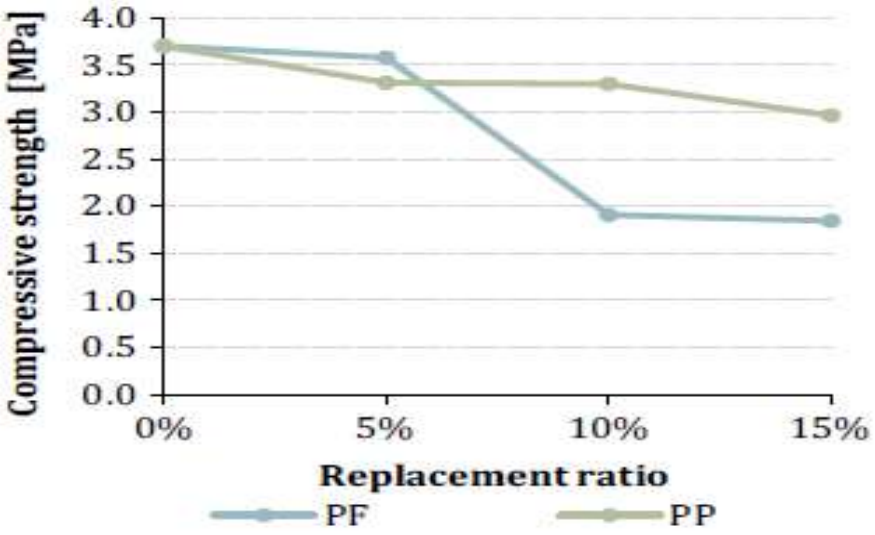


Fig.3.8. Résistance à la compression des mortiers à base de déchets plastiques (PF et PP) [59]

Iucolano et al. [61] ont aussi observé des chutes très importantes de la résistances à la compression pour des mortiers a base de 10%, 15%, 20%, 25%, 33% et 50% des déchets de poudre plastique(type polyéthylène et polypropylène) , qui est estimée à 84.86 % pour un pourcentage de 50% de substitution.

b) La résistance à la traction par flexion

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître. Elle est généralement indirectement déterminée par le biais d'essais de traction par flexion ou de traction par fendage dit brésilien. Quant à l'essai de traction directe, il est certainement le plus noble en la matière, mais il demeure délicat à réaliser car il nécessite le collage de têtes de traction parfaitement centrées et doit être réalisé sans effort de flexion parasite.

Ruiz-Herrero et al. [63] ont constaté que la résistance à la traction par flexion du mortier et du béton est diminuée en fonction d'incorporation de 2.5%, 5%, 10% et 20% de déchets plastiques recyclés (PVC) (Fig.3.9).

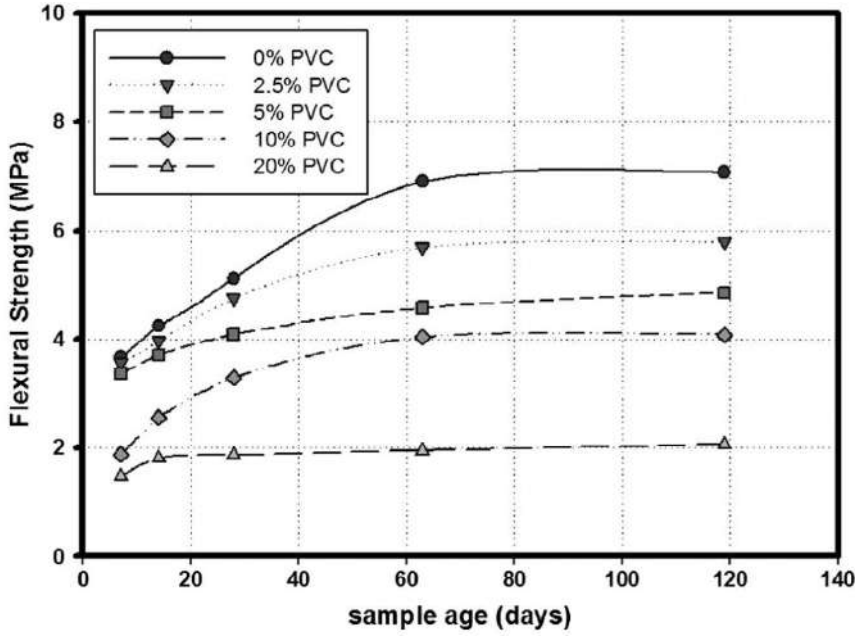


Fig.3.9. Résistance à la traction des mortiers à base de déchets plastiques (PVC)[63]

A.M. Da Silva et al. [59] ont trouvé une chute de résistance à traction par flexion du mortier à base de 5%, 10% et 15 % de déchets plastiques fins (polyfilin et polypropylène)(Fig.3.10).

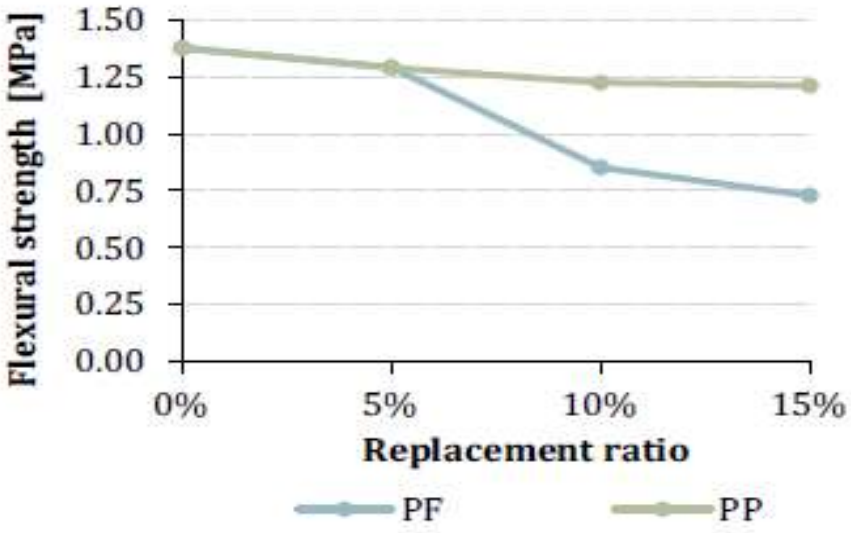


Fig.3.10. Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de déchets plastiques (PF et PP)[59]

Iucolano et al. [61] trouvent aussi des diminutions importantes de la résistance à la traction par flexion du mortier en fonction d'augmentation du pourcentage de substitution du sable par la poudre plastique. Hannawi et al. [62] ont remplacé 3%, 10%, 20% et 50% du sable par polycarbonate (PC) et polyéthylène téréphtalate (PET), ils ont trouvé que la résistance à la

traction par la flexion du mortier est diminuée de 9.5 % et 17.9% respectivement pour des remplacements de 20% et 50 % du sable par le PET, et une diminution de 32.8 % pour un remplacement de 50 % du sable par le polycarbonate (Fig.3.11).

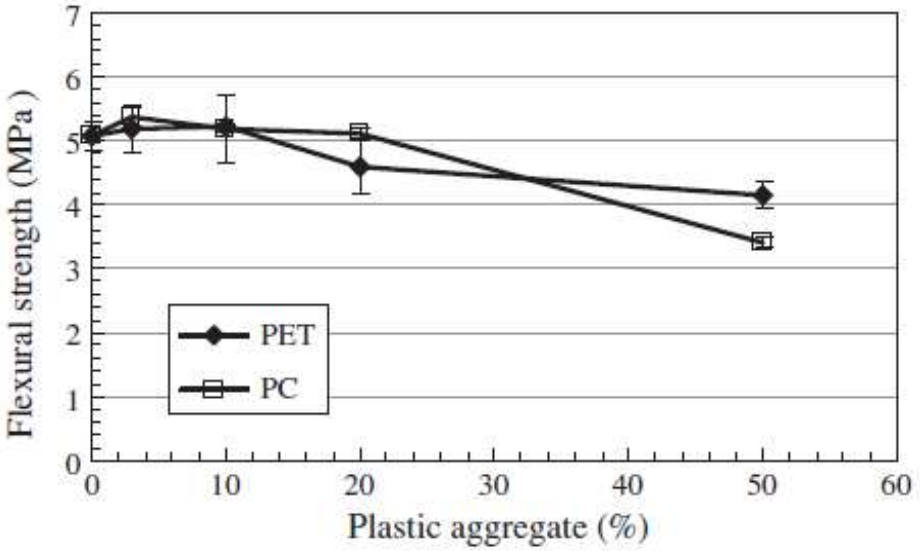


Fig.3.11. Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de déchets plastiques [62]

c) Module d'élasticité

De nombreux travaux confirment que l'incorporation de déchets plastiques dans le mortier ou béton induit une chute importante du module d'élasticité [65,66] (Fig.3.12).

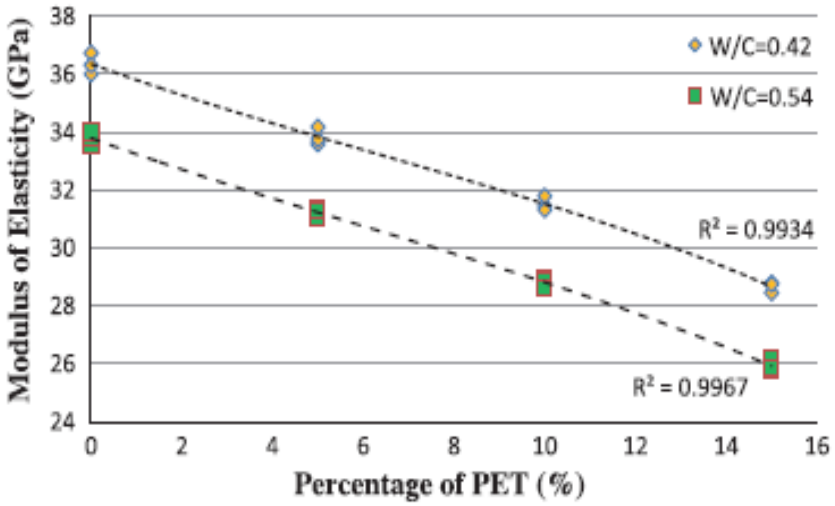


Fig.3.12. Module d'élasticité de bétons à base de déchets plastiques (PET) [65]

Hannawi et al. [62] ont étudié aussi la variation du module d'élasticité en fonction de remplacement du 3%, 10%, 20% et 50% du sable par des déchets de polycarbonate (PC) et polyéthylène téréphtalate (PET),ils ont rapporté que plus le pourcentage de substitution du sable par des déchets plastiques augment plus le module d'élasticité diminué (Fig.3.13).

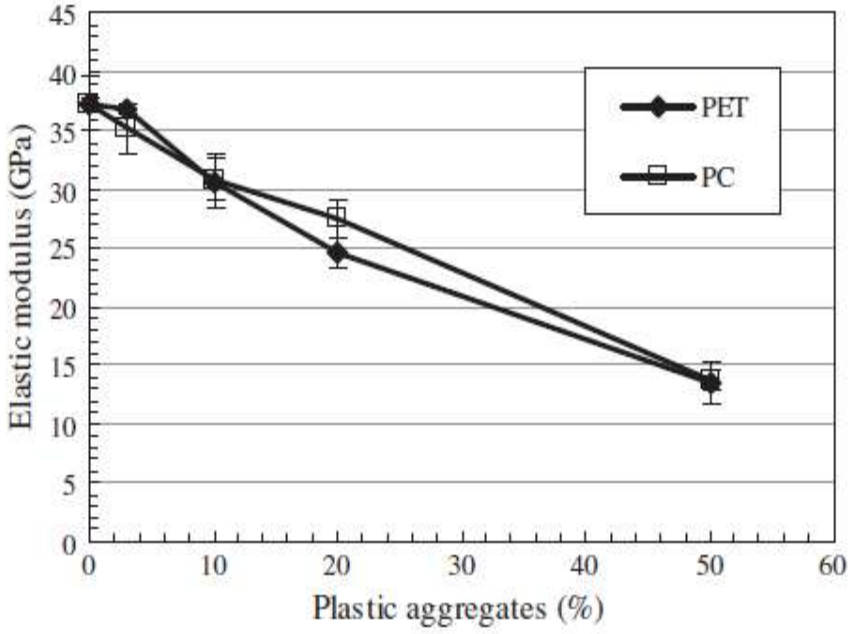


Fig.3.13. Module d'élasticité des mortiers à base de déchets plastiques (PET et PC)[62]

d) La conductivité thermique

La conductivité thermique est un des paramètres thermo physiques les plus importants pour la description des propriétés de transport de chaleur d'un matériau ou d'un composant. Cette propriété de transfert thermique est directement liée aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et à la teneur en eau, donc des conditions de conservation dans le cas d'un béton.

Ruiz-Herrero et al. [63] ont étudie l'influence de 2.5%,5%,10%, et 20% de déchets plastiques recyclé (PVC, PE et PVC+PE sous forme poudre) sur la conductivité thermique du mortier cellulaire. Ils ont constaté que la conductivité thermique du mortier et du béton est diminuée en fonction de l'augmentation du pourcentage de déchets plastiques (λ =0.7 W/mk pour les mortiers à base de 20% de PE+PVC et λ =0.8 W/mk pour 20% les mortiers à base de PE et PVC 0.8 (Fig.3.14).

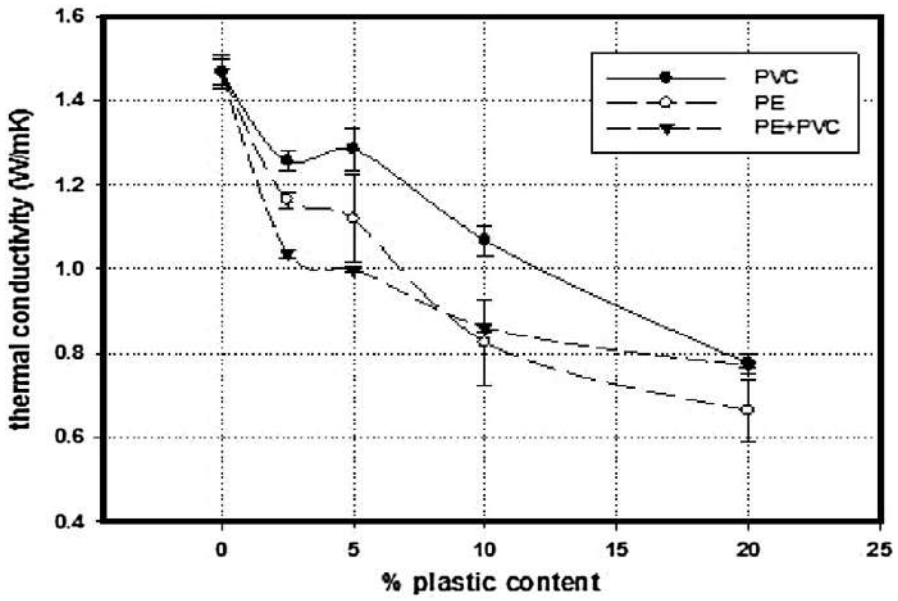


Fig.3.14. Conductivité thermique des mortiers à base de poudre plastique (PF et PET)[63]

Iucolano et al. [61] ont étudié l'effet de substitution du sable naturel par la polyoléfine et le polyéthylène téréphtalate sur la conductivité thermique de mortier .Ils ont trouvé que plus le pourcentage de déchets de poudre plastique augmente plus la conductivité thermique diminué (Fig.3.15).

Akcaozog˘lu et al [67] ont aussi rapporté les mêmes résultats avec une substitution volumique du sable par le déchet en PET. Ils ont expliqué cette diminution par la faible conductivité thermique des déchets plastiques utilisés ainsi que la porosité plus élevé.

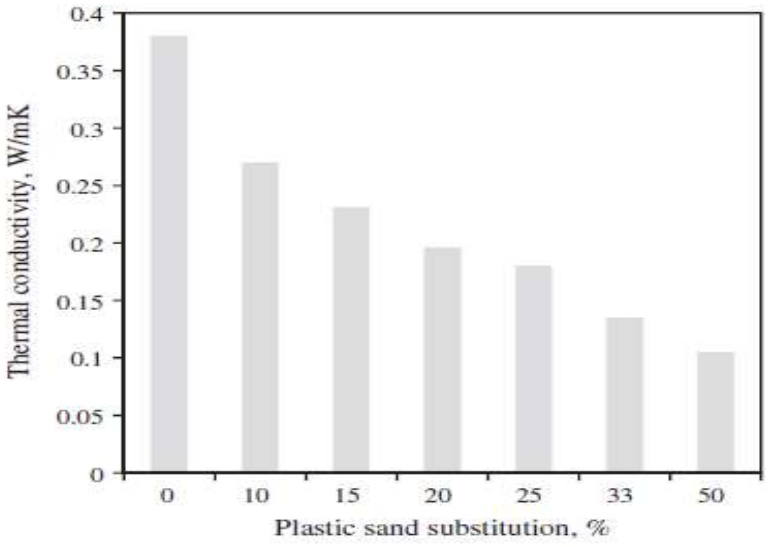


Fig.3.15. La conductivité thermique des mortiers à base de poudre plastique (PF et PET)[61]

3.2.3 Approche de durabilité

a) La porosité et microstructure

La porosité est une caractéristique très importante qui est déterminée avec une certaine mesure des propriétés mécaniques des matériaux. Les vides qui sont généralement de différentes formes et de différentes dimensions se repartissent aléatoirement et contribuent à l'hétérogénéité de la matière.

Beaucoup de chercheurs ont étudié l'influence d'incorporation de déchets plastiques sur la porosité des matériaux cimentaires [62, 68]. Ils ont constaté que la porosité du mortier est augmentée en fonction de substitution du sable par les différents déchets plastiques. F. Iucolano et al. [61] ont étudié l'influence de substitution du sable naturel par la poudre plastique (type polyoléfine et le polyéthylène téréphtalate) sur la porosité du composite. Ils ont trouvé que la porosité est augmentée en fonction d'augmentation de déchets plastiques.

La figure 3.16 ci-dessous donne une idée sur la distribution des pores dans les différents mortiers fabriqués.

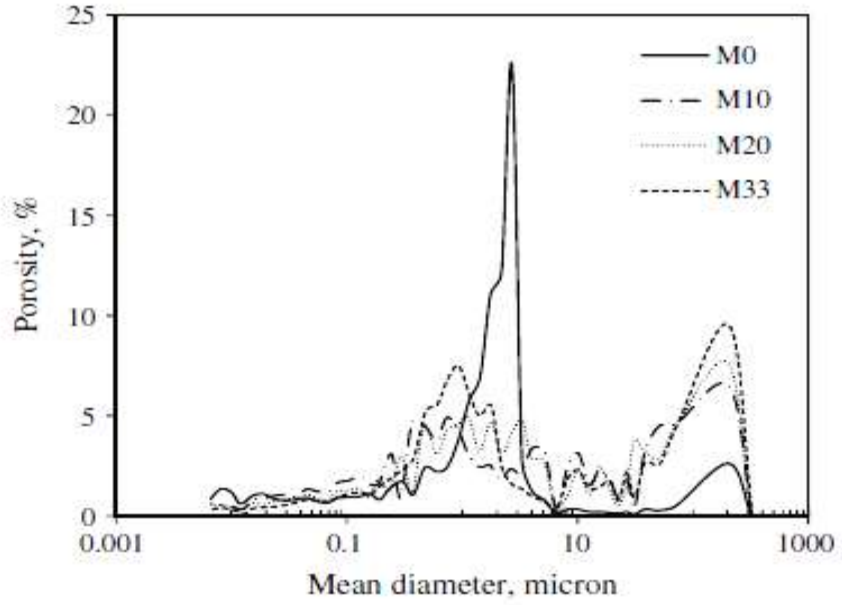


Fig.3.16. La distribution des pores des mortiers à base de déchets plastiques [61]

Ruiz-Herrero et al. [63] ont trouvé que l'incorporation de 2.5%,5%,10%, et 20% de déchets plastiques recyclé (PVC, PE et PVC+PE) dans la masse du béton cellulaire engendre une porosité importante (Fig.3.17).

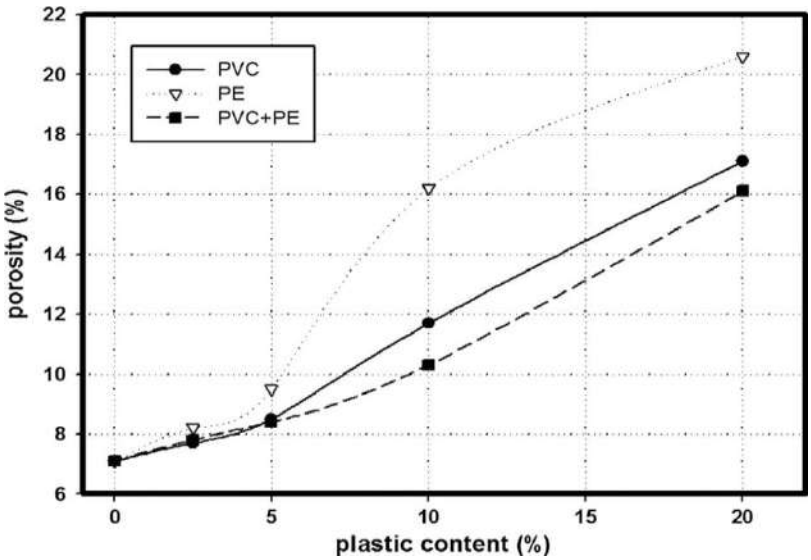


Fig.3.17 Porosité des mortiers à base de déchets plastiques (PVC, PE, PVC+PE) [63]

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée par Iucolano et al. [61], montre que la structure des mortiers à base de déchets de poudre plastique (M_{25} et M_{33}) est moins homogène, plus poreuse et moins compacte que celle du mortier de référence M_0 (Fig.3.18). On peut voir aussi la mauvaise adhésivité entre la poudre plastique à la matrice cimentaire, cette mauvaise adhérence peut s'expliquer par la lisse de la surface de la poudre plastique, ce qui diminue l'adhérence entre la pate de ciment et les grains plastiques et augmente la porosité.

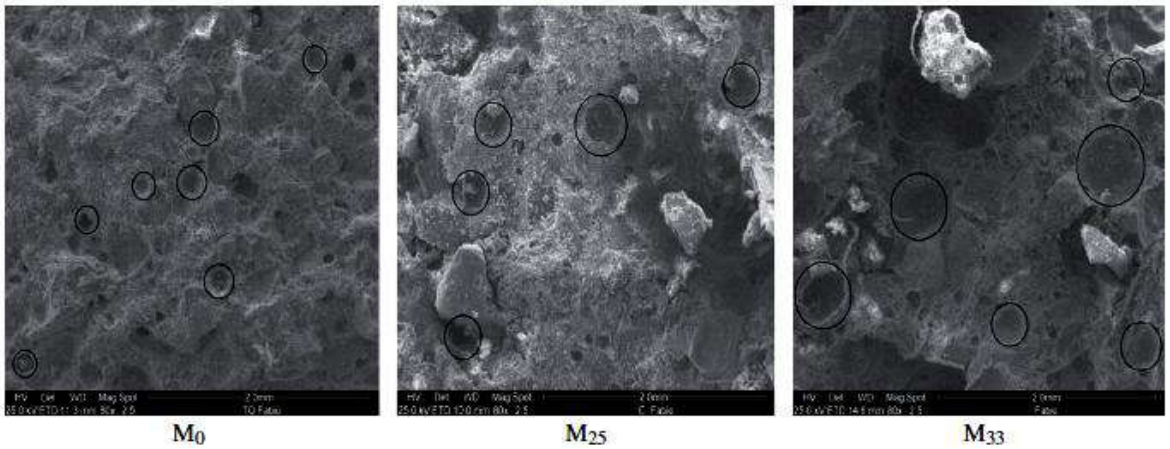


Fig.3.18. La microstructure des mortiers à base de déchets plastiques [61]

b) L'absorption capillaire

La capacité d'absorption de béton de sable donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores), c'est une manière comme une autre de tester la compacité du

mélange, plus le béton de sable est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc il est plus étanche.

Ruiz-Herrero et al. [63] ont trouvé que l'absorption capillaire du mortier et béton cellulaire à base de 2.5%, 5%, 10% et 20% de déchets plastiques recyclés (PVC, PE et PVC+PE sous forme de poudre) est augmentée considérablement en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets plastiques.

A.M. Da Silva et al. [59] ont étudié l'effet de substitution du sable par les déchets plastiques fins (polyfilin et polypropylène). Ils ont trouvé que l'absorption capillaire des mortiers est augmentée en fonction d'augmentation des déchets plastiques (Tableau 3.1)

Tableau .3.1. Coefficient d'absorption capillaire des mortiers à base de déchets plastiques [59]

Mortiers	**Coefficient d'absorption capillaire ($kg/m^2\ min^{1/2}$)**
Mortier de référence	1.34
Mortier à base de 5 % de polyfelin	1.36
Mortier à base de 10% de polyfelin	1.55
Mortier à base de 15 % de polyfelin	1.48
Mortier à base de 5 % de polypropylène	1.35
Mortier à base de 10 % de polypropylène	1.45
Mortier à base de 15 % de polypropylène	1.52

Chidiac et al. [69] ont étudié l'effet de la substitution du sable par le polyéthylène bas densité et polyéthylène haute densité (PEBD et PEHD) sur l'absorption capillaire des blocs de béton. Ils ont trouvé que le taux d'absorption d'eau augmente en fonction d'augmentation des pourcentages de déchets plastiques. Ils ont expliqué cette augmentation par la porosité plus élevée du composite obtenu.

c) Retrait

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferraillage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles entraînent souvent l'apparition de fissures précoces, d'ouverture conséquente ce qui peut nuire à la durabilité du béton.

Certains auteurs ont étudié l'influence des déchets plastiques sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton à base de déchets plastiques (sous forme des grains et poudre) est plus élevé que celui du béton de référence.

Akcaozoglu et al. [70] ont trouvé que la substitution du sable naturel par les déchets de PET induit une augmentation du retrait des bétons légers. Frigione et al. [71] ont mesuré le retrait du béton courant à base de déchets de PET. Ils ont trouvé que le retrait augment en fonction de l'augmentation du pourcentage de déchets plastiques.

d) La résistance au feu

Le béton est largement utilisé comme matériau de structure dans les ouvrages de génie civil tels que les tunnels. Ces structures peuvent être soumises aux conditions extrêmes de température, il est alors nécessaire d'évaluer la sécurité des ouvrages vis-à-vis des incendies.

Albano et al. [72] ont étudié le comportement au feu des bétons à base de différents pourcentages de déchets plastique (PET), dans un four a moufle avec des températures de 200 °C, 400 °C and 600 °C. Ils ont trouvé après l'échauffement des éprouvettes que la résistance à la compression diminuée en fonction de l'augmentation de la température. Ils ont expliqués cette diminution par l'augmentation de la porosité qui provient de l'augmentation de la température.

3.3 Influence des déchets de fibres plastiques sur les propriétés des matériaux cimentaires

3.3.1 Etats frais

a) L'ouvrabilité

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet d'addition des fibres plastiques sur l'ouvrabilité du béton. Ils ont observé que l'ouvrabilité est diminuée considérablement en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres plastiques [73-75].

Pešic´ et al. [76] ont étudié l'influence d'ajout de 0.40%, 0.75% et 1.25% de fibres plastiques recyclés (type PEHD) sur l'ouvrabilité du béton traditionnel. Ils ont constaté que l'affaissement de béton est diminué en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout de fibres plastiques. Yin et al. [77], à l'aide des mesures de l'affaissement au cône d'Abrams. Ils ont remarqué que la maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du dosage de

fibres de plastiques. Bouziani et al. [78] ont étudié l'effet de l'addition des fibres de polypropylènes sur la maniabilité des bétons de sable. Ils ont trouvé que plus le pourcentage des fibres augmente, plus la maniabilité diminué.

Comme indique la figure 3.19 ci-dessous, Soroushian et al. [79] ont étudié l'effet de plusieurs types de fibres plastiques sur l'affaissement du béton ordinaire, et ils ont constaté que l'addition de ces fibres influe négativement sur l'ouvrabilité du béton.

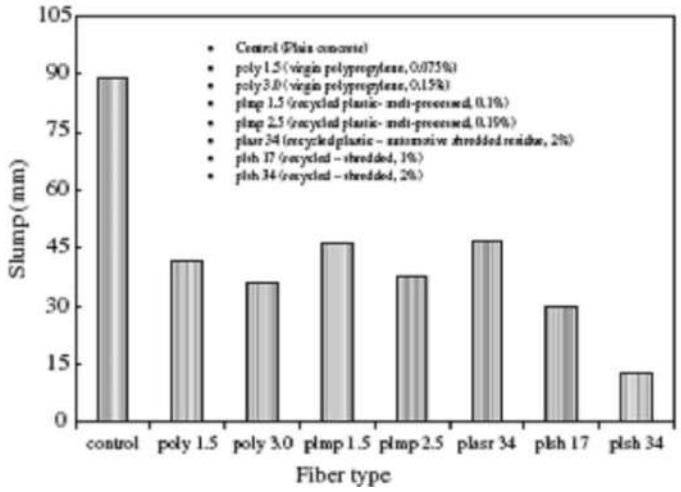


Fig.3.19.L'affaissement de bétons à base de différents types de fibres plastiques [79]

Al-Hadithi et al. [80] ont étudiés l'influence d'ajout de fibres plastiques de type PET de ((2cm de longueur) 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25%, 1.5%, 1.75% et 2% de pourcentage) sur l'étalement du béton autoplaçant. Ils ont constaté que l'étalement est diminué considérablement en fonction de l'augmentation du pourcentage de fibres plastiques (Fig.3.20)

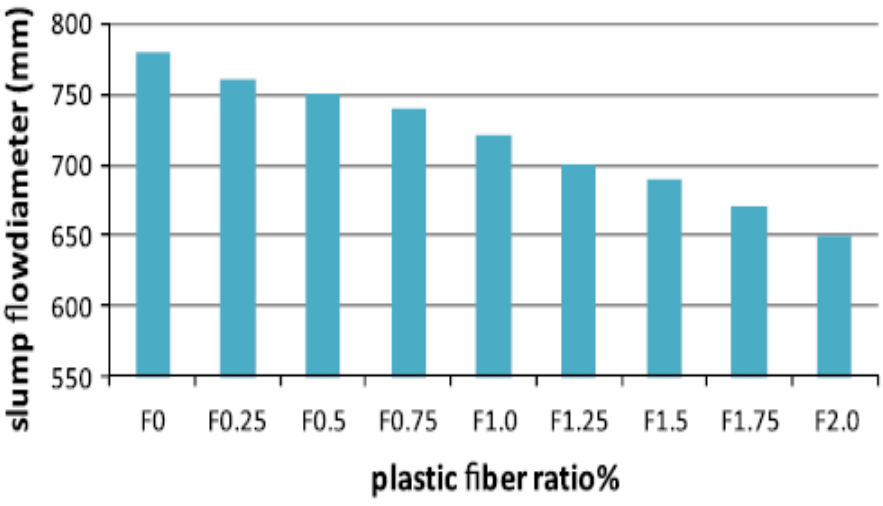


Fig.3.20. Etalement des BAP à base de fibres plastiques (PET)[80]

b) La densité

Comme le montre la figure 3.21 ci-dessous, Pereira de Oliveira et al. [81] ont observé une légère diminution de la densité des mortiers à base de 0.5%, 1% et 1,5% de fibres plastiques (PET).

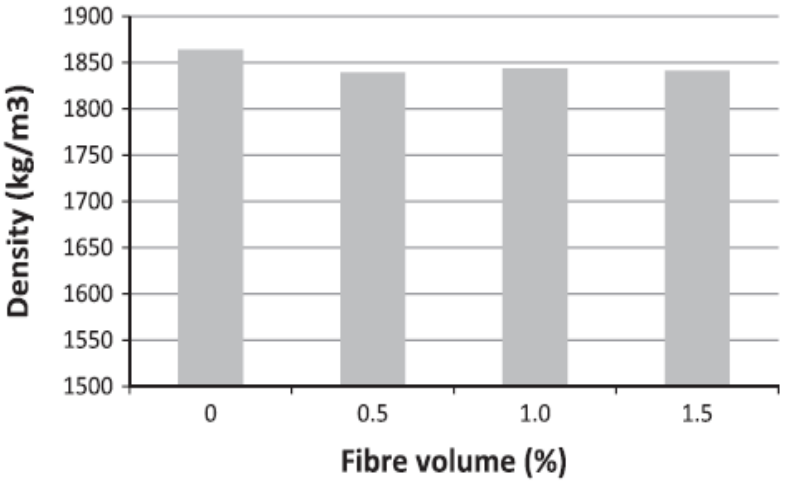


Fig.3.21. Densité des mortiers à base de fibres plastiques en PET [81]

Al-Hadithi et al [80] ont trouvé aussi que la densité de BAP est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres plastiques de types PET (Fig.3.22).

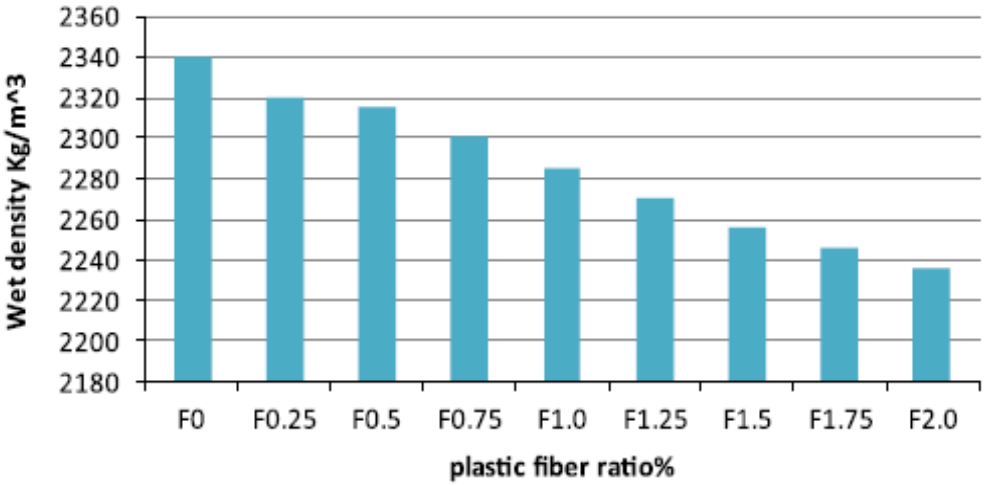


Fig.3.22. Densité des BAP à base de fibres plastiques en PET [80]

c) L'air occlus

S'agissant de la teneur en air occlus, Rebeiz et al. [82] ont trouvé que l'air occlus du béton de polymère augment en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres en PET. Bayasi et al.

[83] ont aussi observé que l'air occlus du béton, est augmenté en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres de polypropylène.

Soroushian et al. [79] ont observé une légère diminution d'air occlus des bétons incorporés différents types de fibres plastiques (Fig. 3.23)

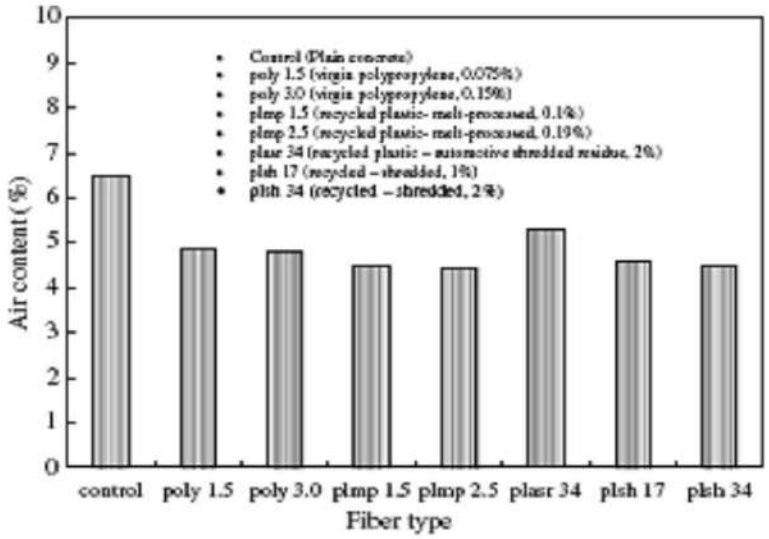


Fig.3.23.L'air occlus de bétons à base de différents types de fibres plastiques [79]

3.3.2 Etats durci

a) La résistance à la compression

La résistance en compression est l'une des propriétés les plus importantes pour caractériser un béton.

Kim et al. [84] et Ochi et al. [85] qui ont constaté que l'ajout de 1% de fibres plastiques (PET) engendre une légère augmentation de la résistance à la compression (gain de 13%) ou une légère diminution (-7% pour un ajout de 1% de fibres) des bétons renforcés de fibres. Luiz et al. [81] ont aussi étudié l'influence d'ajout de fibres plastiques (PET) sur la résistance à la compression du mortier. Ils ont trouvé que l'incorporation de fibres à la matrice cimentaire ne change pas de manière significative la résistance à la compression du mortier. S. Kakooei et al. [86] ont ajouté 0.5, 1, 1.5 et 2 Kg/m^3 de fibres de polypropylène à la masse du béton ordinaire. Ils ont constaté que plus le pourcentage d'ajout de fibres augmente plus la résistance à la compression augmente.

Al-Hadithi et al. [80] ont étudiés l'influence d'ajout de fibres plastiques de type PET ((2cm de longueur) 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25%, 1.5%, 1.75% et 2% de pourcentage) sur

l'étalement du béton autoplaçant. Ils ont trouvé une augmentation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fibres plastiques (Fig.3.24).

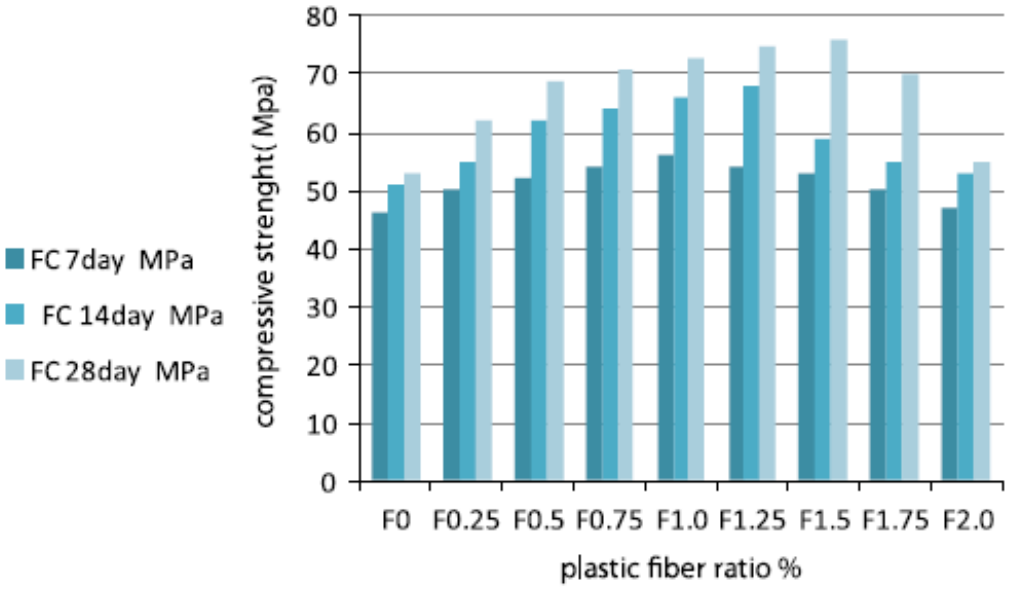


Fig.3.24. Résistance à la compression des BAP a base de fibres plastiques [80]

Ghernouti et al. [87] ont étudié l'influence d'ajout de 1, 3, 5 et 7 kg/m^3 de fibres de polypropylène et fibres issus de broyage de bouteilles plastiques avec trois longueurs (2, 4 et 6 cm) sur la résistance à la compression du béton autoplaçant . Ils ont observé une légère augmentation de la résistance en fonction de l'augmentation des pourcentages de fibres pour toutes les longueurs (Fig.3.25).

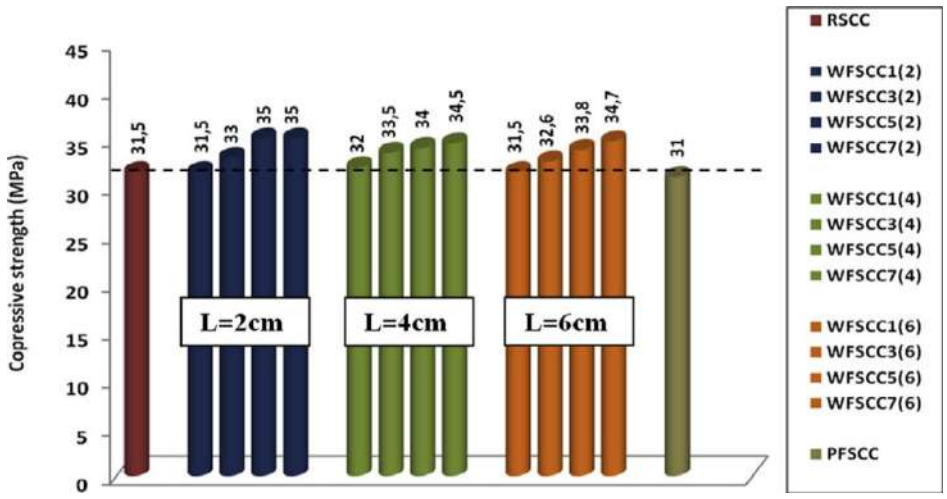


Fig.3.25. Résistance à la compression des BAP a base de fibres plastiques [87]

Pešic´ et al. [76] ont étudié l'influence d'ajout de 0.40%, 0.75% et 1.25% de fibres plastiques recyclées (type PEHD avec 2 élancement et C_1=0%FP, C_2=0.40%FP, C_3=0.75%FP et C_4=1.25%FP sont des bétons à base de fibres plastiques de 2.3cm. C_1=0%FP, C_2=0.40%FP et C_3=0.75%FP sont des bétons à base de fibres plastiques de 3cm) sur la résistance à la compression du béton ordinaire. Ils ont constaté que l'addition de fibres plastiques n'a pas un effet significatif sur la résistance à la compression du béton (Fig.3.26).

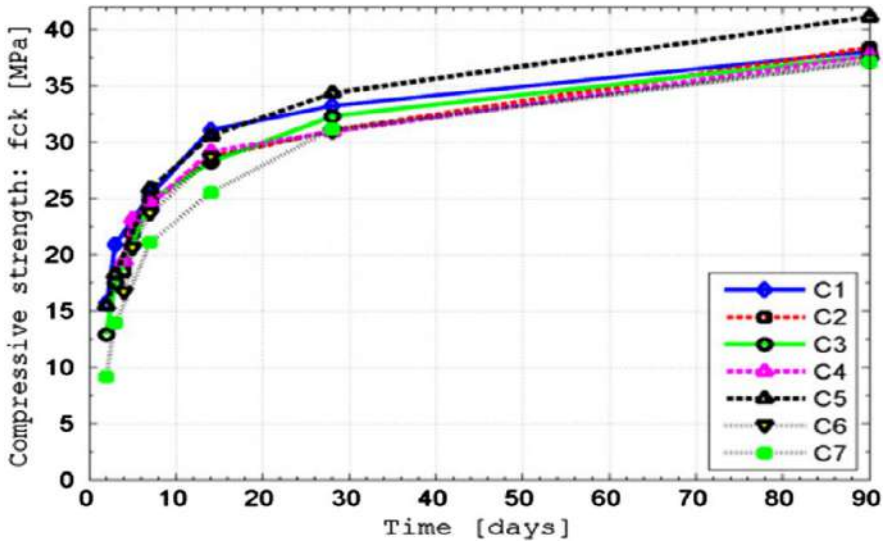
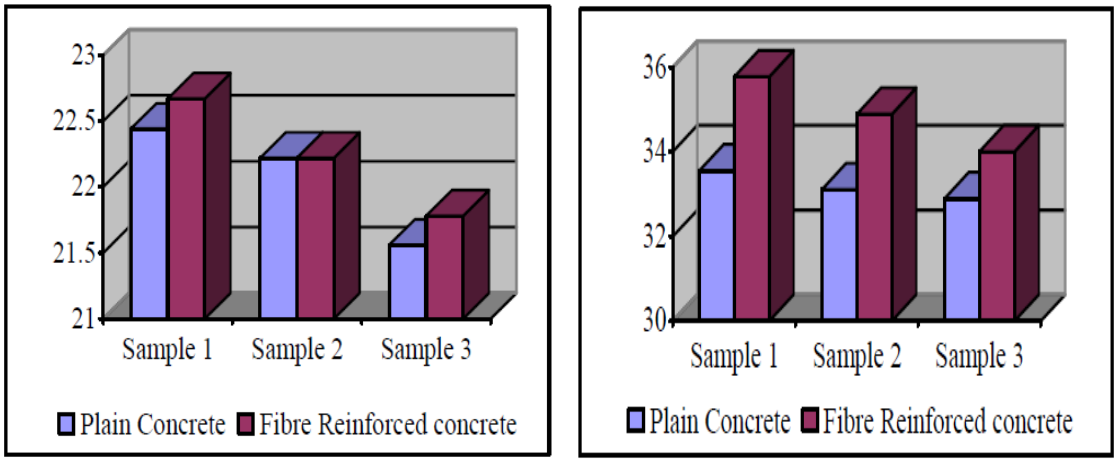


Fig.3.26. Résistance à la compression des BAP a base de fibres plastiques [76]

Comme le montre la figure 3.27 ci-dessous, Kandasamy et al. [88] ont trouvé que l'addition de 0.5% de fibres plastiques issue des bouteilles plastiques polythène, engendre une légère augmentation de la résistance à la compression de 0.68 % à 7 jours et 5.12% à 28 jours.



Rc 7 jours Rc 28 jours

Fig.3.27.Résistance à la compression de bétons renforcés par des fibres plastiques [88]

b) La résistance à la traction par flexion

Diverses études ont été réalisées concernant la résistance à la traction des bétons et mortiers à base de fibres plastiques, nous citons les travaux réalisés par Kim et al. [84] qui ont trouvé des augmentations de la résistance à la traction par flexion des bétons à base de 0.5%, 0.75%, et 1.0% des fibres plastiques en PET. Luiz et al. [79] ont aussi étudié l'influence de l'ajout de 0, 5%, 1% et 1,5% de fibres plastiques en PET sur le mortier de ciment. Ils ont trouvé des augmentations de la résistance à la traction de 60% à 100% à l'âge de 7 jours, 30% à 28 jours et 50% à l'âge de 63 jours (Fig. 3.28). Yin et al. [77] ont étudié l'influence d'ajout des macros fibres en plastique (PET et PP) sur la résistance à la traction du béton. Ils ont constaté que la résistance à la traction est toujours augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres plastiques.

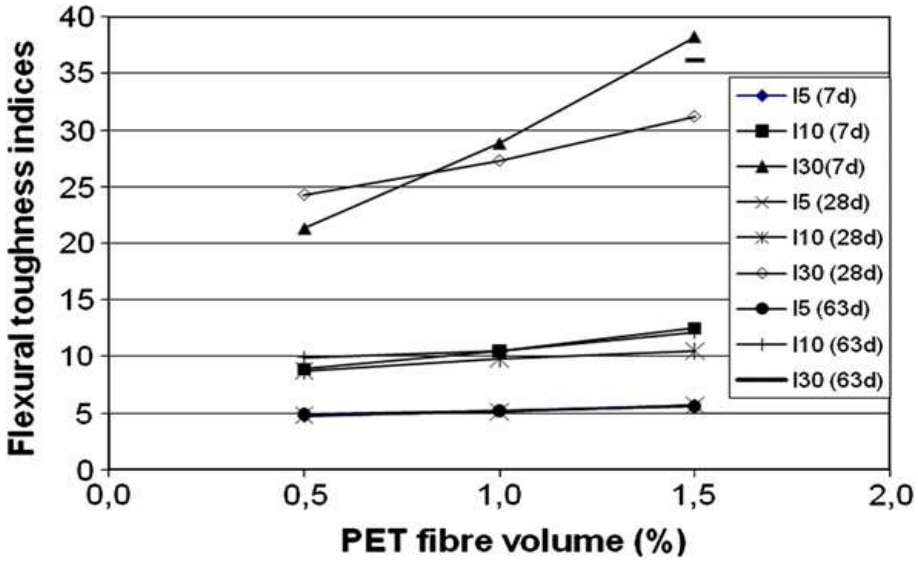


Fig.3.28. Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de fibres plastiques (PET)[79]

Al-Tulaian et al. [89] ont étudié l'effet d'addition de deux types de fibres plastiques (PET) avec deux élancement 2cm et 5cm, et avec 0.50%, 1%, et 1.5% sur la résistance à la flexion du mortier de ciment. Ils ont trouvé que quelque soit l'élancement des fibres, la résistance à la traction par flexion est argumentée en fonction du pourcentage d'ajout de fibres plastiques, et l'ajout de 1.5% de FP de 5cm d'élancement présente le meilleur résultat (Fig.3.29)

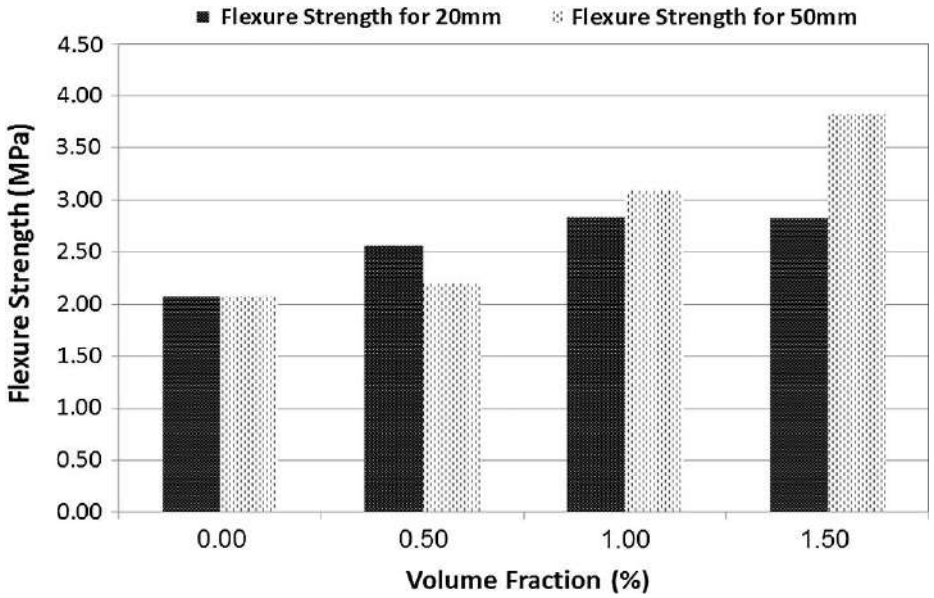


Fig.3.29 Résistance à la traction par flexion des mortiers à base de fibres plastiques (PET)[89]

Al-Hadithi et al. [80] ont trouvé aussi une augmentation importante de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de l'augmentation du pourcentage de fibres plastiques de type PET ajoutés (Fig.3.30).

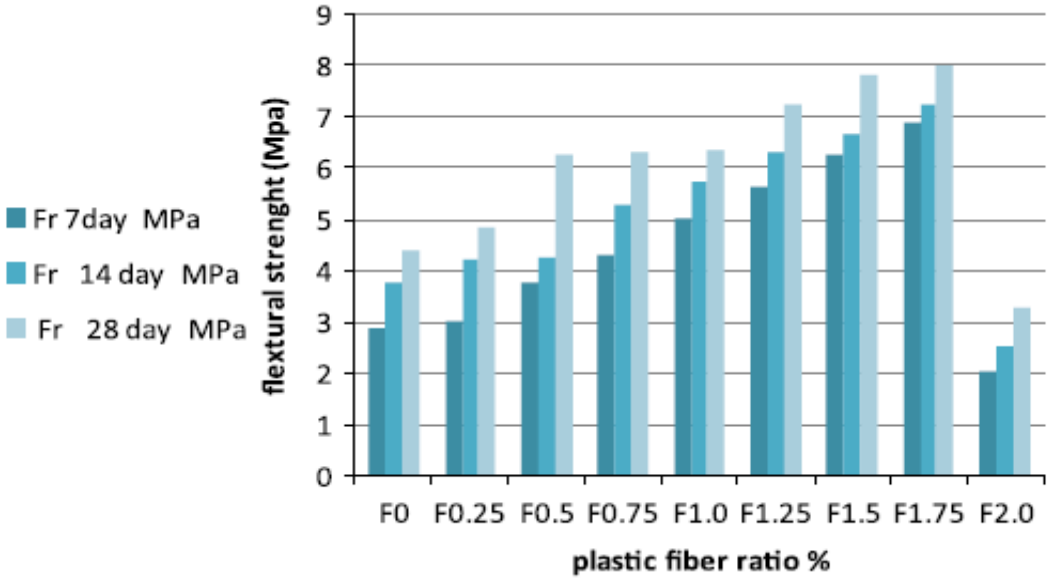


Fig.3.30. La résistance à la flexion des BAP a base de fibres plastiques [80]

Ghernouti et al. [87] ont étudié l'influence d'ajout de 1, 3, 5 et 7 kg/m^3 de fibres de polypropylène et fibres issus de broyage de bouteilles plastiques avec trois longueurs (2, 4 et 6 cm) sur la résistance à la traction par flexion du béton autoplaçant. Ils n'ont trouvé aucune augmentation pour un élancement de 2 cm de fibres. Pour un élancement de 4 cm et 6cm de

fibres, la résistance à la traction est améliorée à 14 % et 11% respectivement pour un ajout de 7 kg/m^3 de ces dernières (Fig. 3.31 et 3.32).

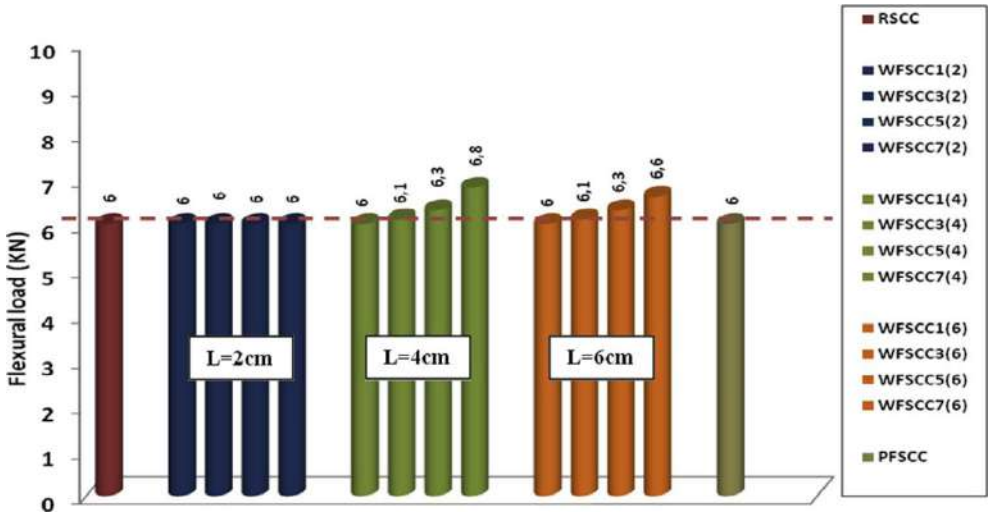


Fig.3.31. Résistance à la flexion des BAP a base de fibres plastiques [87]

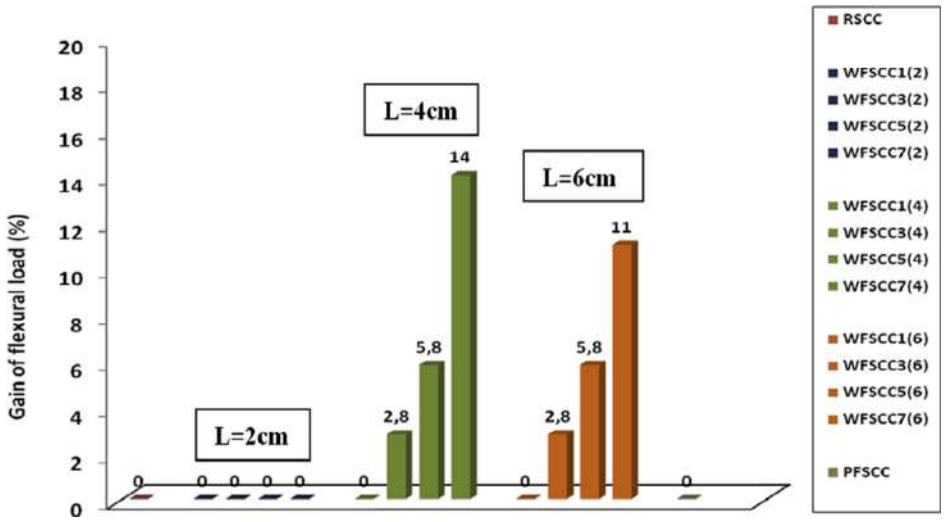


Fig.3.32. Gain de résistance à la flexion des BAP a base de fibres plastiques [87]

c) Le module d'élasticité

Peu de données sur le module d'élasticité des bétons à base de fibres plastiques sont disponibles dans la littérature.

Comme le montre la figure 3.33 ci-dessous, les bétons à base de fibres plastiques (PET) étudiés par Kim et al. [84] présentent une légère diminution du module d'élasticité par rapport aux bétons sans fibres.

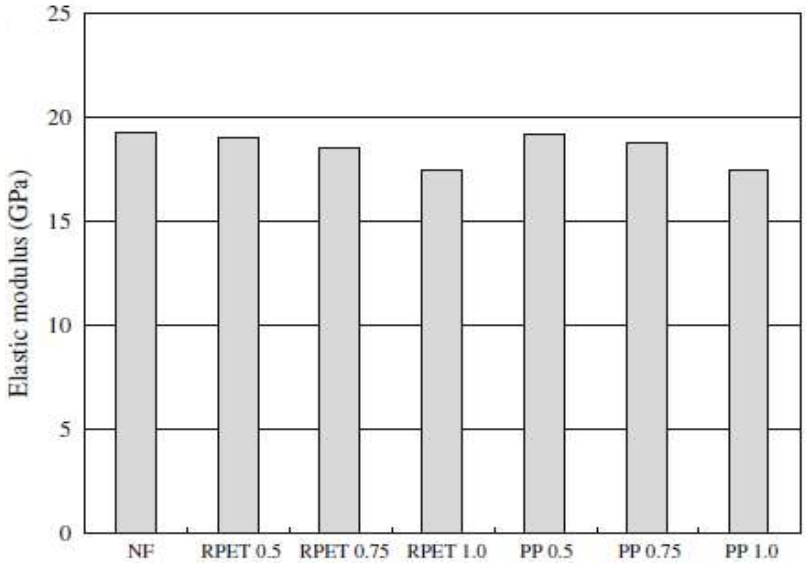


Fig.3.33. Module d'élasticité des bétons à base de fibres plastiques (PET) [84]

d) La conductivité thermique

Dans la littérature, il existe peu de résultats sur la conductivité thermique des bétons à base de fibres plastiques. Fernando et al. [90] ont étudié l'influence d'ajout de 1% de fibres plastiques PET sur la conductivité thermique du béton ordinaire. Ils ont trouvé une diminution de l'ordre de 18% par rapport au béton de référence.

3.3.3 Approche de durabilité

a) Porosité et microstructure

Luiz et al. [79] ont constaté que l'addition de fibres en PET au mortier, induit une légère diminution de la porosité. Beddar et al. [91] ont étudié l'influence de fibres de déchets métalliques sur la porosité du béton .Ils ont observé au début que la porosité est diminué en fonction d'ajouts de fibres avec une longueur de flambement augmente en fonction d'augmentation de fibres lf =10mm. Mais avec lf = 20mm la porosité augmente avec l'augmentation de la teneur de fibres.

Pešic´ et al. [76] ont pris des photos de MEB sur des échenillions du béton à base de 0.40%, 0.75% et 1.25% de fibres plastiques recyclés (type PEHD). Ils ont remarqué que la structure et la morphologie du béton renforcé par des fibres plastiques est plus homogène, continuée, moins fissurées par rapport au béton sans fibres (Fig.3.34).

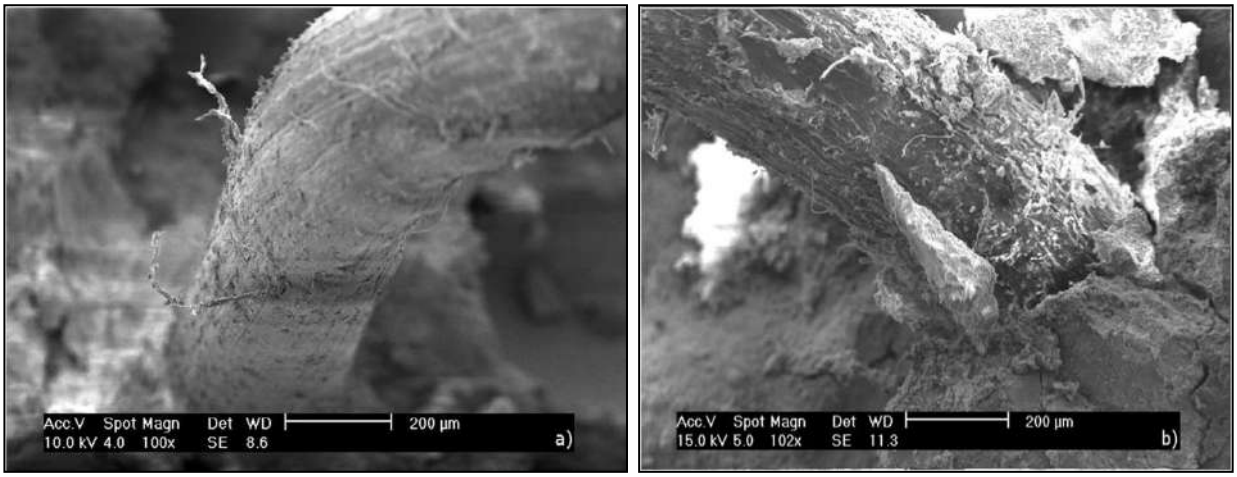


Fig.3.34. La microstructure des bétons à base de fibres plastiques [76]

b) Absorption capillaire

Yin et al. [77] ont trouvé que l'absorption des bétons à base de 0.5%, 1% et 1,5% de macro fibres en PET et en Polypropylène est plus important que celle du béton sans fibres. Luiz et al. [79] ont étudié l'influence d'ajout de 0.5%, 1% et 1,5% de fibres plastiques PET sur l'absorption capillaire du mortier de ciment à 7, 28 et 63 jours. Ils n'ont trouvé pas des variations importantes du coefficient d'absorption entre les différents mortiers (Fig.3.35).

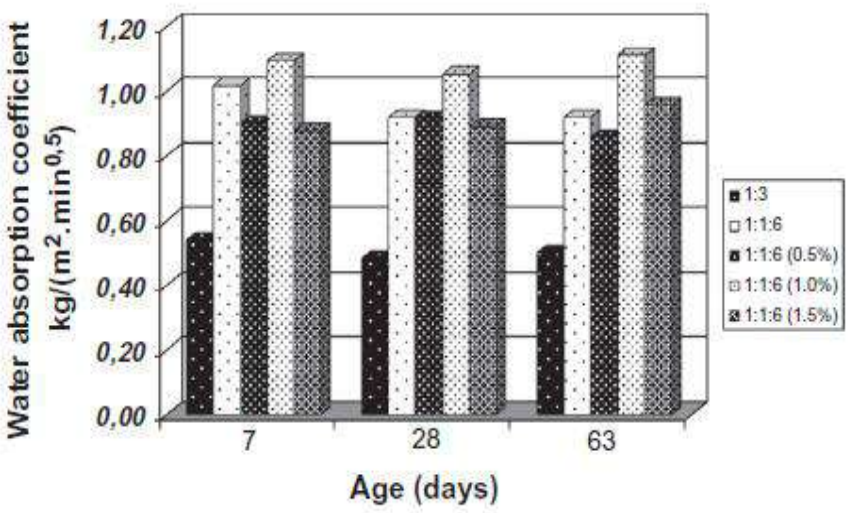


Fig.3.35. Coefficients d'absorption capillaire des mortiers à base de fibres plastiques [77]

c) Le retrait

Kim et al. [92] ont constaté d'après leurs étude que tous les types de fibres en PET et quelque soit la forme de ces fibres, diminuent le retrait des matériaux cimentaires. LANDAU et al. [93] ont étudié l'influence d'ajout de fibres synthétiques (polypropylène) sur le retrait du

béton ordinaire. Ils ont trouvé que les fibres de polypropylène contribuent à limiter le retrait du béton quand il passe de l'état plastique à une masse hydratée.

Pešic´ et al. [76] ont étudié l'influence d'ajout de 0.40%, 0.75% et 1.25% de fibres plastiques recyclés (type PEHD) sur le retrait du béton vibré (C1=béton témoin, C2, C3, et C4 sont des bétons à base de 0.40%,0.75% et 0.1.25 % de FP de diamètre 0.25mm et de longueur 23 mm, C2, C3, et C4 sont des bétons à base de 0.40%,0.75% et 0.1.25 % de FP de diamètre 0.25mm et de longueur 23 mm respectivement) . Ils ont constaté qu'une diminution du retrait en fonction de l'augmentation du pourcentage d'ajout de fibres plastiques et cela pour tous les âges (Fig.3.36).

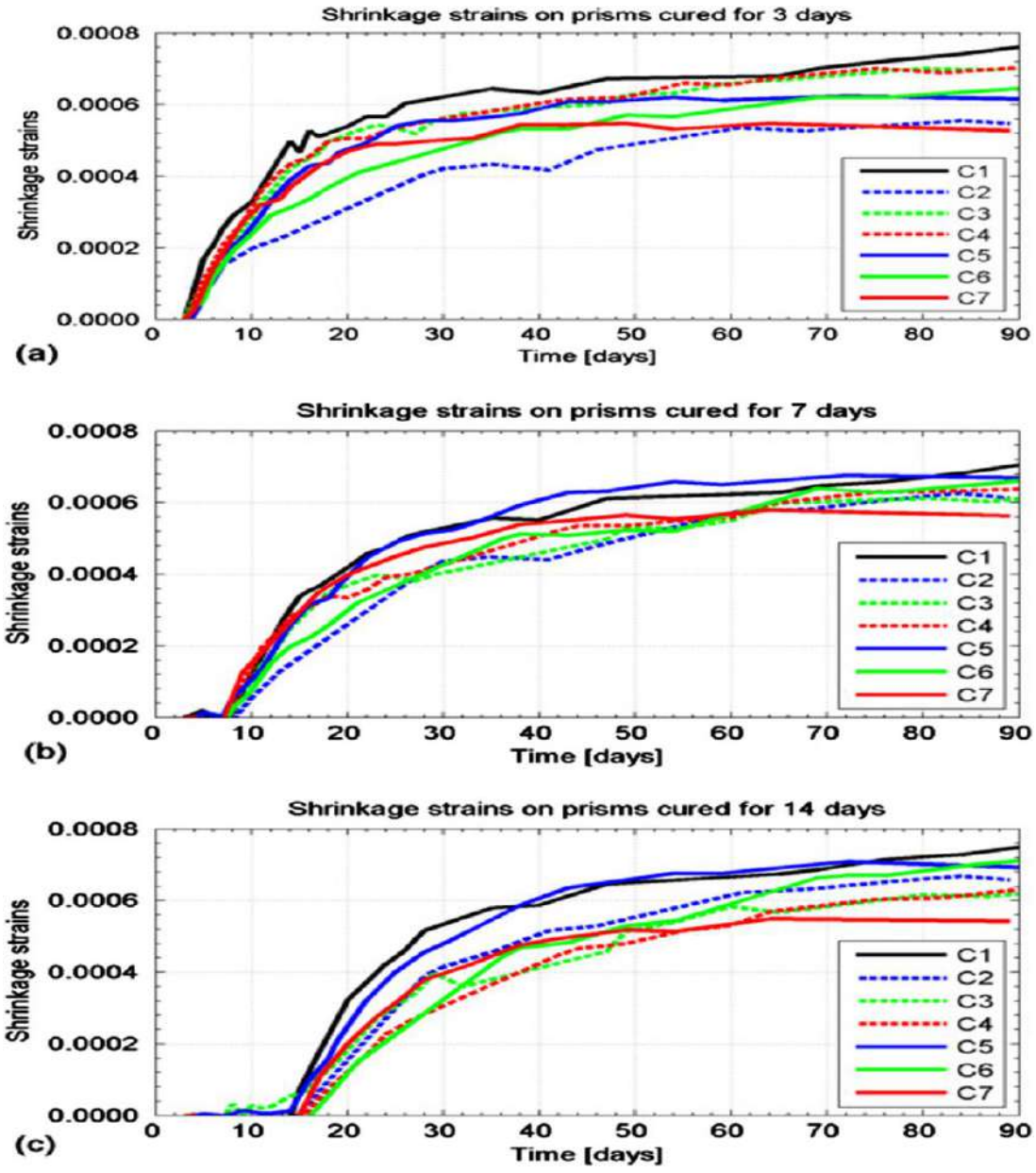


Fig.3.36 L'influence d'ajout de fibres plastiques sur le retrait du béton ordinaire [76]

d) La résistance au feu

Le béton est un matériau qui présente un bon comportement lorsqu'il est soumis à des hautes températures. Et c'est l'une des raisons pour laquelle il est largement utilisé pour la réalisation des structures porteuses, des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Malgré ce bon comportement, face à un incendie, les performances du matériau peuvent être plus ou moins affectées en fonction de la température maximale atteinte, de la durée de l'incendie et de la composition du matériau.

Zheng et al. [94] ont trouvé que la perte en masse des bétons renforcés par des fibres de polypropylène et des fibres métalliques exposés à des hautes températures (jusqu'à 900°C) est toujours permanente et augmente en fonction de l'augmentation de la température. Behnood et al. [95] ont étudié l'influence des hautes températures sur la résistance à la compression des bétons avec et sans fibres de polypropylène. Ils ont trouvé que la résistance à la compression des bétons à base de fibres de polypropylènes est plus importante que celle du béton sans fibres, et présente des pics de résistance à 200 °C. Zheng et al. [94] ont aussi trouvé que la résistance à la compression des bétons renforcés par des fibres de polypropylène et des fibres métalliques exposés à des hautes températures (jusqu'à 900°C) est présente un pic de résistance à une température de 400°C. Mais au-delà de cette température une chute de résistance très importante à été obtenues.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la valorisation des matières sous forme de poudre et fibres plastiques dans les matériaux à base cimentaire.

A travers les différents documents et exemples disponibles dans la littérature, nous nous sommes rendu compte que l'adjonction des déchets plastiques aux matériaux cimentaires peut constituer une solution pour concevoir un composite cimentaire offrant de meilleures performances. Malgré la chute des résistances mécaniques (en compression et en traction), ce composite offre une grande capacité de déformation avant la localisation de la fissuration, un atout vis-à-vis de la fissuration due aux variations dimensionnelles du retrait, la principale pathologie limitant l'utilisation du matériau dans les applications à grande surface. C'est sur cette base que nous avons entrepris un travail de formulation et caractérisation en vue d'explorer les applications rendues possibles par les nouvelles propriétés du béton de sable à base cimentaire et incorporant des déchets plastiques. Tout au long du développement, on gardera en mémoire que compte tenu des effets préjudiciables de l'adjonction de déchets plastiques sur les résistances en compression et en traction du BS, les applications sur terre-plein (dallages, chaussées, route, pavé, caniveaux, poteaux, poutres) sont privilégiées.

Chapitre 04 :

Matériaux et Essais

4.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux et techniques expérimentales utilisés dans cette étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des bétons, et en seconde partie, on expose la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des bétons de sable. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci.

Le béton de sable (BS) est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :
- La maniabilité
- La densité
- L'air occlus

A l'état durci nous avons évalué la porosité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion aux différents âges, le module d'élasticité et la conductivité thermique.

En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous avons réalisé les essais suivants :
- L'absorption d'eau par capillarité.
- Les variations dimensionnelles (retrait et gonflement)
-Les variations massiques (perte et gain de masse)
- La résistance au feu (perte de masse et de résistance à la compression)

En parallèle, des observations au MEB (Microscope électronique à balayage) ont été effectuées pour caractériser la microstructure des bétons de sable à base de différents déchets.

4.2. Matériaux utilisés

Les caractéristiques physico-chimiques des matières premières utilisées pour la confection des bétons de sable sont présentées ci-après.

4.2.1 Les sables

L'Algérie, comme beaucoup d'autres pays du monde, notamment dans les zones désertiques, dispose de grands gisements de sables, dunaires et alluvionnaires. Ces sables restent toujours non ou très peu exploités dans la construction. Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, quatre sables différents ont été séparément utilisés :

a) Sable de TAMANRASSET

Le premier sable utilisé est un sable de dune provenant de la région de TAMANRASSET, situé à l'extrême sud du pays, à plus de 2000 Km de la capitale Alger (Cœur de SAHARA).

b) Sable de HASSI BAHBAH

Le deuxième sable utilisé est un autre sable de dune qui provient de la région de HASSI BAHBAH située au nord de la wilaya de Djelfa à plus de 250 km au sud d'Alger.

c) Sable de BOUGHEZOUL

Le troisième type de sable utilisé dans cette étude, est un sable roulé provenant de la carrière de BOUGHEZOUL (Wilaya de MEDEA), située à 170 km au sud d'Alger.

d) Sable de Concassage

Le quatrième type de sable utilisé est un sable concassé provenant de la wilaya de BOUIRA, située à 90 km au sud d'Alger.

La figure 4.1 suivante donne un aperçu général sur la nature des sables utilisés.

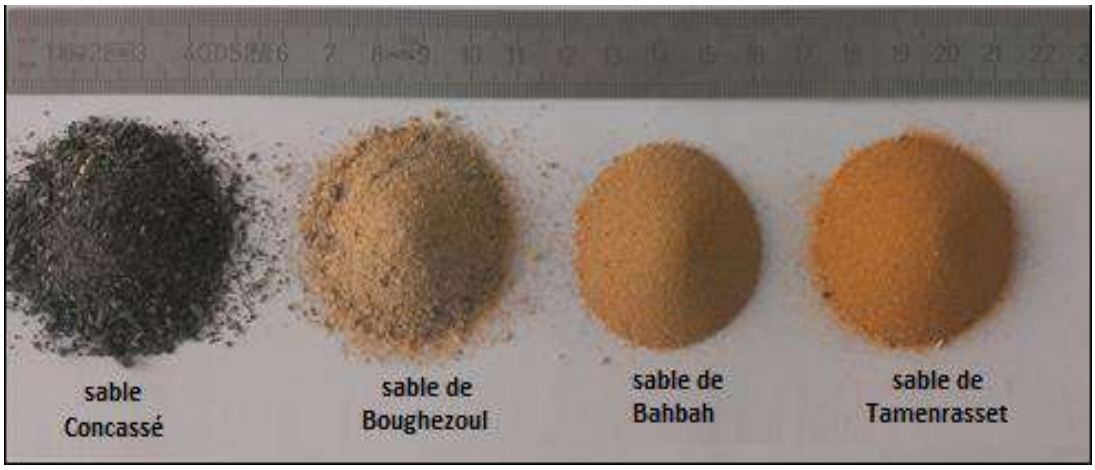


Fig. 4.1. Aspect général des sables utilisés

La figure 4.2 illustre l'analyse granulométrique réalisée sur les sables utilisés selon la norme NF EN 933-1[96] et montre que les sables de dunes sont des sables fins présentant une granulométrie serrée, par contre le sable de concassage est un sable relativement grossier et présente une granulométrie étalée. En outre, le sable de Boughezoul présente aussi une granulométrie serrée. Le diamètre maximal est 0.315 mm pour le sable de Tamanrasset, 0.63 mm pour le sable de Bahbah, 3.15 mm pour le sable de Boughezoul et de 5 mm pour le sable de concassage. Il est clair donc, que le diamètre maximal dans les granulats d'un béton de sable est beaucoup plus petit que celui des granulats d'un béton ordinaire. Ceci augmente la surface spécifique des granulats et par conséquent leur porosité. Notons que c'est cette porosité élevée qui impose l'ajout des fillers dans les bétons de sable pour éviter un surdosage en ciment [52]. Les autres caractéristiques physiques de ces sables sont regroupées dans le tableau 4.1. Les valeurs moyennes de la masse volumique apparente montrent que les sables de dunes sont plus denses, les valeurs des modules de finesse confirment que les sables de dune sont plus fins et les valeurs de l'équivalent de sable (selon la norme NF EN 933-8 [97]) mettent en évidence la propreté des sables utilisés (pauvres en éléments fins).

Tableau. 4.1. Caractéristiques physiques des sables utilisés

Caractéristiques	**Sable de TAMANRASSET**	**Sable de BAHBAH**	**Sable de BOUGHEZOUL**	**Sable de Concassage**	**Normes**
Module de finesse	0.84	1.16	1.86	3.14	NF EN 933-1 [96]
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.66	2.58	2.55	2.50	NF EN 1097-6 [98]
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.4	1.42	1.49	1.40	NF EN 1097-3 [99]
Equivalent de sable (%)	80.50	65.00	62.5	75.00	NF EN 933-8 [97]
Coefficient d'absorption d'eau (%)	6.5	5	3	1.5	NF EN 1097-6 [98]
La compacité (%)	52.63	55.03	58.43	56	NF EN 1097-3 [99]
La porosité (%)	47.37	44.97	41.57	44	NF EN 1097-3 [99]

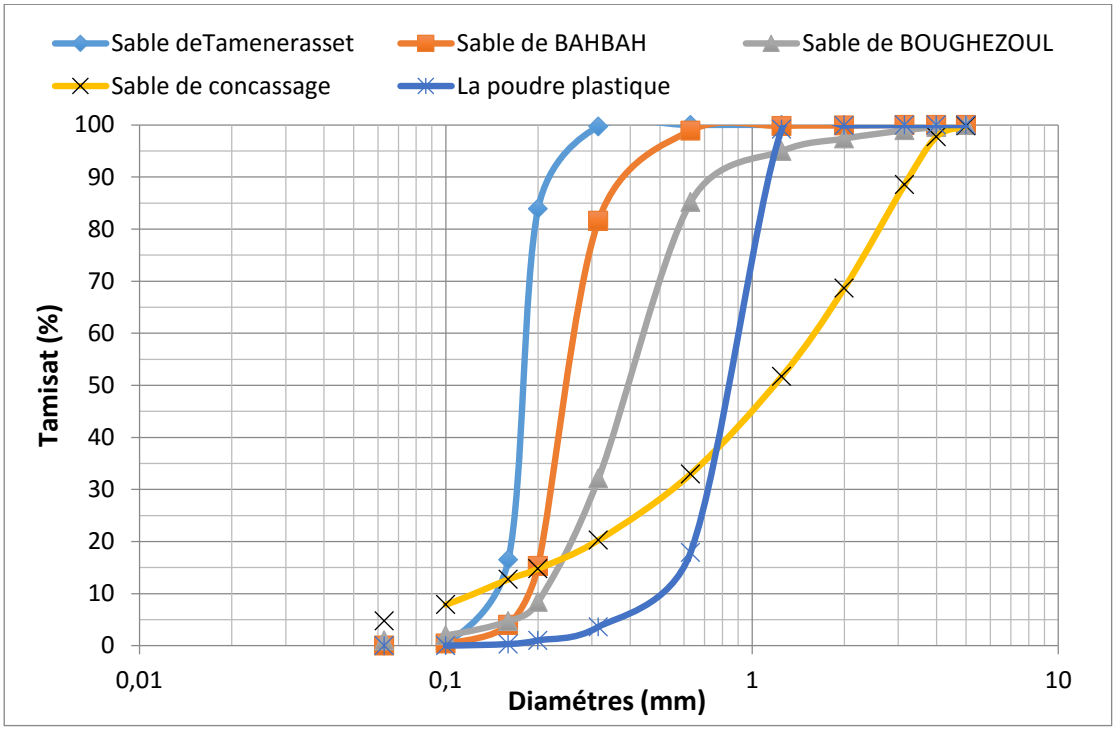


Fig. 4.2. Courbes granulométriques des sables et de poudre utilisées

Les figures présentées ci-dessous (Fig. 4.3 à Fig. 4.6) montrent l'aspect général des grains, visualisés, par le microscope électronique à balayage (M.E.B). Les grains des sables dunaires et de carrière sont de forme roulée (arrondie). Alors que, les grains du sable concassé sont de forme angulaire.

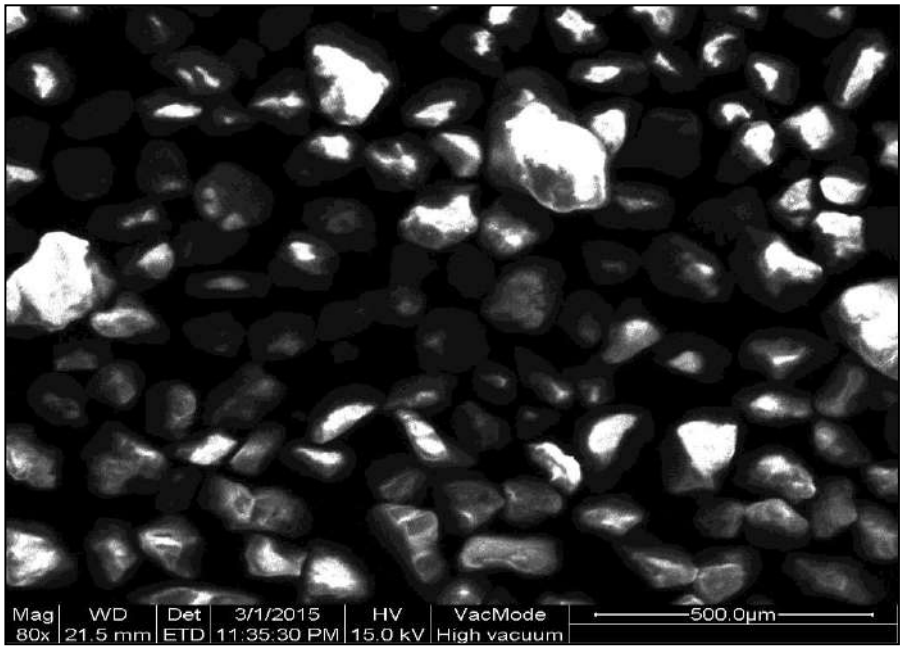


Fig. 4.3. Photos MEB du sable de Tamanrasset

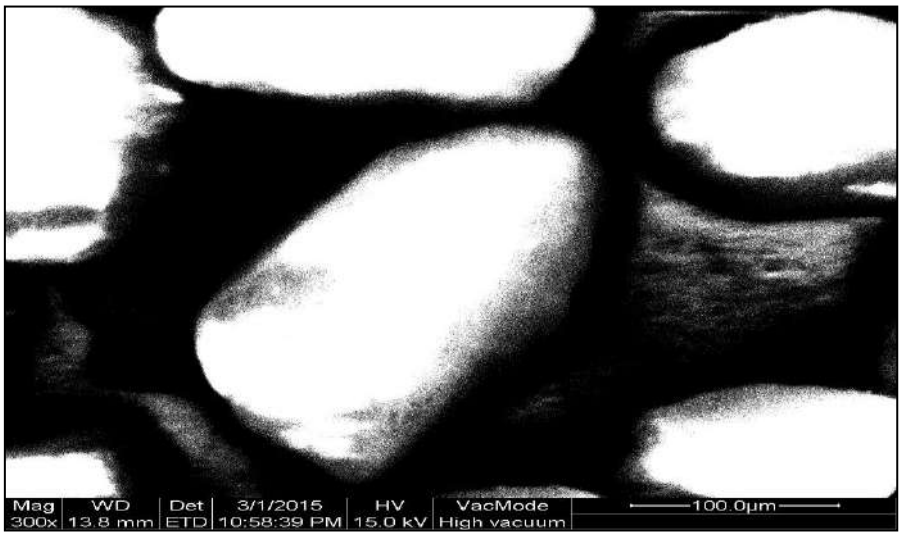


Fig. 4.4. Photos MEB du sable de BAHBAH

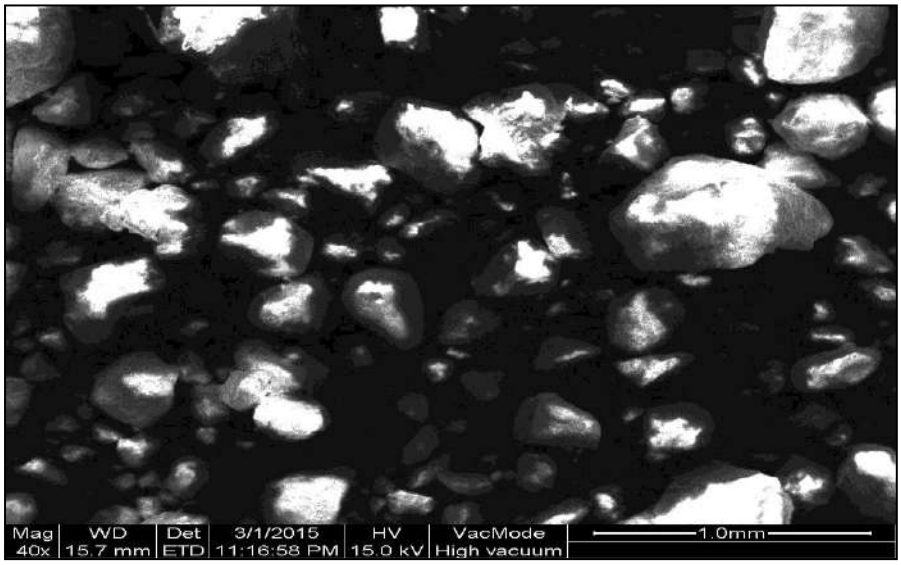


Fig. 4.5. Photo MEB du sable de BOUGHEZOUL

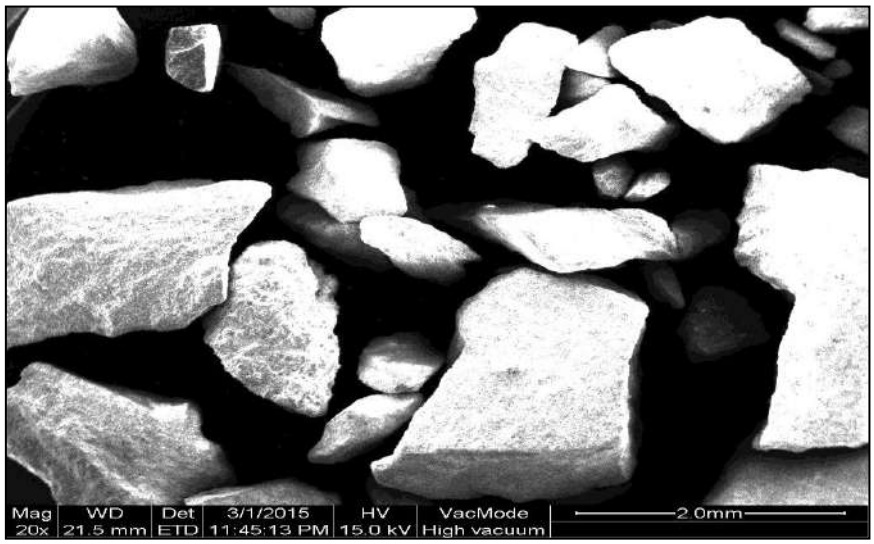


Fig. 4.6. Photo MEB du sable de Concassage

L'analyse chimique des sables utilisés, menée par rayon X, révèle que le sable concassé est riche en calcite ($CaCO_3$). Pour les sables dunaires et de carrière, la silice (Quartz) (S_iO_2) est l'élément le plus prépondérant dans la composition chimique de ces derniers (Fig.4.7 à Fig. 4.10)

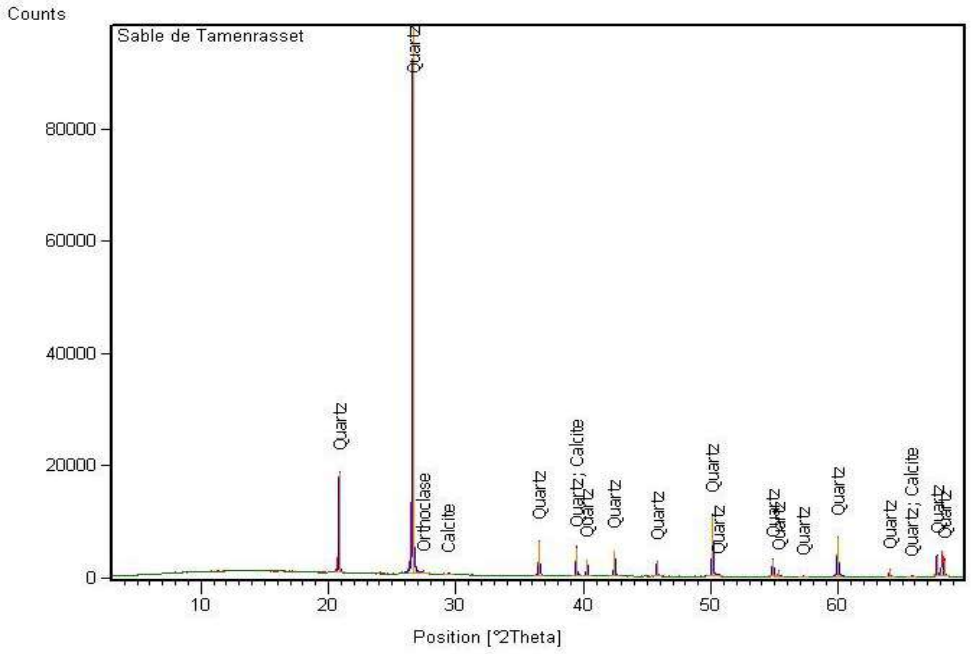


Fig. 4.7. Analyse par DRX du sable de Tamanrasset

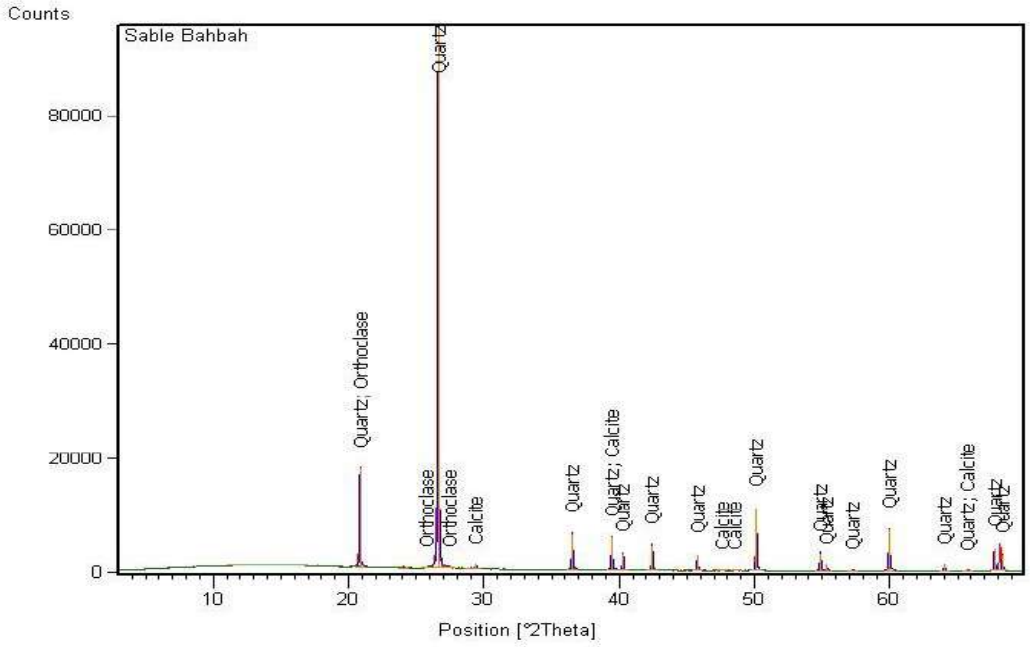


Fig. 4.8. Analyse par DRX du sable de BAHBAH

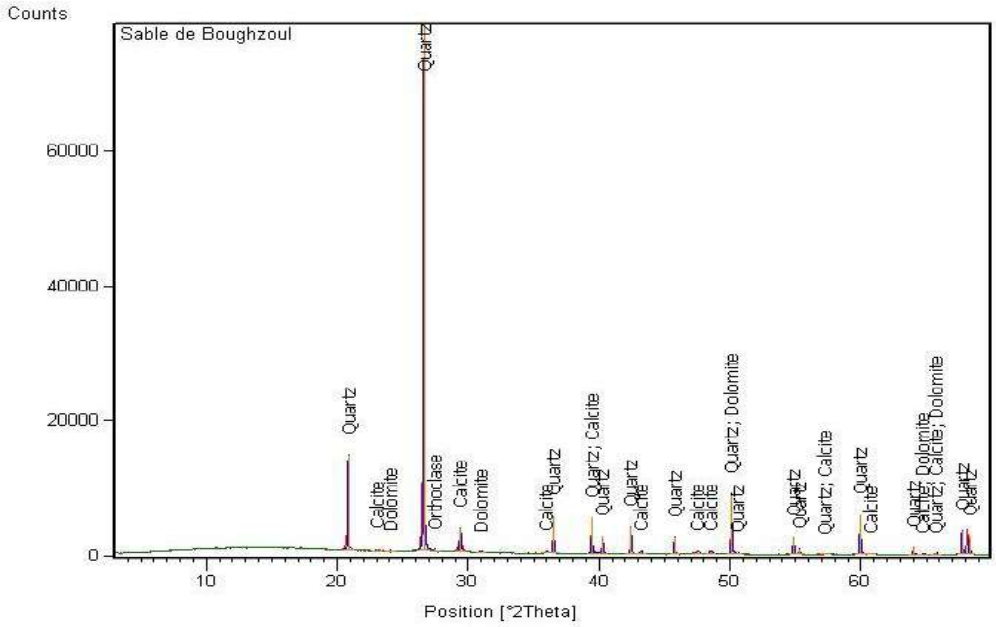


Fig. 4.9. Analyse par DRX du sable de BOUGHZOUL

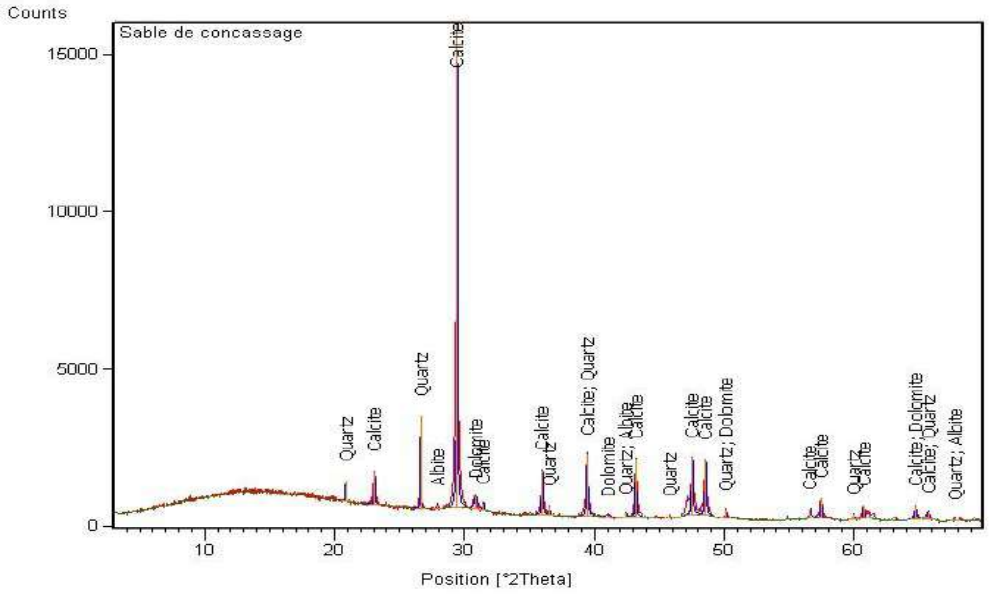


Fig. 4.10. Analyse par DRX du sable de CONCASSAGE

4.2.2 Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude. Il s'agit d'un ciment portland composé CEM II/A 42.5, avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa, une masse spécifique de 3,1 g/cm^3 et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3080

cm²/g produit par la cimenterie de CHLEF qui présente des performances mécaniques et caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442 [100].

Le ciment de CHLEF 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. L'addition utiliser pour ce type de ciment est le calcaire (10%). Le tableau 4.2 résume la composition chimique et le tableau 4.3 représente la composition minéralogique du ciment utilisé. Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé sont représentées dans le tableau 4.4. L'analyse chimique du ciment menée par rayon X met en évidence l'existence des éléments de la composition minéralogique (Fig. 4.11). Néanmoins, cette analyse à un aspect qualitatif et non quantitatif. Cette analyse confirme l'existence des C_3S, C_2S, C_3A et C_4AF.

Tableau. 4.2. Composition chimique du ciment utilisé

Oxydes	S_iO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Mgo	Na_2O	SO_3	Cao_{libre}	R.insol	P.F
Teneurs(%)	21.89	6.15	3.95	58.76	0.67	1.13	0.57	1.62	0.45	5.19	4.67

Tableau. 4.3. Composition minéralogique du ciment utilisé

Minéraux	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO libre	Gypse	Phase d'ajout
Teneurs(%)	45	18	11	8	1	5	12

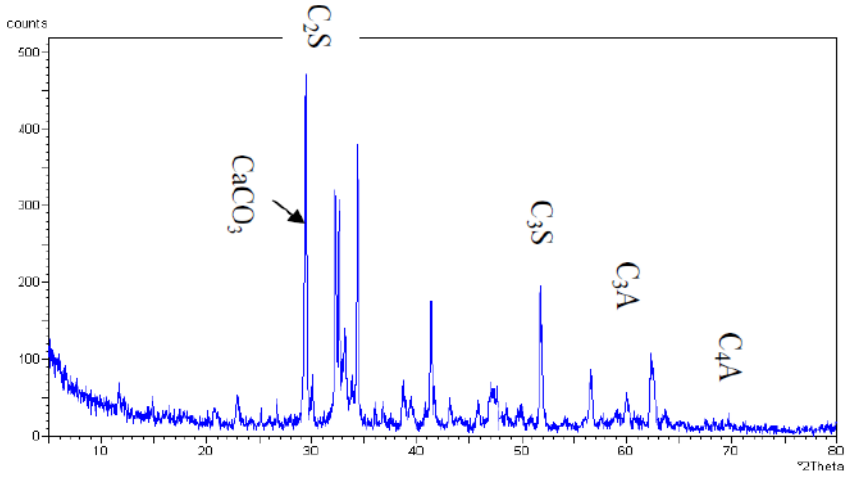


Fig.4.11. Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 CHLEF

Tableau. 4.4. Caractéristiques physicomécaniques du ciment utilisé

Les essais	Valeurs Mesurées	Norme NA 442
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	3080	-
Consistance (%)	24.15	-
Début de Prise (h, mn)	02 :34	≥60 mm
Compression 02 Jours (MPa)	15.15	≥12.5
Compression 28 Jours (MPa)	46.43	≥42.5
Flexion 02 Jours (MPa)	2.97	-
Flexion 28 Jours (MPa)	6.26	-
Expansion à chaud sur pate (mm)	2.12	≤10 mm

4.2.3 Fillers

Les fillers sont destinés à compléter la courbe granulométrique du sable dans sa partie fine et à combler les vides inter-granulaires. Un seul type de fillers a été utilisé au cours de ce travail, le laitier de haut fourneau provenant du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, finement broyé au laboratoire de l'université de Blida. Il est fourni sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair comme le montre la figure 4.12 suivante.

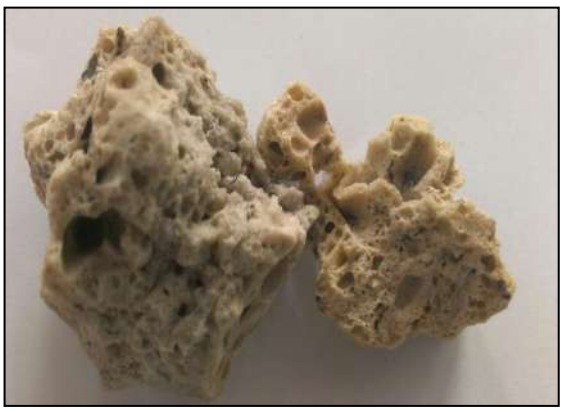


Fig.4.12. Laitier granulé

Pour le broyage du laitier, nous avons utilisé un broyeur à boulets (Fig. 4.13) de vitesse de 56 tr/min. Nous avons fixé le temps nécessaire pour avoir la finesse voulue à 60 min, puis le

laitier a été tamisé en utilisant un tamis 63 µm. La surface spécifique obtenue est de 3100 cm²/g, la masse spécifique est de 2.87 g/cm^3. La figure 4.14 donne un aperçu général sur le laitier broyé utilisé.



Fig.4.13. Broyeur à boulet utilisé



Fig. 4.14. Le laitier broyé utilisé

Les différentes caractéristiques du laitier sont présentées dans les tableaux 4.5 et 4.6 suivants :

Tableau. 4.5. Caractéristiques chimiques du laitier utilisé

S_iO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Cao	MgO	MnO	K_2O	SO_3	T_iO_2	total
39,10	6,00	2,00	42,20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	99,15

Tableau. 4.6. Caractéristiques physico-mécaniques du laitier utilisé

ρ (Kg/m^3)	ρ_s (Kg/m^3)	Densité	Pouzzolanicité (%)	Surface spécifique (cm^2/g)	Résistance Mécanique (granulat) (Kg/cm^2)
1.254	2.857	0.80	80	3100	45

Le difractogramme DRX présenté dans la figure 4.15, montre que le filler du laitier utilisé contient principalement de la carlinite.

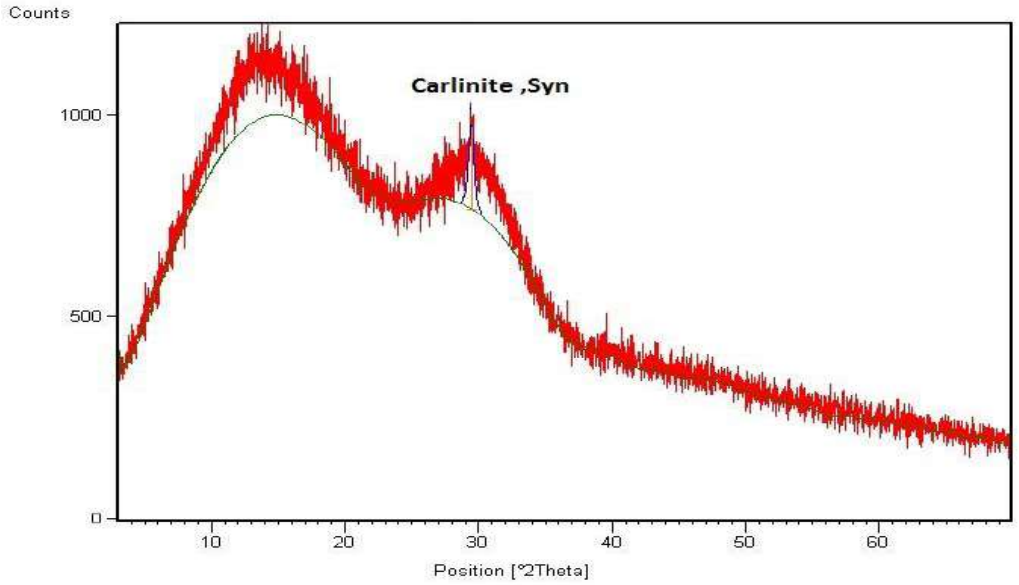


Fig. 4.15. Analyse par DRX du laitier utilisé

4.2.4 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société Algérienne GRANITEX, commercialisé sous l'appellation MEDAFLUID 104 de forme liquide de couleur marron, d'un PH égal à 6, de densité 1,04 ± 0,01 et d'une teneur en chlore < 1g/L. MEDAFLUID 104 permet de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) environ 6 à 10%, tout en améliorant la plasticité du béton. La plage de dosage recommandée du MEDAFLUID 104 est de 0.3 à 1.5 % du poids de ciment.

4.2.5. Eau

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable de distribution de notre laboratoire, exempte d'impuretés, et sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

4.2.6 Déchets Plastiques

Deux types de déchets plastiques recyclés de natures différentes ont été utilisés au cours de ce travail, sous forme de poudre (PP) et sous forme de fibres (FP).

4.2.6.1 Déchets plastiques sous forme de poudre (Polyéthylène Bas Densité –PEBD-)

Ce sont des déchets recyclés sous forme d'une poudre (Fig. 4.16**)** très légère, leur densité est inférieure à celle de l'eau, obtenus par le recyclage des « anciennes citernes usagées des

produits chimiques et de l'eau potable –PEBD- » rejetées dans la nature, après avoir été collectées, sont lavées, compressées, broyées puis extrudées sous forme de poudre, puis incorporées dans la masse du béton de sable par substitution volumique du sable avec des pourcentages de 10%, 20%, 30% et 40%. La granulométrie de cette poudre est représentée dans la figure 4.2. La figure 4.17 présenté ci-dessous donne une idée sur l'aspect général et la forme de la poudre plastique visualisée, par le microscope électronique à balayage (M.E.B). Les grains de la poudre plastique sont de forme angulaire et hétérogène. L'analyse chimique menée par rayon X (Fig. 4.18), confirme que la poudre plastique est une matière organique riche en éléments ''Cristobalite High, Tridymite et MAPO 20''. Les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques de la poudre plastique utilisées sont résumées dans le tableau 4.7 ci-dessous.



Fig.4.16. Aspect général de la poudre plastique utilisée.

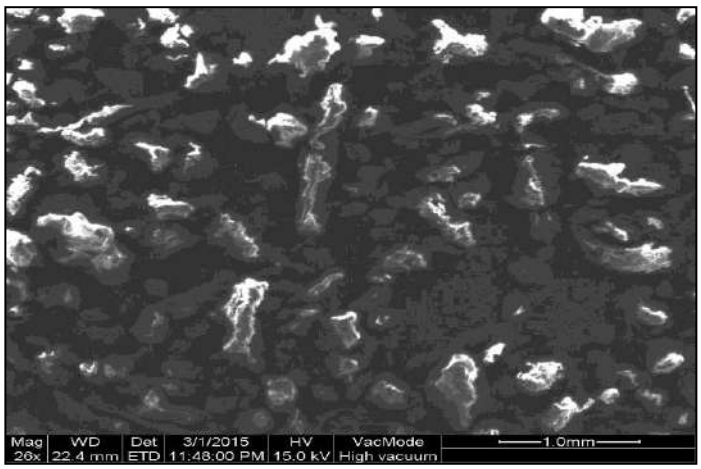


Fig. 4.17. Photo MEB de la poudre plastique utilisée.

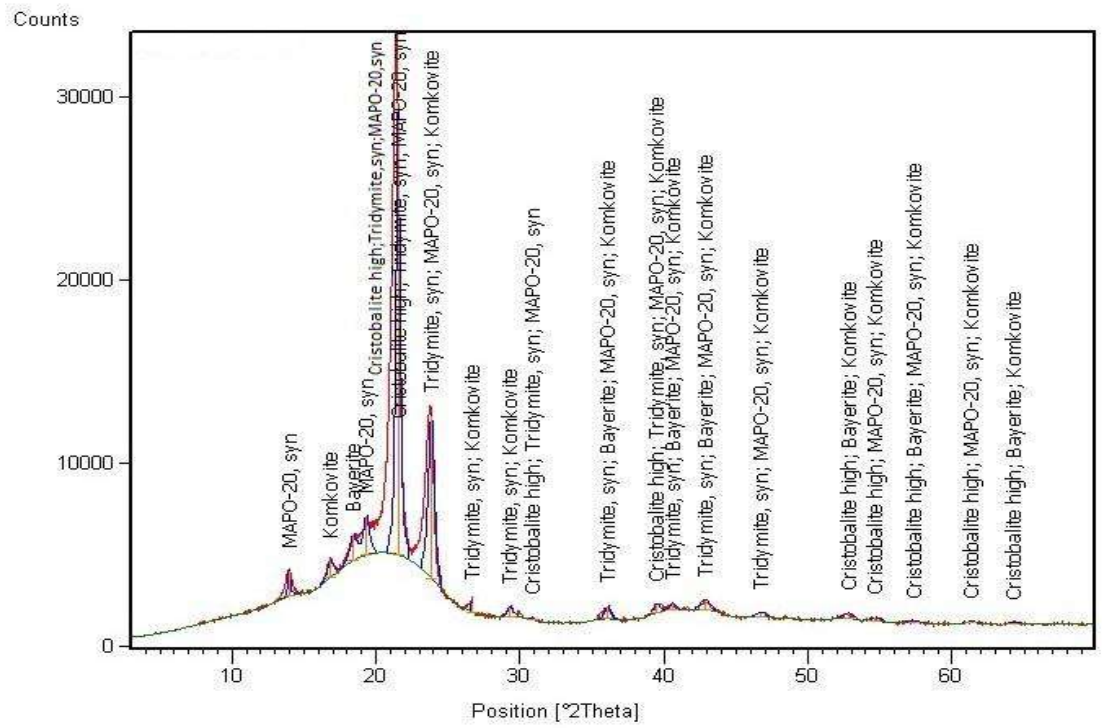


Fig. 4.18. Analyse par DRX de la poudre plastique utilisée.

Tableau. 4.7. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques de la poudre plastique utilisée

Caractéristiques	**Poudre plastique**
Le module de finesse	2.8
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	0.35
La masse volumique absolue (Kg/m^3)	0.45
La Compacité (%)	77
La porosité (%)	33
Effort d'fléchissement de tension (MPa)	16
La dureté (rivage D)	66
La résistance à la flexion (MPa)	13
Le module d'élasticité (N/mm^2)	200
La Température de fragilité (°C)	< -75
Point de fusion (°C)	120
La conductivité thermique (W/m°C)	0.15

4.2.6.2 Déchets plastiques sous forme de fibres (Polyéthylène téréphtalate –PET-)

Ces déchets sont des fibres ondulée de 0.5 mm de diamètre (Fig. 4.19), obtenue par le recyclage des anciennes bouteilles plastiques usagées de nature polyéthylène téréphtalate (PET).

Dans cette étude on a choisies de couper ces fibres en 4 cm de longueur, et puis les ajouter à la masse du béton de sable avec des pourcentages de 0.5%, 1%, 1.5% et 2% par rapport au volume du béton. Leurs caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques sont représentées dans le tableau 4.8.



Fig.4.19. Aspect général des fibres plastiques utilisées

Tableau. 4.8. Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des fibres plastiques utilisées

Caractéristiques	**Fibres plastiques**
La longueur (mm)	40
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	0.95
La masse volumique absolue (Kg/m^3)	1.23
Élongation finale (%)	11.2
La résistance à la traction (MPa)	60
Le module d'élasticité (N/mm^2)	3100
Effort d'fléchissement de tension (MPa)	60
Point de fusion (°C)	260
La conductivité thermique (W/m°C)	0.30

4.3 Formulation du béton

La composition du béton de sable pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode expérimentale du projet de SABLOCRETE 1994 [39]. Deux grandes familles de béton de sable ont été formulées : Bétons de sable à base de poudre plastique et bétons de sable à base de fibres plastiques à base de quatre sables utilisés à savoir : sable de TAMANRASSET , sable de BAHBAH, sable de BOUGHZOUL et sable concassé.

4.3.1 Formulation du béton de sable à base de poudre plastique

Le béton de sable à base de poudre plastique est obtenu par substitution volumique du sable avec la poudre plastique (10%, 20%, 30% et 40%). Les nouveaux composites obtenus sont répertoriés comme suit (Tab.4.9) :

Tableau. 4.9. Nomenclature des bétons de sable à base de déchets de poudre plastique

Sable	**Béton de sable**
Sable de TAMANRASSET	**BSTT** : Béton de sable de TAMANRASSET témoin (sans poudre plastique) **BST PP** : Béton de sable de TAMANRASSET à base de poudre plastique
Sable de BAHBAH	**BSBHT** : Béton de sable de BAHBAH témoin (sans poudre plastique) **BSBH PP** : Béton de sable de BAHBAH à base de poudre plastique
Sable de BOUGHZOUL	**BSBGT** : Béton de sable de BOUGHEZOUL témoin (sans poudre plastique) **BSBG PP** : Béton de sable de BOUGHEZOUL à base de poudre plastique
Sable de CONCASSAGE	**BSCNT** : Béton de sable de Concassage témoin (sans poudre plastique) **BSCN PP** : Béton de sable de Concassage à base de poudre plastique

La composition de chaque mélange et pour chaque type de béton est codifié et mentionnée dans le tableau 4.10 suivant :

Tableau. 4.10. Compositions des bétons de sable à base de poudre plastique (pour 1 m³)

Sable de TAMANRASSET					
	BSTT	**BST PP**			
		10%	20%	30%	40%
Sable (Kg/m³)	1200	1080	960	840	720
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	200	200	200	200	200
Eau (l/m³)	301	301	301	301	301
Plastifiant (%)*	1	0.80	0.50	0.35	0.30
Poudre plastique (kg/m³)	0	20.30	40.60	60.90	81.2
Sable de BAHBAH					
	BSBHT	**BSBH PP**			
		10%	20%	30%	40%
Sable (Kg/m³)	1310	1178	1047	916	786
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	175	175	175	175	175
Eau (l/m³)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Plastifiant (%)*	1	0.70	0.55	0.40	0.30
Poudre plastique (kg/m³)	0	22.85	45.71	68.56	91.41
Sable de BOUGHEZOUL					
	BSBGT	**BSBG PP**			
		10%	20%	30%	40%
Sable (Kg/m³)	1375	1237	1100	962	825
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	160	160	160	160	160
Eau (l/m³)	280	280	280	280	280
Plastifiant (%)*	1	0.75	0.65	0.57	0.40
Poudre plastique (kg/m³)	0	24.28	48.56	72.84	97.12
Sable de Concassage					
	BSCNT	**BSCN PP**			
		10%	20%	30%	40%
Sable (Kg/m³)	1560	1404	1248	1092	936
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	140	140	140	140	140
Eau (l/m³)	262.5	262.5	262.5	262.5	262.5
Plastifiant (%)*	1	0.95	0.87	0.80	0.60
Poudre plastique (kg/m³)	0	27	54	81	108

(***** % par rapport à la masse du ciment)

4.3.2 Formulation du béton de sable à base de fibres plastiques

De la même manière que pour le BS à base de poudre plastique, le béton de sable à base de fibres plastiques est obtenu par ajout volumique des fibres plastiques (0.5%, 1%, 1.5% et 2%) dans la masse du béton. Les différents composites obtenus sont répertoriés selon la nomenclature suivante :

Tableau. 4.11. Nomenclature des bétons de sable à base de fibres plastiques

Sable	**Béton de sable**
Sable de TAMANRASSET	**BSTT** : Béton de sable de TAMANRASSET témoin (sans fibres plastiques) **BST FP** : Béton de sable de TAMANRASSET à base de fibres plastiques
Sable de BAHBAH	**BSBHT** : Béton de sable de BAHBAH témoin (sans fibres plastiques) **BSBH FP** : Béton de sable de BAHBAH à base de fibres plastiques
Sable de BOUGHZOUL	**BSBGT** : Béton de sable de BOUGHEZOUL témoin (sans fibres plastiques) **BSBG FP** : Béton de sable de BOUGHEZOUL à base de fibres plastiques
Sable de CONCASSAGE	**BSCNT** : Béton de sable de Concassage témoin (sans fibres plastiques) **BSCN FP** : Béton de sable de Concassage à base de fibres plastiques

La composition de chaque mélange et pour chaque type de béton est mentionné dans le tableau 4.12 suivant :

Tableau. 4.12. Compositions des bétons de sable à base de fibres plastiques (pour 1 m³)

Sable de TAMANRASSET					
	BSTT	**BST FP**			
		0.5%	1%	1.5%	2%
Sable (Kg/m³)	1200	1200	1200	1200	1200
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	200	200	200	200	200
Eau (l/m³)	301	301	301	301	301
Plastifiant (%)*	1	1.35	1.40	1.48	1.5
Fibres plastiques (kg/m³)	0	6	12	18	24
Sable de BAHBAH					
	BSBHT	**BSBH FP**			
		0.5%	1%	1.5%	2%
Sable (Kg/m³)	1310	1310	1310	1310	1310
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	175	175	175	175	175
Eau (l/m³)	297.5	297.5	297.5	297.5	297.5
Plastifiant (%)*	1	1.25	1.35	1.43	1.5
Fibres plastiques (kg/m³)	0	6	12	18	24
Sable de BOUGHEZOUL					
	BSBGT	**BSBG FP**			
		0.5%	1%	1.5%	2%
Sable (Kg/m³)	1375	1375	1375	1375	1375
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	160	160	160	160	160
Eau (l/m³)	280	280	280	280	280
Plastifiant (%)*	1	1.32	1.38	1.43	1.5
Fibres plastiques (kg/m³)	0	6	12	18	24
Sable de Concassage					
	BSCNT	**BSCN FP**			
		0.5%	1%	1.5%	2%
Sable (Kg/m³)	1560	1560	1560	1560	1560
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350
Fillers de Laitier (Kg/m³)	140	140	140	140	140
Eau (l/m³)	262.5	262.5	262.5	262.5	262.5
Plastifiant (%)*	1	1.35	1.43	1.47	1.5
Fibres plastiques (kg/m³)	0	6	12	18	24

(***** % par rapport à la masse du ciment)

4.4 Malaxage et conservation des éprouvettes en béton

Le malaxage des bétons de sable se fait en deux malaxeurs en fonction de la nature et du nombre des éprouvettes à réaliser. S'il s'agit des éprouvettes de 4×4×16 cm, on utilise un malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L, et pour les éprouvettes cylindriques 16×32 cm ou carrées 4×10×10 cm on a utilisé le malaxeur à béton d'une capacité de 56 L. Quel que soit le type de malaxeur utilisé, l'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un

mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés. Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- on verse les gros grains (le sable);
- puis en verse les fines et le ciment;
- on malaxe pendant 2 minutes;
- on verse de l'eau et la moitié de la quantité d'adjuvant et on continue le malaxage pendant 2 minutes;
- on verse le reste de l'eau et de l'adjuvant et on mélange pendant 1 minute.

-L'introduction des déchets de poudre plastique a été effectué au départ (après l'introduction du sable et avant l'introduction du ciment).
-L'introduction des fibres plastiques a été effectué juste après la version de la quantité finale d'adjuvant par petites quantités tout en malaxant pour permettre aux fibres de se répartir d'une façon homogène.

4.5. Essais réalisés sur béton de sable frais

Juste après chaque malaxage, trois essais sur béton frais ont été réalisés :

4.5.1 La maniabilité

Elle nous permis d'apprécier la fluidité d'un béton de sable qu'est l'objet des essais définis par la norme NF P 18 - 452 [102]. La consistance est caractérisée par le temps que met le béton de sable pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre LCL (B). Après la mesure de la maniabilité (temps d'écoulement), toutes les compositions de béton ont été ajustées pour avoir une maniabilité constante pour tous les mélanges.

4.5.2 L'air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton de sable frais, on a utilisé la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton de sable frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre selon la norme française [NF P 18-353] [103].

4.5.3 La densité

La densité du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 [104].

4.6 Fabrication et confection des éprouvettes

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton a été coulé dans des moules métalliques de forme cylindrique 16×32 cm, destinées aux essais de module d'élasticité, des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de traction par flexion et de variations dimensionnelles , ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 [105]. Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 1800, et elles ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuelle.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. 24 heures après la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents : dans l'eau à 20°C ± 2°C et à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire).

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai et jusqu'à un poids constant.

4.7. Essais réalisés sur béton de sable durci

Les essais de caractérisation sur béton de sable durci sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau. 4.13**.** Essais sur bétons de sable durcis

Essais	**Appareil**	**Dimension (cm)**
Traction	La Presse hydraulique	4x4x16
Compression		
module d'élasticité	Cage extensométrique	16x32
La conductivité thermique	CT mètre	4×10×10
Retrait + gonflement	Déformètre	4x4x16
Variation massiques	Balance	
Capacité d'absorption d'eau	Essai d'absorption	demi-prisme d'éprouvette 4x4x16
La porosité	Dessiccateur	
La résistance au feu	Four à moufle	

4.7.1 Essais de traction par flexion

Selon la norme EN 196-1 [106], c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Fig. 4.20), une éprouvette prismatique de côté **a** et de longueur **L**. Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 7, 28 et 90 jours.



Fig.4.20. Dispositif de l'essai de traction par flexion

4.7.2 Essais de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme NF EN 196-1 [106] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm (Fig. 4.21), à l'âge de 7, 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme à la norme NF P 18-412 [107].



Fig.4.21. Diapositif de l'essai de résistance à la compression

4.7.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité en compression a été déterminé à l'âge de 28 jours à l'aide de la cage extensométrique (Fig. 4.22) permettant de mesurer les déformations longitudinales au cours de chargement sur des éprouvettes 16× 32 cm selon la norme ISO 1920-10[108].



Fig.4.22. Mesure du module d'élasticité en compression

4.7.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ, elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre [109]. Elle s'exprime en W/m°C. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant [110].

Dans notre cas la conductivité thermiques des différents bétons a été mesurée à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme NF EN 993-15 [111] sur des échantillons de 4 ×10×10 cm.

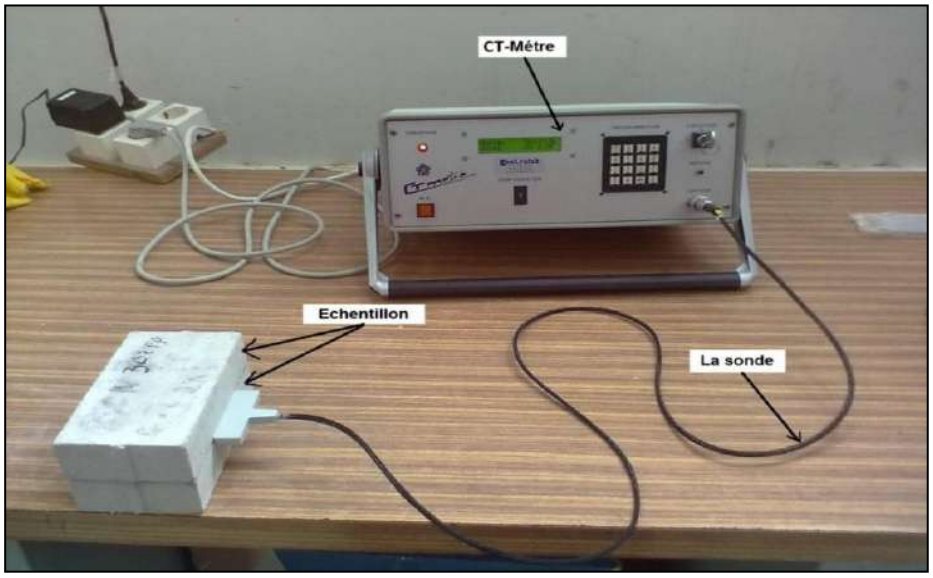


Fig.4.23. Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique

4.8. Essais sur l'approche de durabilité

4.8.1 Porosité et microstructure

À la fin de la cure, les demi-prismes d'éprouvette 4x4x16cm sont séchés dans une étuve ventilée à 40 ± 5 °C jusqu'à poids constant ; elles sont ensuite prolongé dans l'eau, jusqu'à poids constant (Fig.4.24). L'échantillon est passé ensuite à imbibition sous vide, et après saturation une pesée sous eau (M_{eau}) et une autre dans l'air (M_{air}) sont réalisées. Ensuite, l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à poids constant et à nouveau, une mesure de masse (M_{sec}) est réalisée selon la recommandation l'AFPC-AFREM. La porosité volumique accessible à l'eau ε , exprimée en pourcentage, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad \text{..... (Equation 4.8)}$$

ε (%) : La porosité totale

M_{air} : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

M_{sec} : La masse d'éprouvette sèche

M_{eau} : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau



Fig.4.24. Mesure de la porosité accessible à l'eau

La structure des bétons de sable étudiés a été effectuée par analyse d'images en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) pour des agrandissements très élevées et un vidéo - microscope (Controlab®) VH-Z25 muni d'un zoom 25x à 175x (Fig. 4.25) pour des faibles agrandissements. Les observations au MEB ont été effectuées sur des surfaces d'échantillons de 5 à 10g, après les avoir rendus conducteurs par métallisation en les couvrant, sous vide, d'une couche d'environ 10 à 20nm d'or et les observations au vidéo – microscope ont été effectuées sur des échantillons provenant de coupes d'éprouvette 4x4x16 cm^3,et cela pour avoir une idée sur la porosité el le vide qui se trouve à l'intérieur de l'échantillon.



Fig.4.25. Observation de l'échantillon par Microscope Electronique à Balayage (MEB)

4.8.2 Absorption capillaire

Dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de béton de sable déjà utilisé puis sécher. On le pèse (m_0) au début, après on l'introduit dans un bac remplit d'un film d'eau (5mm d'eau) (comme mentionné dans la figure. 4.26), et pendant chaque intervalle du temps (15 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h et 24h) on repese le morceau (m_1). La différence du poids entre m_1 et m_0 (m_1- m_0), est le poids d'eau absorbé (NBN NE 13057) [112].

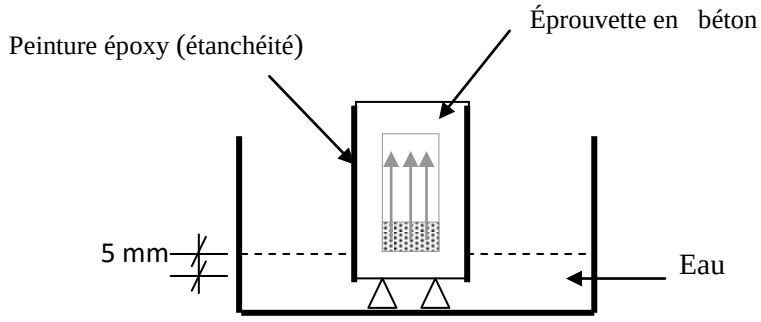


Fig. 4.26. Absorption d'eau par succion capillaire

4.8.3 Variations dimensionnelles et massique

En l'absence de toute charge, le béton 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 béton. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton [113].

Les mesures du retrait à l'air libre et gonflement sous eau, ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm^3 conformément à la norme NF P 18-404 [114]. Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un retractométre (Fig. 4.27) muni d'un comparateur qui permet de mesurer le retrait et le gonflement de l'éprouvette à tout moment à cours et moyenne terme (du 1er jusqu'a 300 jours). La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C pour l'essai de retrait, et dans l'eau à 20°C ± 2°C pour l'essai de gonflement**.**

En plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g prés l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.



Fig.4.27. Dispositif mesure du retrait et gonflement

4.8.4 Résistance au feu

Cet essai consiste à préparer des demi prismes d'éprouvettes $4\times4\times16cm^3$ 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 (Fig. 4.28) à différentes températures 200°C, 400°C ,600°C et 800°C avec une vitesse de chauffage égale à 10°C/min (Fig. 4.29**)** maintenues la température constante dans le four pendant une heure conformément à la norme ISO 834[115]. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasés. Pour chaque température, des mesures de pertes de masse ont été effectuées. Le degré de déshydratation (Perte de masse (%)) est évalué par la relation suivante :

$$[\text{Perte de masse (\%)}] = [(M_1-M_2)/M_1)] \times 100 \quad \text{(Equation 4.12)}$$

Avec M_1, M_2 les masses des éprouvettes avant et après le chauffage respectivement



Fig.4.28. Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle

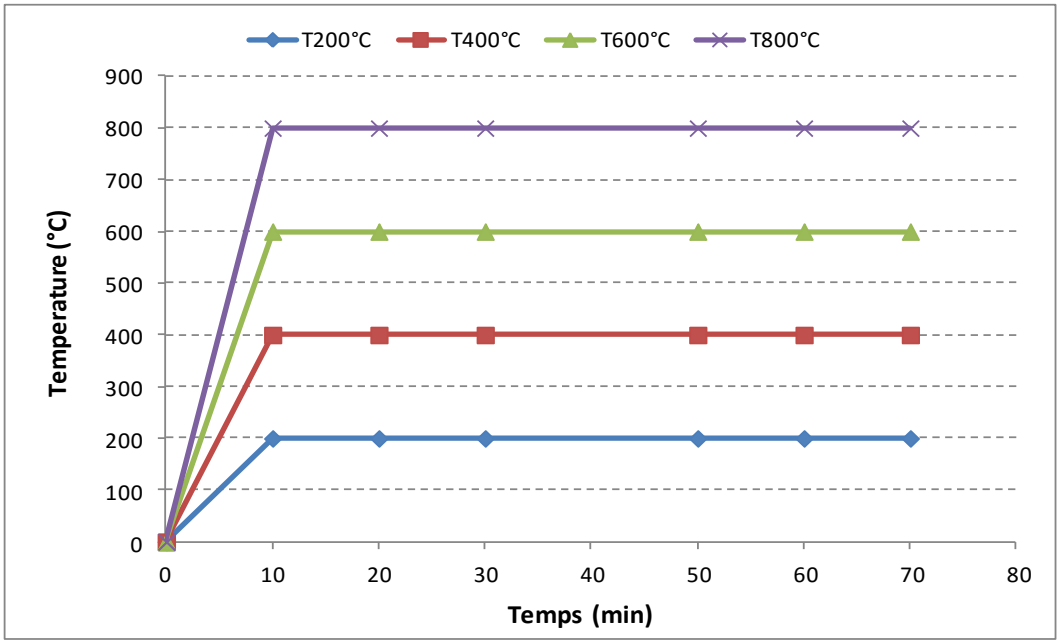


Fig. 4.29. Courbe de chauffage des éprouvettes

4.9 Variables étudiées

L'organigramme suivant résume les variables d'étude expérimentale réalisée au laboratoire. Les différents matériaux utilisés, les essais réalisés et les différentes composites obtenues sont présentés à l'organigramme suivant.

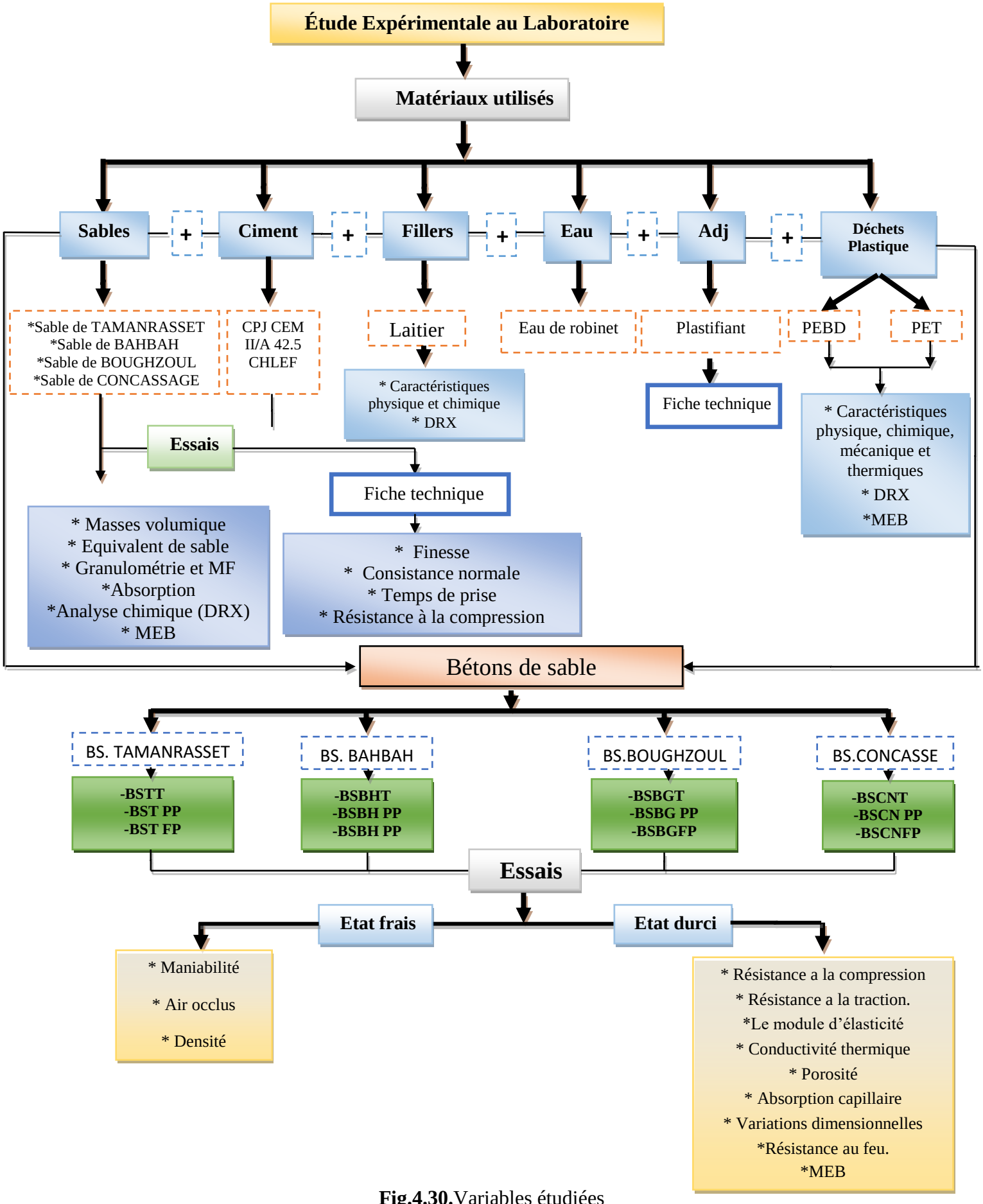


Fig.4.30. Variables étudiées

4.10. Conclusion

L'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels recyclés dans la fabrication du BS constitue une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet des déchets plastiques sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des bétons de sables. Quatre types de sables de nature et de morphologie différente, ont été utilisés, il s'agit des sables de dune, de carrière et de concassage.

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants :

- Caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés dans les compositions des BS ;

- La méthode de formulation utilisée, est appelée méthode expérimentale du projet SABLOCRETE.;

- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents bétons de sable à base de déchets plastiques à l'état frais et à l'état durci au cours de cette étude.

- Pour évaluer la durabilité du BS à base de déchets plastiques, nous avons choisi les essais de la porosité et microstructure, l'absorption d'eau, les variations dimensionnelles (retrait et gonflement), les variations massiques (perte et gain de masse), la résistance au feu (perte de masse et résistance à la compression).

Chapitre 05 :

Résultats et interprétations

Partie 01 :

Béton de sable à base de Poudre Plastique

5.1. Introduction

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable à base de poudre plastique à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

5.2. Béton frais

5.2.1. La maniabilité

La maniabilité des bétons de sable réalisés, est basée souvent sur la mesure du temps d'écoulement à l'aide d'un maniabilimètre LCL type B (page 164). Les résultats trouvés sont résumés sur les figures 5.1 à 5.4.

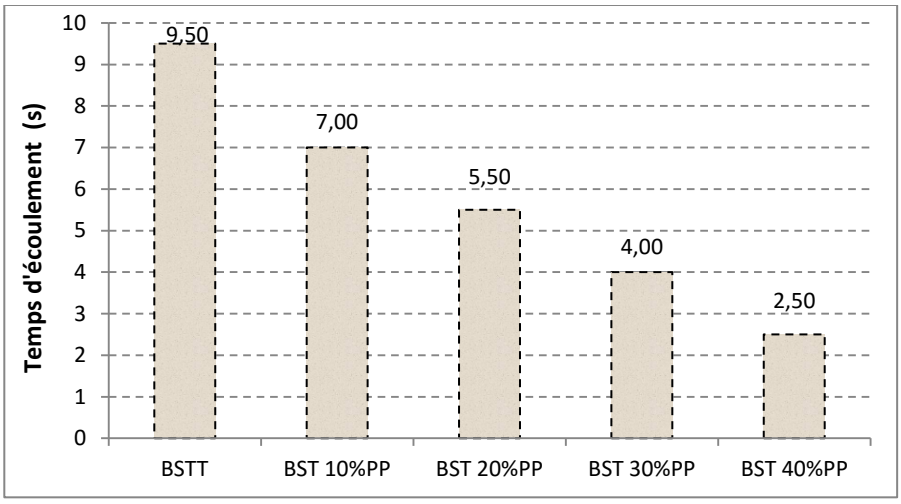


Fig. 5.1. Temps d'écoulement des BST à base de poudre plastique

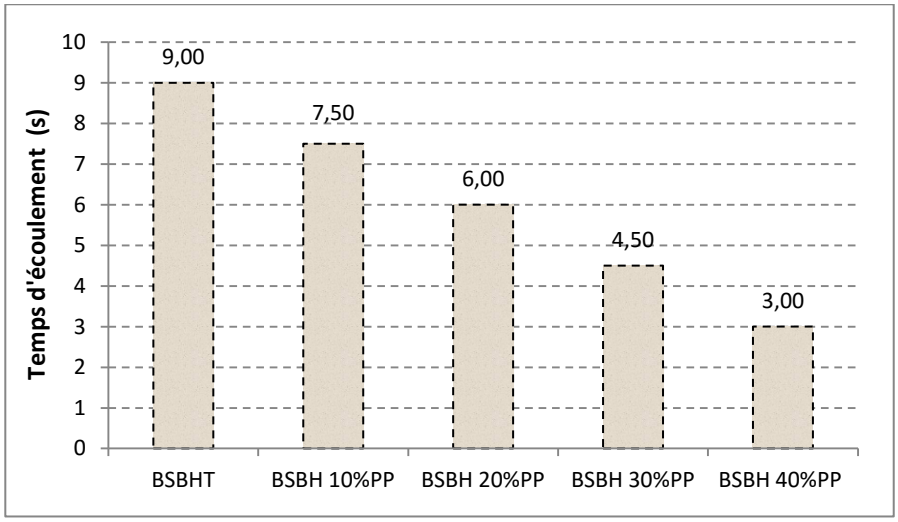


Fig. 5.2. Temps d'écoulement des BSBH à base de poudre plastique

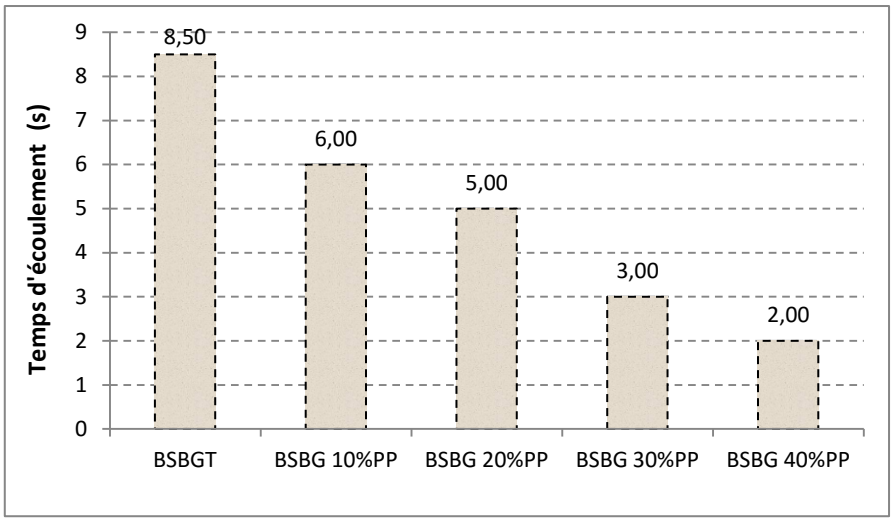


Fig. 5.3. Temps d'écoulement des BSBG à base de poudre plastique

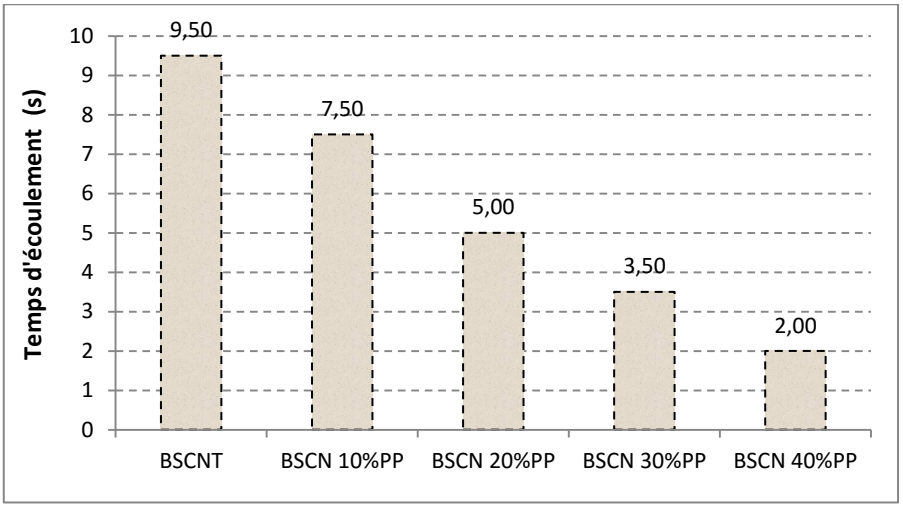


Fig. 5.4. Temps d'écoulement des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures ci-dessus, on remarque que la maniabilité de tous les types de bétons de sable varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par la poudre plastique. On constate aussi que plus le pourcentage de la poudre plastique augmente, plus le temps d'écoulement diminue. Cela est due peut être à la présence d'eau libre dans le mélange, parce que la poudre plastique n'absorbe pas d'eau, ce qui confirme les résultats trouvés par A.M. Da Silva et al. [59].

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir une maniabilité constante (un temps d'écoulement entre 8(s) et 11 (s) est visé) comme indiquent les figures suivantes (Fig. 5.5 à Fig. 5.8) :

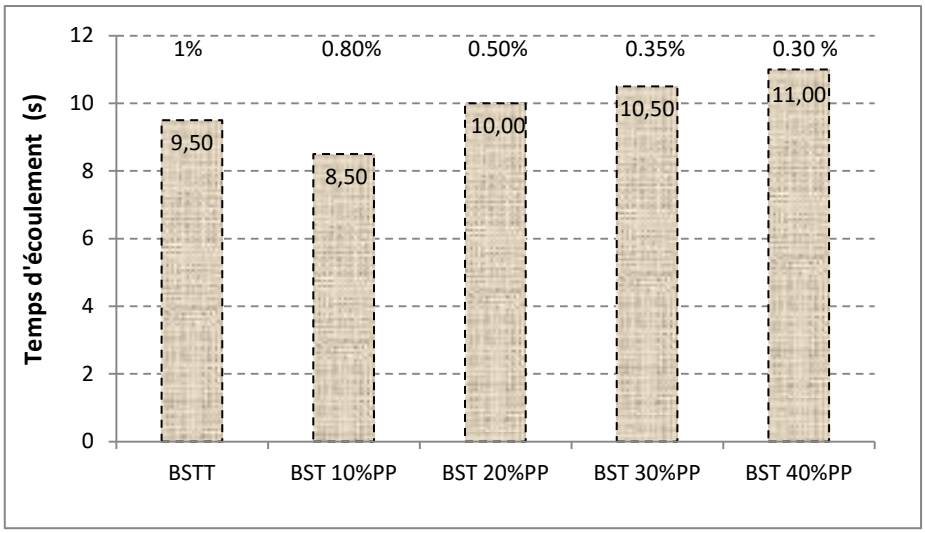


Fig. 5.5. Temps d'écoulement des BST à base de poudre plastique après réglage

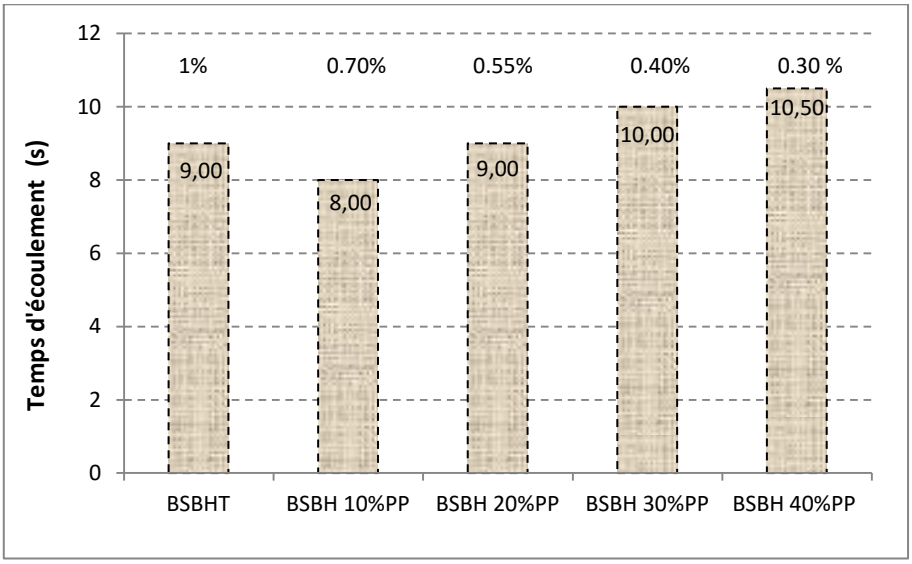


Fig. 5.6. Temps d'écoulement des BSBH à base de poudre plastique après réglage

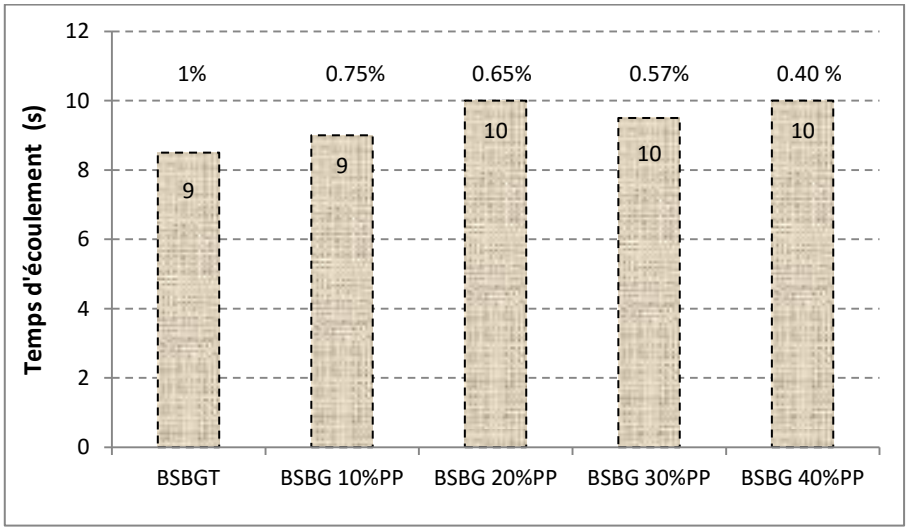


Fig. 5.7. Temps d'écoulement des BSBG à base de poudre plastique après réglage

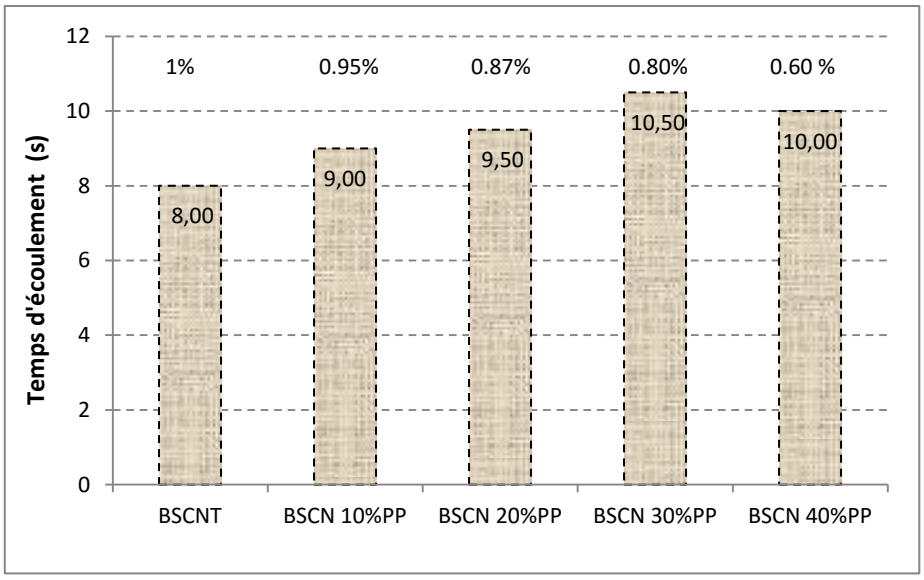


Fig. 5.8. Temps d'écoulement des BSCN à base de poudre plastique après réglage

5.2.2. La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures ci-dessous (Fig. 5.9 à 5.12) :

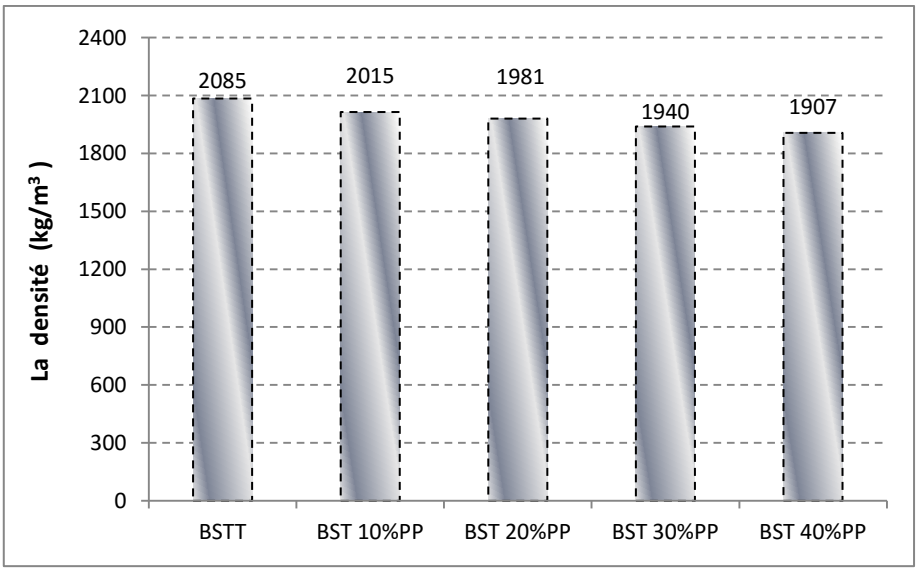


Fig. 5.9. La densité des BST à base de poudre plastique

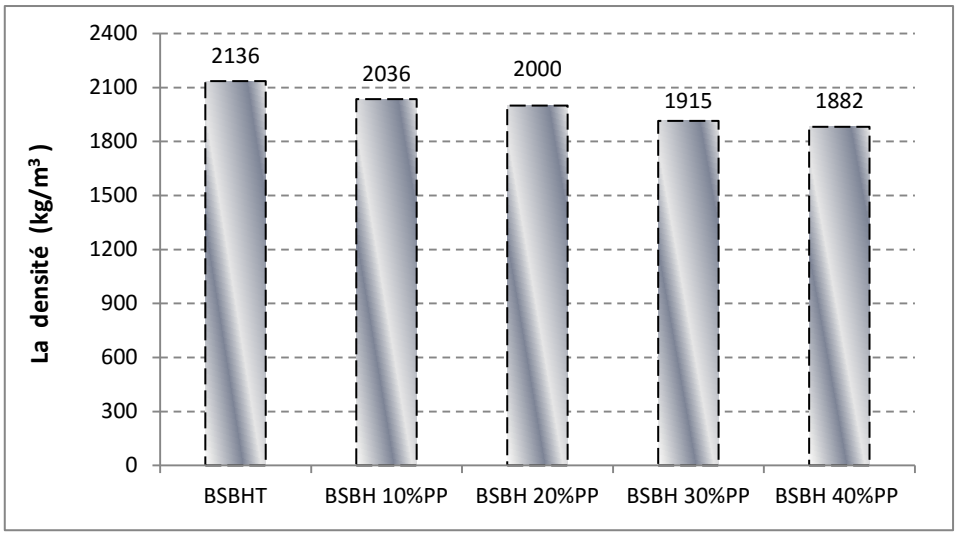


Fig. 5.10. La densité des BSBH à base de poudre plastique

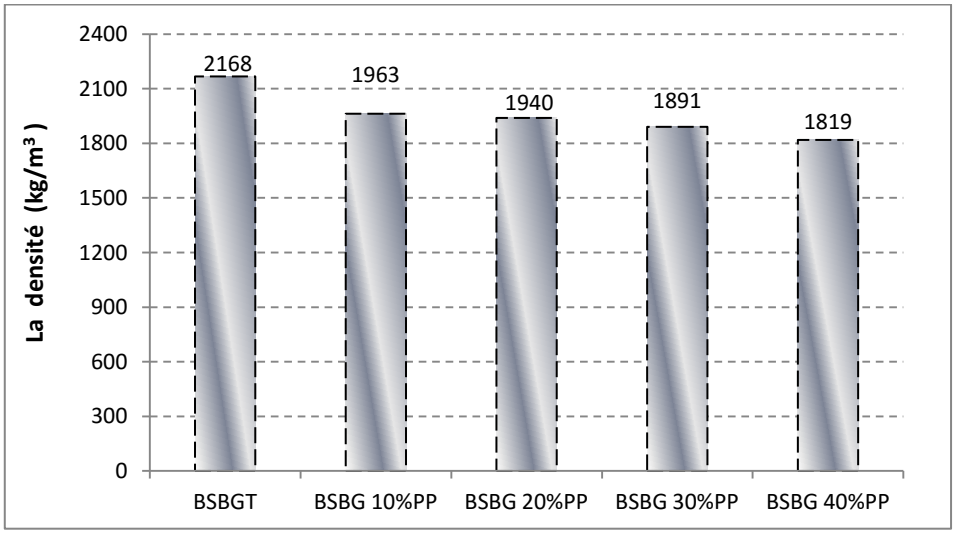


Fig. 5.11. La densité des BSBG à base de poudre plastique

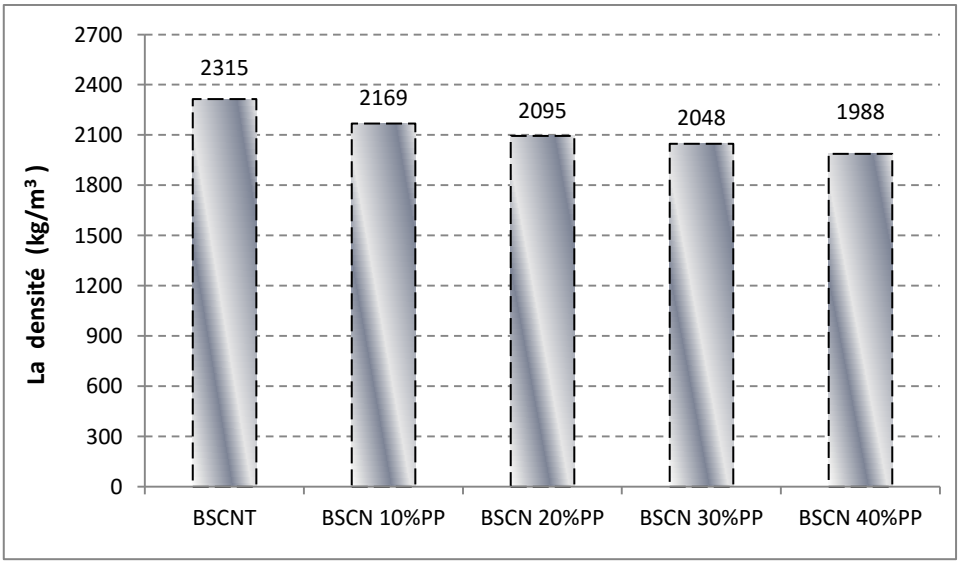


Fig. 5.12. La densité des BSCN à base de poudre plastique

Les figures précédentes montrent que la substitution du sable par la poudre plastique influe négativement sur la densité du béton de sable. On remarque aussi que quelque soit le type du sable, la densité du béton est diminuée en fonction de l'augmentation du dosage en poudre plastique. Ce résultat est logique et attendu, car la densité du plastique incorporé est plus faible que celle du sable substitué; Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [59, 61-63] qui ont trouvé aussi que la densité du mortier est diminuée d'une façon considérable en fonction du pourcentage de substitution du sable par la poudre plastique recyclée (type polyéthylène et polypropylène).

5.2.3. L'air occlus

Dans cet essai, l'air occlus est mesuré (en pourcentage) pour chaque gâché du béton de sable et les résultats obtenus sont résumés dans les figures suivantes (Fig. 5.13 à Fig. 5.16):

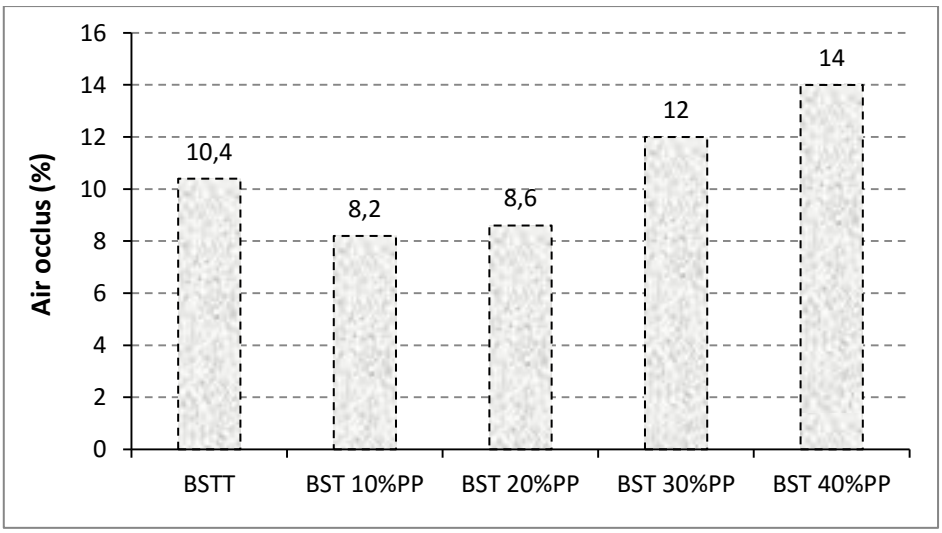


Fig. 5.13. L'air occlus des BST à base de poudre plastique

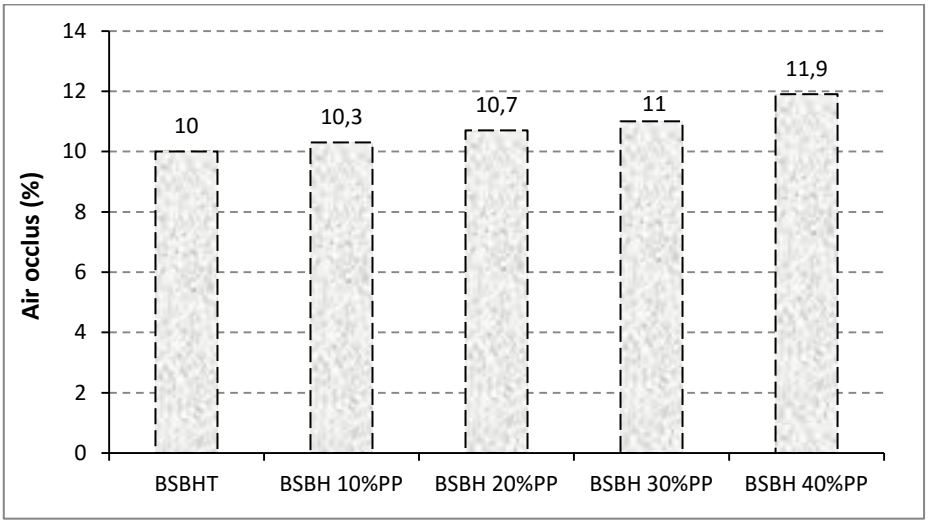


Fig. 5.14. L'air occlus des BSBH à base de poudre plastique

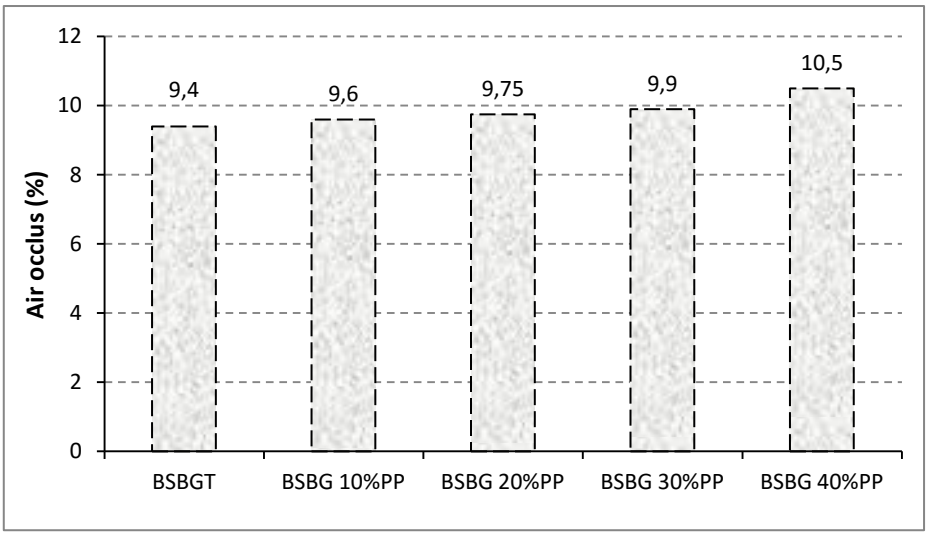


Fig. 5.15. L'air occlus des BSBG à base de poudre plastique

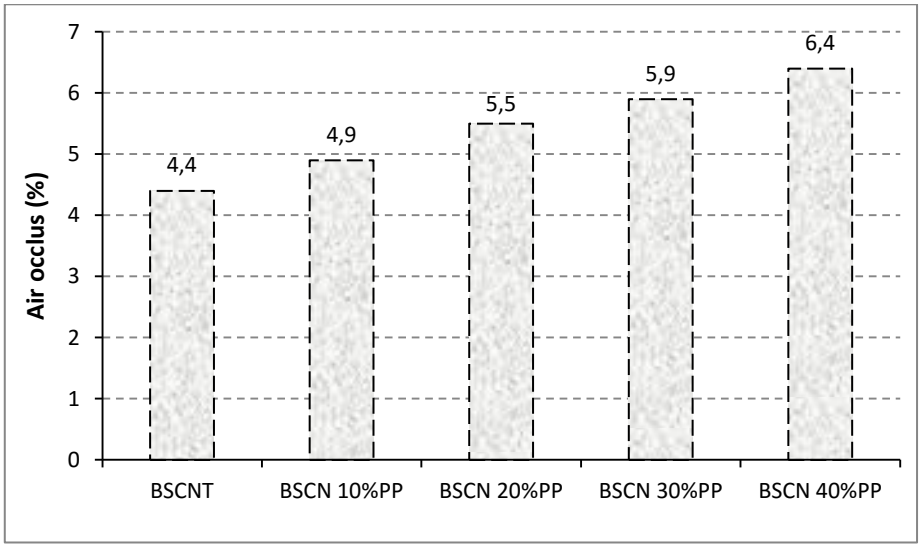


Fig. 5.16. L'air occlus des BSCN à base de poudre plastique

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'incorporation de déchets de poudre plastique à la masse de différents types de béton de sable cause plus d'air occlus, et que la quantité d'air est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de la poudre plastique. Cela explique que ces types de béton de sable sont moins compactes et par conséquence plus poreux par rapport au béton de sable de référence. Cette augmentation d'air est liée à la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de poudre plastique. Ce qui confirme les résultats de Siddique et al [64] qui ont trouvé que les bétons à base de déchets plastiques (sous forme de poudre) contient plus d'air occlus que celui du béton de référence même sans l'utilisation de l'adjuvant entraîneur d'air (AEA). Des observations similaires ont été constatées aussi par Khatib et al [116]. Un cas particulier a été enregistré pour les BST à base de 10% et 20% de poudre plastique qui présentent un taux d'air occlus moins par rapport au béton de sable témoin. Cela

signifie que ce type de béton de sable est bien compacté et par conséquence moins poreux par rapport au BS de référence.

5.3. Béton durci

De la même façon que le béton de sable frais, les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable durcis sont résumés ci-dessous :

5.3.1. Résistances à la compression

Pour chaque essai, les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures prises sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 7, 28 et 90 jours. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes :

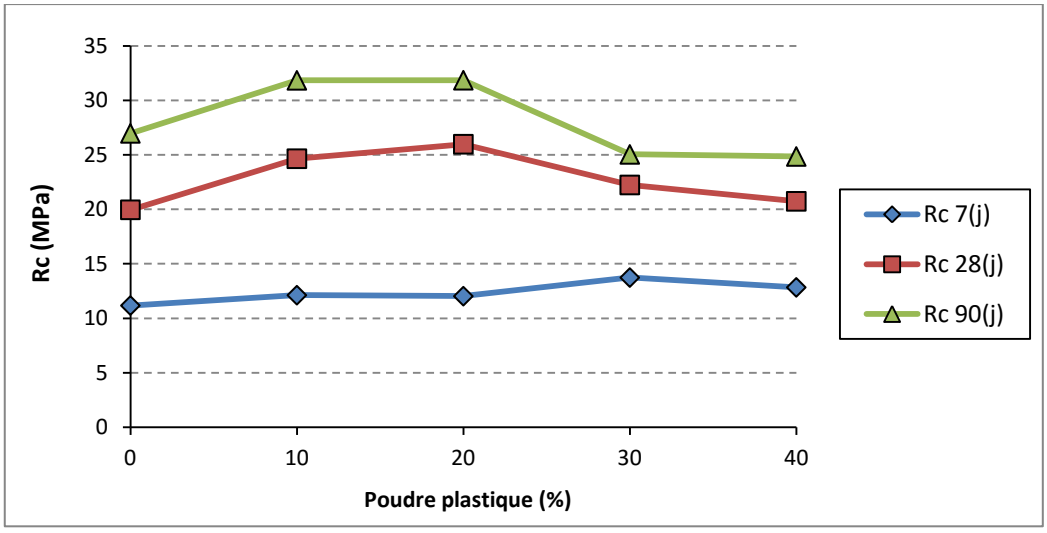


Fig. 5.17. La résistance à la compression des BST à base de poudre plastique

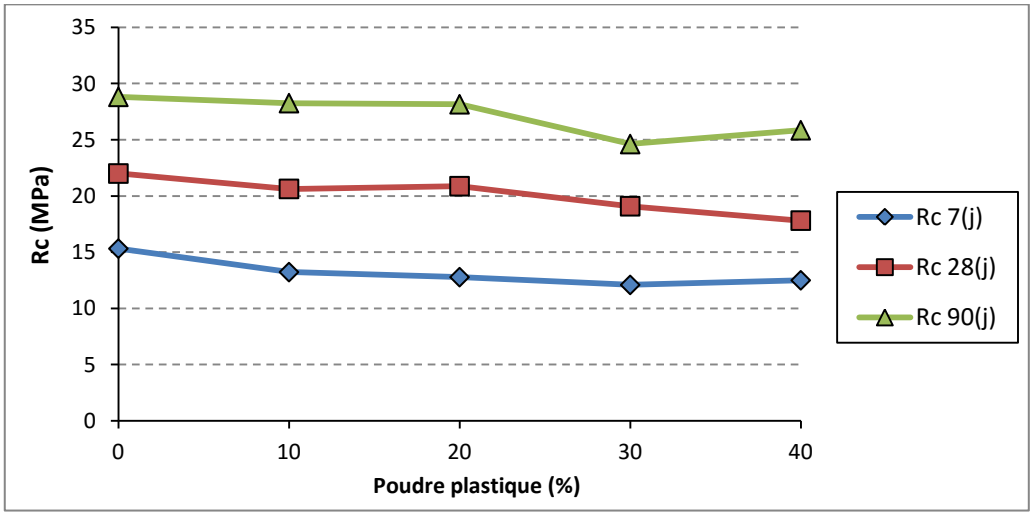


Fig. 5.18. La résistance à la compression des BSBH à base de poudre plastique

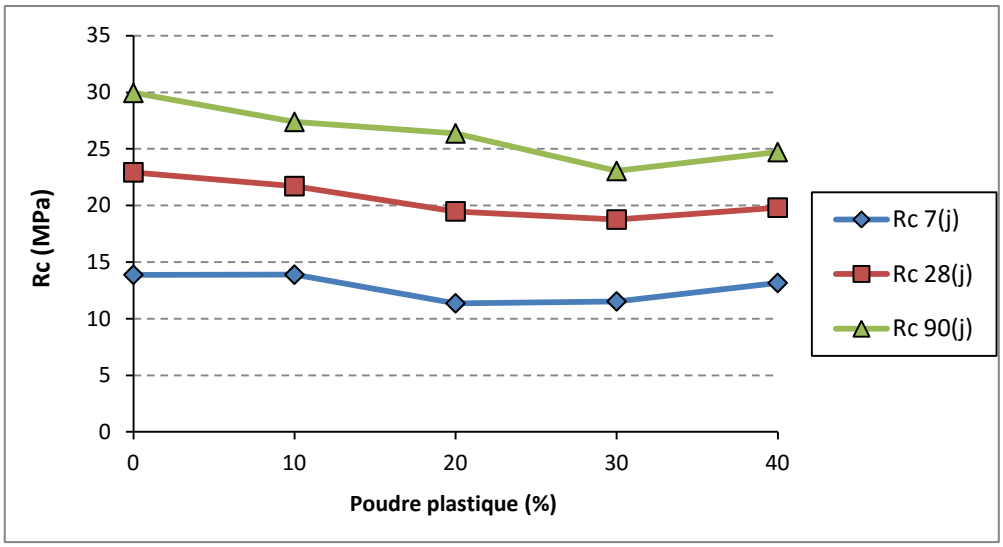


Fig. 5.19. La résistance à la compression des BSBG à base de poudre plastique

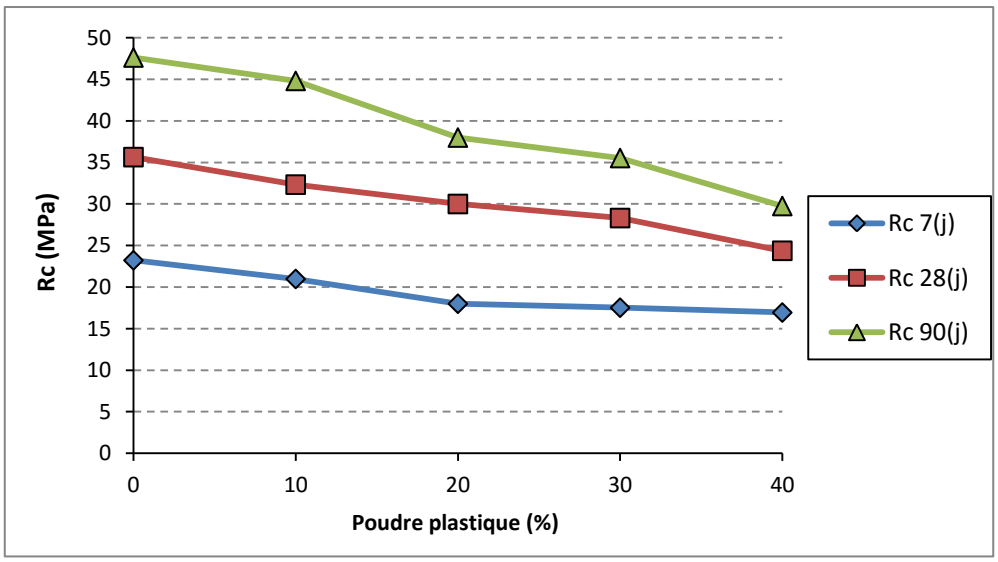


Fig. 5.20. La résistance à la compression des BSCN à base de poudre plastique

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des différents bétons de sable augmente en fonction de l'âge et suit la même cinétique que celle du béton de sable de référence. La figure 5.17 montre que la substitution du sable très fin par la poudre plastique mène à une augmentation de la résistance (passe par un optimum de 20%) à l'âge de 28 et 90 jours. Cette augmentation de résistance est liée à la porosité des BST 10% et 20% PP qui est plus faible que celle du béton de sable témoin, ainsi que à la granulométrie du sable très fin substitué. Le gain de résistance estimé à 28 jours pour un pourcentage de substitution de 10% et 20% est de 23.5 % et 30.16% respectivement. Au-delà de cette valeur la résistance commence a diminué à cause d'augmentation de la porosité. Ce qui confirme les résultats de Rahmani et al. [65] qui ont trouvé une augmentation de la résistance à la compression en fonction de substitution de 5 % de PET dans le sable. Galvão et al. [66] ont étudié l'effet de substitution de 0.5, 1, 2.5, 5 et 7.5%

du sable par PEBD sur la résistance à la compression du béton. Ils ont trouvé que les bétons à base de 0.5, 1 et 2.5% présentent des résistances plus importantes que celles du béton témoin. Mais au-delà de 2.5% la résistance est diminuée et devient moins importante que celle du béton de référence. Cependant les figures 5.18, 5.19 et 5.20, montrent que la substitution du sable par la poudre plastique influe négativement sur la résistance à la compression des bétons de sable fabriqués. La réduction de la résistance est estimée par 19 % pour les BSBH, 13.6 % pour les BSBG et 31.6 % pour les BSCN à l'âge de 28 jours. Cette chute semble être logique et attendue, parce que le grain de poudre plastique incorporé est moins dure que celle du sable substitué, qui par conséquent donne naissance à un produit moins résistant. Cependant, la porosité plus élevé des bétons de sable à base de poudre plastique qui est due à la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et la poudre plastique a aussi une influence sur la diminution de la résistance .Ceci confirme les résultats des d'autres chercheurs [61], qui ont trouvé des chutes très importantes de la résistances à la compression pour des mortiers à base de 10, 15, 20, 25, 33 et 50% de déchets de poudre plastique (type polyéthylène et polypropylène) ,et qui est estimée à 84.86 % pour un pourcentage de 50% de substitution. Ruiz-Herrero et al. [63] ont aussi constaté une diminution de la résistance à la compression en fonction de substitution du sable par les déchets de poudre plastique recyclée (PVC, PE et PVC+PE).A.M. Da Silva et al. [59] ont aussi étudié l'influence des déchets de polyéthylène (PE) et de Polypropylène (PP) avec des taux de substitution de 5, 0 et 15% sur les performances des mortiers. Ils ont trouvé une diminution de la résistance à la compression avec la substitution des agrégats naturels par les granulats en plastique recyclé. On note finalement que le BSCN présente des meilleurs résultats grâce à sa bonne classe granulométrique et à sa porosité moins élevé. Par contre les bétons de sable de dune (BST et BSBH) présentent des résistances moins importantes, et cela est dû à ses granulométries très fines et ses porosités très élevées. L'application de ces types de bétons est recommandé pour les éléments en béton structuraux (pontaux, poutre, dalle, chaussé).

5.3.2. Résistances à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment / granulats. L'analyse des résultats de la résistance à la traction présentés sur les figures 5.21 – 5.24, est faite de la même façon que pour la résistance à la compression.

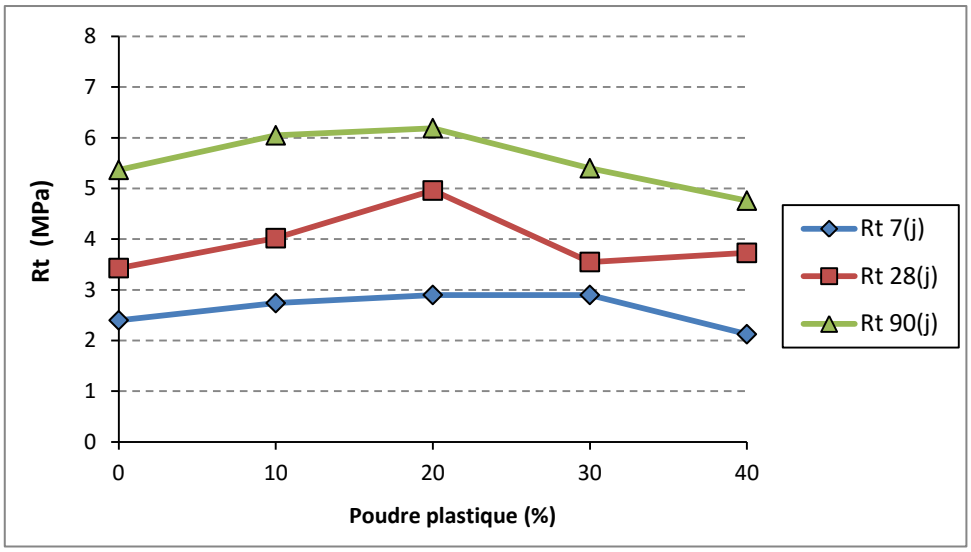


Fig. 5.21. La résistance à la traction des BST à base de poudre plastique

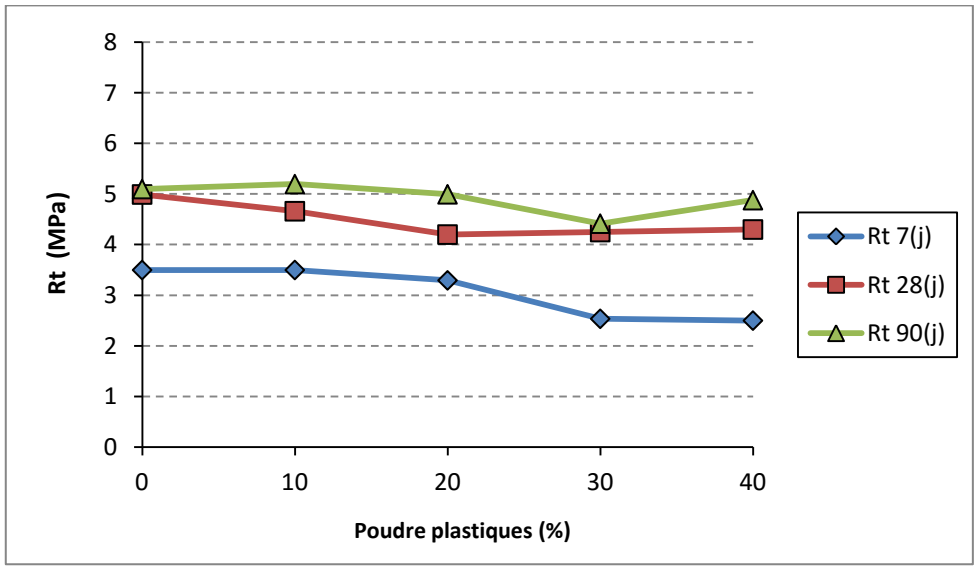


Fig. 5.22. La résistance à la traction des BSBH à base de poudre plastique

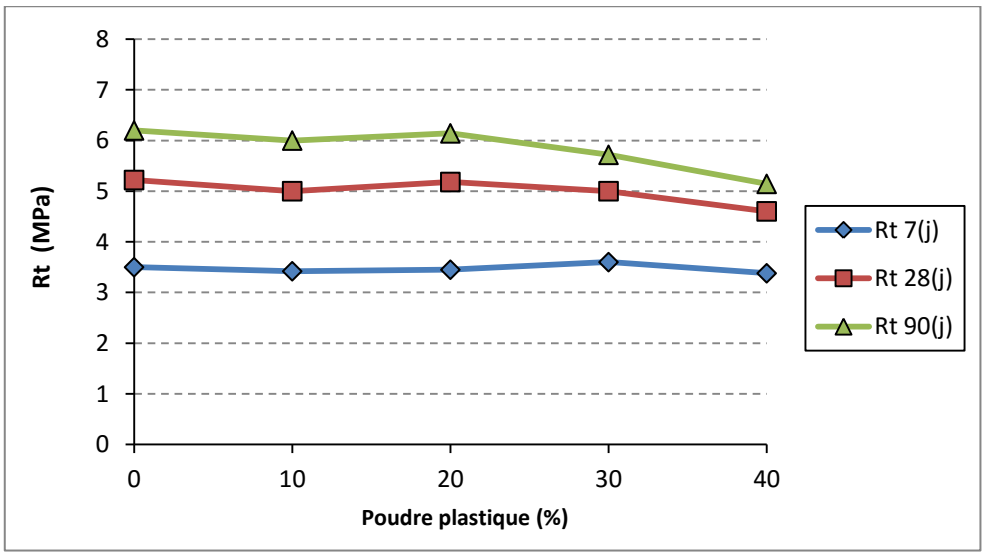


Fig. 5.23. La résistance à la traction des BSBG à base de poudre plastique

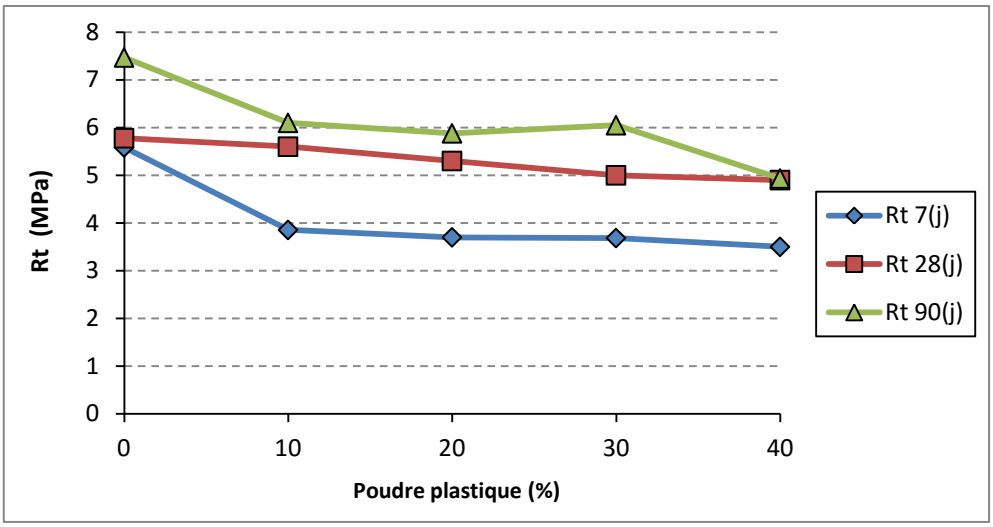


Fig. 5.24. La résistance à la traction des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures précédentes, on remarque que la substitution de 10 et 20 % du sable de dune de Tamanrasset par le déchet de poudre plastique mène à des augmentations de la résistance à la traction par flexion des BST. Au-delà de 20%, la résistance à la traction commence a diminué jusqu'à l'atteindre de la valeur minimale à 40% de substitution. Le gain de résistance à 28 jours est estimé à 17 et 44% pour une substitution de 10 et 20% respectivement.

Les résultats obtenus montrent aussi que pour tous les autres types de béton de sable, la substitution du sable par le déchet de poudre plastique engendre une diminution de la résistance à la traction par flexion et cela pour tous les âges réalisés. La dégression à l'âge de 28 jours est estimé par 13.8 % pour les BSBH, 11.8% pour les BSBG et 15% pour les BSCN. Cette chute est due à la porosité plus élevé de tous les bétons de sable à base de poudre plastique par rapport au béton de sable de référence, ainsi que au mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et les grains de la poudre plastique, ce qui est en concordance avec les résultats de d'autres auteurs [59], qui ont trouvé des chutes des résistances à la flexion des mortiers qui contient 5, 10 et 15% des déchets plastiques. Iucolano et al. [61] ont trouvé aussi des diminutions importantes de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction d'augmentation du pourcentage de substitution du sable par la poudre plastique.

Ruiz-Herrero et al. [63] ont constaté que la résistance à la traction par flexion du mortier et du béton est diminuée en fonction d'incorporation de 2.5, 5,10 et 20% de déchets plastiques recyclés. Hannawi et al. [62] ont remplacé 3, 10, 20 et 50% du sable par polycarbonate (PC) et polyéthylène téréphtalate (PET), ils ont trouvé que la résistance à la traction par flexion du mortier est diminuée de 9.5 et 17.9% respectivement pour des remplacements de 20 et 50 % du

sable par le PET, et une diminution de 32.8 % pour un remplacement de 50 % du sable par le polycarbonate.

5.3.3. Le module d'élasticité

Le module d'élasticité des différentes compositions en fonction du taux d'incorporation du pourcentage de la poudre plastique est illustré dans les figures 5.25 – 5.28 suivantes. Chaque valeur correspond à une moyenne obtenue à partir de trois essais.

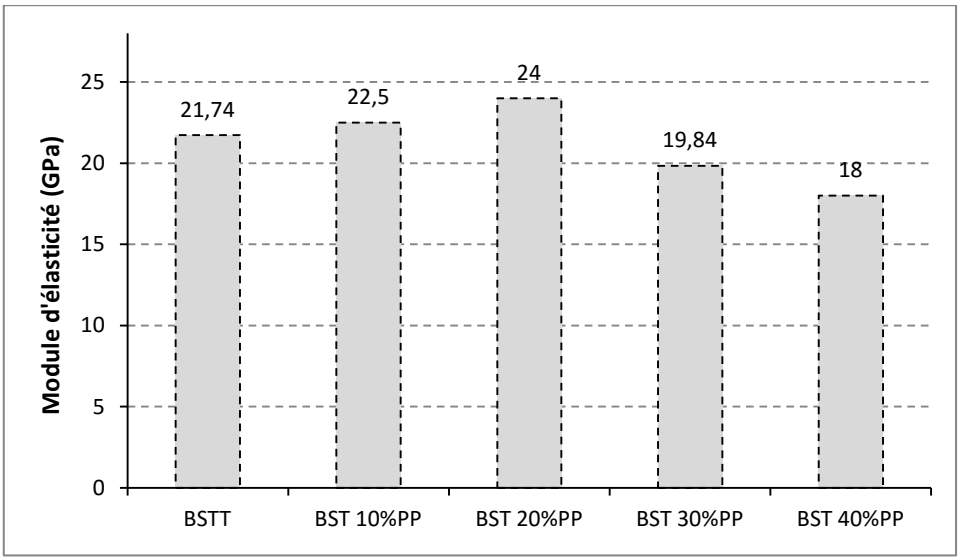


Fig. 5.25. Le module d'élasticité des BST à base de poudre plastique

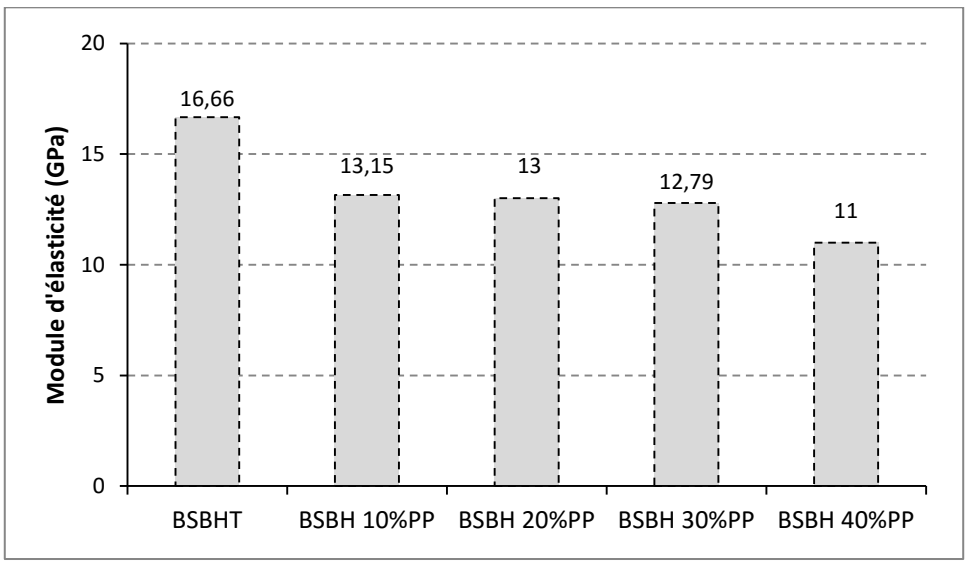


Fig. 5.26. Le module d'élasticité des BSBH à base de poudre plastique

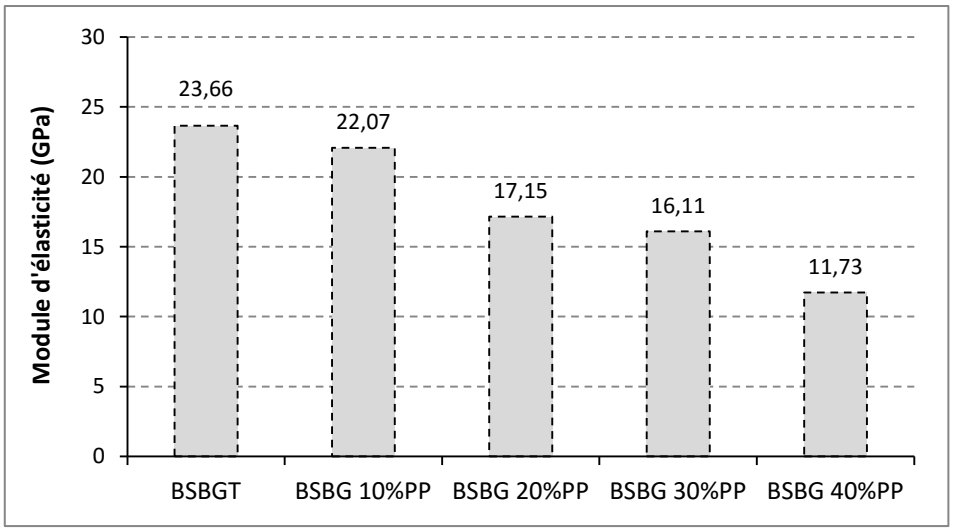


Fig. 5.27. Le module d'élasticité des BSBG à base de poudre plastique

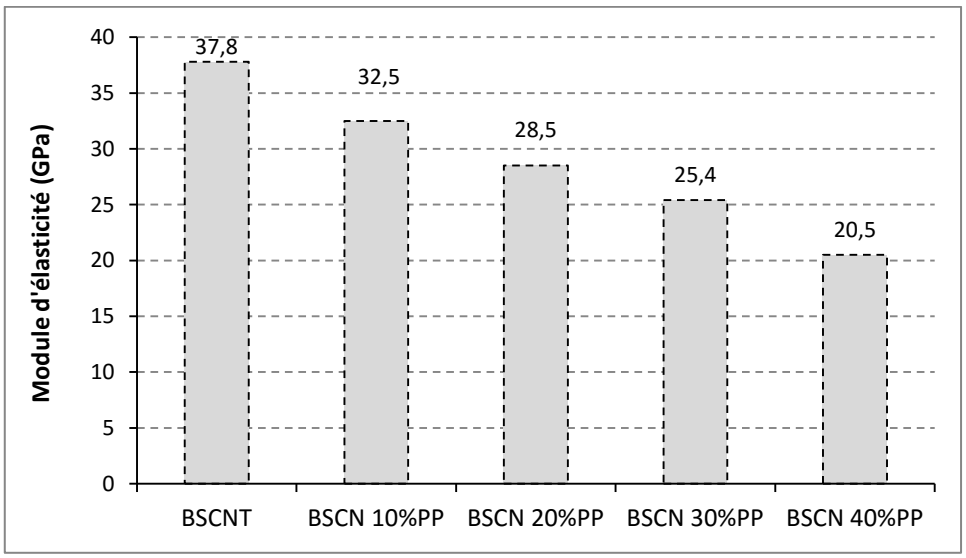


Fig. 5.28. Le module d'élasticité des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures ci-dessus on remarque que la substitution de 10 et 20 % du sable de Tamanrasset par la poudre plastique induit une légère augmentation du module d'élasticité. Le gain pour 20% de substitution, est estimé à 10,40%. Au-delà de 20% de substitution la valeur du module d'élasticité commence a diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre plastique. En outre, les résultats obtenus montrent que le module d'élasticité des autres types de béton de sable est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de la poudre plastique. La dégression est estimé à 17% pour les BST, 34% pour les BSBH, 50% pour les BSBG et 48% pour les BSCN. Cette chute est liée au faible module d'élasticité de la poudre plastique utilisée, et aux valeurs de la résistance à la compression et à la porosité du béton. Ce qui confirme les résultats des plusieurs chercheurs dans le domaine [65, 67] qui ont trouvé une diminution du module d'élasticité en fonction de substitution du sable par déférents pourcentages de déchets

plastiques (PET). Hannawi et al. [62] ont étudié aussi la variation du module d'élasticité en fonction du remplacement de 3, 10, 20 et 50% du sable par des déchets de polycarbonate (PC) et polyéthylène téréphtalate (PET). Ils ont conclus que plus le pourcentage de substitution du sable par des déchets plastiques augmente plus le module d'élasticité est diminué.

5.3.4. Conductivité thermiques

Les valeurs moyennes de la conductivité thermique obtenue sont représentées dans les figures de 5.29 – 5.32 ci-dessous :

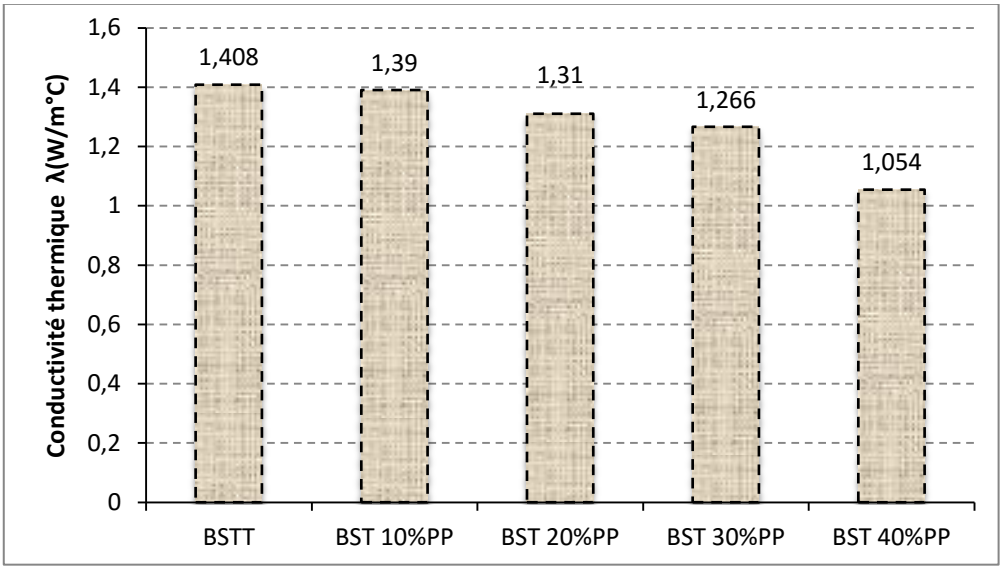


Fig. 5.29. La conductivité thermique des BST à base de poudre plastique

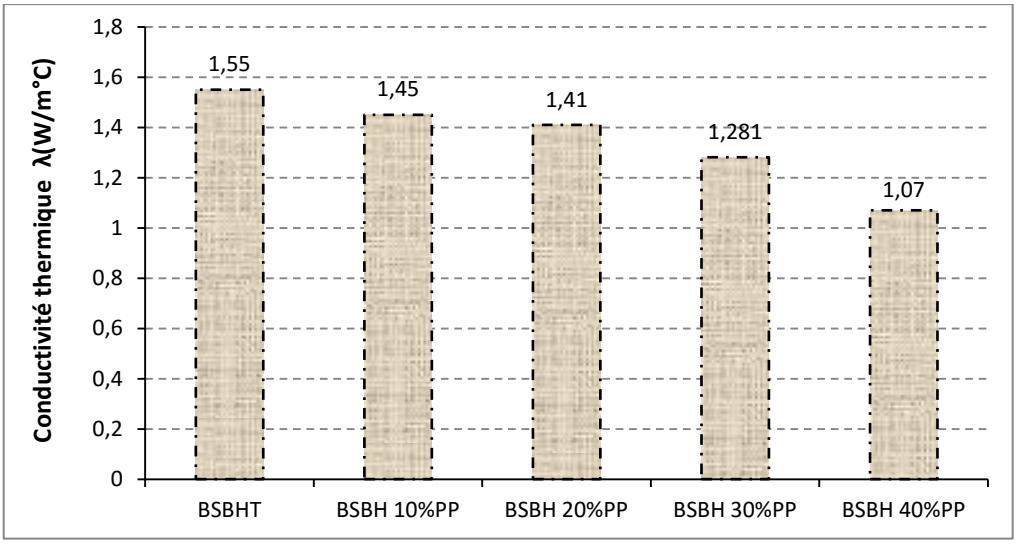


Fig. 5.30. La conductivité thermique des BSBH à base de poudre plastique

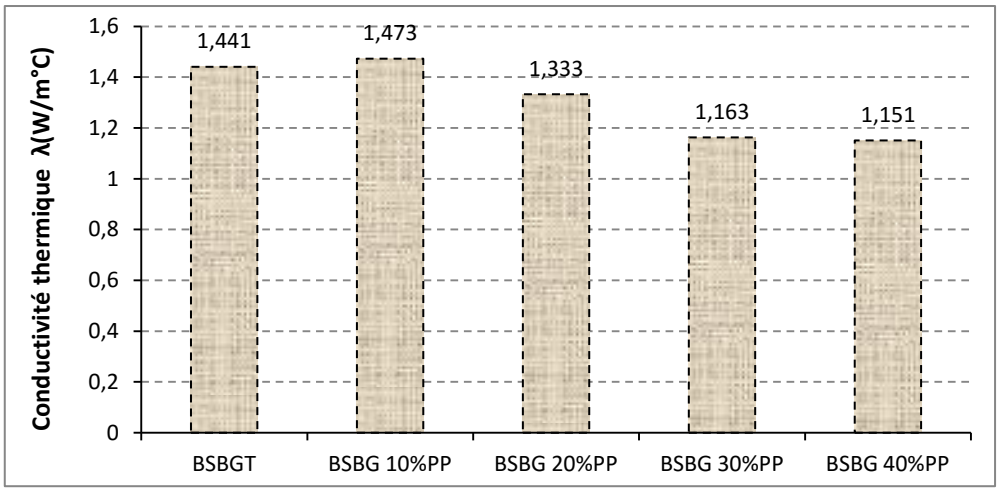


Fig. 5.31. La conductivité thermique des BSBG à base de poudre plastique

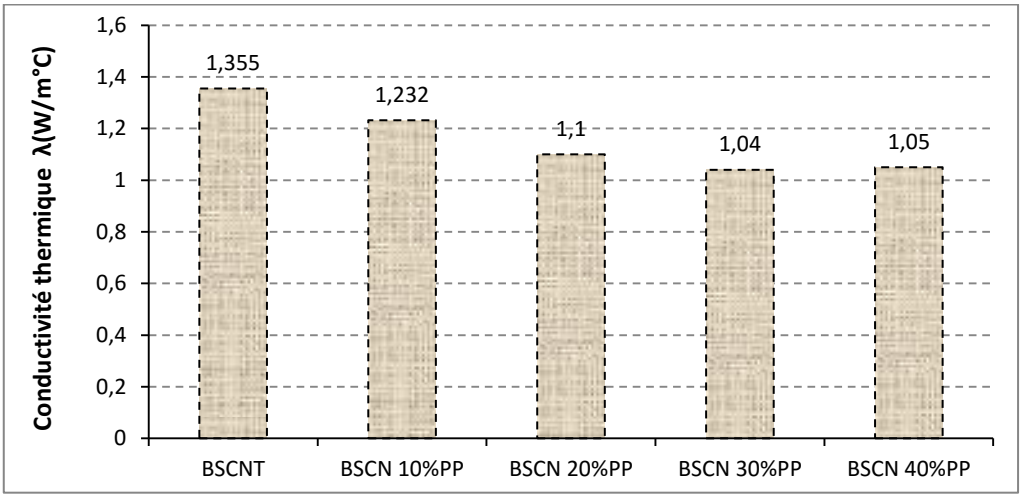


Fig. 5.32. La conductivité thermique des BSCN à base de poudre plastique

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique de tous les types de bétons de sable est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de la poudre plastique. La dégression à 40% de substitution est estimé à 25, 31, 20 et 22.5% pour les BST, BSBH, BSBG et BSCN respectivement, qui présentent les bétons de sable les plus isolants. Cette dégression est due à la conductivité thermique de la poudre plastique (PEBD 0.15 W/m°C) qui est plus faible que celle du sable naturel substitué (2 W/m°C). En outre, la diminution de la conductivité thermique est liée aussi à l'augmentation de la porosité causée par l'augmentation du pourcentage de poudre plastique. En fait, les pores contiennent de l'air qui a une conductivité thermique (0.024 W/m°C) beaucoup plus faible par rapport aux autres composants du béton de sable. Ce qui est en concordance avec les résultats de Ruiz-Herrero et al. [63].

Iucolano et al. [61] qui ont étudié l'influence de substitution du sable naturel par la polyoléfine et le polyéthylène téréphtalate sur la conductivité thermique de mortier. Ils ont trouvé que plus le pourcentage de déchets plastiques augmente, plus la conductivité thermique est diminuée. Ils ont

observé aussi que le remplacement du 20% du sable naturel par le déchet plastique entraine une diminution de 50% de la conductivité thermique. Akcaozog˘lu et al. [67] ont aussi trouvé les mêmes résultats avec une substitution volumique du sable par le déchet en PET.

Finalement, sur la base des résultats obtenus, l'utilisation de ces types de béton est conseillée pour les éléments de séparation (éléments préfabriqués, panneaux de sandwich).

5.4. Approche de durabilité

5.4.1. Porosité et microstructure

- ***La porosité***

La porosité des différents mélanges obtenus est résumée dans les figures 5.33 – 5.36 suivantes :

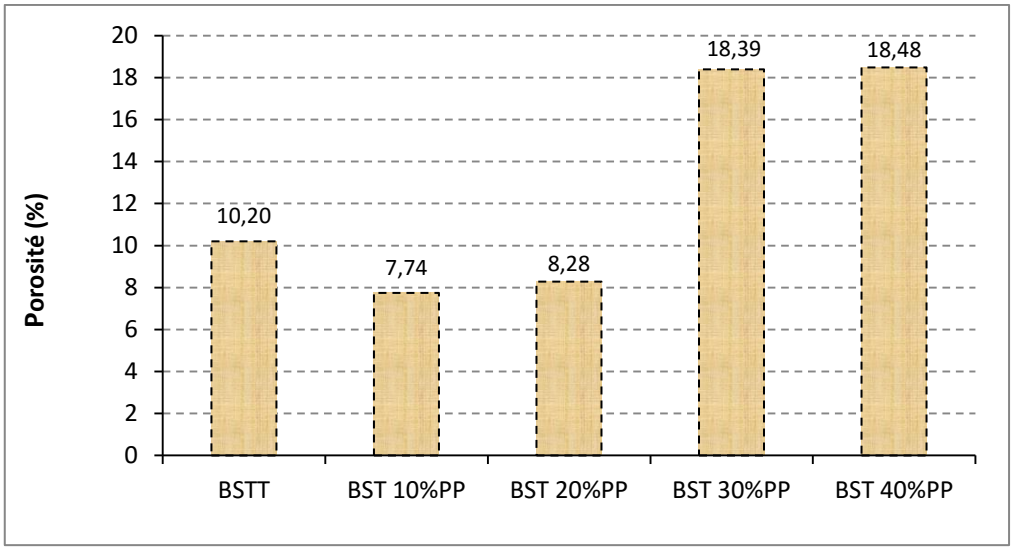


Fig. 5.33. La porosité des BST à base de poudre plastique

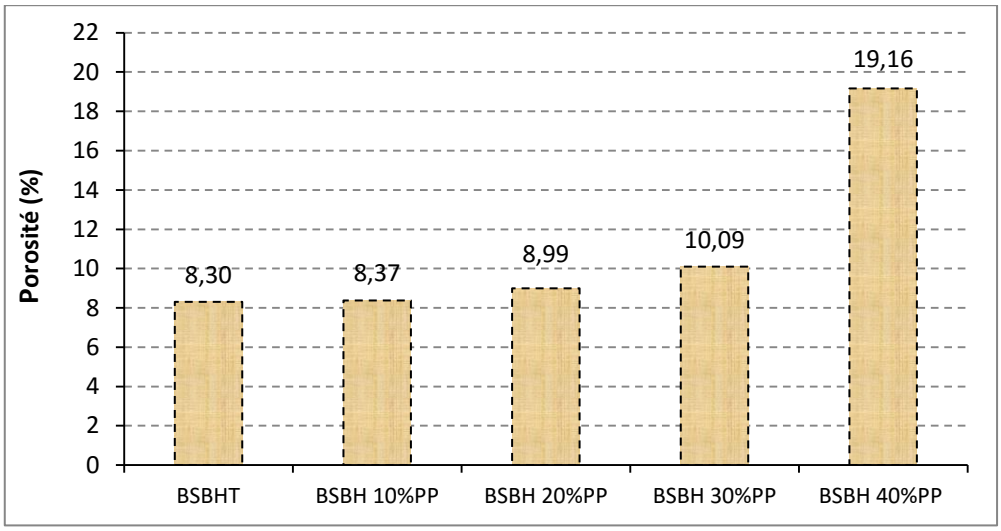


Fig. 5.34. La porosité des BSBH à base de poudre plastique

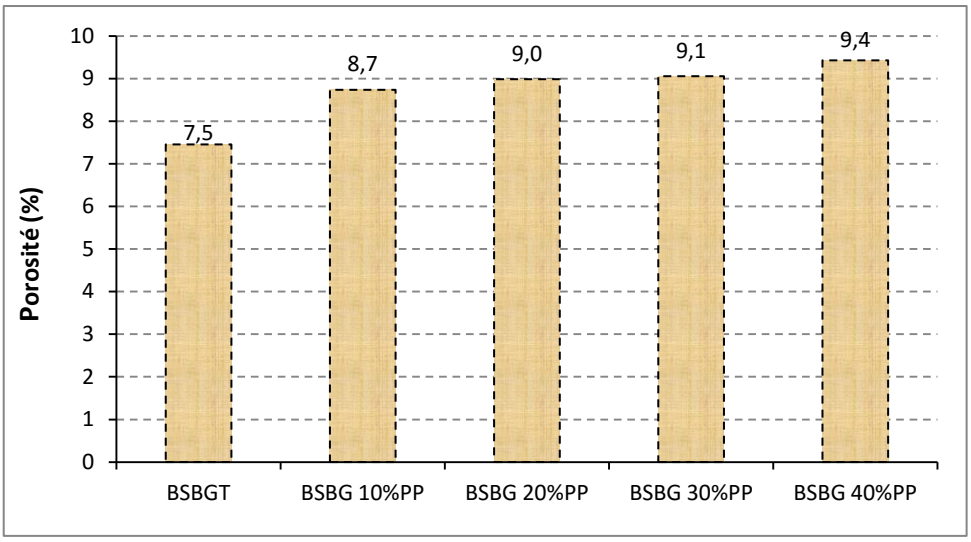


Fig. 5.35. La porosité des BSBG à base de poudre plastique

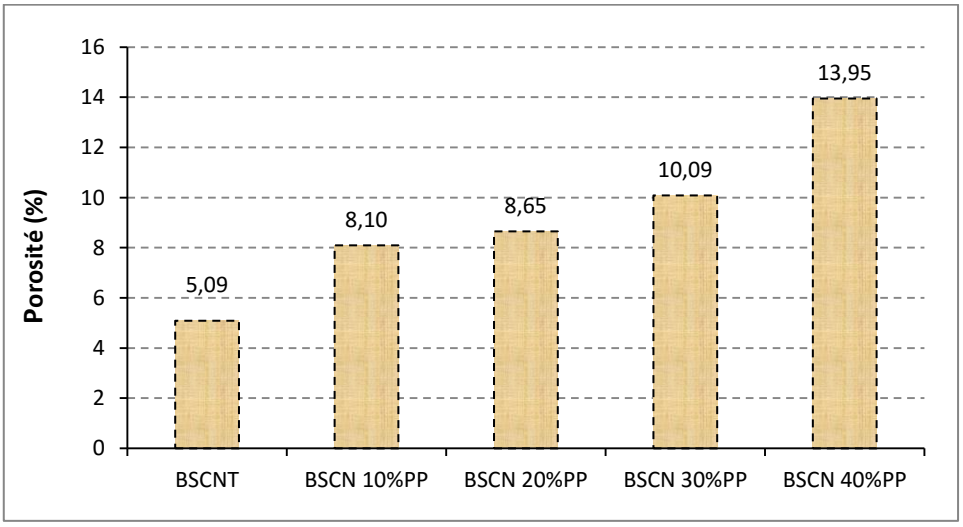
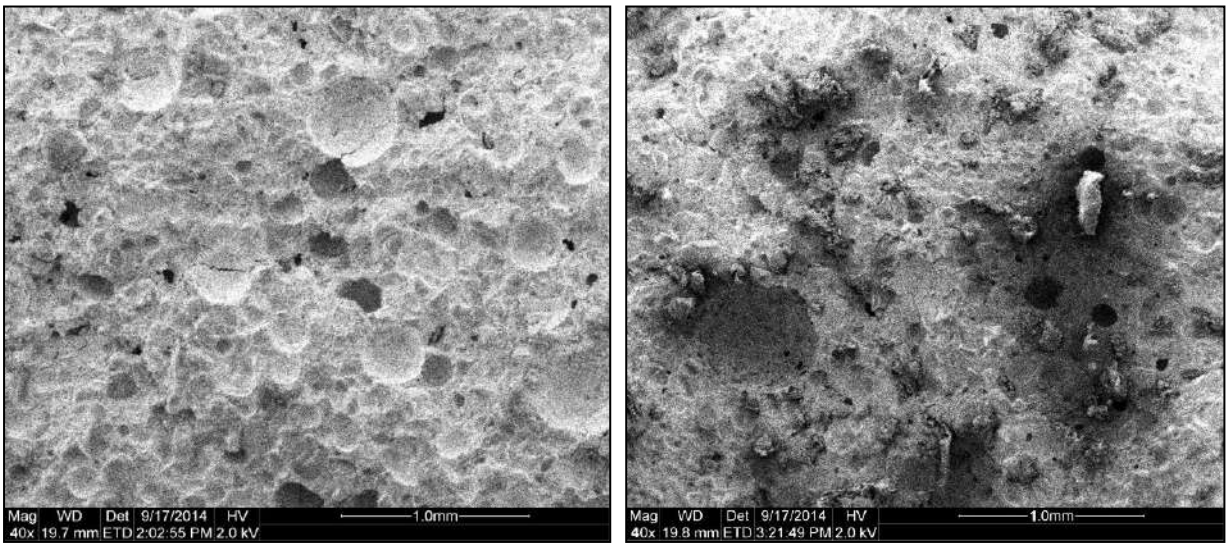


Fig. 5.36. La porosité des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures ci-dessus on remarque que la porosité des bétons de sable à base des déchets de poudre plastique est plus élevée que celle du béton de sable de référence. Les résultats obtenus montrent aussi que la porosité est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de la poudre plastique. Cela est dû au défaut d'adhérence entre la matrice cimentaire et la poudre plastique. Cette constatation est en accord avec les résultats de plusieurs chercheurs [61- 63, 68,119], qui affirment que l'incorporation des déchets plastiques dans le mortier soit par ajouts, soit par substitution de sable augmente la porosité d'une façon considérable. Un cas particulier a été enregistré pour les BST à base de 10 et 20% de PP qui présentent une porosité moins élevée par rapport au béton de sable témoin. Finalement, les bétons de sable de dune présentent une porosité plus grande que les autres types de béton grâce à ses granulométries très fines et ses porosités très élevées, ce qui donne des bétons de sable moins compacts que ceux qui sont fabriqués à base de sable de concassage.

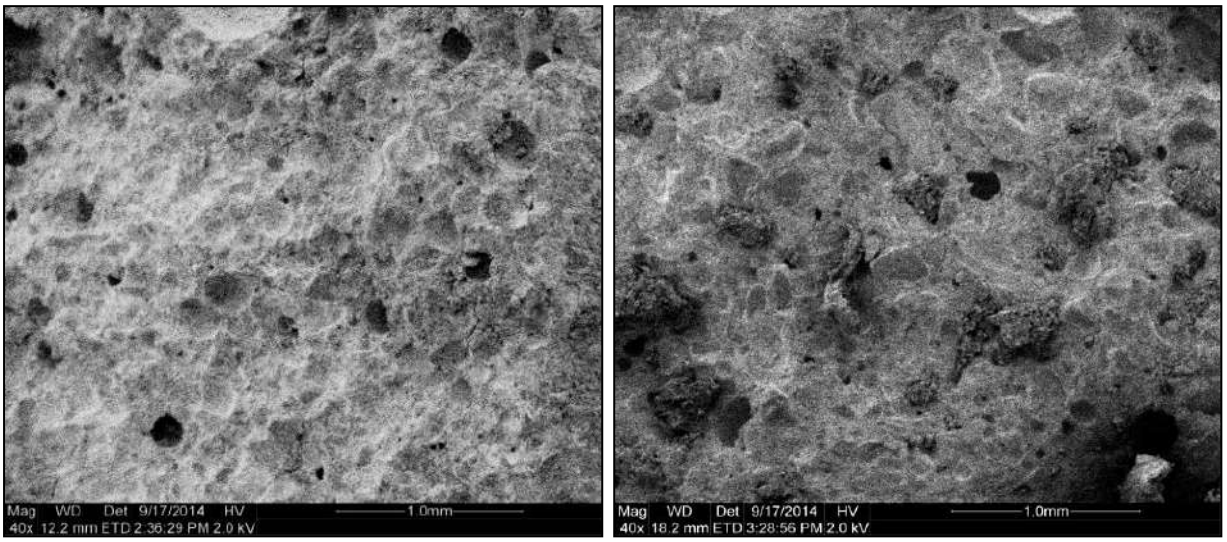
- ***La microstructure***

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de béton de sable à base avec 40% de déchets de poudre plastique et leurs témoins respectifs montre que la structure des bétons de sable à base de déchets de poudre plastique (40%) est moins homogène, plus poreuse et moins compacte que celle du béton de sable de référence comme indiquent les figures 5.37 à 5.40 ci-dessous . On peut voir aussi la mauvaise adhésivité entre la poudre plastique à la matrice cimentaire, cette mauvaise adhérence peut s'expliquer par la lisse de la surface de la poudre plastiques, ce qui diminue l'adhérence entre la pâte de ciment et les grains plastiques et augmente la porosité, ce qui confirme les résultats de Iucolano et al. [61].



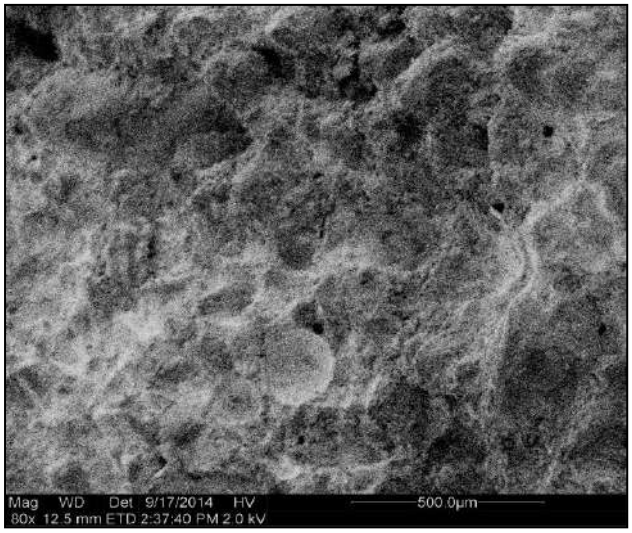
BSTT BST 40% PP

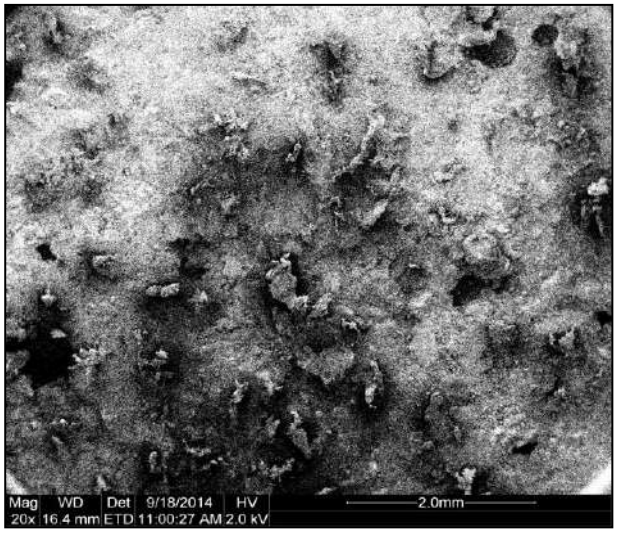
Fig. 5.37. Examen au MEB de BSTT et BST à base de déchets de poudre plastique



BSBHT BSBH 40% PP

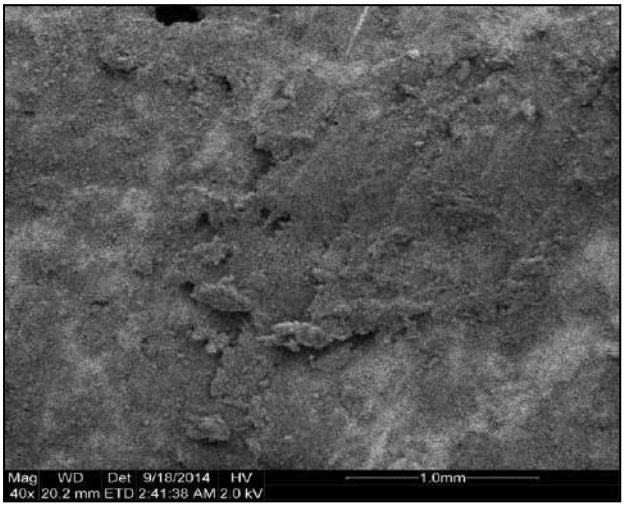
Fig. 5.38. Examen au MEB de BSBHT et BSBH à base de déchets de poudre plastique

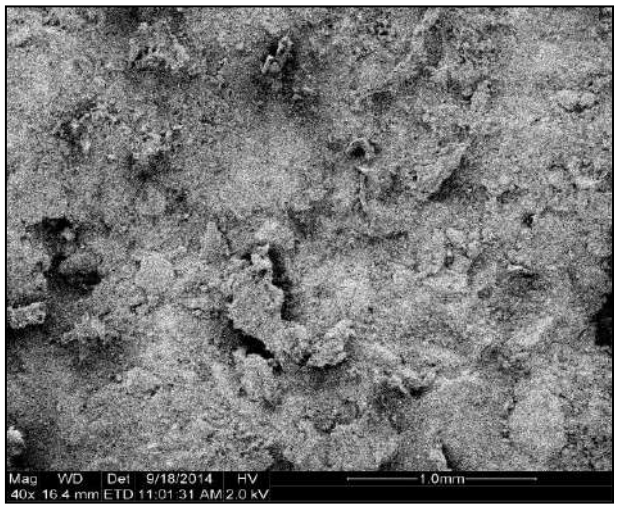




BSBGT BSBG 40% PP

Fig. 5.39. Examen au MEB de BSBGT et BSBG à base de déchets de poudre plastique





BSCNT BSCN 40% PP

Fig. 5.40. Examen au MEB de BSCNT et BSCN à base de déchets de poudre plastique

5.4.2. Absorption d'eau

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable réalisés sont illustrés dans les figures 5.41 – 5.44 suivantes :

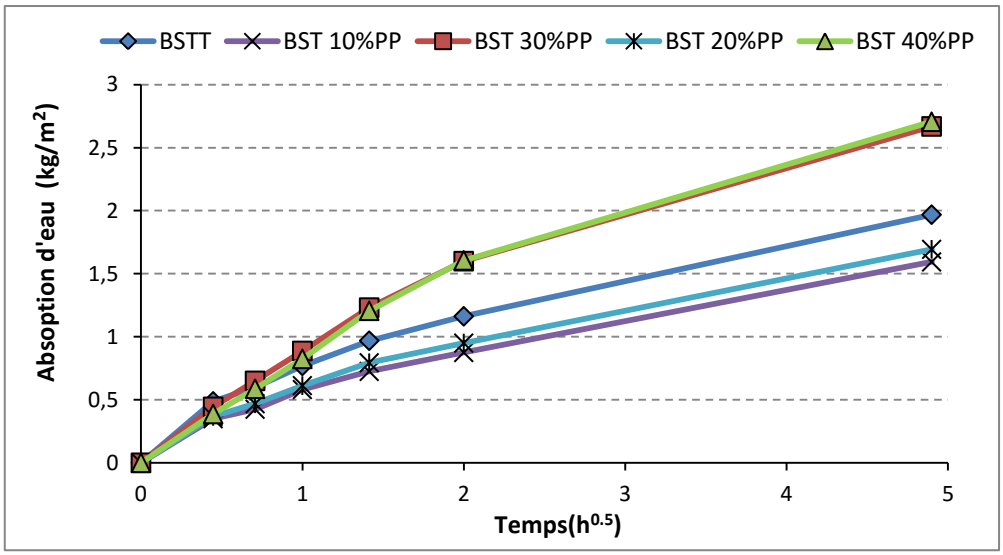


Fig. 5.41. Absorption d'eau des BST à base de poudre plastique

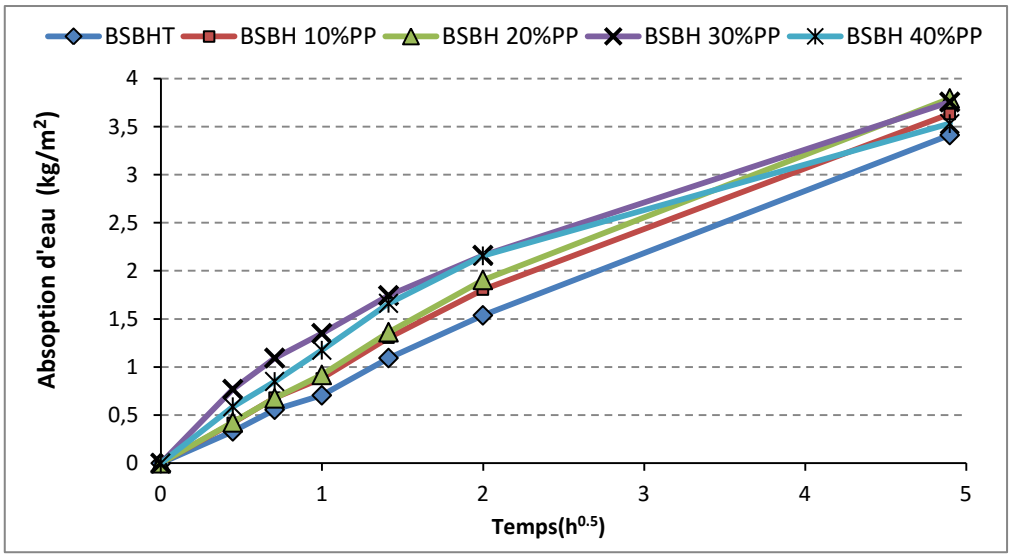


Fig. 5.42. Absorption d'eau des BSBH à base de poudre plastique

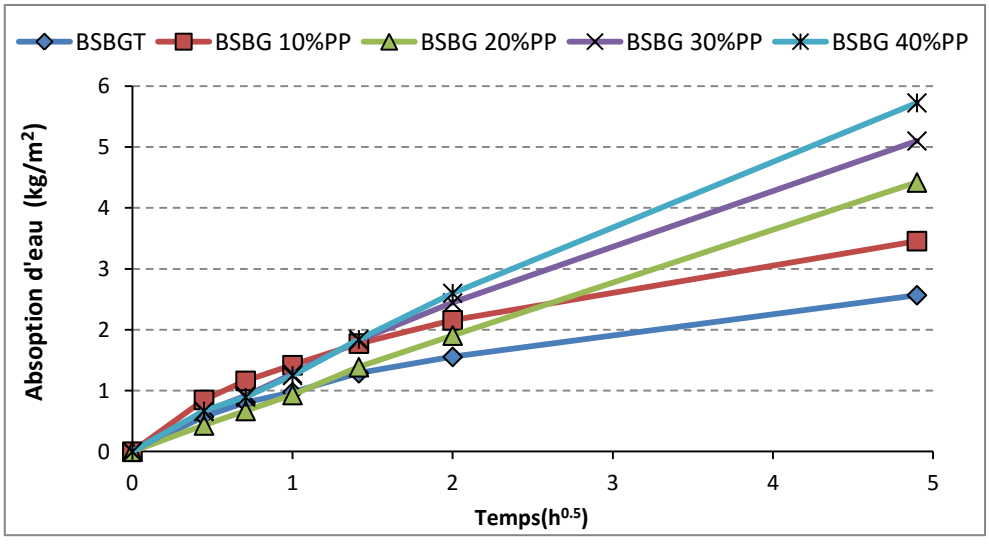


Fig. 5.43. Absorption d'eau des BSBG à base de poudre plastique

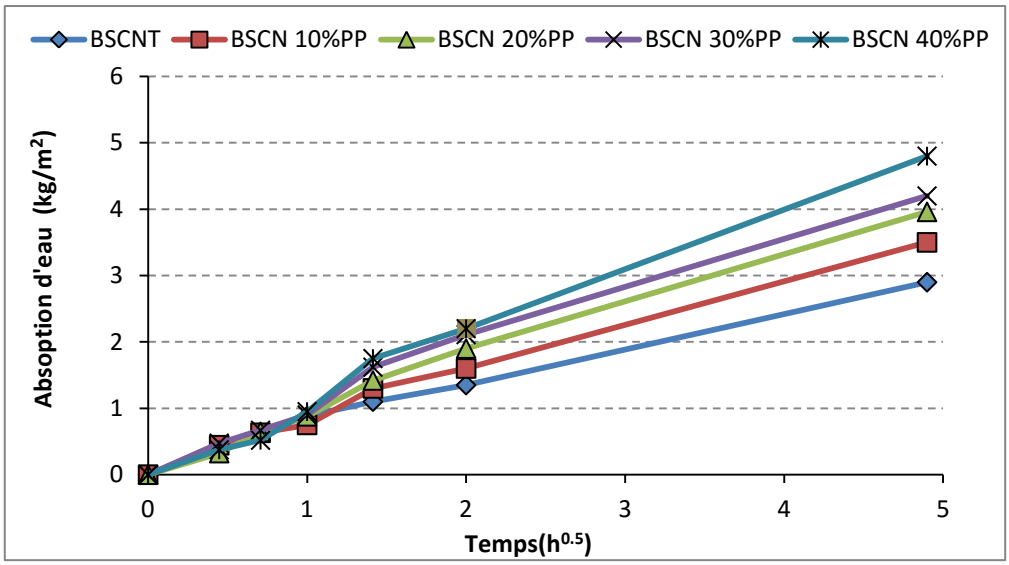


Fig. 5.44. Absorption d'eau des BSCN à base de poudre plastique

D'après la figure 5.42 on remarque que la capacité d'absorption d'eau des BST (10 et 20% PP) est moins importante que celle du béton de sable de référence. Cette diminution est liée probablement à la porosité continue de BST (10 et 20% PP) qui est moins importante par rapport au BST témoin. Au-delà de 20% on remarque que la capacité d'absorption d'eau devienne plus grande que celle du BS de référence. Ce qui en concordance avec les résultats de Marzouk [117].

Les figures ci-dessous montrent que la capacité d'absorption d'eau de tous les autres types de béton de sable (BSBH, BSBG et BSCN) est augmentée en fonction de l'augmentation du pourcentage de déchets de poudre plastique. Cette augmentation d'absorption est liée à l'augmentation de la porosité continue qu'est plus importante et qu'est due à la mauvaise adhérence entre la poudre plastique et la matrice cimentaire, ce qui confirme les résultats de plusieurs chercheurs dans le domaine [61,62, 66, 120, 121].

Ruiz-Herrero et al. [63] ont trouvé que l'absorption capillaire du mortier et béton cellulaire à base de 2.5, 5, 10 et 20% de déchets plastiques recyclés (PVC, PE et PVC+PE) sous forme de poudre, est augmentée considérablement en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets plastiques. Chidiac et al. [69] ont étudié l'influence de substitution du sable par le polyéthylène bas densité et polyéthylène haute densité (PEBD et PEHD) sur l'absorption capillaire des blocs de béton. Ils ont trouvé que le taux d'absorption d'eau augmente en fonction d'augmentation des pourcentages de déchets plastiques.

5.4.3 Variations de longueur

a) Retrait

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Dans notre cas, et pour les différents pourcentages en déchets de poudre plastique, les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par les courbes présentées dans les figures 5.45 – 5.48 suivantes :

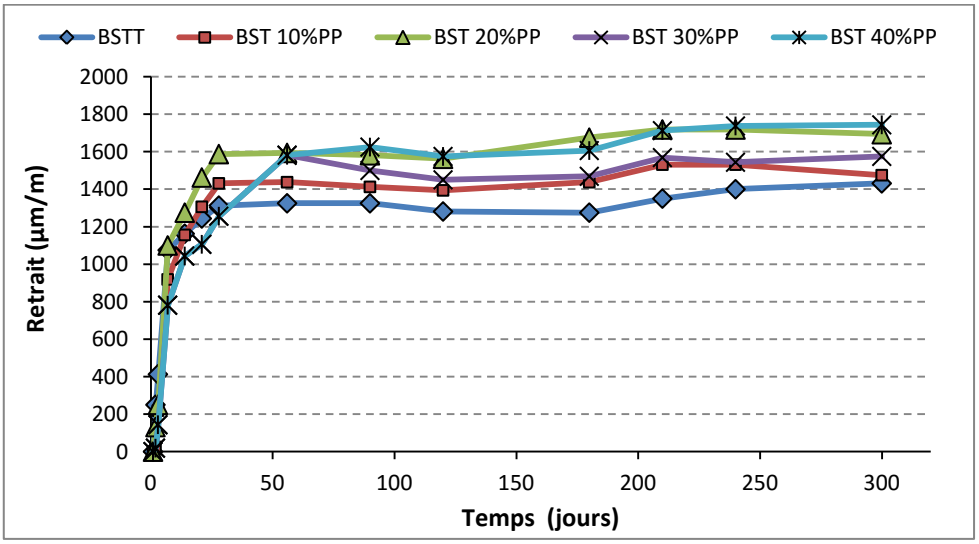


Fig. 5.45. Retrait des BST à base de poudre plastique

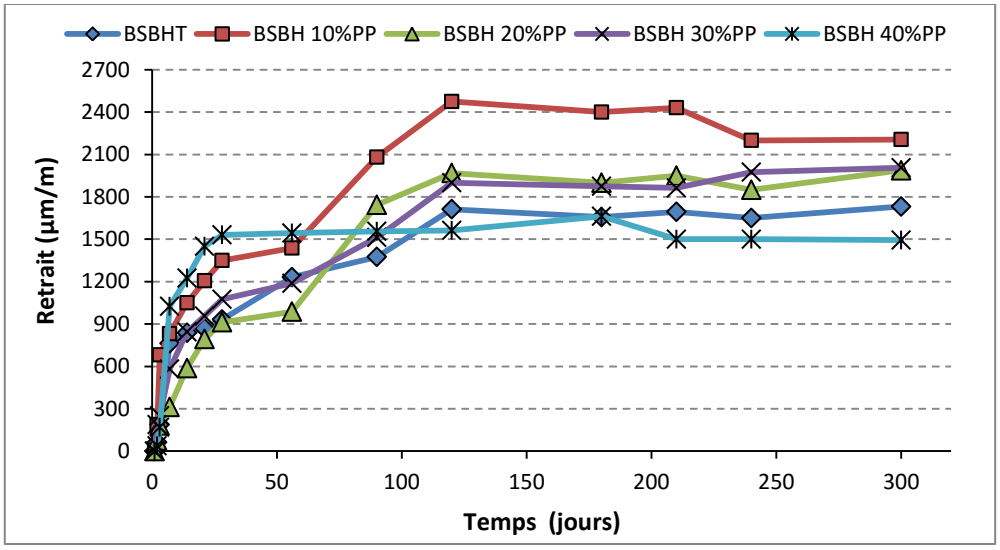


Fig. 5.46. Retrait des BSBH à base de poudre plastique

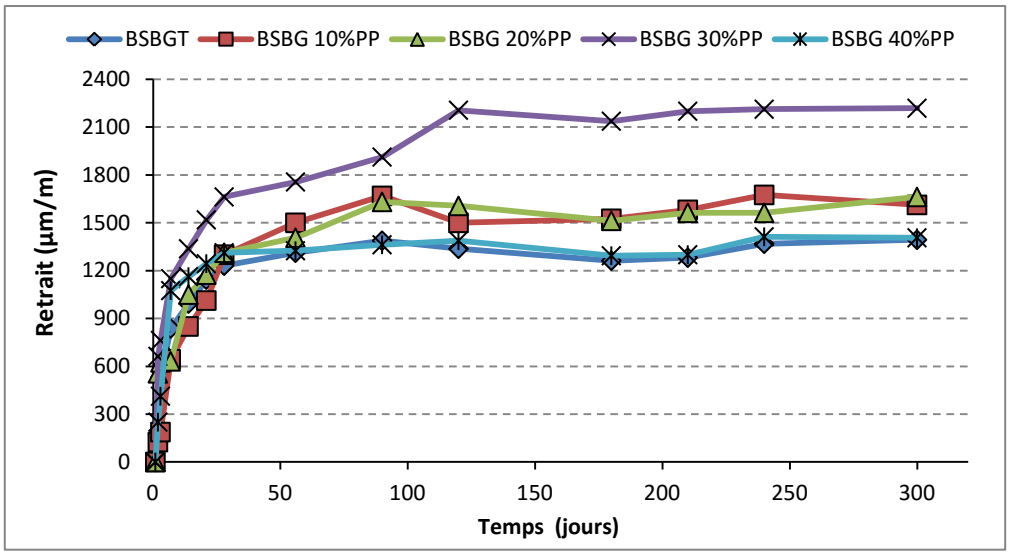


Fig. 5.47. Retrait des BSBG à base de poudre plastique

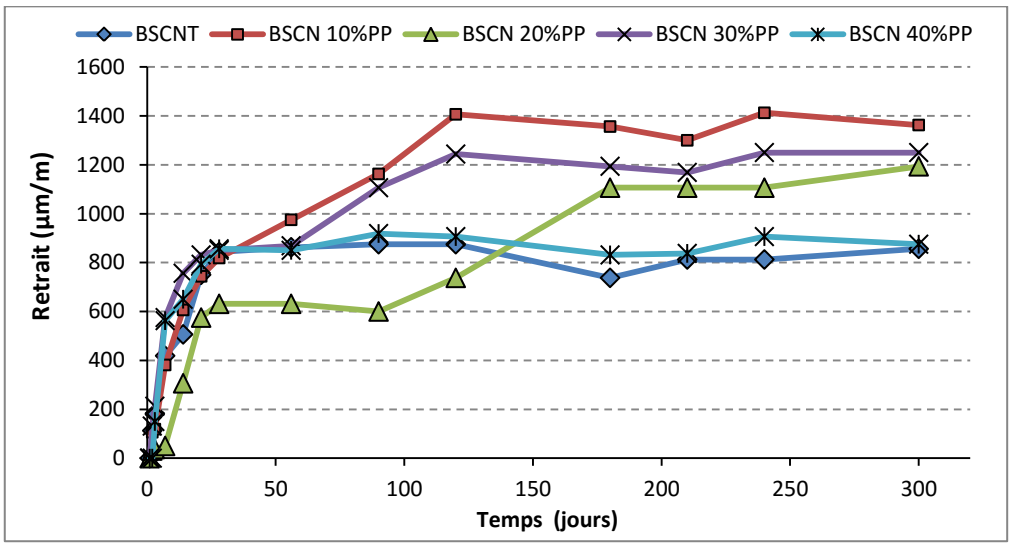


Fig. 5.48. Retrait des BSCN à base de poudre plastique

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de tous les types de béton de sable à base de déchets de poudre plastique est nettement plus important que celui du béton de sable de référence. Il est clairement observé aussi que le retrait est différent d'un béton à un autre. Les BSBH et BSBG présentent un taux de retrait plus important que les autres types du béton (entre 1500 µm/m et 2400 µm/m pour BSBH et 1300 µm/m et 2200 µm/mm pour BSBG). Cette augmentation du retrait est liée probablement au faible module d'élasticité de la poudre plastique, parce qu'en générale plus le module d'élasticité est diminué plus le retrait augmente [119]. Cependant ces valeurs du retrait sont acceptables pour divers usages de béton structural. Akcaozoglu et al. [70] ont trouvé que la substitution du sable naturel par les déchets de PET induit une augmentation du retrait des bétons légers. Frigione et al. [71] ont mesuré le retrait du

béton courant à base de déchets de PET. Ils ont trouvé que le retrait augment en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets plastiques.

b) Gonflement

De la même façon, les résultats du gonflement des différents bétons après une année d'immersion dans l'eau, sont illustrés dans les figures 5.49 – 5.52 ci-dessous :

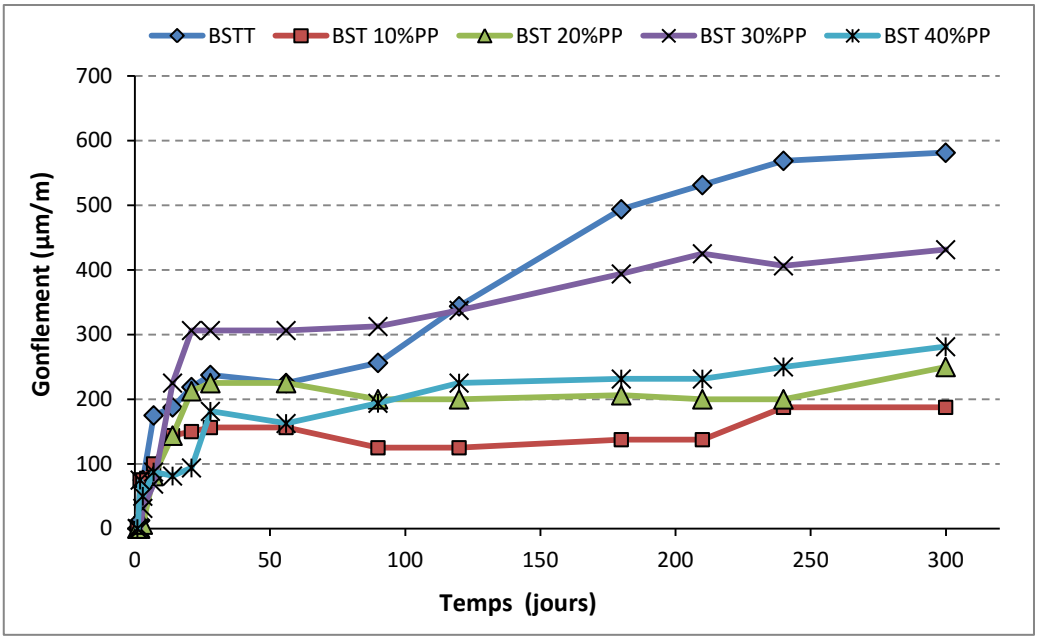


Fig. 5.49. Gonflement des BST à base de poudre plastique

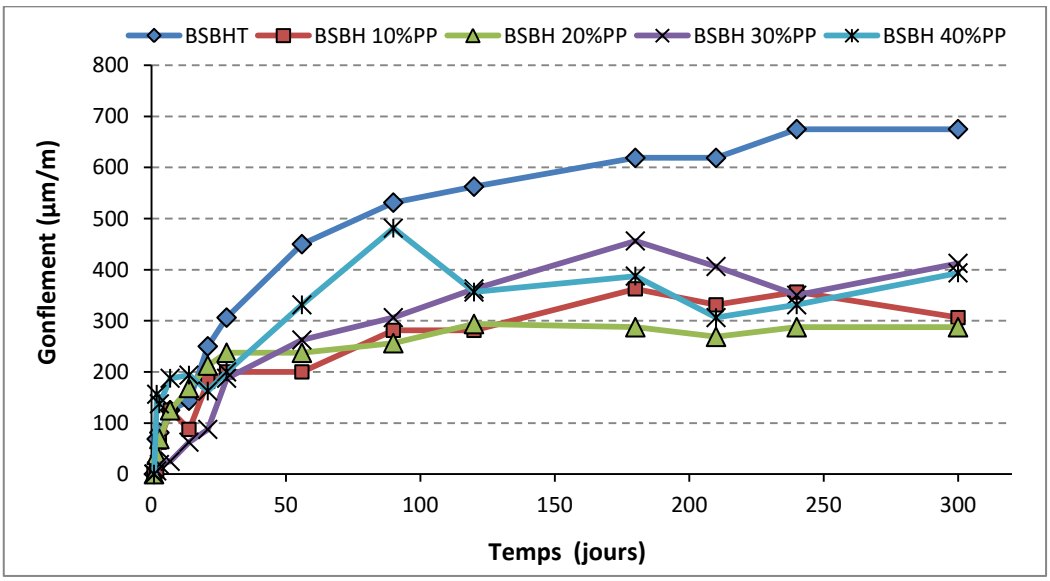


Fig. 5.50. Gonflement des BSBH à base de poudre plastique

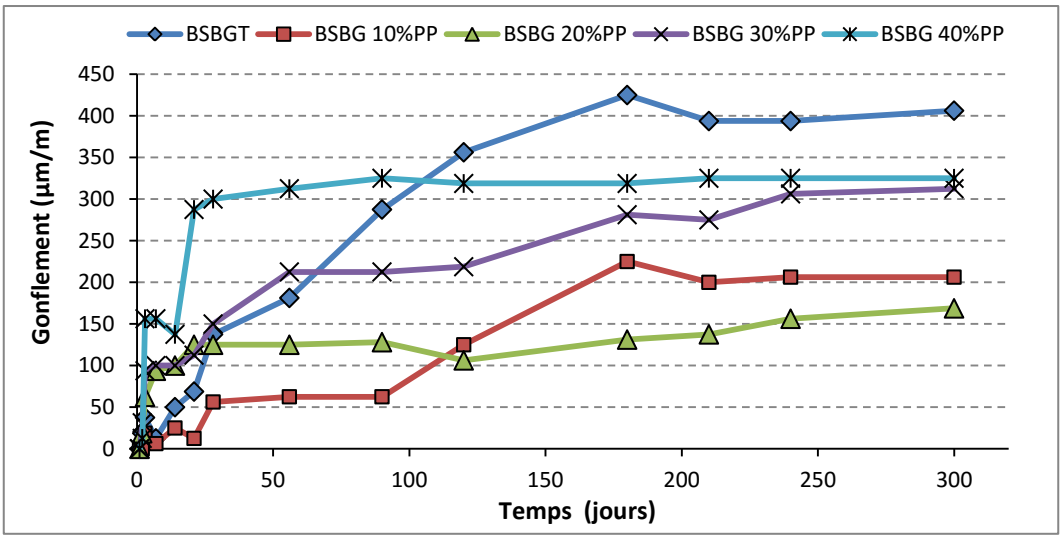


Fig. 5.51. Gonflement des BSBG à base de poudre plastique

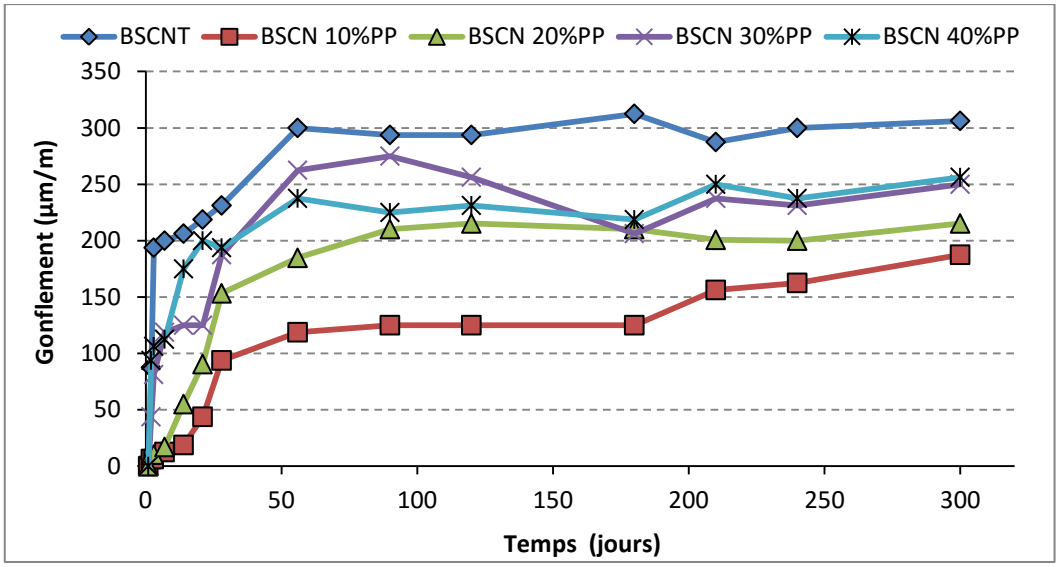


Fig. 5.52. Gonflement des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures ci-dessus, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable à base de déchets de poudre plastique ayant un gonflement moins important que celui du béton de sable de référence. Les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de poudre plastique, et selon le type du sable utilisé. Ceci semble logique a cause de l'augmentation en PP qui n'absorbe pas d'eau et donc moins de gonflement.

5.4.4 Variations de masse

a) Perte de masse

La perte de masse des déférents bétons est illustrée dans les figures 5.53 – 5.56 suivantes :

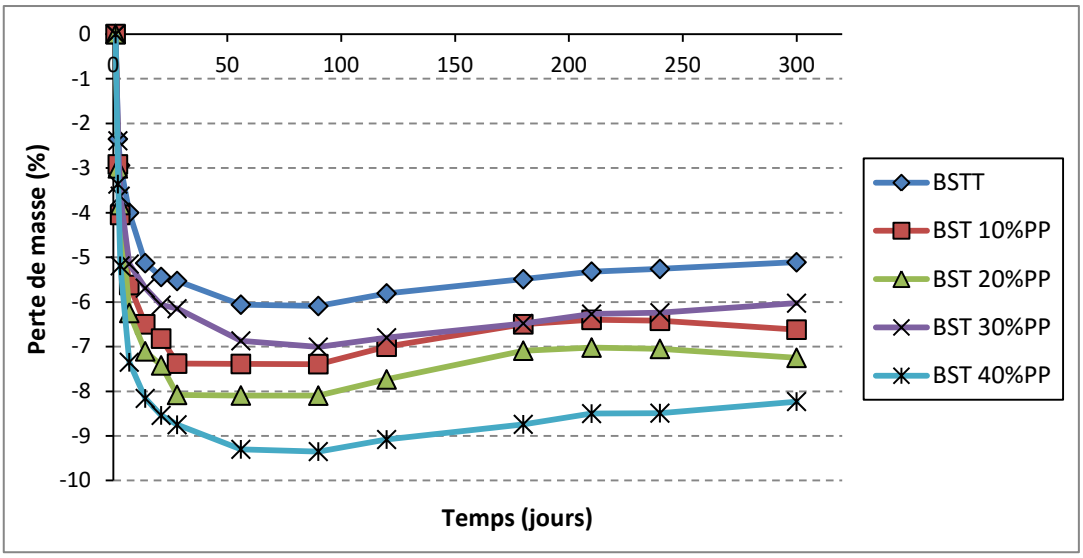


Fig. 5.53. Perte de masse des BST à base de poudre plastique

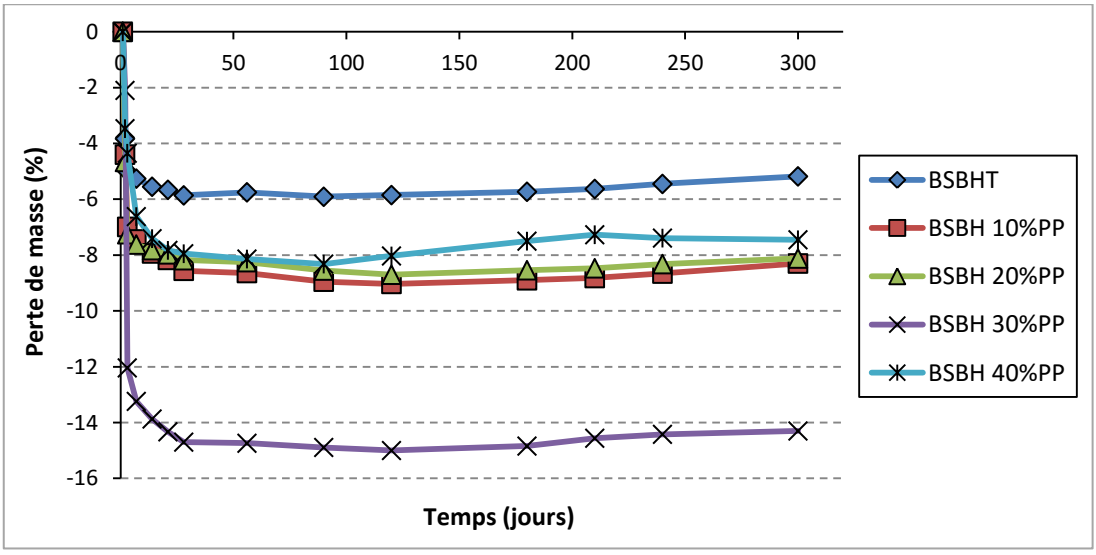


Fig. 5.54. Perte de masse des BSBH à base de poudre plastique

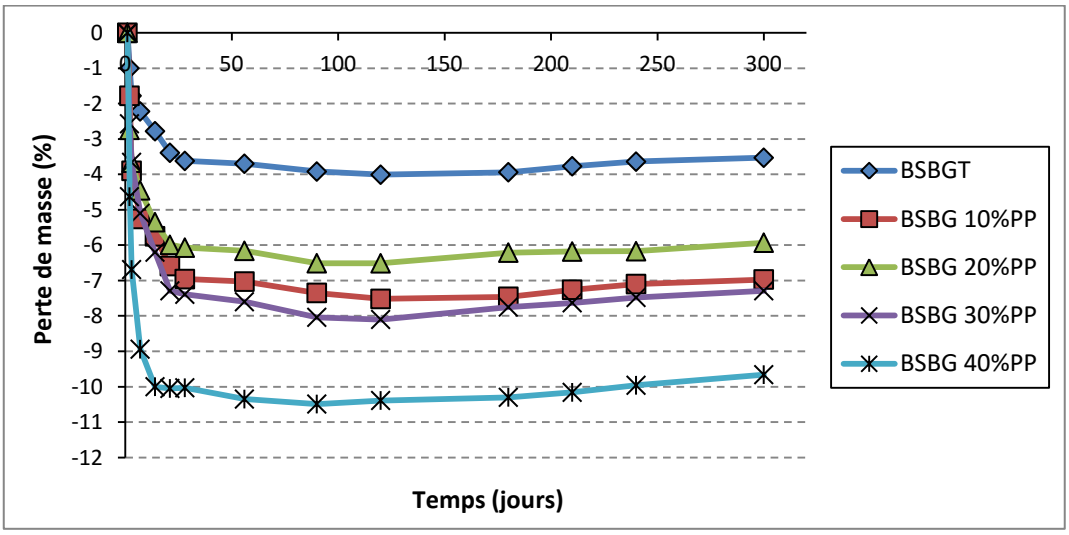


Fig. 5.55. Perte de masse des BSBG à base de poudre plastique

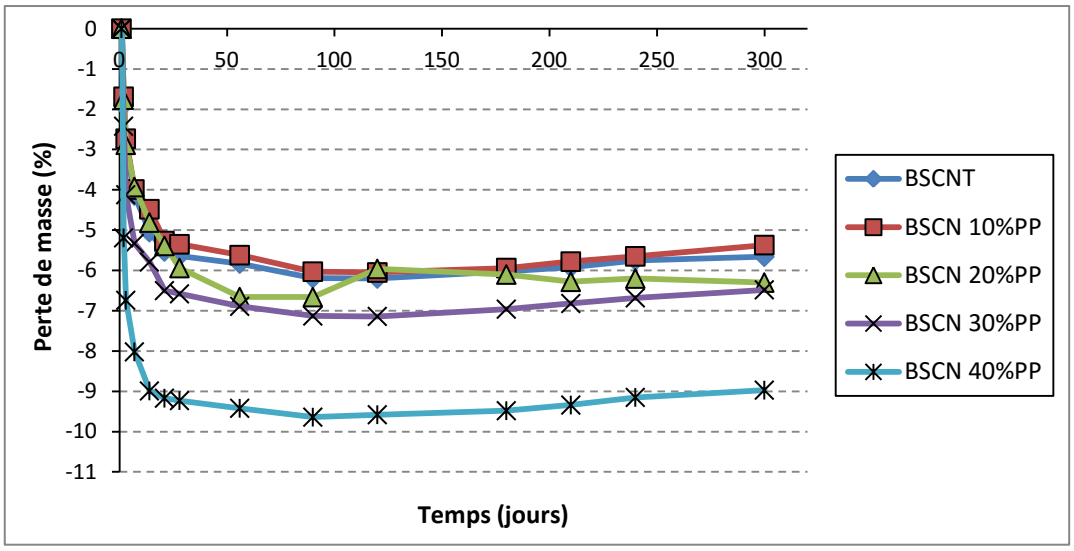


Fig. 5.56. Perte de masse des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures précédentes, on remarque que la perte de masse de tous les types du béton de sable à base de poudre plastique est nettement plus importante que celle du béton de sable de référence .On remarque aussi que les bétons de sable à base de 40 et 30% de poudre plastique présentent des pertes en masse plus importantes par rapport aux autres type de béton de sable. Elle est de l'ordre de 9.5% pour les BST 30% PP et BSCN 40% PP, 15% pour les BSBH 30% PP et 10.5 % BSBG 40% PP. Ce changement de volume peut être due au séchage et sans doute due à la perte de l'humidité qui dépend de l'environnement ainsi que de la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et la poudre plastique.

b) Gain de masse

Les résultats du gain de masse des déférents bétons sont illustrés dans les figures ci-dessous :

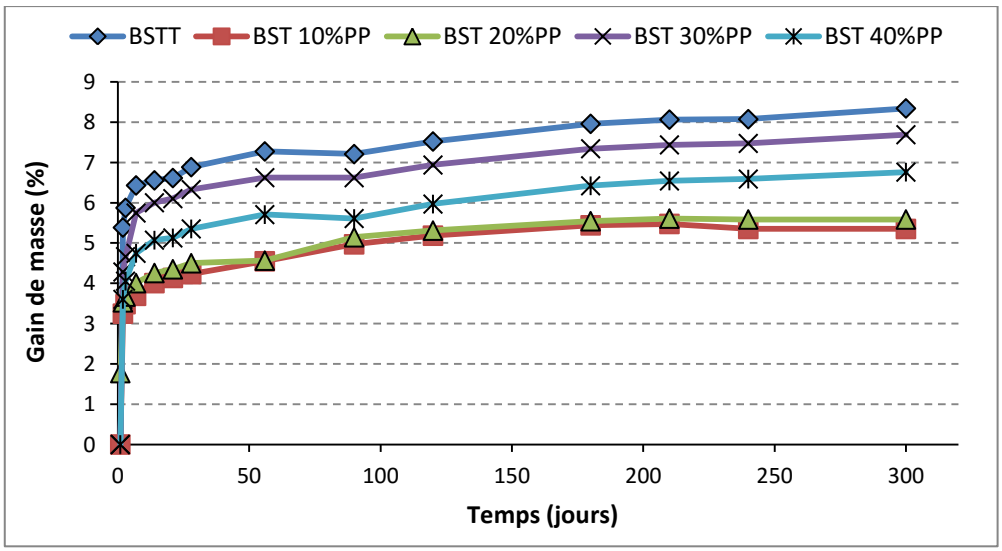


Fig. 5.57. Gain de masse des BST à base de poudre plastique

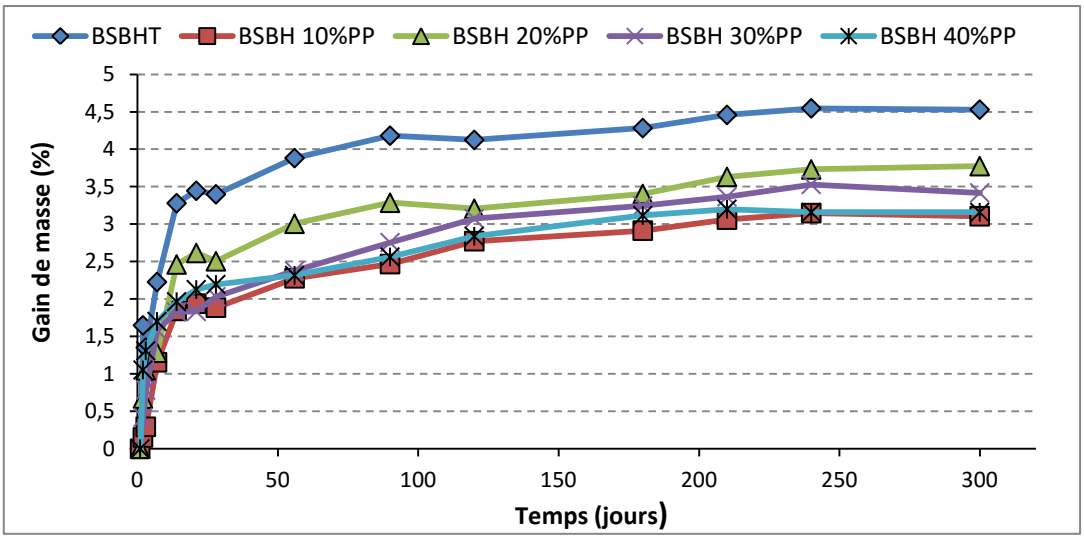


Fig. 5.58. Gain de masse des BSBH à base de poudre plastique

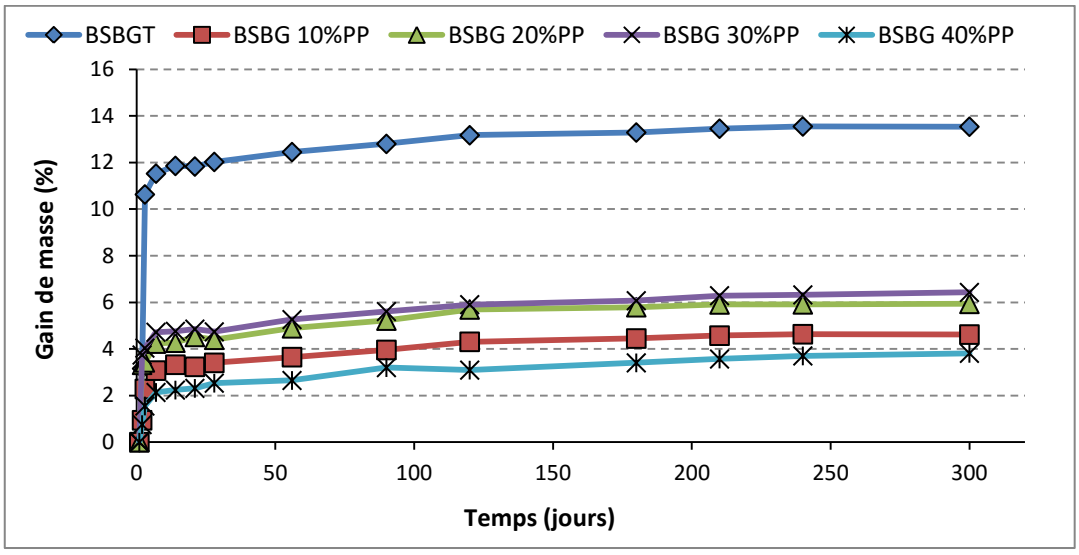


Fig. 5.59. Gain de masse des BSBG à base de poudre plastique

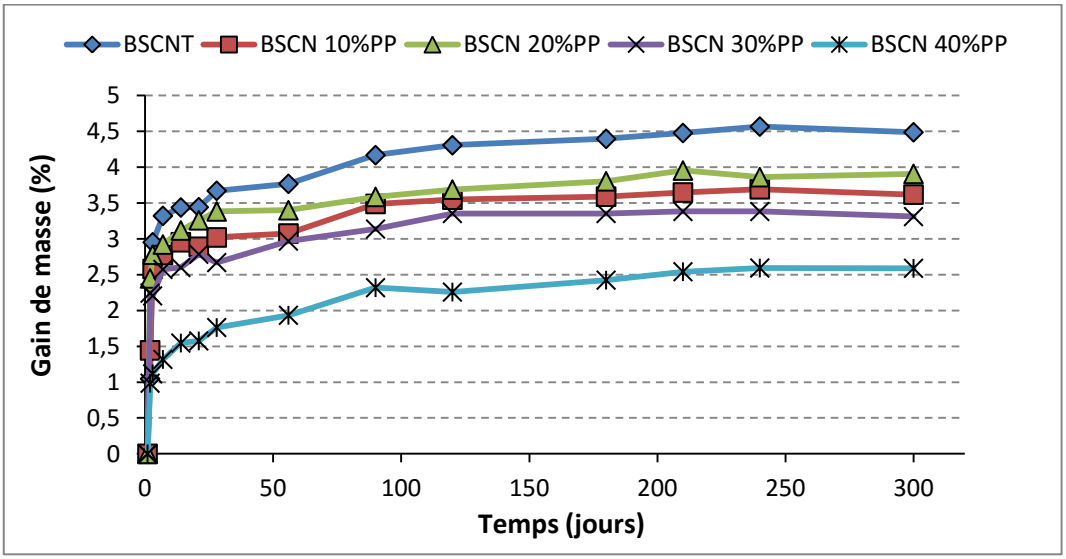


Fig. 5.60. Gain de masse des BSCN à base de poudre plastique

D'après les figures ci-dessus, on remarque que le gain de masse des bétons de sable à base de déchets de poudre plastique est moins important que celui des bétons de sable de référence. Les valeurs de gain de masse varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de poudre plastique, et selon le type du sable utilisé. Les BST PP présentent des gains de masse plus importants, elle est entre 5 et 7%. Ceci est en concordance avec les résultats du gonflement.

5.4.5. La résistance au feu

a) La perte de masse

Les résultats de la perte de masse des éprouvettes chauffées à 200, 400, 600 et 800°C sont représentés sur les figures 5.61 – 5.64 ci-dessous :

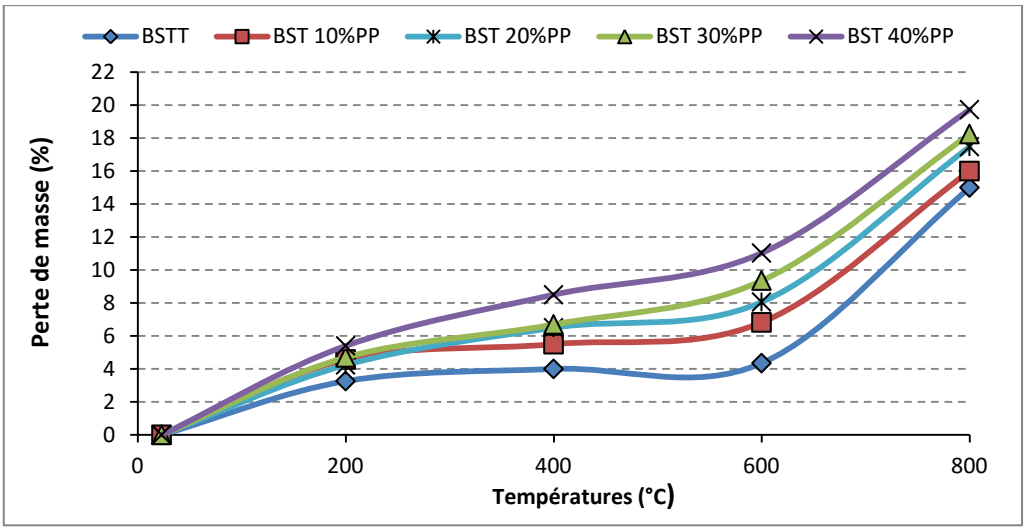


Fig. 5.61. Perte de masse des BST PP en fonction de l'élévation de température

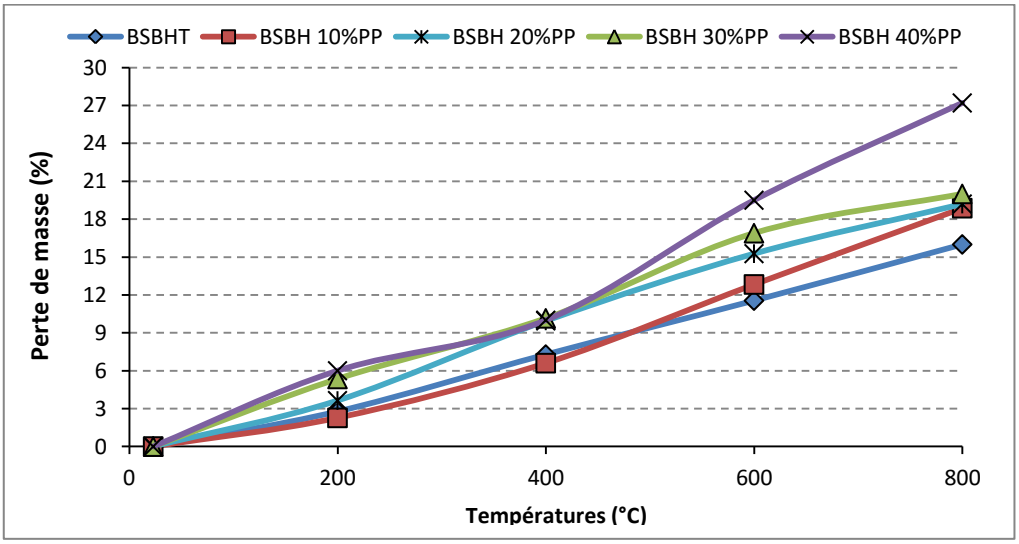


Fig. 5.62. Perte de masse des BSBH PP en fonction de l'élévation de température

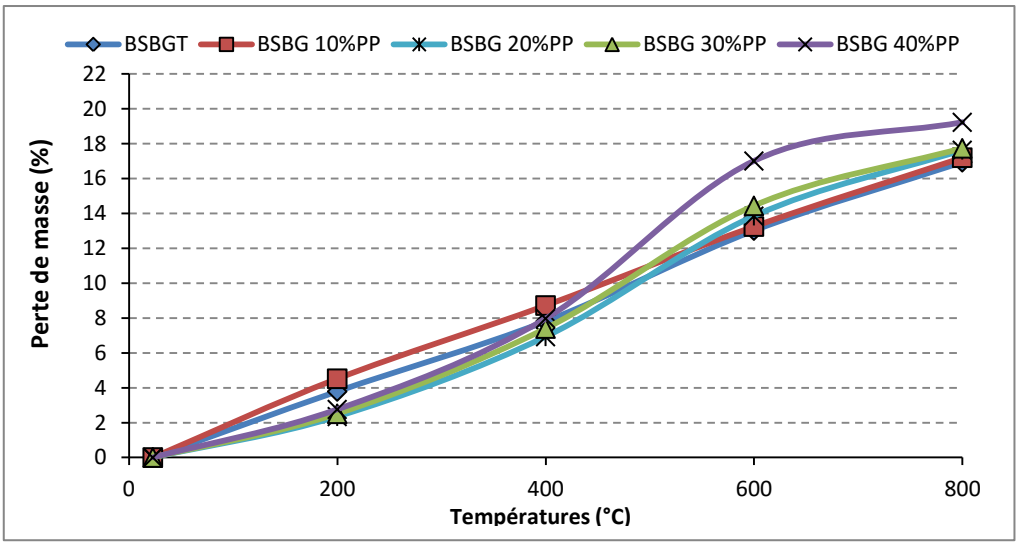


Fig. 5.63. Perte de masse des BSBG PP en fonction de l'élévation de température

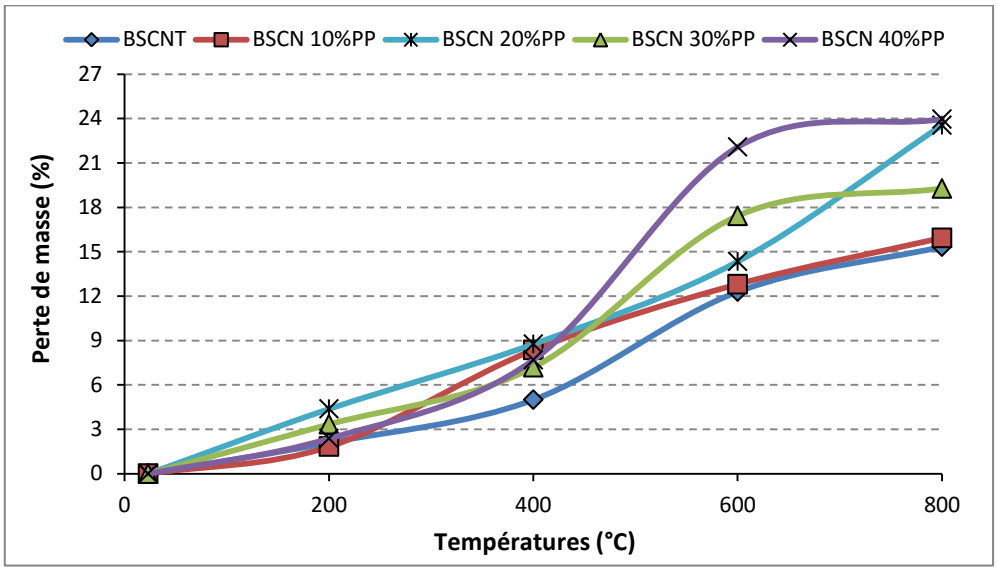


Fig. 5.64. Perte de masse des BSCN PP en fonction de l'élévation de température

Les figures précédentes représentent l'évolution de la perte de masse des différents bétons de sable à base de déchets de poudre plastique en fonction de l'élévation de la température. On remarque de ces que quel que soit le type de béton de sable, la perte de masse est toujours permanente durant l'échauffement des éprouvettes. On observe aussi que la perte de masse des bétons de sable à base de déchets plastiques est toujours plus importante que celle du béton de sable de référence. Elle varie entre 15 et 27% pour tous les types des bétons de sable à une température de 800°C. Ces pertes de masse sont dues à la déshydratation progressive du béton, et la fonte des déchets plastiques. Jusqu'à la température de 200°C, l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite s'évapore et les pores capillaires sont asséchés. La fonte des de poudre plastique a été remarquée sous une température de 250°C. À 600°C il ne reste qu'une petite quantité d'eau 0,2 % dans l'éprouvette de béton, cette eau est

absorbée par les granulats, ce confirme les résultats de d'autres chercheurs [122,123] qui ont constaté que la masse du béton dans les éprouvettes est toujours diminuée avec l'augmentation de la température.

b) Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à l'âge de 120 jours des éprouvettes chauffées à 200, 400, 600 et 800°C sont représentés sur les figures 5.65 – 5.68 suivantes :

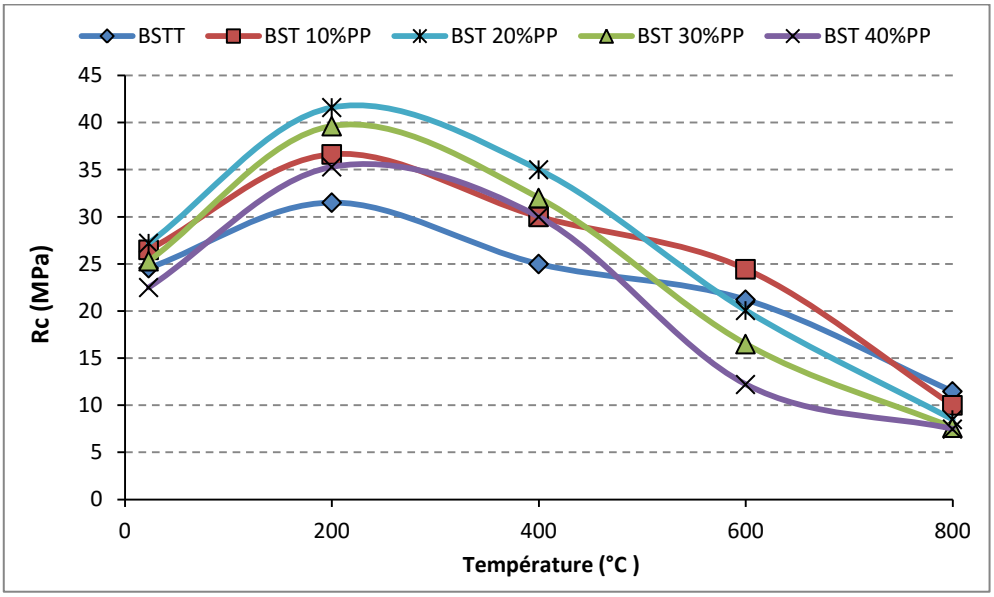


Fig. 5.65. Résistance à la compression des BST PP en fonction de l'élévation de température

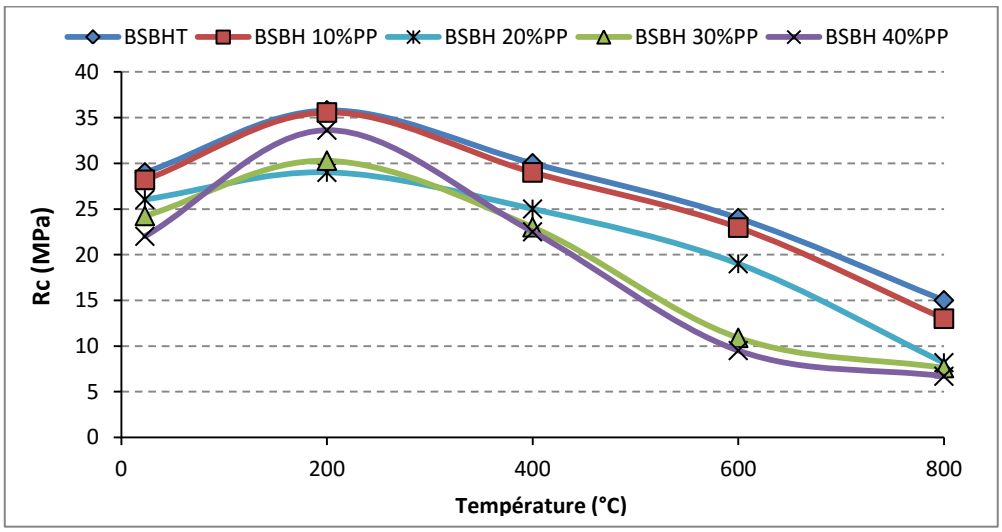


Fig. 5.66. Résistance à la compression des BSBH PP en fonction de l'élévation de température

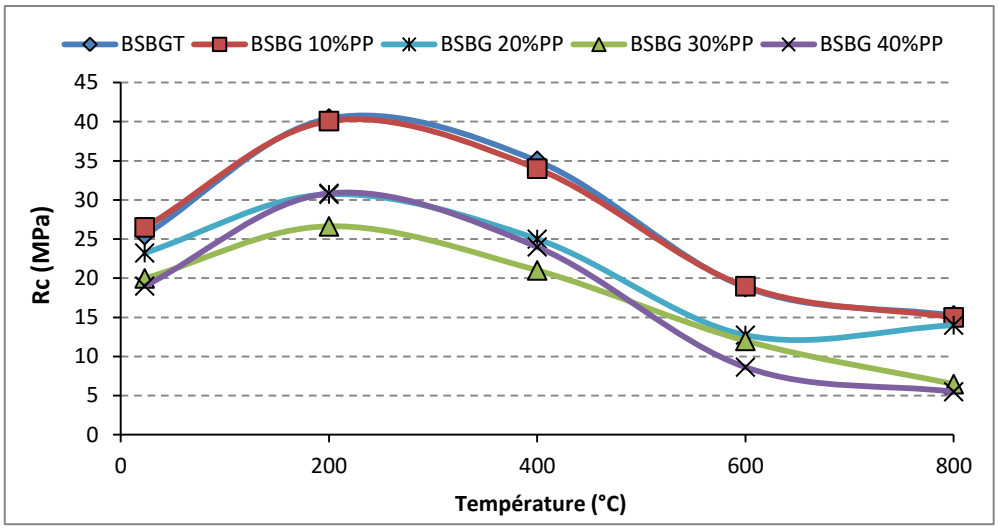


Fig. 5.67. Résistance à la compression des BSBG PP en fonction de l'élévation de température

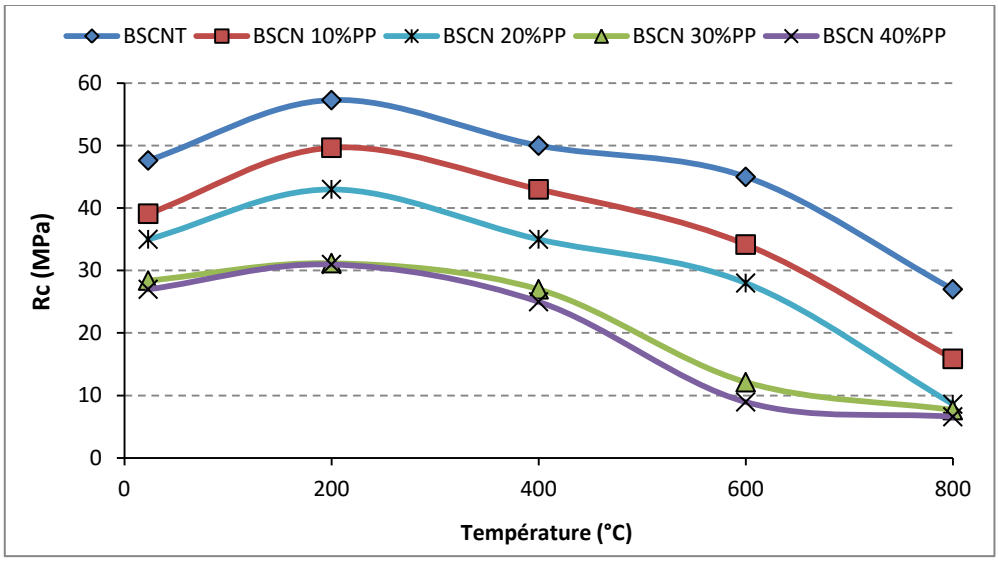
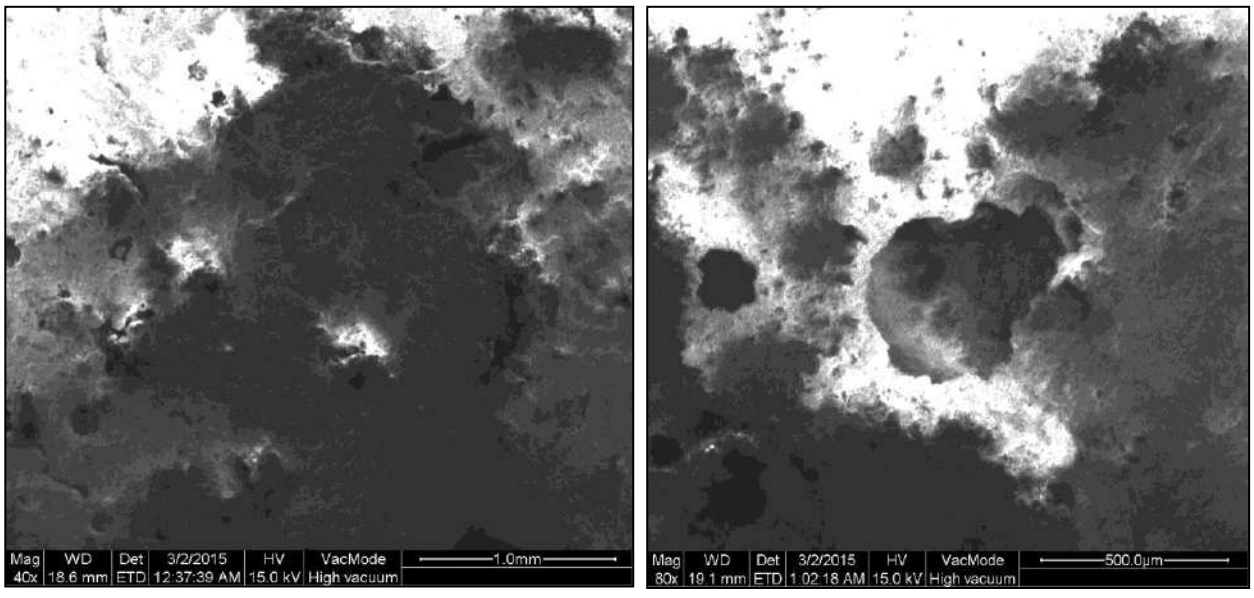


Fig. 5.68. Résistance à la compression des BSCN PP en fonction de l'élévation de température

Les résultats obtenus montrent qu'il y a toujours un pic de résistance à 200 °C pour tous les types de béton de sable. On enregistre aussi toujours à cette température une augmentation importante de la résistance à la compression quel que soit le sable utilisé et le pourcentage de déchet incorporé. Les résultats indiquent aussi que la résistance à la compression des bétons de sable à base de poudre plastique est plus faible que celle du béton de sable témoin, sauf pour les BST PP qui présentent une résistance plus importante que celle du béton de sable témoin et surtout pour un échauffement de 200 et 400°C. On remarque aussi qu'au-delà de 200°C, il y a toujours une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression pour tous les types de béton de sable. Nous constatons alors que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans les hydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui jouent un rôle de

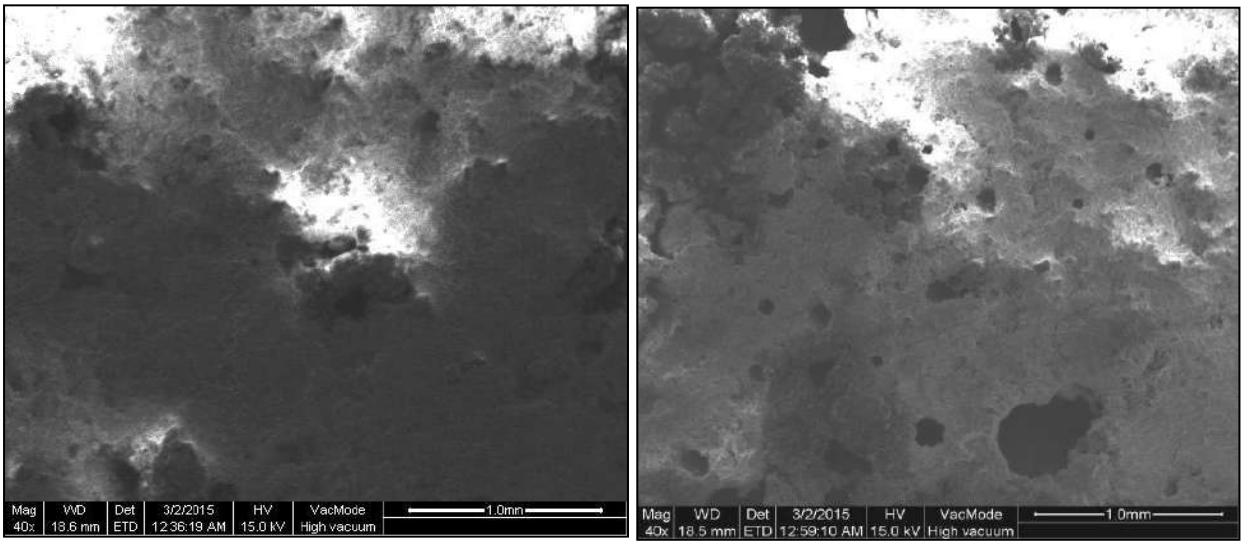
précontrainte et par ceci à une augmentation de la résistance à la compression aux alentours de 200°C. Au-delà de 200°C, le rapport de la résistance à chaud est diminué jusqu'à une faible résistance obtenus à 800°C, et cela est due à l'augmentation considérable de la porosité pour tous les bétons chauffés.

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de bétons de sable à base de 40% de poudre plastique chauffés à 600°C et leurs témoins respectifs, montre que la porosité des bétons de sable à base de déchets de poudre plastique (40%) est nettement plus importante que celle du béton de sable de référence (Figures 5.69 - 5.72). Cette augmentation de la porosité est liée principalement à la fonte des poudres plastiques qui laisse des vides et des micropores à l'intérieur du béton. Ce qui est en concordance avec les résultats de autres auteurs [83] qui ont remarqué que il y a toujours un pic de résistance des bétons chauffés à température de 200°C et/ou 400˚C, et au-delà de cette température des pertes en résistance ont été obtenus. Albano et al. [72] ont étudié le comportement au feu des bétons à base de différents pourcentages de déchets plastiques (PET), dans un four a moufle avec des températures de 200, 400 et 600°C. Ils ont trouvé après l'échauffement des éprouvettes que la résistance est diminuée en fonction de l'augmentation de la température. Ils ont expliqué cette diminution par l'augmentation de la porosité.



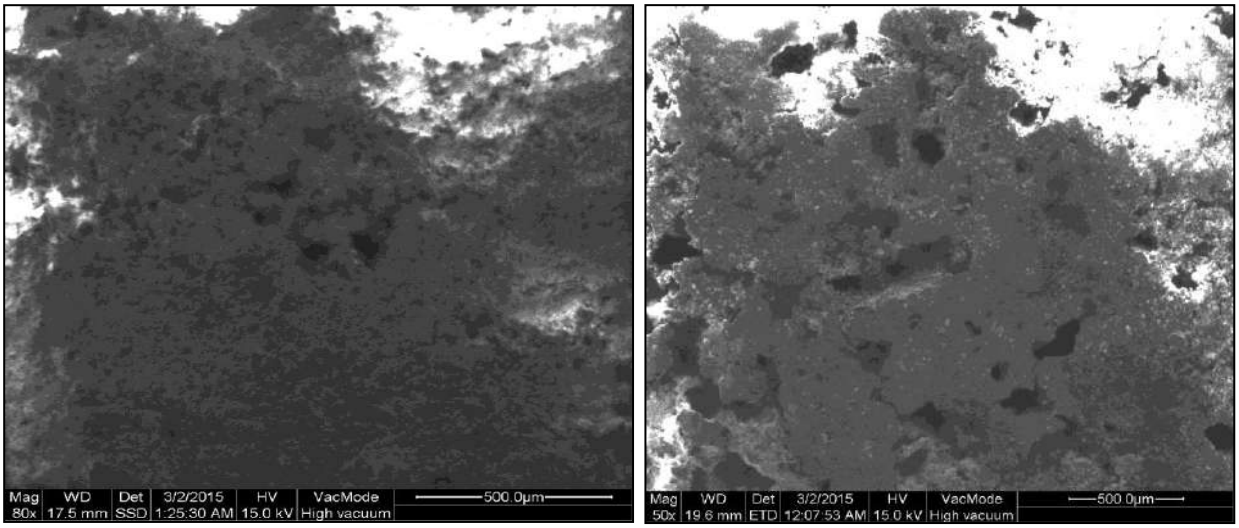
BSTT BST 40% PP

Fig. 5.69. Examen au MEB de BSTT et BST 40%PP chauffés à 600°C



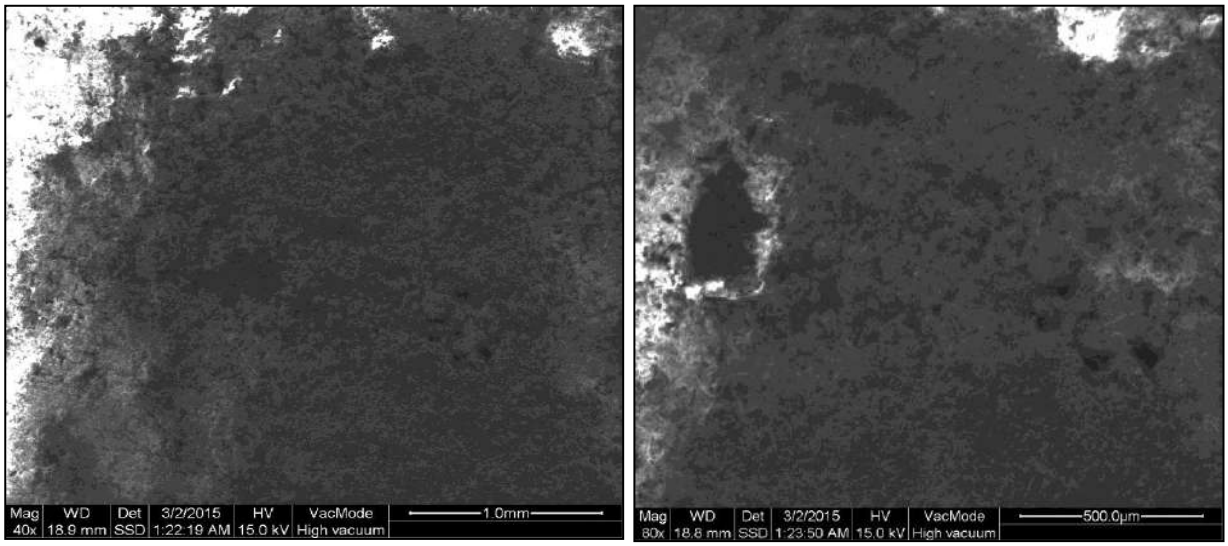
BSBHT BSBH 40% PP

Fig. 5.70. Examen au MEB de BSBHT et BSBH 40%PP chauffés à 600°C



BSBGT BSBG 40% PP

Fig. 5.71. Examen au MEB de BSGT et BSBG 40%PP chauffés à 600°C



BSCNT BSCN 40% PP

Fig. 5.72. Examen au MEB de BSCNT et BSCN 40%PP chauffés à 600°C

5.5. Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux de la première partie (béton de sable à base de poudre plastique) peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Quelque soit la nature du sable, la maniabilité du béton de sable est augmentée en fonction de substitution du sable par la poudre plastique ;
- La densité du béton de sable est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre plastique ;
- La substitution du sable par la poudre plastique cause plus d'air occlus dans la masse de béton de sable. Une exception a été enregistré pour les bétons de sable de dune fin (BST) à base de 10 et 20% de poudre plastique ;
- Les performances mécaniques (Rc, Rt et E) des bétons de sable sont diminuées en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre plastique. Par contre, une amélioration dans la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité du béton à base du sable de Tamanrasset avec 10 et 20% de poudre plastique.
- La conductivité thermique du béton de sable est diminuée en fonction de substitution du sable par la poudre plastique.
- La porosité des bétons de sable est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre plastique. Un cas particuliers a été enregistré pour les bétons de sable de Tamanrasset à base de 10 et 20% de poudre qui présentent une porosité moins importante que celle du béton de sable témoin ;
- L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de bétons de sable à base de 40% de déchets de poudre plastique et leurs témoin respectifs montre que la structure des bétons de sable à base de 40% de poudre plastique est moins homogène, plus poreuse et moins compacte que celle du béton de sable de référence ;
- L'absorption capillaire des bétons de sable est augmentée en fonction de substitution du sable par la poudre plastique. Un cas particulier a été enregistré pour les BST 10% et 20% PP qui présentent des taux d'absorptions moins important que ce du béton de sable de référence ;
- La substitution du sable par la poudre plastique engendre un retrait plus important par rapport au béton de sable de référence ;
- Le gonflement sous l'eau de tous les bétons de sable à base de poudre plastique est moins important que les bétons de sable témoin ;

- Quelque soit la nature du sable ou le pourcentage du déchet incorporé, la perte de masse du béton de sable est augmentée en fonction d'incorporation de la poudre plastique ;
- Le gain de masse sous l'eau du béton de sable à base de poudre plastique est nettement moins important que ceux du béton de sable témoin ;
- Quelque soit la nature du sable, la masse du béton de sable est diminuée avec l'augmentation de la température. Cette perte de masse augmente graduellement jusqu'à 800°C ;
- Toutes les familles de béton de sable réalisées présentent un pic de résistance à 200°C. On enregistre toujours à cette température une augmentation importante de la résistance à la compression.

Si on compare les résultats qu'on a trouvés dans cette partie d'étude et les résultats des différents chercheurs (citées dans la bibliographie) on peut dire qu'il y a une nette concordance entre les résultats.

Le tableau 5.1 ci-dessous résume les propriétés mécaniques et la durabilité du béton de sable à base de poudre plastique :

Tableau. 5.1. Résumé des propriétés mécaniques et durabilité du BSPP

			Propriétés								
Déchets	Sable	% Optim	Rc	Rt	E	CT	Por	Abs	Ret	Gonf	Rc feu
Poudre plastique	Tamanrasset	20 %	↗ 30%	↗ 44%	↗ 11%	↘ 7%	↘ 19%	↘ 15%	↗ 22%	↘ 59%	↗ 24%
	Bahbah	20%	↘ 4%	↘ 16%	↘ 22%	↘ 9%	↗ 8%	↗ 6%	↗ 5%	↘ 57%	↘ 20%
	Boughezoul	20%	↘ 17%	→ Cst	↘ 28%	↘ 8%	↗ 20%	↗ 57%	↗ 8%	↘ 66%	↘ 13%
	Concassé	40%	↘ 32%	↘ 9%	↘ 46%	↘ 23%	↗ 63%	↗ 63%	→ Cst	↘ 20%	↘ 28%

Avec :

Rc : Résistance à la compression

Rt : Résistance à la traction

E : Module d'élasticité

CT : Conductivité thermique

Por : Porosité

Abs : Absorption capillaire

Ret retrait

Gonf : Gonflement

Rc : Résistance au feu

Partie 02 :

Béton de sable à base de Fibres Plastiques

5.6. Introduction

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable à base de fibres plastiques à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

5.7. Béton frais

5.7.1 La maniabilité

Les figures 5.73 – 5.76 suivantes, présentent la maniabilité des différents types de béton de sable, par la mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC.

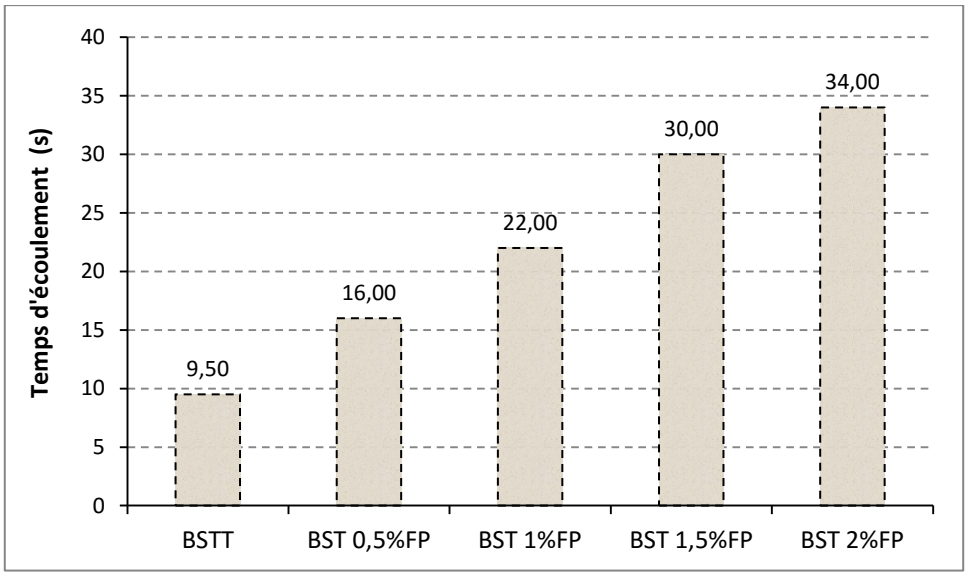


Fig. 5.73. Temps d'écoulement des BST à base de fibres plastiques

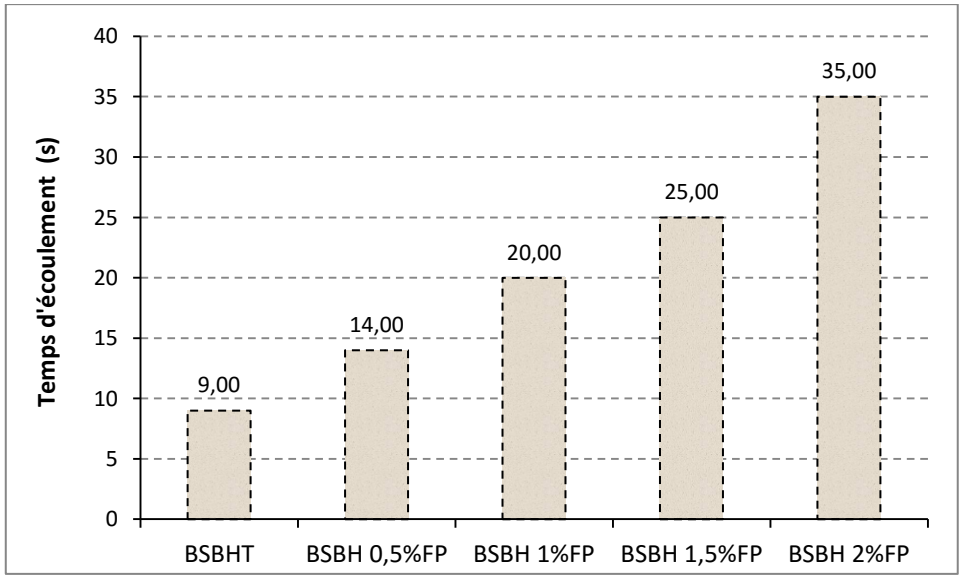


Fig. 5.74. Temps d'écoulement des BSBH à base de fibres plastiques

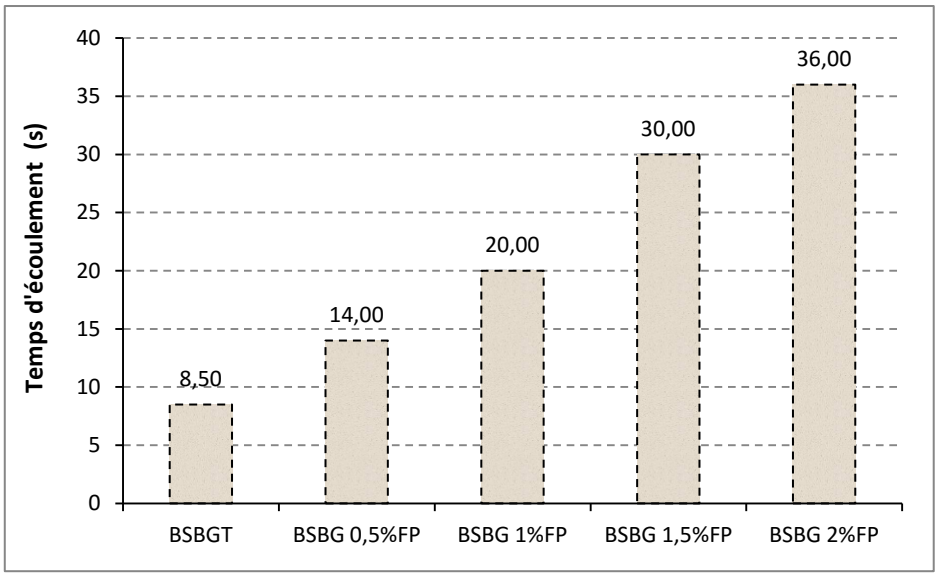


Fig. 5.75. Temps d'écoulement des BSBG à base de fibres plastiques

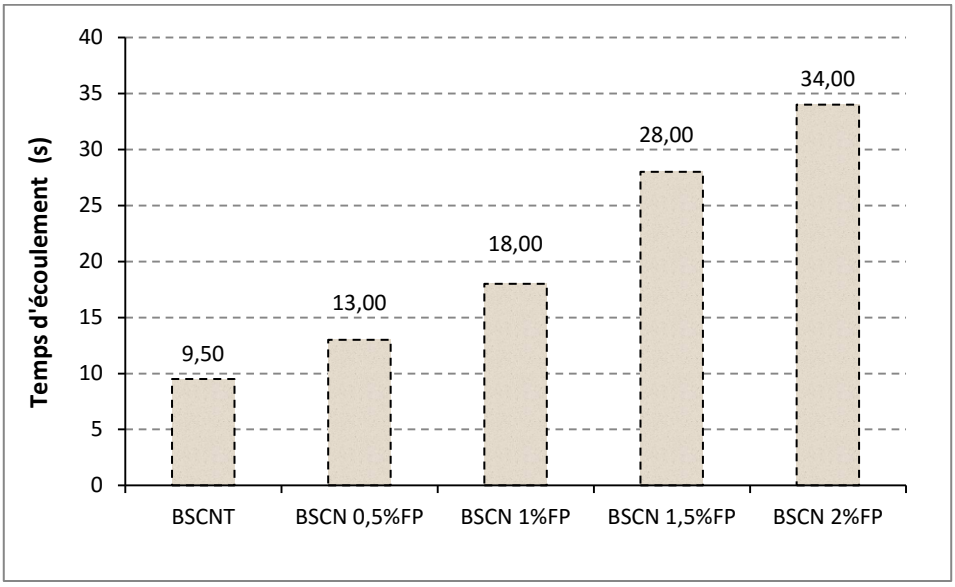


Fig. 5.76. Temps d'écoulement des BSCN à base de fibres plastiques

D'après les figures précédentes, on constate une diminution rapide de la maniabilité avec l'incorporation des fibres plastiques pour tous les types de béton de sable. On remarque aussi que le temps d'écoulement du béton augmente en fonction de l'augmentation en pourcentage de fibres plastiques qui jouent un rôle d'obstacle. Ceci confirme les résultats de d'autres études antérieurs [77, 78] dans lesquelles ils ont trouvé que la maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage en fibres plastiques.

Al-Hadithi et al. [80] ont constaté aussi une diminution de l'étalement du béton autoplaçant en fonction de l'ajout des fibres plastiques de type PET de 2 cm de longueur.

De la même que la première partie et pour pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir une maniabilité constante pour tous les mélanges (un temps d'écoulement entre 8 et 11 s est visé) comme indiqué sur les figures 5.77 - 5.80 suivantes :

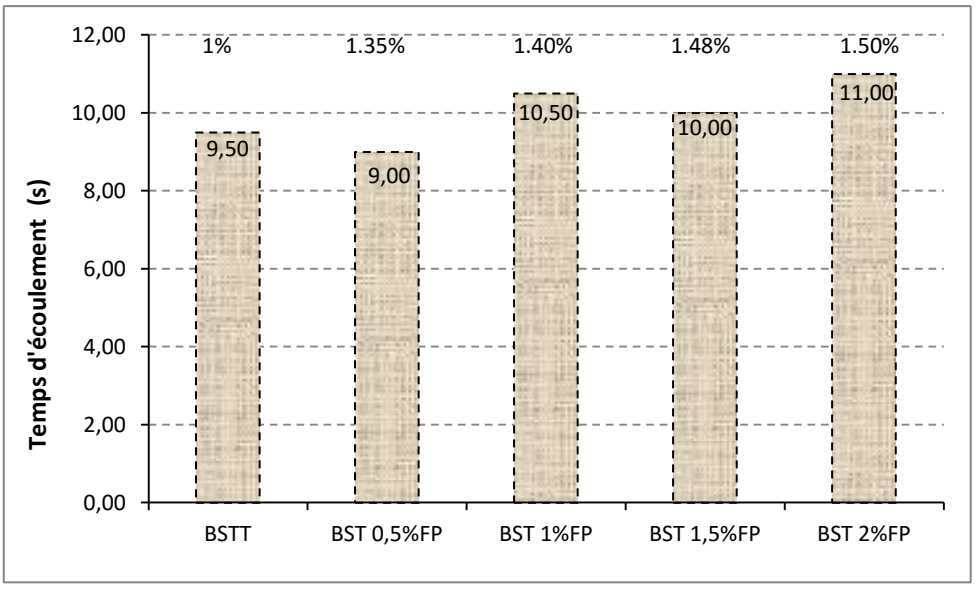


Fig. 5.77. Temps d'écoulement des BST à base de fibres plastiques après réglage

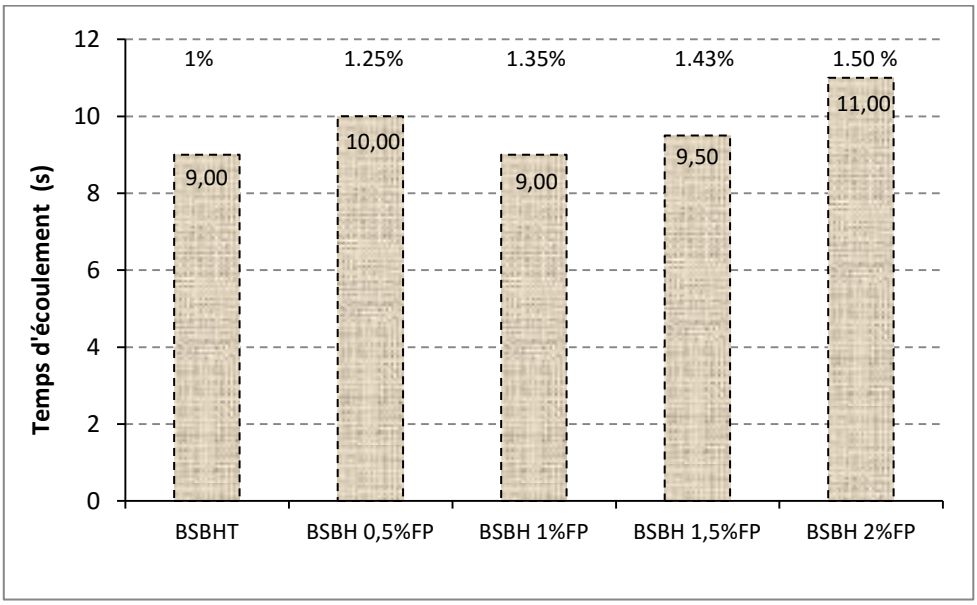


Fig. 5.78. Temps d'écoulement des BSBH à base de fibres plastiques après réglage

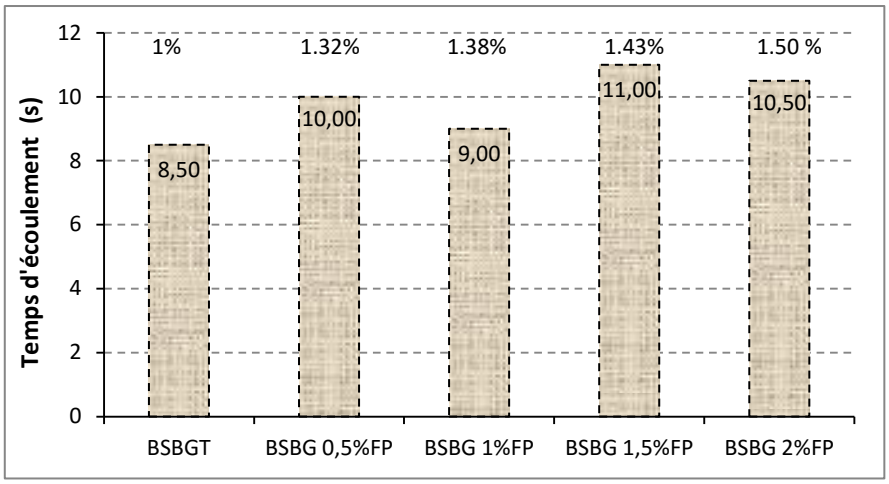


Fig. 5.79. Temps d'écoulement des BSBG à base de fibres plastiques après réglage

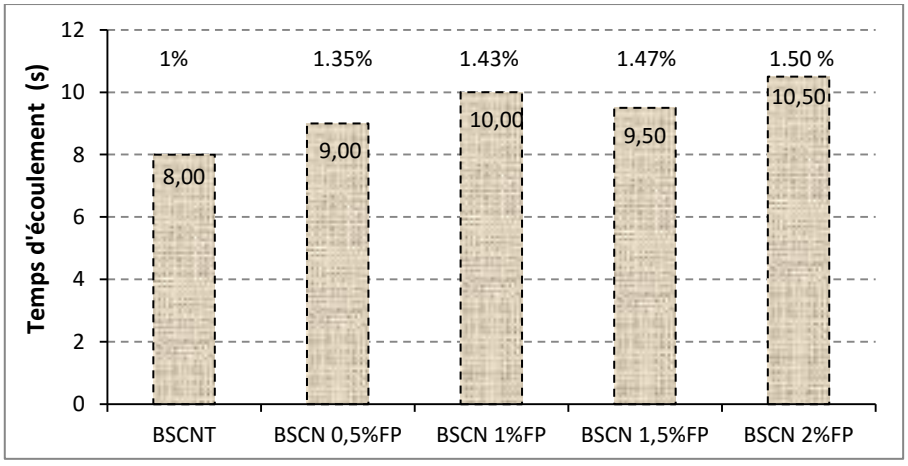


Fig. 5.80. Temps d'écoulement des BSCN à base de fibres plastiques après réglage

5.7.2. La densité

Les résultats de la densité des différents bétons de sable fabriqués sont résumés dans les figures 5.81 – 5.84 ci-dessous.

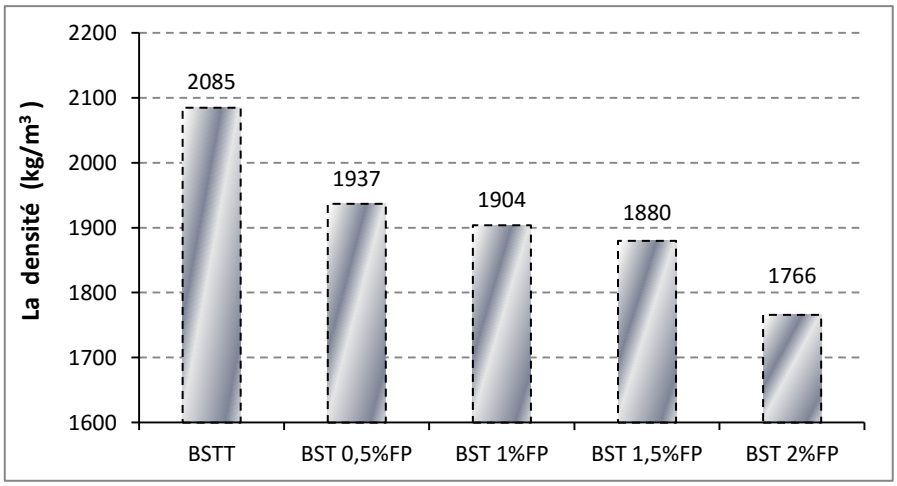


Fig. 5.81. La densité des BST à base de fibres plastiques

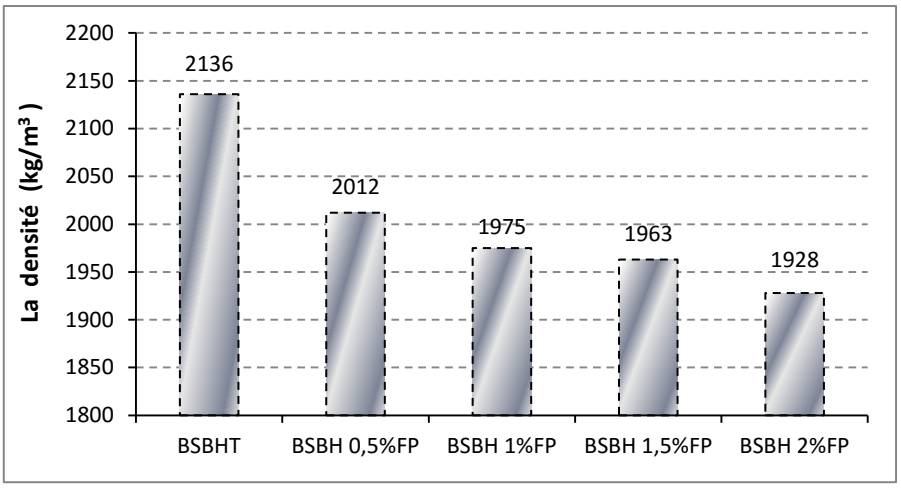


Fig. 5.82. La densité des BSBH à base de fibres plastiques

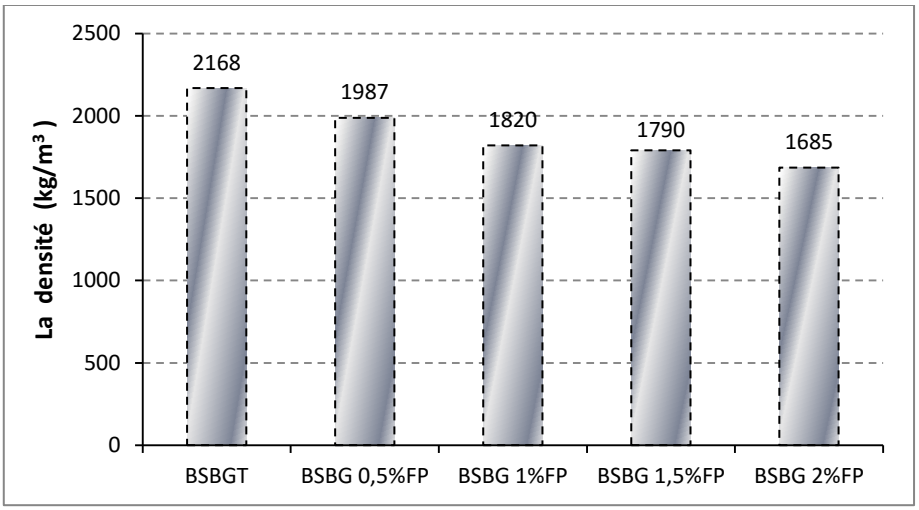


Fig. 5.83. La densité des BSBG à base de fibres plastiques

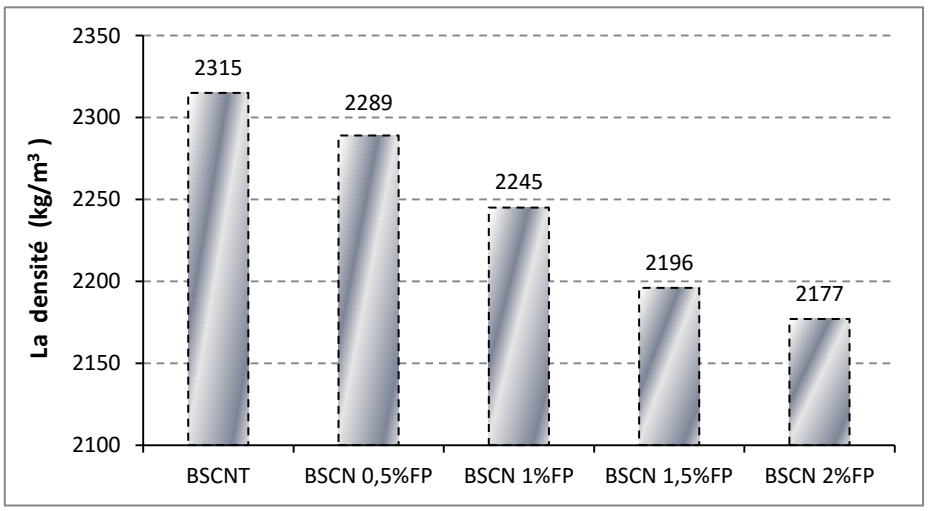


Fig. 5.84. La densité des BSCN à base de fibres plastiques

Les résultats obtenus montrent que l'ajout des fibres plastiques dans la masse du béton de sable influe négativement sur sa densité. Cette diminution est due sans doute à la porosité successive

induite par la forme des fibres plastiques dans le béton. Pereira De Oliveira et al. [81] ont étudié l'influence de 0.5, 1 et 1,5% de fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) sur la densité du mortier de ciment. Ils ont trouvé que plus le pourcentage de fibres plastiques augmente, plus la densité diminué. De la même façon Al-Hadithi et al. [80] ont trouvé aussi que la densité du béton autoplaçant est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage en fibres plastiques de type PET.

5.7.3. L'air occlus

Les résultats d'air occlus des différents bétons réalisés (en %) obtenus sont résumés dans les figures 5.85 – 5.88 ci-dessous.

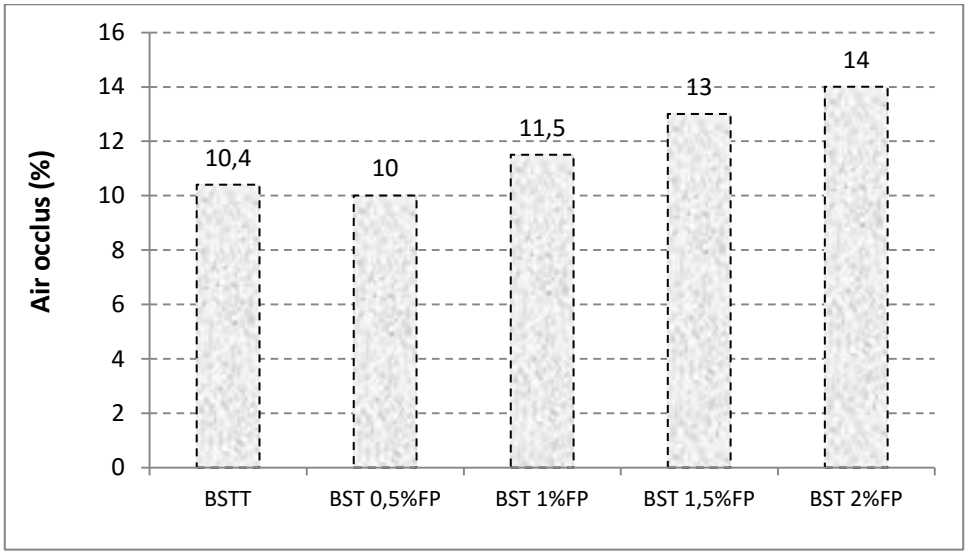


Fig. 5.85. L'air occlus des BST à base de fibres plastiques

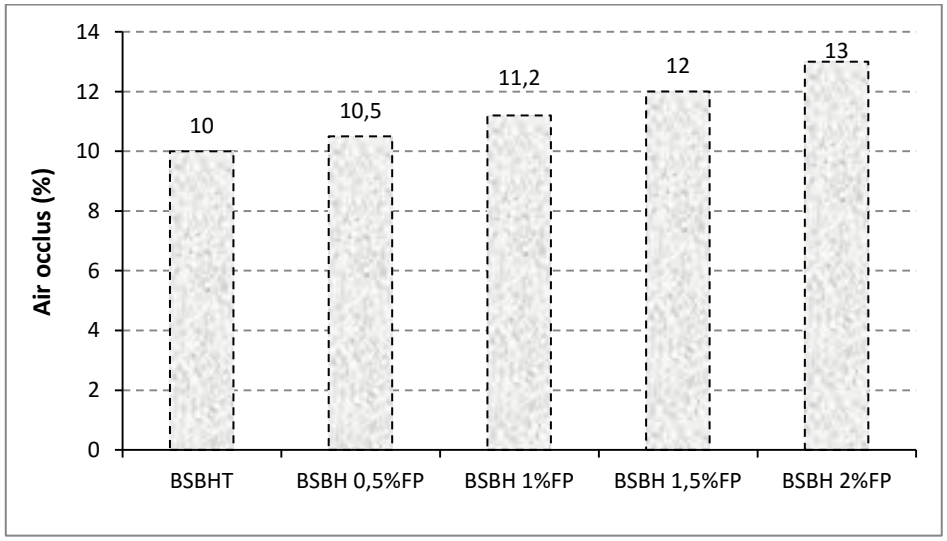


Fig. 5.86. L'air occlus des BSBH à base de fibres plastiques

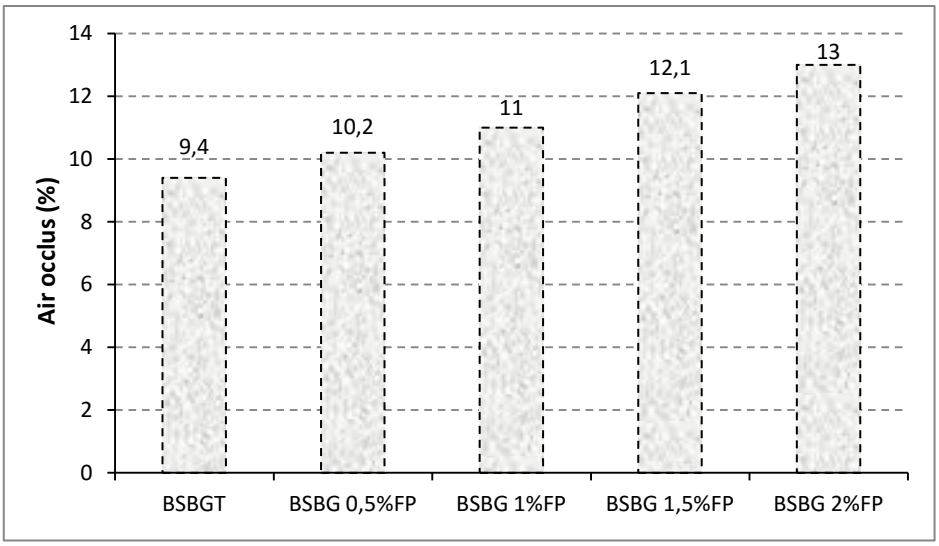


Fig. 5.87. L'air occlus des BSBG à base de fibres plastiques

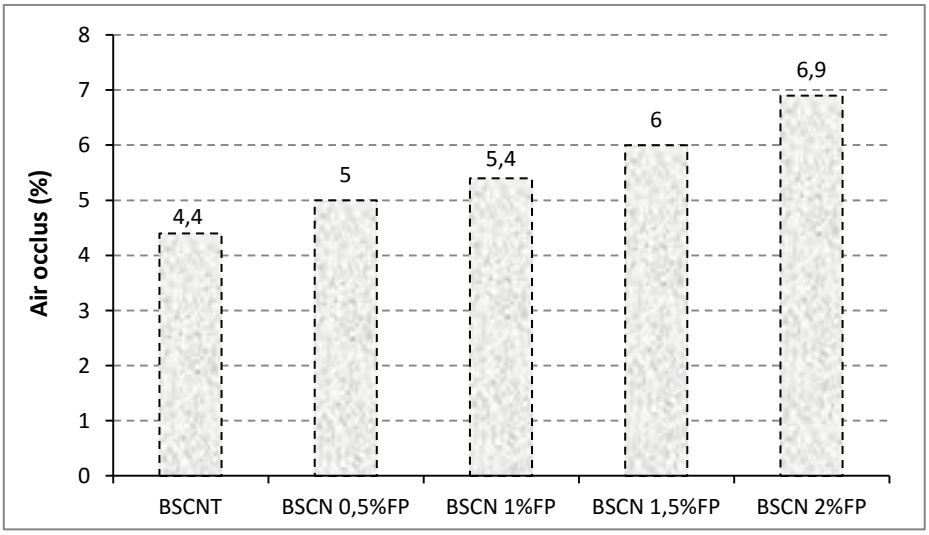


Fig. 5.88. L'air occlus des BSCN à base de fibres plastiques

Les figures ci-dessus montrent que l'ajout des fibres plastiques dans le béton de sable cause plus d'air occlus à l'intérieur du mélange. On remarque aussi que le contenu d'air occlus augment en fonction de l'augmentation en fibres plastiques. Cela explique que le béton de sable à base de fibres plastiques est moins compact par rapport au béton de sable de référence. Ce qui confirme les résultats de Rebeiz et al. [82], qui ont trouvé que l'air occlus du béton de polymère augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage des fibres en PET. Bayasi et al. [83] ont aussi observé que l'air occlus du béton augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage en fibres de polypropylène.

5.8. Béton durci

De la même façon que le béton de sable frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton de sable durci sont résumés comme suit :

5.8.1. Résistances à la compression

Les résultats de la résistance à la compression prisent sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 7, 28 et 90 jours sont illustrés dans les figures 5.89 – 5.92 suivantes.

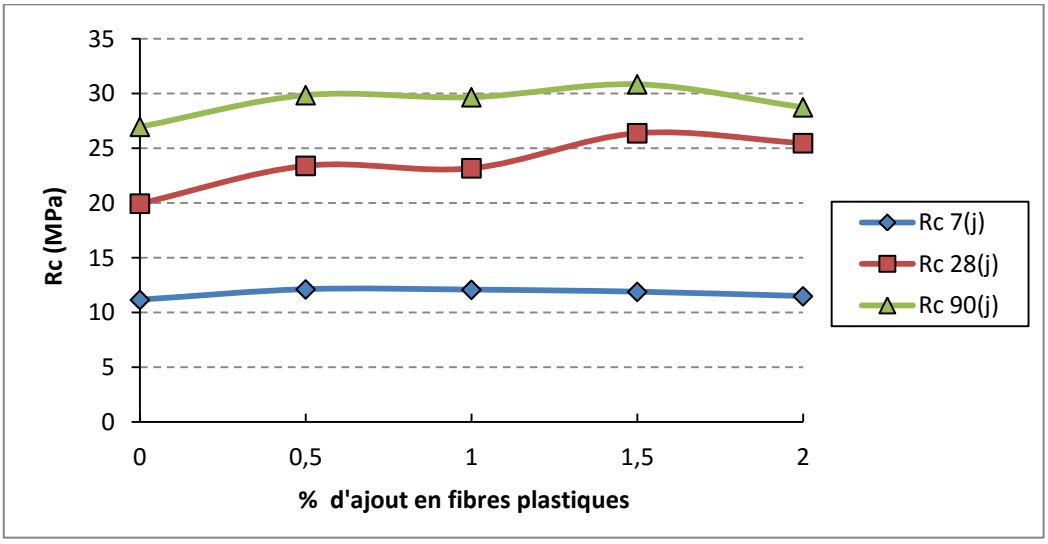


Fig. 5.89. La résistance à la compression des BST à base de fibres plastiques

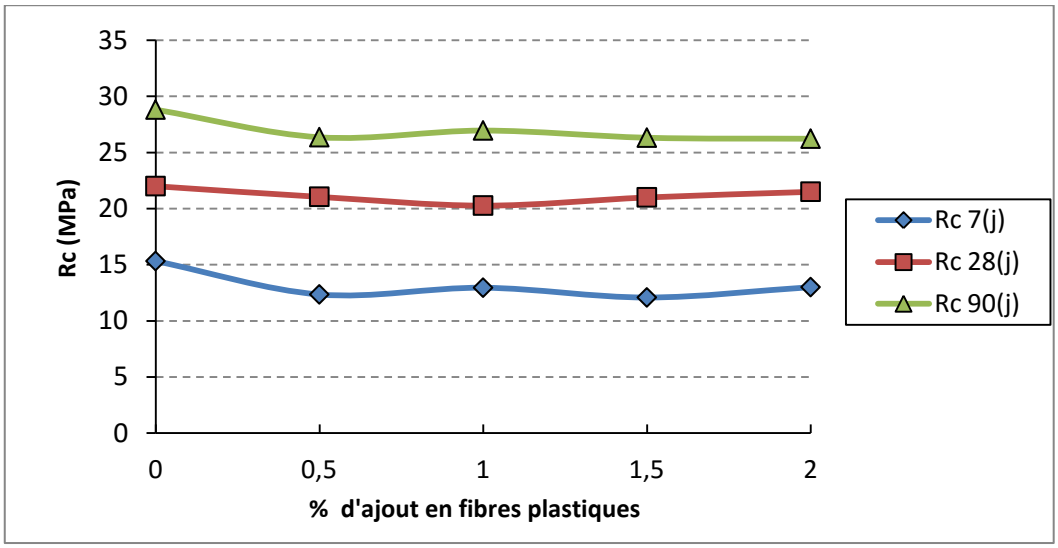


Fig. 5.90. La résistance à la compression des BSBH à base de fibres plastiques

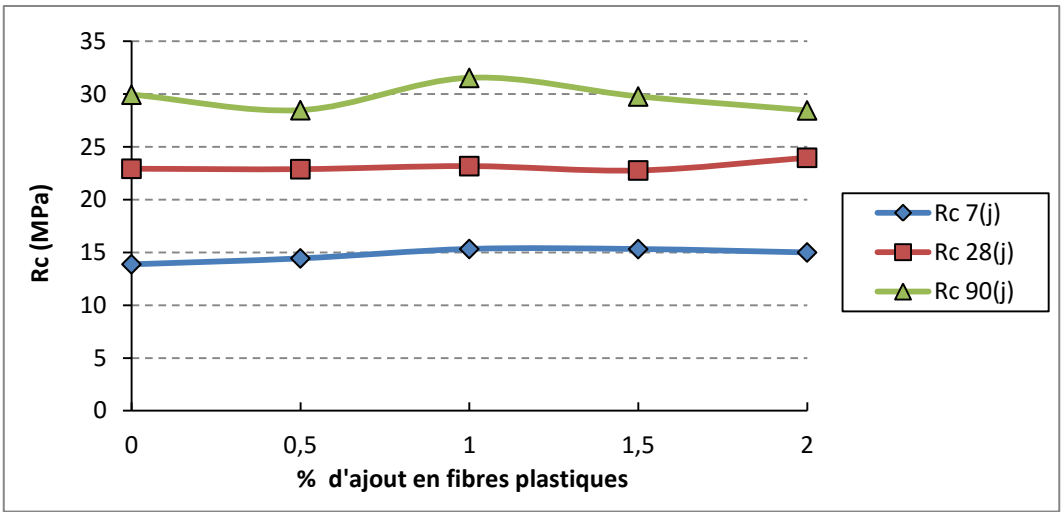


Fig. 5.91. La résistance à la compression des BSBG à base de fibres plastiques

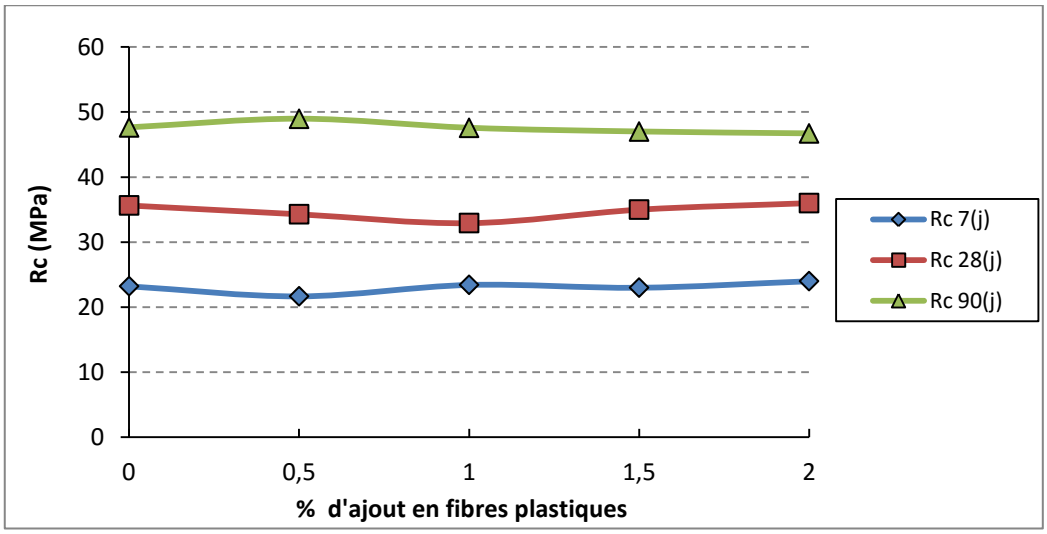


Fig. 5.92. La résistance à la compression des BSCN à base de fibres plastiques

Les résultats obtenus montrent que la cinétique de la résistance à la compression est la même pour tous les bétons en fonction du temps. On constate aussi à 28 jours que les fibres plastiques améliorent la résistance à la compression du béton de sable de Tamanrasset et passe par un optimum de 26% pour 1.5% en fibres. Par contre, pour les autres bétons de différents sables, cette résistance à la compression est moyennement constante. Ceci nous amène à conclure que la finesse du sable joue un rôle important avec l'optimum en fibres plastiques dans la variation de la résistance à la compression du béton de sable. Ce qui confirme les résultats de plusieurs chercheurs dans le domaine [86, 87]. Kim et al. [84] et Ochi et al. [85] ont constaté que l'ajout de 1% de fibres plastiques (PET) engendre une légère augmentation dans la résistance à la compression (gain de 13%) ou une légère diminution (-7%) pour un ajout de 1% de fibres des bétons renforcés de fibres. Luiz et al. [81] ont aussi étudié l'influence d'ajout de fibres plastiques (PET) sur la résistance à la compression du mortier. Ils ont conclus que l'incorporation des fibres

à la matrice cimentaire ne change pas de manière significative la résistance à la compression du mortier. Kandasamy et al. [88] ont trouvé que l'addition de 0.5% de fibres plastiques issues de bouteilles plastiques (polythène), engendre une légère augmentation de la résistance à la compression de 0.68 % à 7 jours et 5.12% à 28 jours.

Finalement, sur la base des résultats obtenus, on peut dire que l'utilisation de ces types de béton est recommandée pour les différents voies de construction (béton de structure, béton de route, voirie, etc.).

5.8.2. Résistances à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des différents bétons de sable à base de fibres plastiques sont illustrés dans les figures 5.93 – 5.96 ci-dessous.

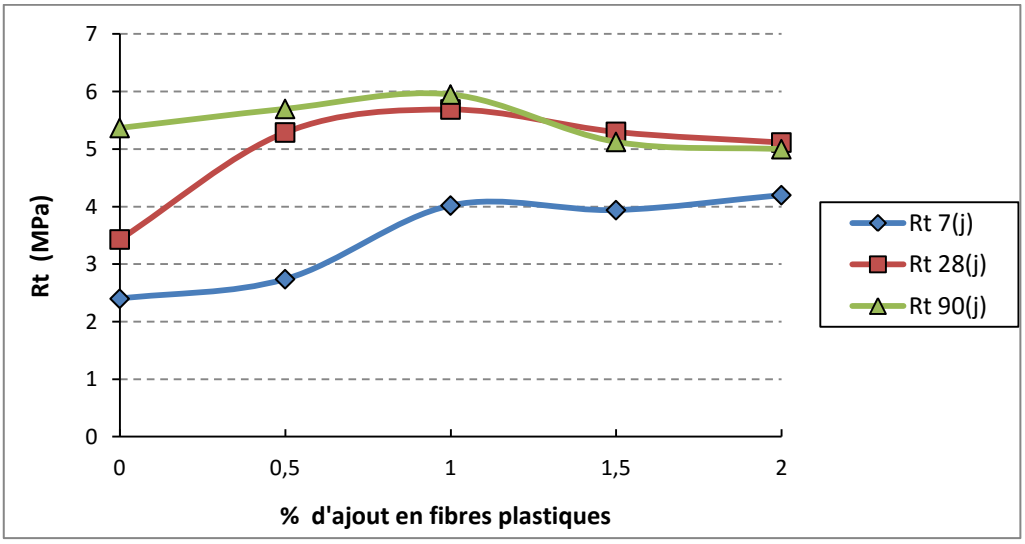


Fig. 5.93. La résistance à la traction des BST à base de fibres plastiques

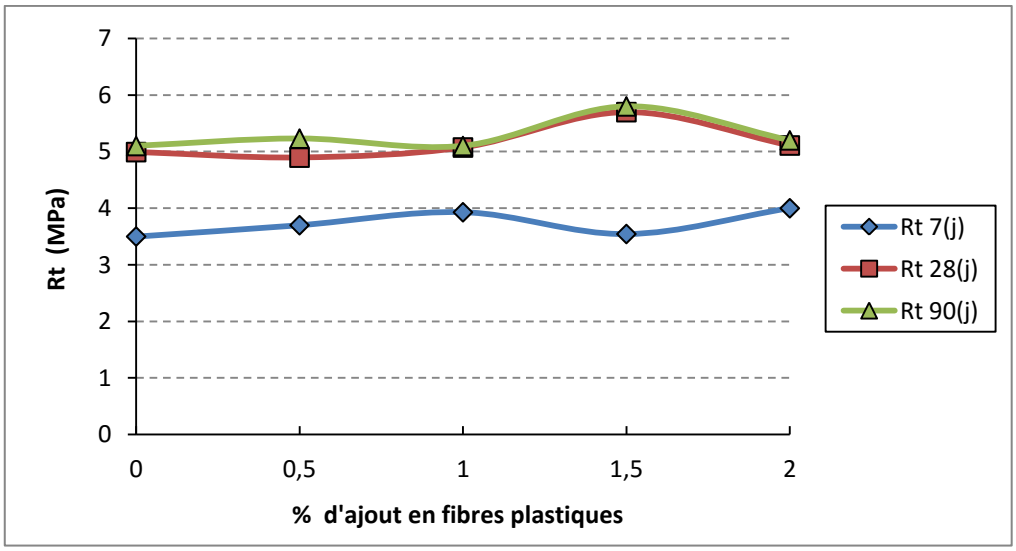


Fig. 5.94. La résistance à la traction des BSBH à base de fibres plastiques

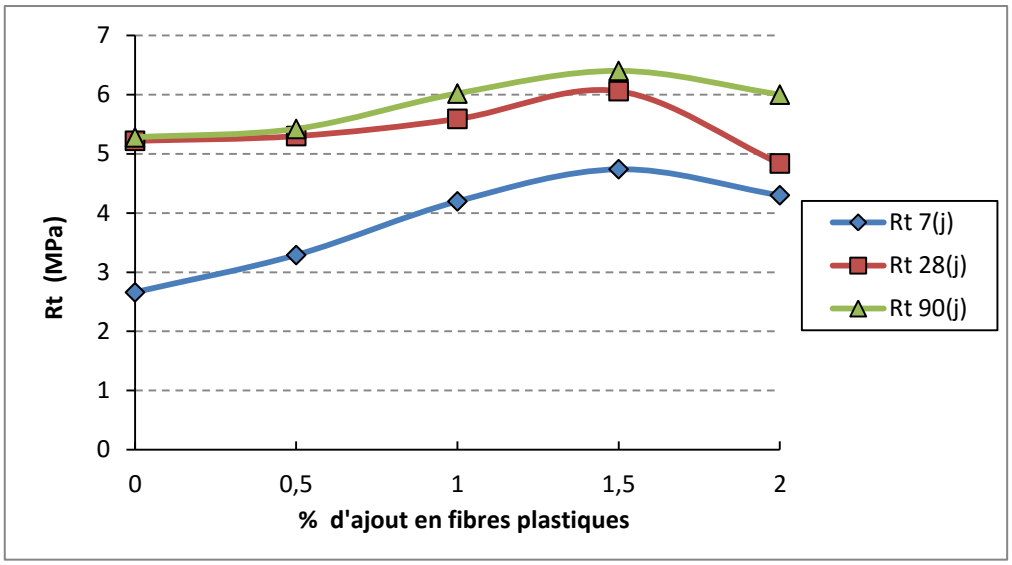


Fig. 5.95. La résistance à la traction des BSBG à base de fibres plastiques

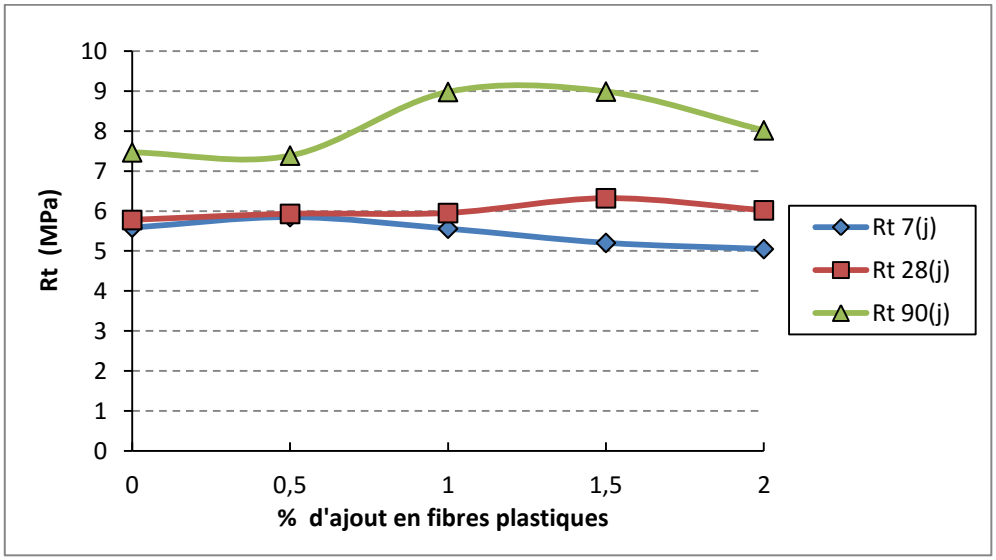


Fig. 5.96. La résistance à la traction des BSCN à base de fibres plastiques

De la même façon que la résistance à la compression, la cinétique de la résistance à la traction est la même pour tous les bétons en fonction du temps. Pour tous les bétons de sable à base de fibres plastiques, nous avons une augmentation de la résistance à la traction par flexion par rapport au béton de sable de référence, et cela pour tous les âges, ce qui confirme tous les résultats trouvés dans la littérature en ce qui concerne cette particularité. On constate aussi que le pourcentage optimum de la résistance est en fonction d'ajouts de 0.5 à 1.5% de fibres plastiques. Ceci est expliqué par le fait que les fibres contribuent à la couture des macro-fissures. Le gain de résistance pour les BST avec un ajout de 1% de fibres est de 66% à l'âge de 28 jours, 14% pour les BSBH avec un ajout de 1.5%, 15% pour les BSBG et 9.5% pour les BSCN. Ces résultats confirment plusieurs travaux de recherche dans ce domaine Kim et al. [84] ont trouvé des augmentations dans la résistance à la traction par flexion des bétons à base de 0.5, 0.75 et 1.0%

des fibres plastiques en PET. Al-Tulaian et al. [89] ont étudié l'effet d'addition de deux types de fibres plastiques (PET) avec deux élancement 2 et 5cm, et avec 0.50, 1 et 1.5% sur la résistance à la flexion du mortier de ciment. Ils ont trouvé que quelque soit l'élancement des fibres, la résistance à la traction par flexion est argumenteé en fonction du pourcentage d'ajout de fibres plastiques, et l'ajout de 1.5% de FP de 5cm d'élancement présente le meilleur résultat. C'est les mêmes résultats trouvés par Luiz et al. [81] qui ont aussi constaté des augmentations dans la résistance à la traction du mortier à base de 0,5, 1 et 1,5% de fibres plastiques en PET (augmentation de 60% à 100% à l'âge de 7 jours, 30% à 28 jours et 50% à l'âge de 63 jours). Yin et al. [77] ont étudié l'influence d'ajout des macros fibres en plastiques (PET et PP) sur la résistance à la traction du béton. Ils ont trouvé que la résistance à la traction est toujours augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres plastiques. Finalement, L'application de ce type de béton est recommandée pour les éléments en béton structuraux (pontaux, poutre, dalle, chaussée) ainsi que pour la réparation des ouvrages dégradés.

5.8.3. Le module d'élasticité

Le module d'élasticité des différentes compositions est illustré dans les figures 5.97 – 5.100 ci-dessous. Chaque valeur correspond à une moyenne obtenue à partir de trois essais.

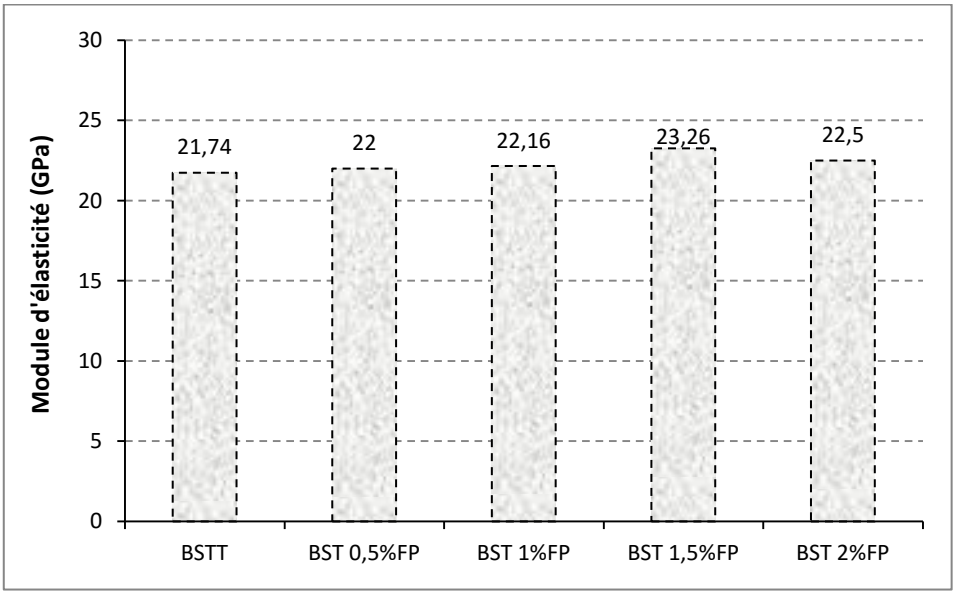


Fig. 5.97. Le module d'élasticité des BST à base de fibres plastiques

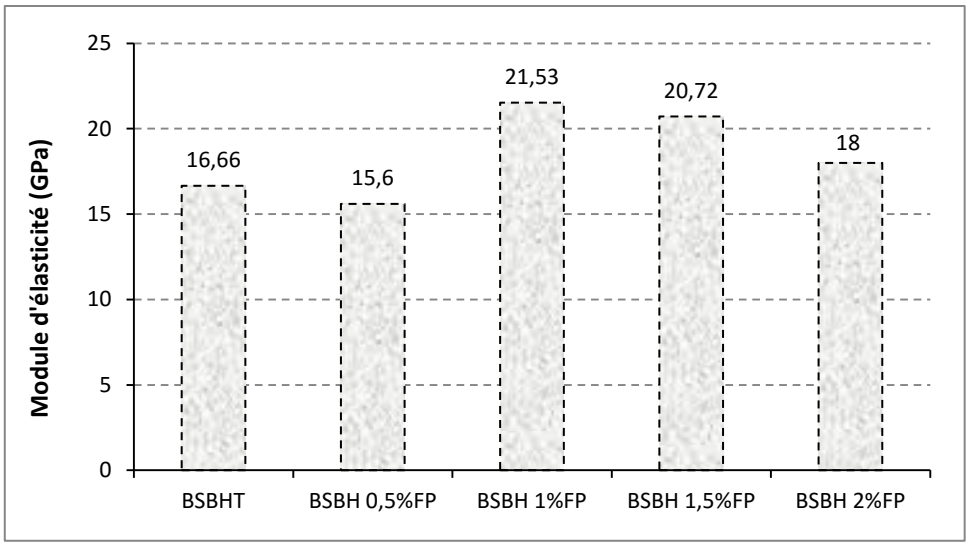


Fig. 5.98. Le module d'élasticité des BSBH à base de fibres plastiques

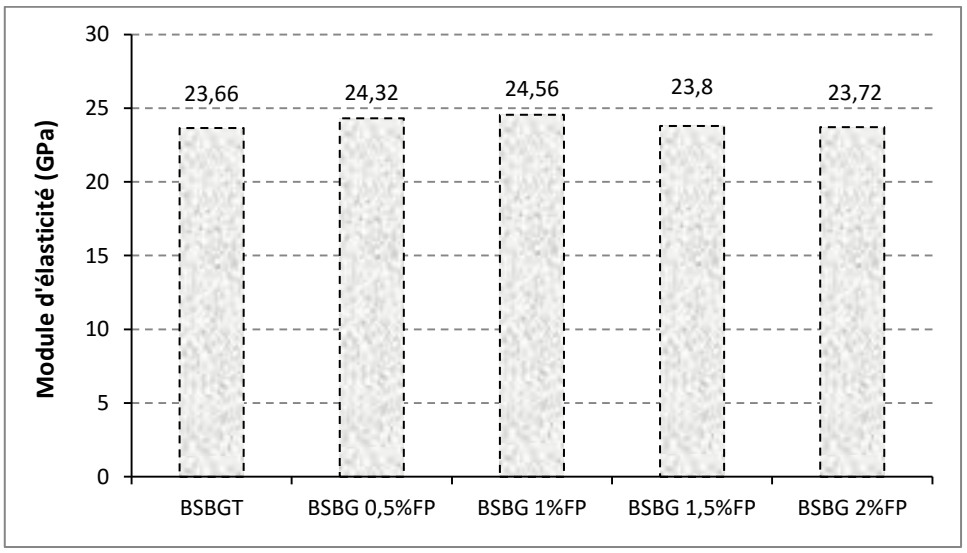


Fig. 5.99. Le module d'élasticité des BSBG à base de fibres plastiques

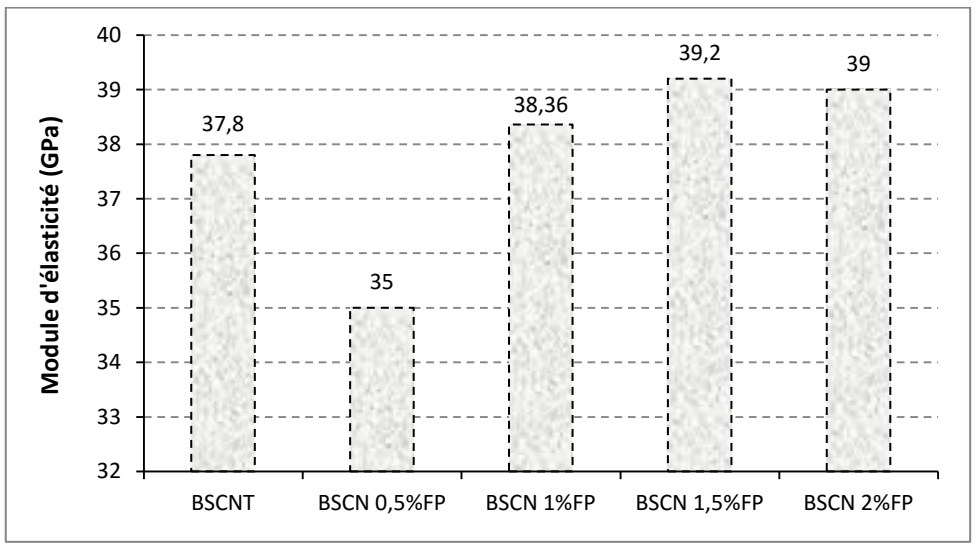


Fig. 5.100. Le module d'élasticité des BSCN à base de fibres plastiques

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres plastiques à la masse de tous les types de béton de sable engendre une augmentation du module d'élasticité par rapport au béton de sable témoin. Cette augmentation est liée au module d'élasticité des fibres utilisées, ainsi que à la résistance à la compression des différents bétons de sable. Des cas particuliers ont été observés pour BST et BSCN à base de 0.5% de fibres plastiques qui ont présentés des modules d'élasticité plus faible que celle de béton de sable de référence. Cependant, contrairement à ce que nous avons trouvé, tous les bétons à base de fibres plastiques (PET) étudiés par Kim et al. [84] présentent une légère diminution dans le module d'élasticité par rapport au béton sans fibres.

5.8.4. Conductivité thermiques

Les résultats d'essais de la conductivité thermique obtenus sont illustrés dans figures 5.101-5.104 ci-dessous.

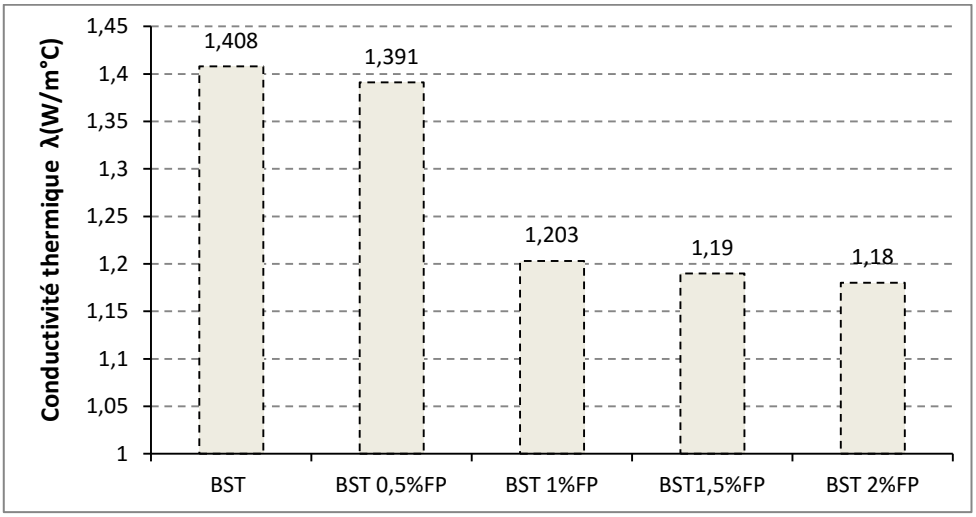


Fig. 5.101. La conductivité thermique des BST à base de fibres plastiques

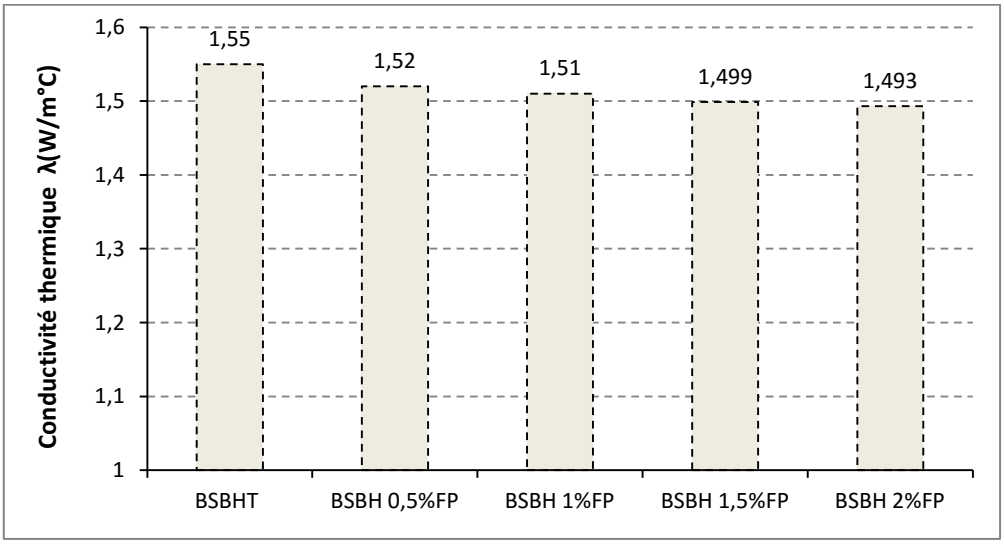


Fig. 5.102. La conductivité thermique des BSBH à base de fibres plastiques

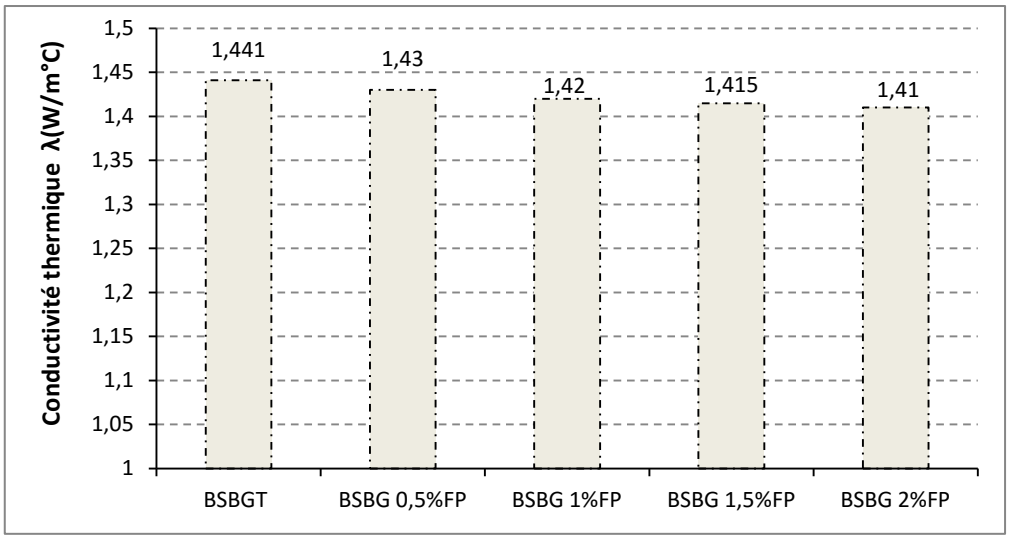


Fig. 5.103. La conductivité thermique des BSBG à base de fibres plastiques

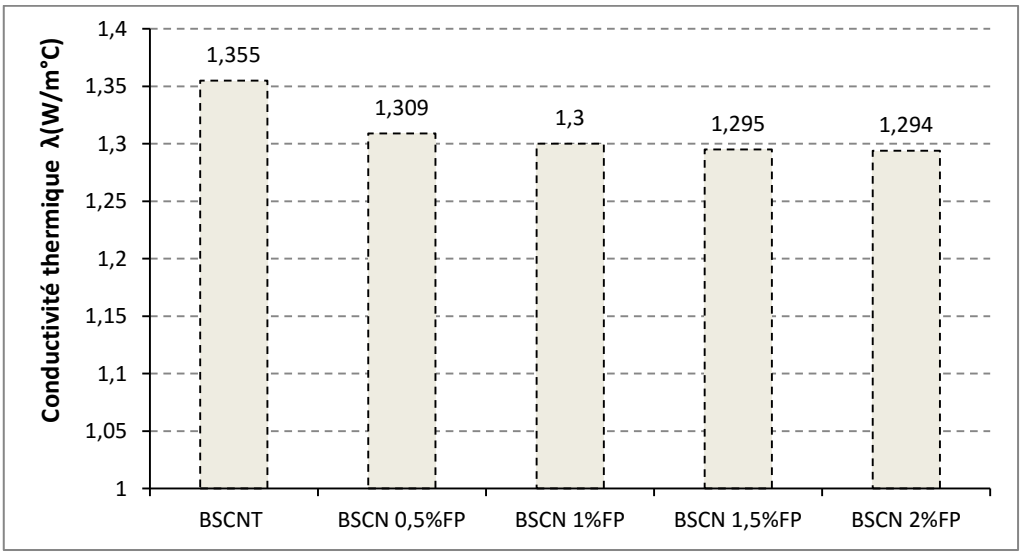


Fig. 5.104. La conductivité thermique des BSCN à base de fibres plastiques

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique de tous les bétons de sable est diminuée en fonction d'ajout de fibres plastiques. La dégression est estimé par 16.20% pour les BST, 3.70% pour les BSBH, 2% pour les BSBG et 4.5% pour les BSCN. Cette dégression est due à la conductivité thermique des fibres plastiques (PET 0,28–0,30 W/mK) ajoutées qui est plus faible que celle des autres constituants du béton. En outre, la diminution de la conductivité thermique est liée aussi à l'augmentation de la porosité causée par l'ajout de fibres plastiques à la matrice cimentaire. En fait, les pores contiennent de l'air, ont une conductivité thermique (0.024 W/m°C) beaucoup plus faible par rapport aux autres composants du béton de sable. Ce qui confirme les résultats de Fernando et al. [90] qui ont concluent que l'ajout de 1% de fibres plastiques en PET au béton ordinaire, diminue la conductivité thermique de 18 %.

5.9. Approche de durabilité

5.9.1. Porosité et microstructure

- ***La porosité***

La porosité des différents composites est représentée dans les figures 5.105-5.108 suivantes.

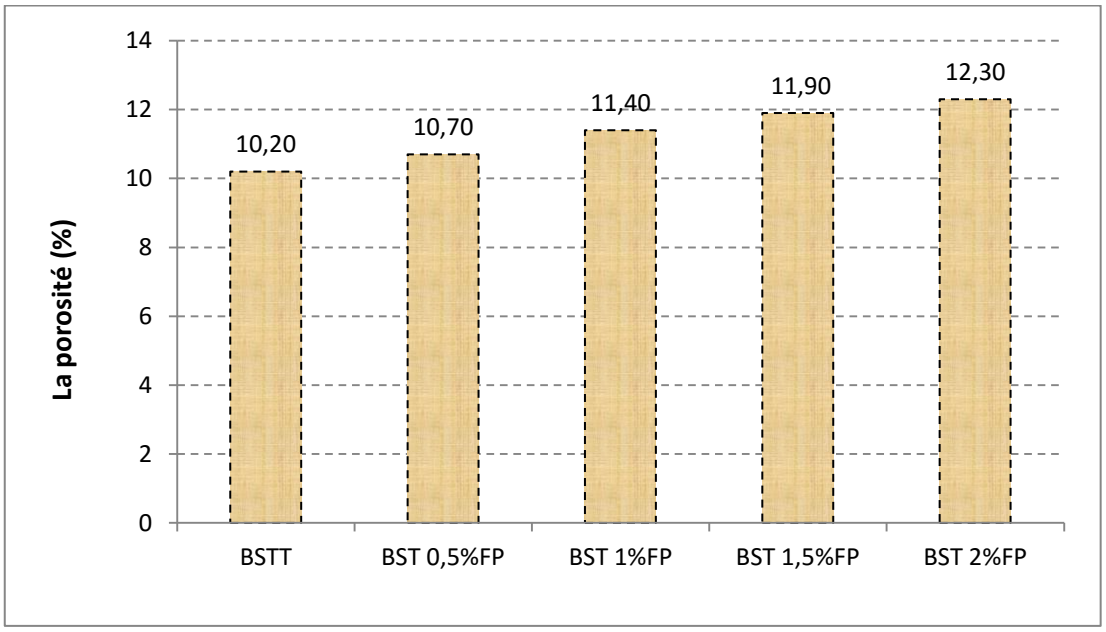


Fig. 5.105. La porosité des BST à base de fibres plastiques

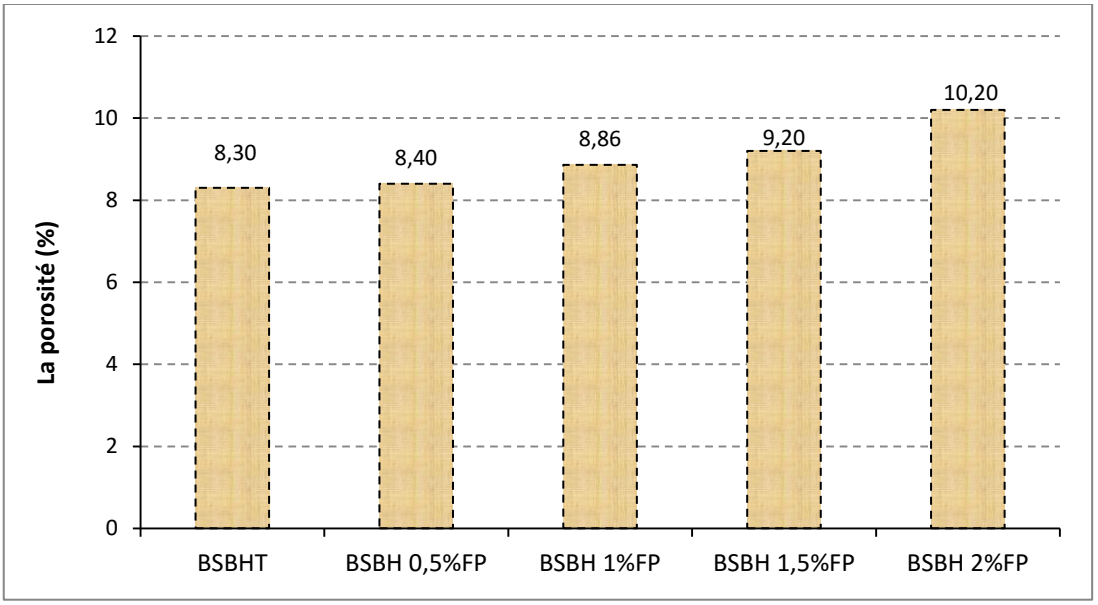


Fig. 5.106. La porosité des BSBH à base de fibres plastiques

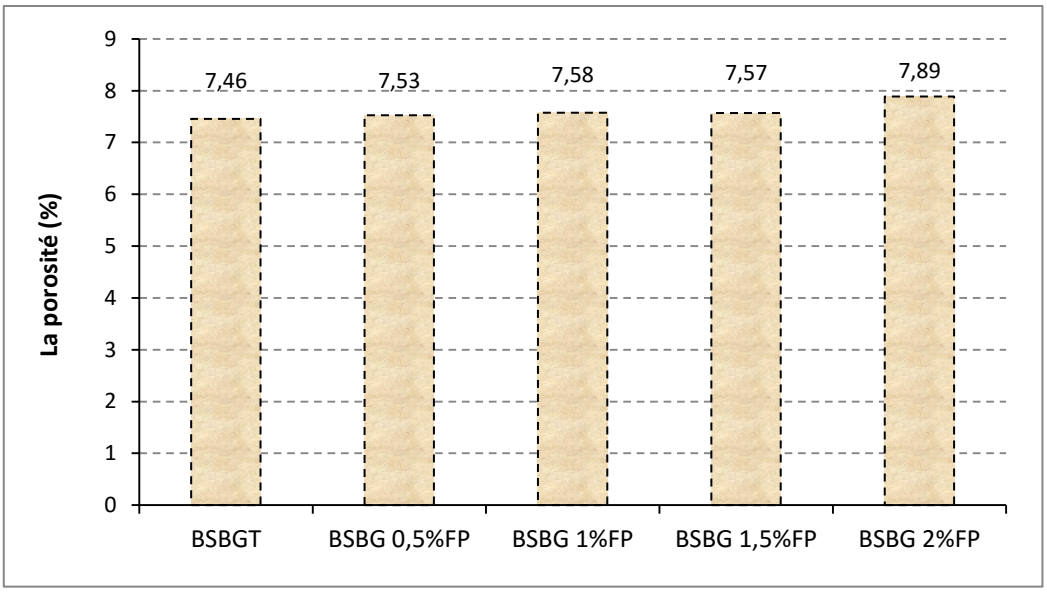


Fig. 5.107. La porosité des BSBG à base de fibres plastiques

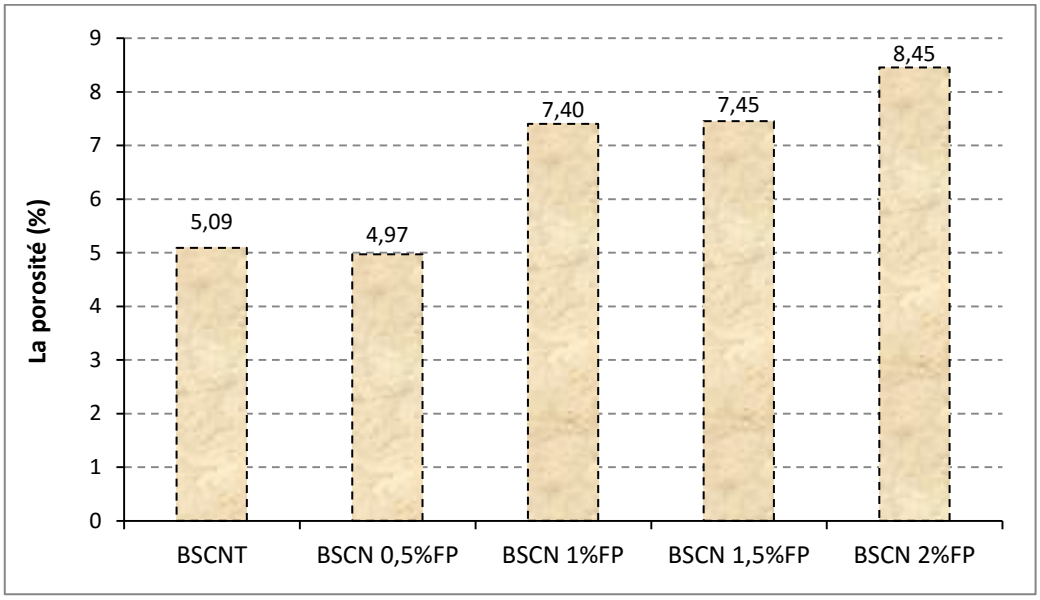
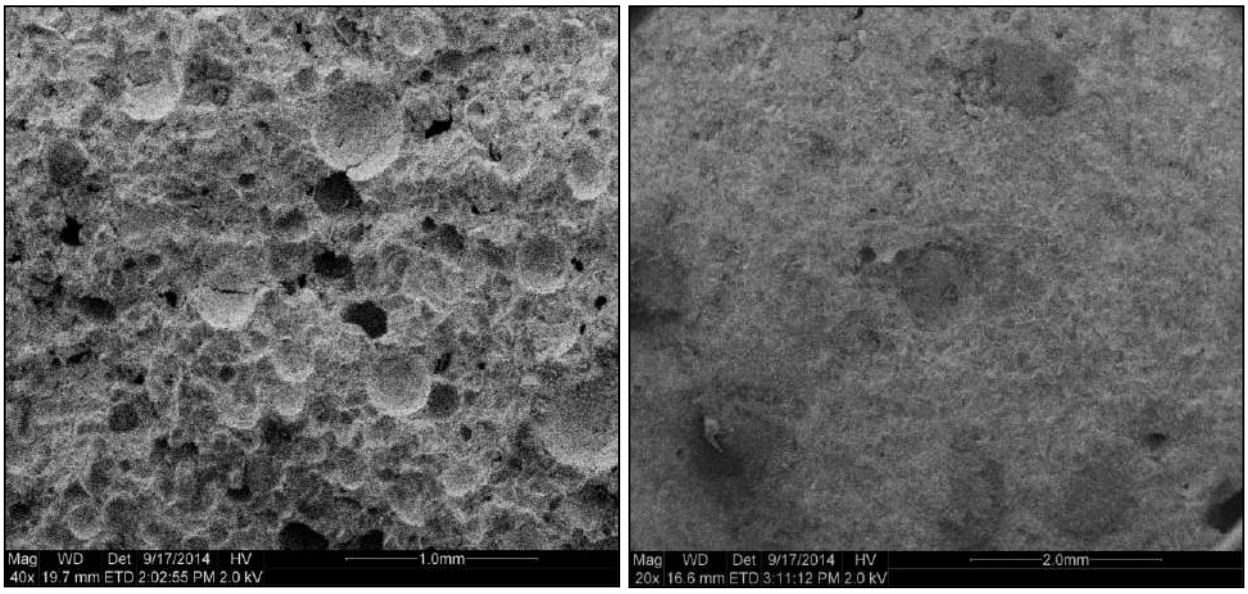


Fig. 5.108. La porosité des BSCN à base de fibres plastiques

Les résultats obtenus montrent que la porosité du béton de sable est légèrement augmentée en fonction d'ajout de fibres plastiques. Beddar et al. [91] ont étudié l'influence de fibres métalliques sur la porosité du béton. Ils ont trouvé au début que la porosité est diminuée en fonction d'ajouts de fibres avec une longueur de flambement qui augmente en fonction d'augmentation de fibres l_f =10mm. Mais avec l_f = 20mm, la porosité augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. Finalement, les bétons de sable de dune présentent des porosités plus grandes que les autres types de béton grâce à ses granulométries très fines et ses porosités très élevées, ce qui donne des bétons de sable moins compacts que ceux qui sont fabriqués à base du sable de concassage.

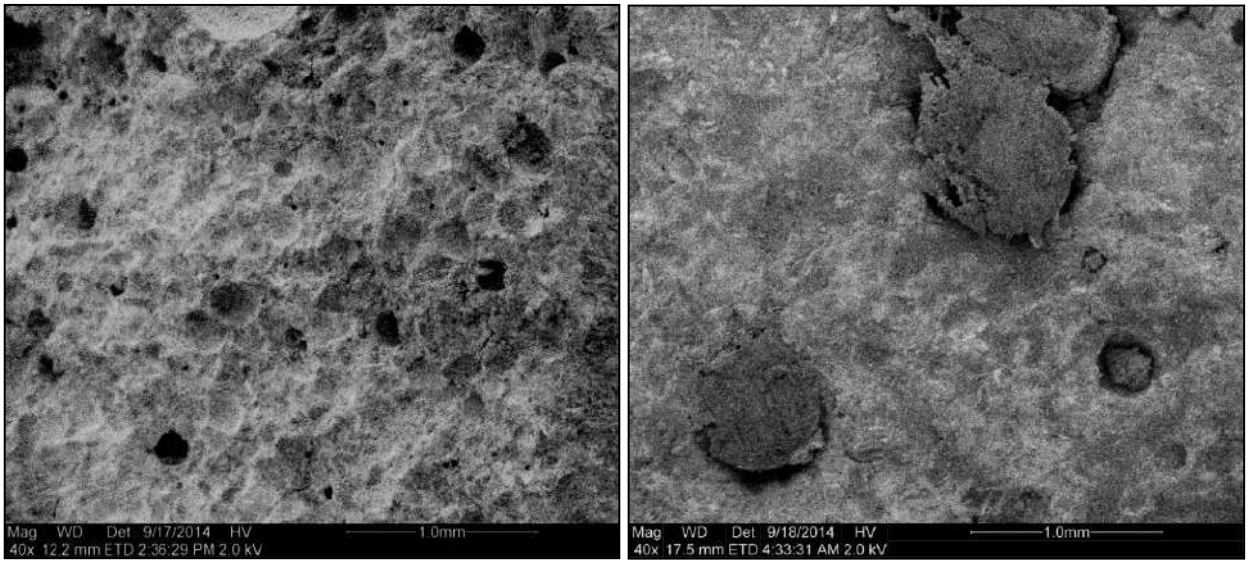
- ***La microstructure***

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de béton de sable à base de 2% de fibres plastiques et leurs témoin respectifs, montre que la structure de tous les béton de sable à base de fibres plastiques (2%) est plus homogène par rapport au béton de sable de référence comme indiquent les figures 5.109 – 5.102 ci-dessous. On peut voir aussi la bonne adhésivité entre les fibres plastiques à la matrice cimentaire. Cette même conclusion est tirée par de nombreux chercheurs [84].



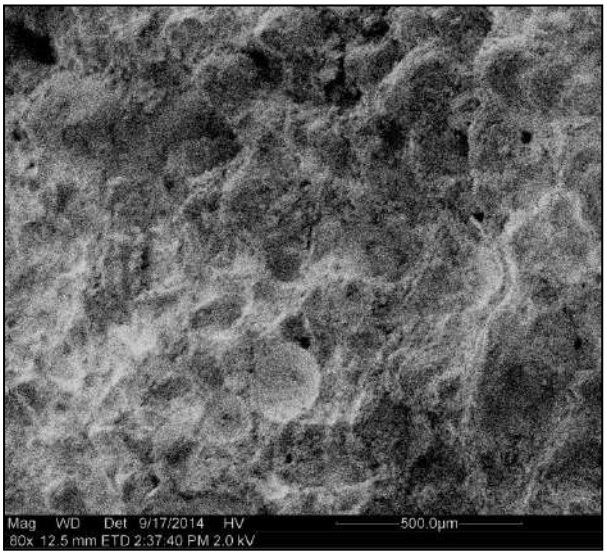
BSTT BST 2% FP

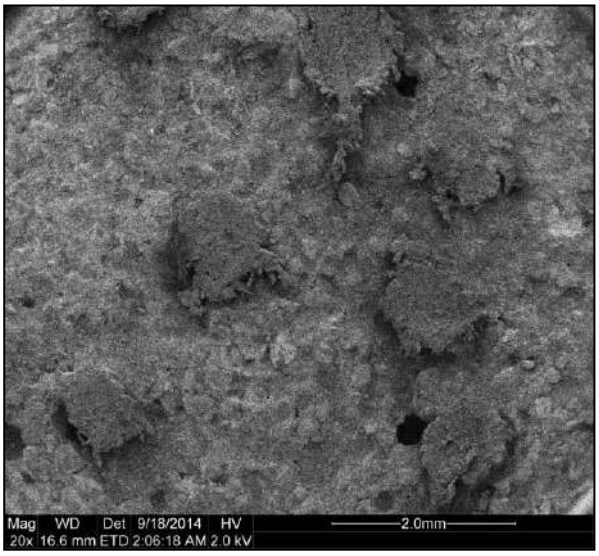
Fig. 5.109. Examen au MEB de BSTT et BST à base de fibres plastiques



BSBHT BSBH 2% FP

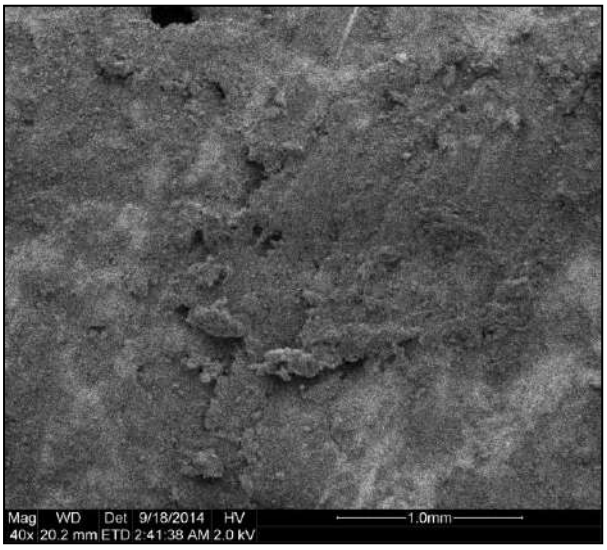
Fig. 5.110. Examen au MEB de BSBHT et BSBH à base de fibres plastiques





BSBGT BSBG 2% FP

Fig. 5.111. Examen au MEB de BSGT et BSBG à base de fibres plastiques





BSCNT BSCN 2% FP

Fig. 5.112. Examen au MEB de BSCNT et BSCN à base de fibres plastiques

5.9.2. Absorption d'eau

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable à base de fibres plastiques sont illustrés dans les figures 5.113 – 5.116 suivantes.

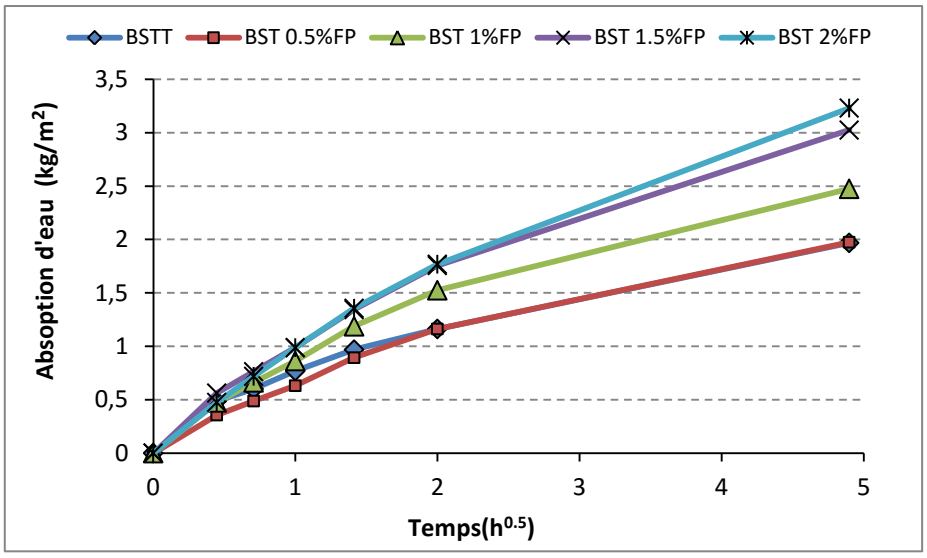


Fig. 5.113. Absorption d'eau des BST à base de fibres plastiques

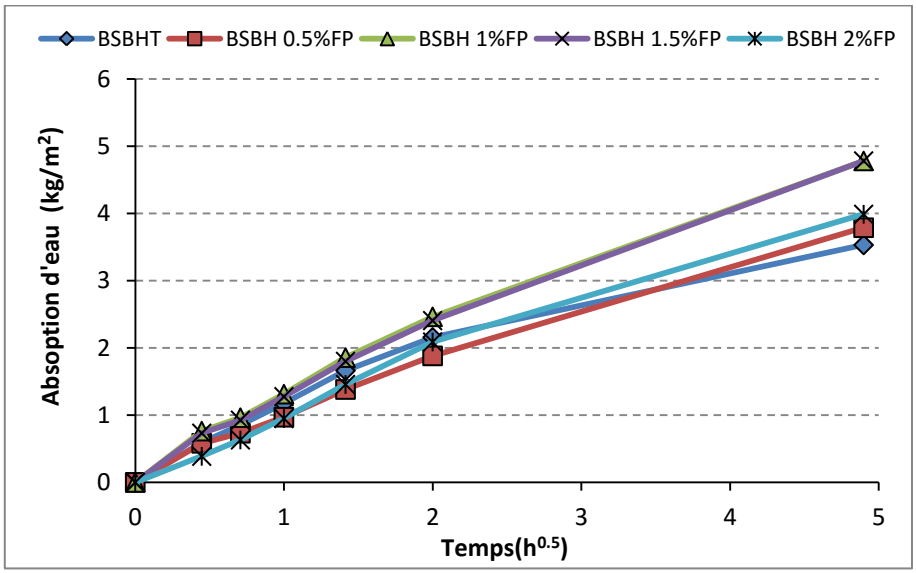


Fig. 5.114. Absorption d'eau des BSBH à base de fibres plastiques

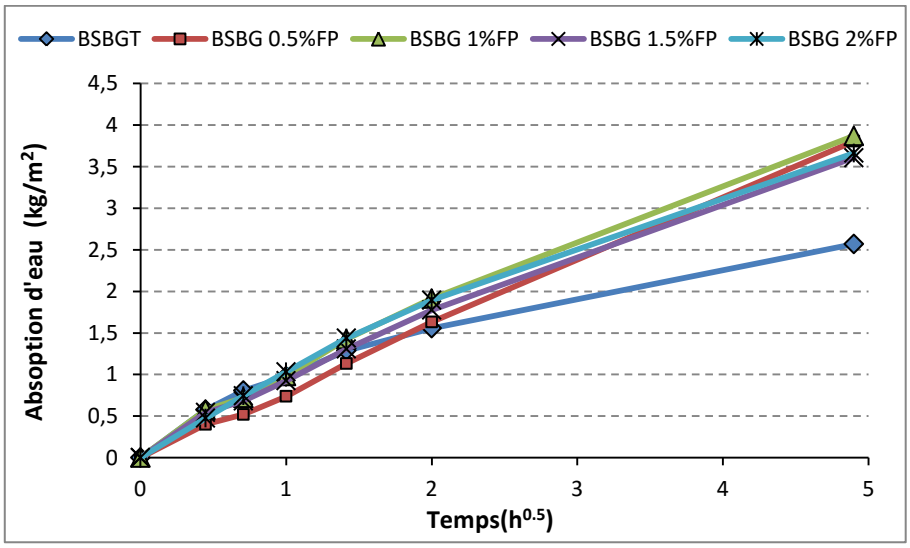


Fig. 5.115. Absorption d'eau des BSBG à base de fibres plastiques

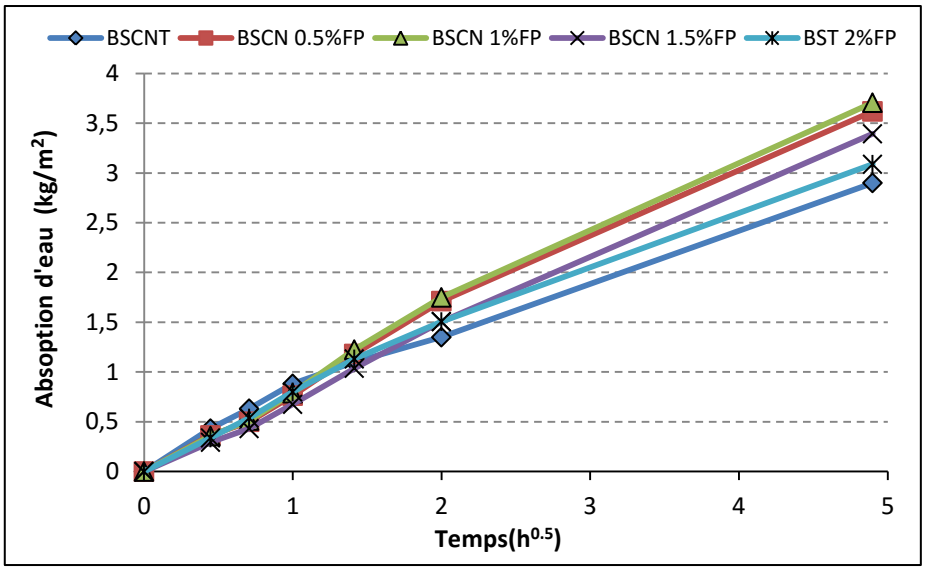


Fig. 5.116. Absorption d'eau des BSCN à base de fibres plastiques

A partir des résultats précédents on constate en premier lieu que l'absorption initiale de tous les bétons de sable à base de fibres plastiques est nettement moins importante. En second lieu, il est nettement visible que l'absorption d'eau finale de tous les bétons de sable de fibres est augmentée en fonction d'ajout de fibres plastiques et devienne plus importante que celle du béton de sable témoin. Cette augmentation est liée par l'introduction de ces fibres dans le béton, qui se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume de vides, associée à une diminution de la compacité du matériau. Nos résultats vont dans le même sens que ceux des travaux de [79,126]. Yin et al. [77] ont trouvé que l'absorption des bétons à base de 0.5, 1 et 1.5% de macro fibres en PET et en Polypropylène est plus importante que celle du béton sans fibres.

5.9.3 Variations de longueur

a) Retrait

Les figures 5.117-5.120 ci-dessous permettent de mettre en lumière l'influence du dosage en fibres plastiques sur le retrait en l'air libre des quatre types de béton de sable employés.

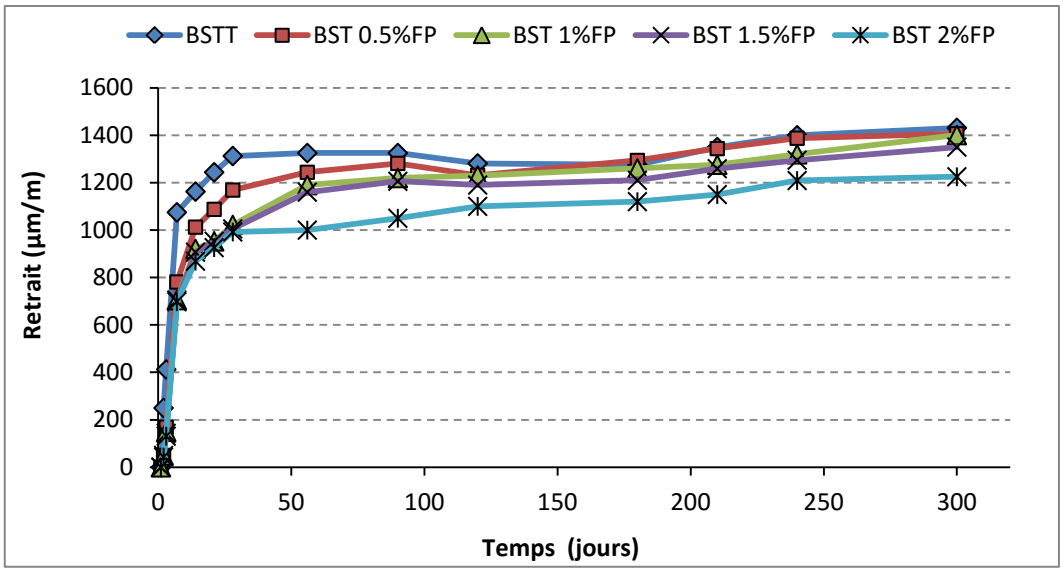


Fig. 5.117. Le retrait des BST à base de fibres plastiques

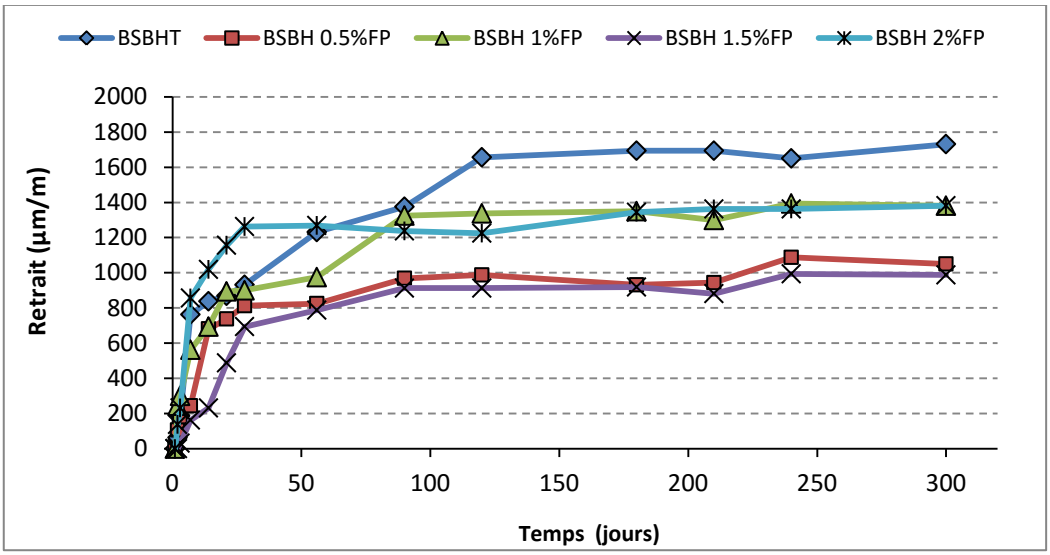


Fig. 5.118. Le retrait des BSBH à base de fibres plastiques

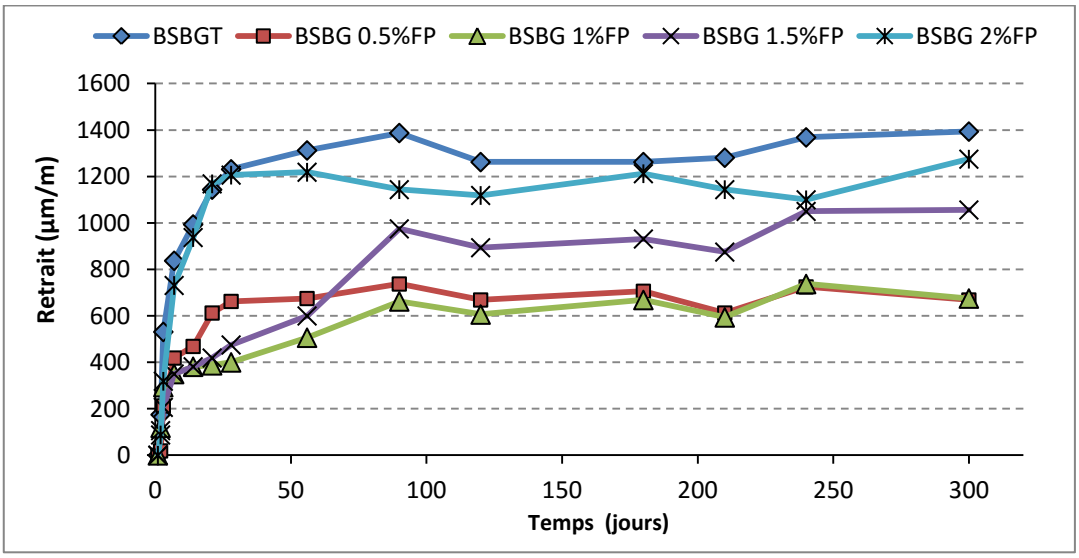


Fig. 5.119. Le retrait des BSBG à base de fibres plastiques

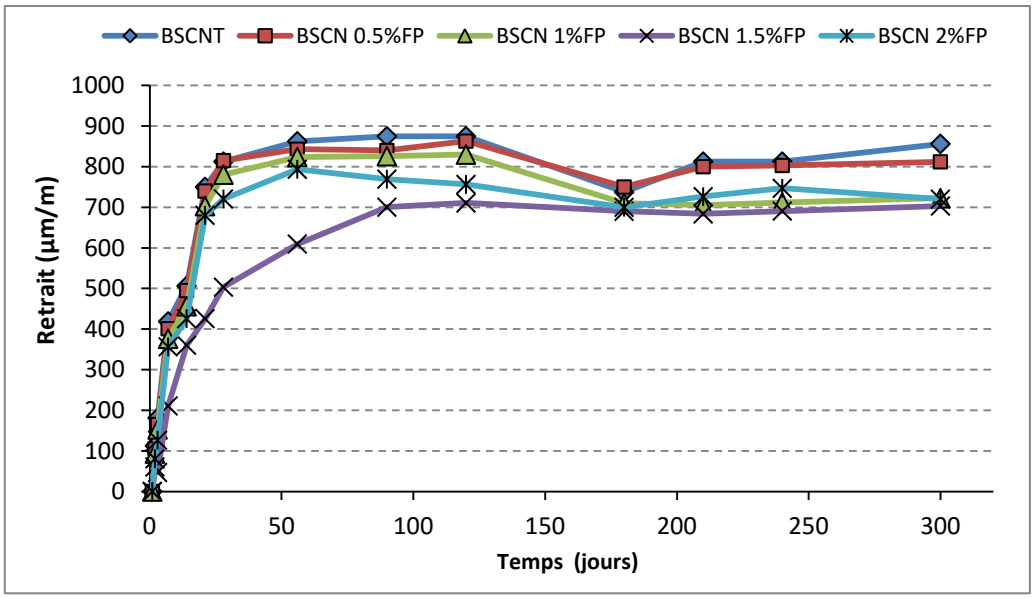


Fig. 5.120. Le retrait des BSCN à base de fibres plastiques

On constate d'après ces figures que l'ajout de fibres plastiques diminue le retrait de tous les types de béton de sable. Cette diminution est de l'ordre de 32% pour les BST, 40% pour les BSBH, 67 % pour les BSBG et 55 % pour les BSCN à 28 jours par rapport au témoin respectif. Les BST et BSBH présentent un retrait plus important que les autres types du béton (entre 1200 µm/m et 1400 µm/m pour BST et 1000 µm/m et 1800 µm/mm pour BSBH). Cette diminution peut s'expliquée par la présence de fibres qui aident à la diminution de la fissuration causée par le retrait plastique. Ceci confirme les résultats trouvés par d'autres chercheurs dans ce domaine [124, 125] qu'ils ont constaté que le retrait total des bétons est diminué en fonction d'ajout des fibres plastiques. Kim JJ. Et al. [92] ont constaté d'après leurs étude que tous les types de fibres en PET diminuent le retrait des matériaux cimentaire et ceci quelque soit leur forme. LANDAU et al. [93] ont étudié l'influence d'ajout de fibres synthétiques (polypropylène) sur le retrait du béton ordinaire. Ils ont constaté que les fibres de polypropylène contribuent à limiter le retrait du béton quand il passe de l'état plastique à une masse hydratée. Pešic´ et al. [76] ont étudié l'influence d'ajout de 0.40, 0.75 et 1.25% de fibres plastiques recyclés (type PEHD) sur le retrait du béton vibré. Ils ont constaté que le retrait du béton est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage d'ajout de fibres plastiques et cela pour tous les âges.

Ces résultats confirment aussi ceux déjà obtenus lors d'études antérieures [126] en utilisant les fibres commercialisées sous différentes appellations ; à savoir que les déformations du retrait sont généralement plus petites pour les mortiers renforcés de fibres à celles du mortier sans fibres. Cette réduction est effectuée par plusieurs paramètres comme la durée de séchage, la forme et la quantité de fibres.

Vu les résultats obtenus, l'utilisation de ces types de béton est conseillée pour la réparation des ouvrages dégradés, pour les dallages, etc.

a) Gonflement

De la même façon, les résultats du gonflement des différents bétons sont illustrés dans les figures 5.121-5.124 suivantes :

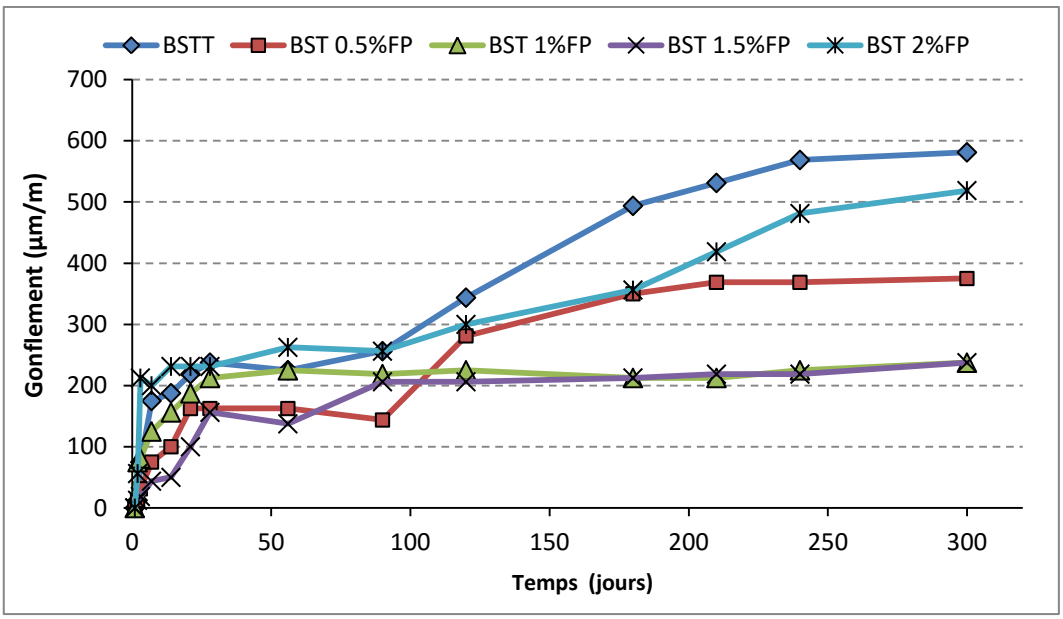


Fig. 5.121. Le gonflement des BST à base de fibres plastiques

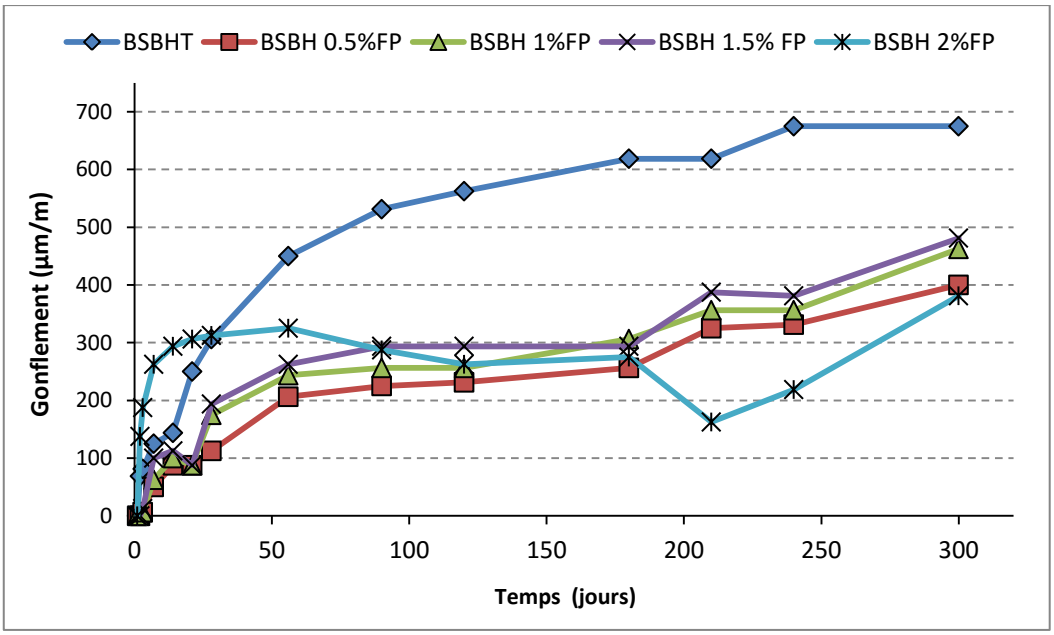


Fig. 5.122. Le gonflement des BSBH à base de fibres plastiques

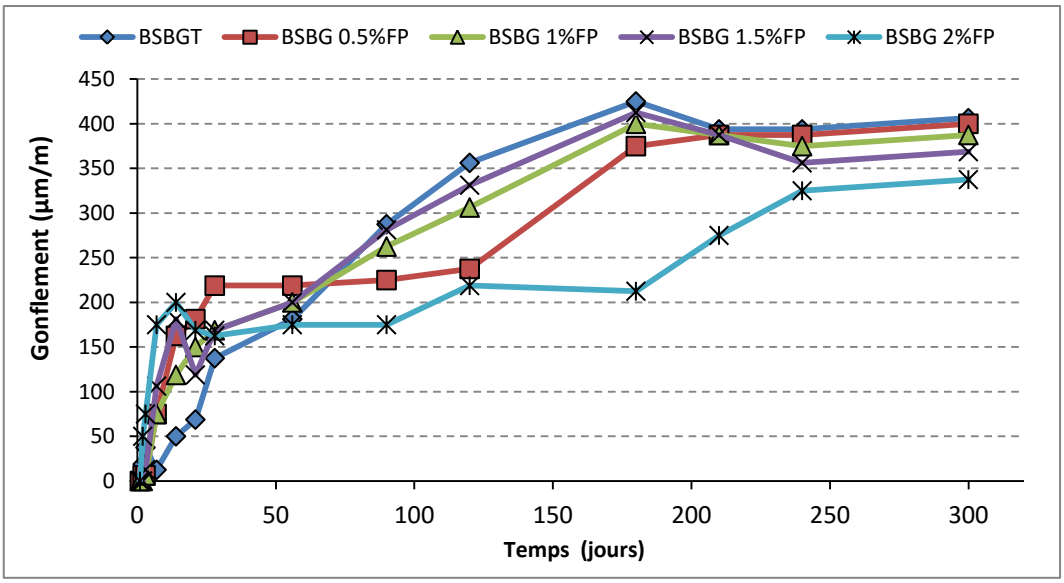


Fig. 5.123. Le gonflement des BSBG à base de fibres plastiques

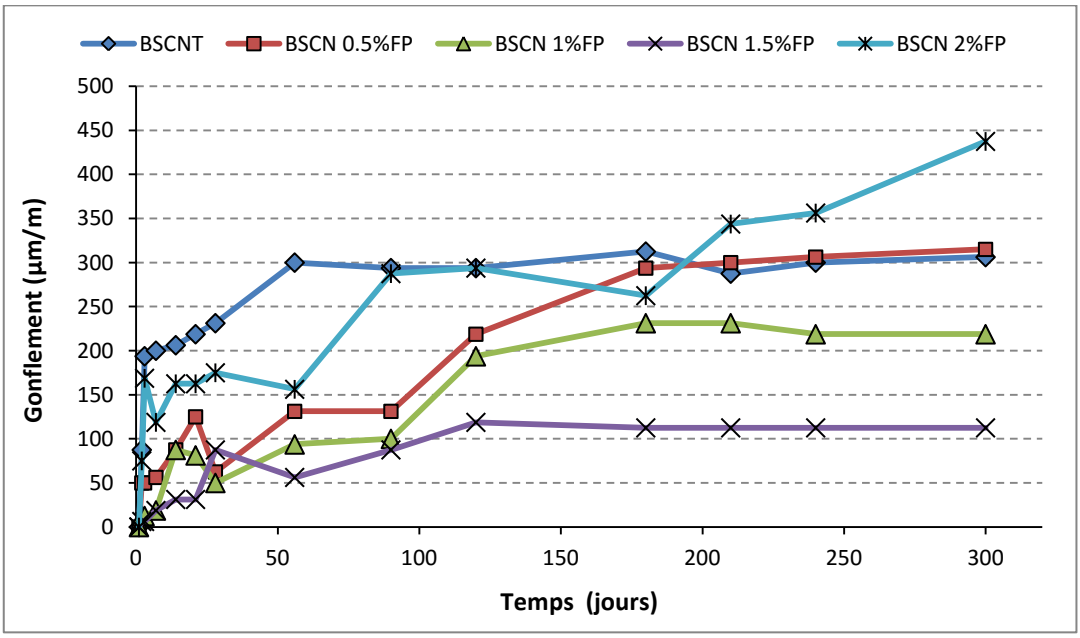


Fig. 5.124. Le gonflement des BSCN à base de fibres plastiques

D'après les figures précédentes, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable à base de déchets de fibres plastiques ayant un taux de gonflement moins important que celui du béton de sable de référence. On remarque aussi que toutes les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage des fibres plastiques, et selon le type du sable utilisé. Les BST et BSBH présentent un taux de gonflement plus important par rapport aux autres types de béton de sable. Un cas particulier pour le BSCN 2%FP qui présente un taux de gonflement plus important que ce du BSCNT, et cela à partir de 210 jours.

5.9.4 Variations de masse

a) Perte de masse

Les résultats de la perte de masse des déférents bétons sont illustrés dans les figures suivantes :

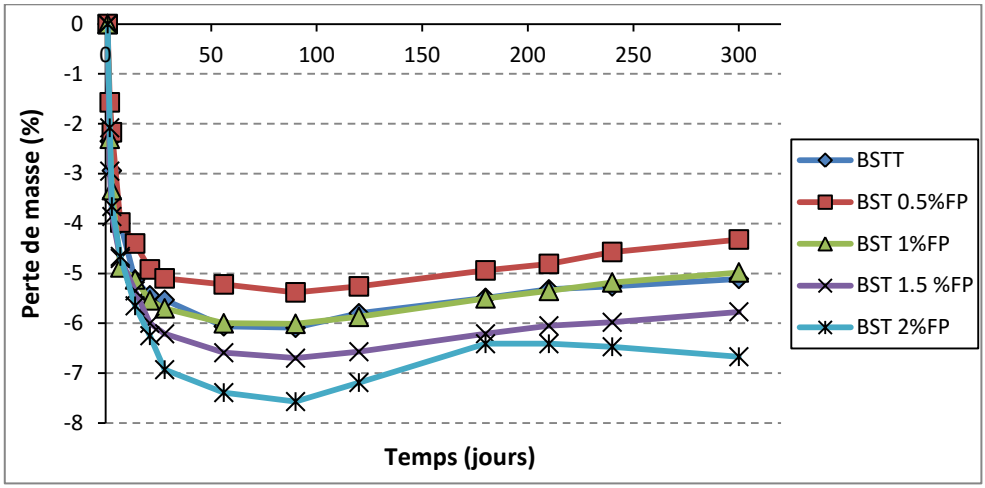


Fig. 5.125. Perte de masse des BST à base de fibres plastiques

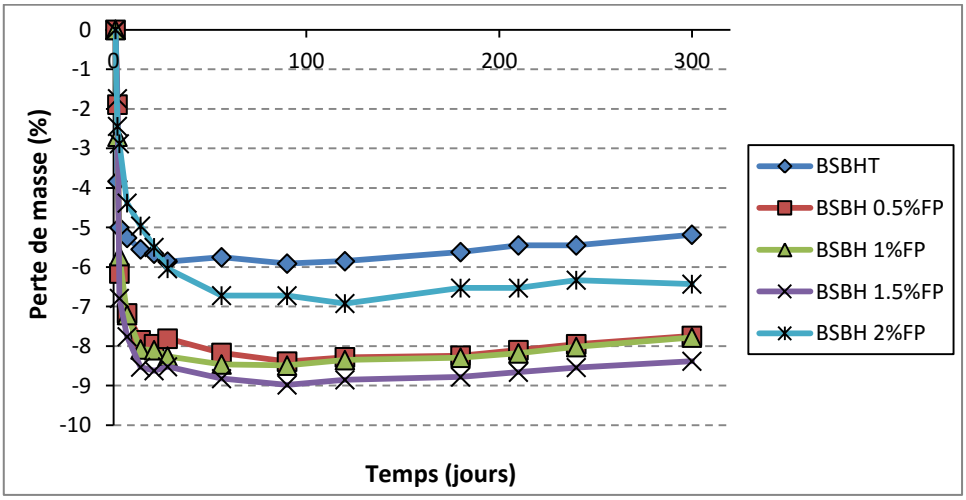


Fig. 5.126. Perte de masse des BSBH à base de fibres plastiques

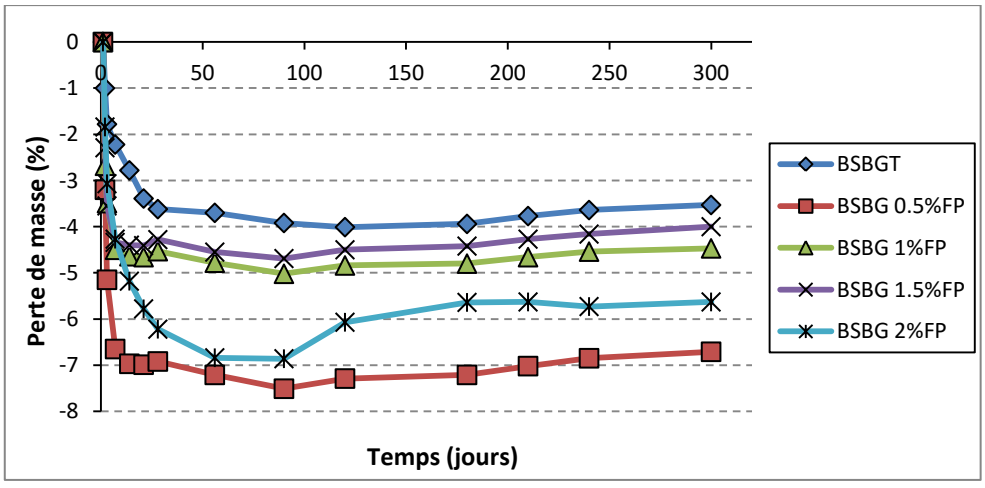


Fig. 5.127. Perte de masse des BSBG à base de fibres plastiques

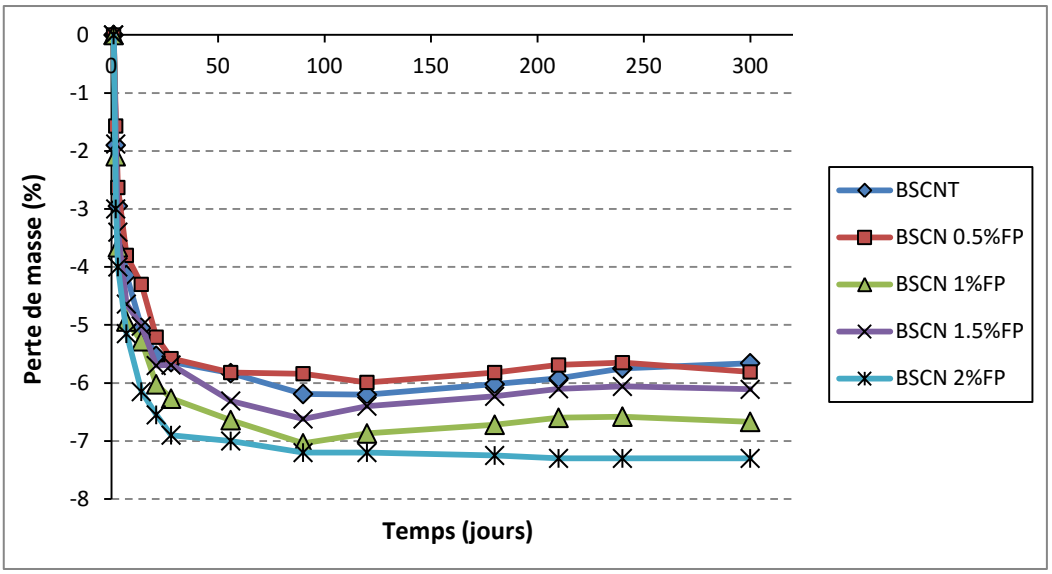


Fig. 5.128. Perte de masse des BSCN à base de fibres plastiques

D'après les figures précédentes on remarque que la perte de masse de tous les types du béton de sable à base de fibres plastiques est nettement plus importante que celle du béton de sable de référence. Un cas particulier a été enregistré pour les BST et BSCN à base de 0.5% de fibres plastiques qui présentent une perte de masse inférieure à celle du béton de sable témoin. Ce changement de volume du béton de sable due au séchage et sans doute dû à la perte de l'humidité (l'évaporation de l'eau) qui dépend de l'environnement.

Ces résultats confirment les résultats de Mangat et al. [126] qui ont étudié l'influence d'addition de fibres commercialisés sur la perte de masse du mortier de ciment. Ils ont trouvé que la perte en poids est plus importante pour les mortiers de fibres que pour le mortier sans fibres (témoin). Ils ont conclus que la présence des fibres dispersées augmente la grosseur des pores dans les matériaux ainsi que le volume, en diminuant ainsi l'intensité des étreintes capillaires, tout en facilitant l'évaporation de l'eau.

b) Gain de masse

Les résultats du gain de masse des déférents bétons sont illustrés dans les figures 5.129-5.132 ci-dessous.

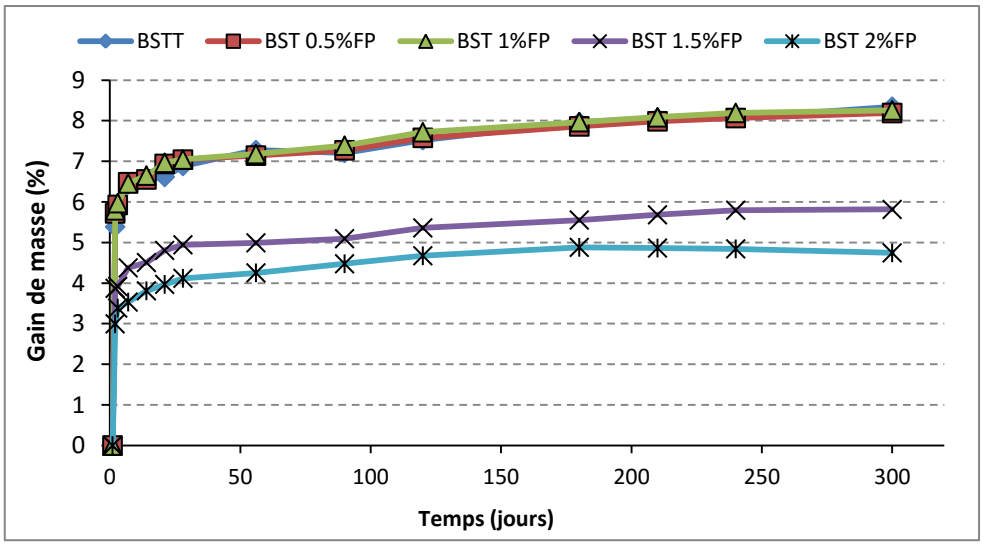


Fig. 5.129. Gain de masse des BST à base de fibres plastiques

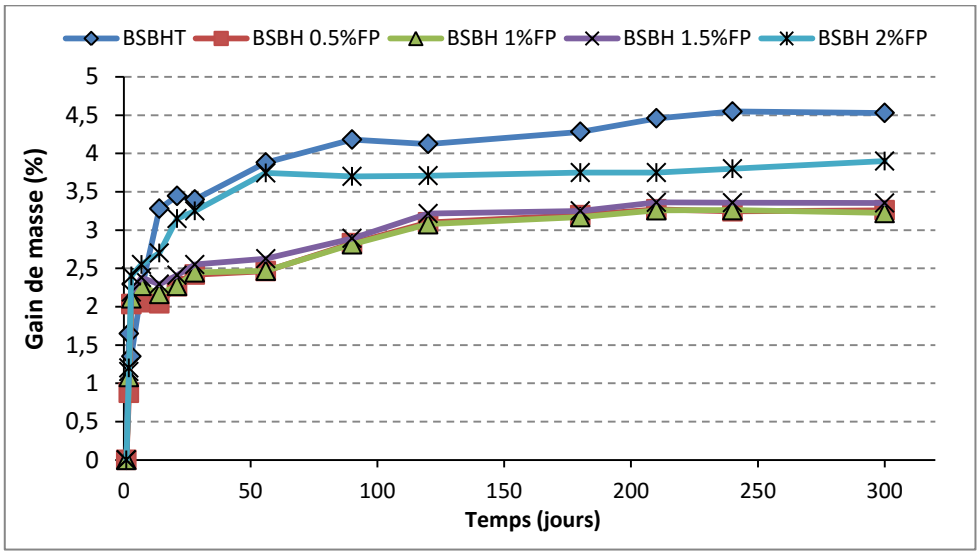


Fig. 5.130. Gain de masse des BSBH à base de fibres plastiques

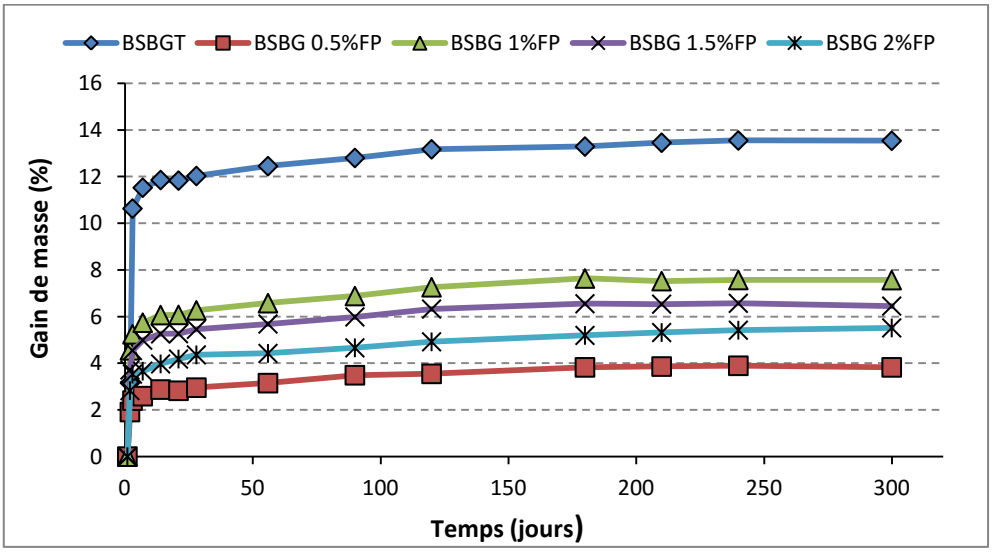


Fig. 5.131. Gain de masse des BSBG à base de fibres plastiques

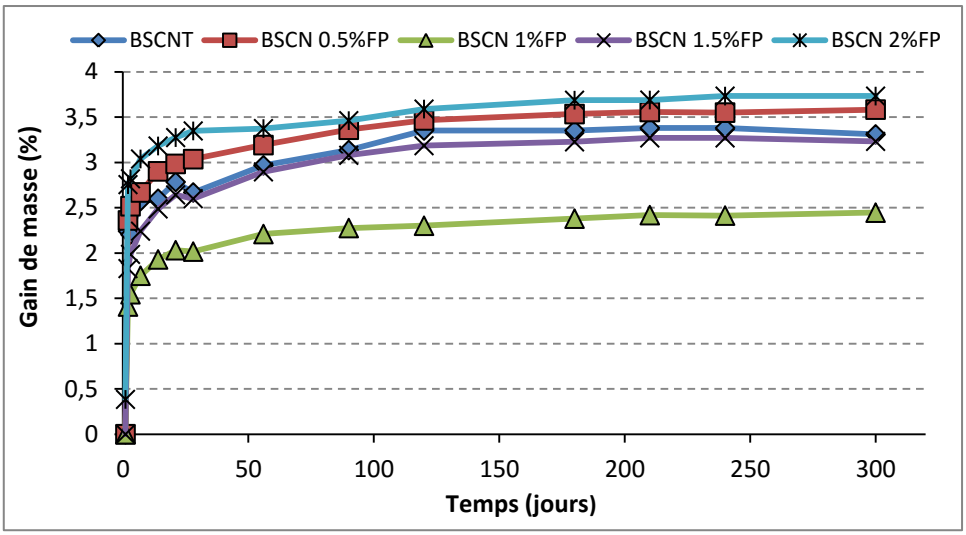


Fig. 5.132. Gain de masse des BSCN à base de fibres plastiques

D'après les figures ci-dessus, on remarque que le gain de masse des bétons à base de fibres plastiques est moins important que celui des bétons de sable de référence. Des exceptions ont été enregistrées pour les BSCN à base de 0.5 et 2% de fibres, qui ont présenté un gain de masse plus important que celui du BSCNT ainsi que le BST à base de 0.5 et 1% qui ont les mêmes gains de masse avec le béton de sable témoin. Le gain de masse le plus important est présenté par le BSBG qui atteint les 14 %, par contre le BSCN présente un gain de masse moins important que les autres types de béton et qui ne dépasse pas les 4%.

5.9.5 Résistance au feu

a) La perte de masse

Les résultats obtenus sur la perte de masse des éprouvettes chauffés à 200, 400, 600 et 800°C sont représenté sur les figures 5.133-5.136 suivantes.

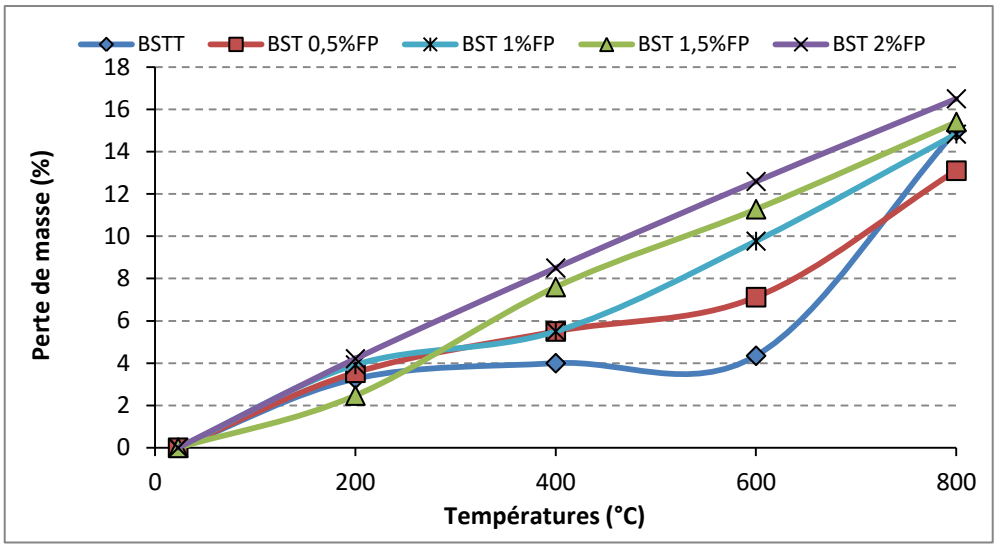


Fig. 5.133. Perte de masse des BST FP en fonction de l'élévation de température

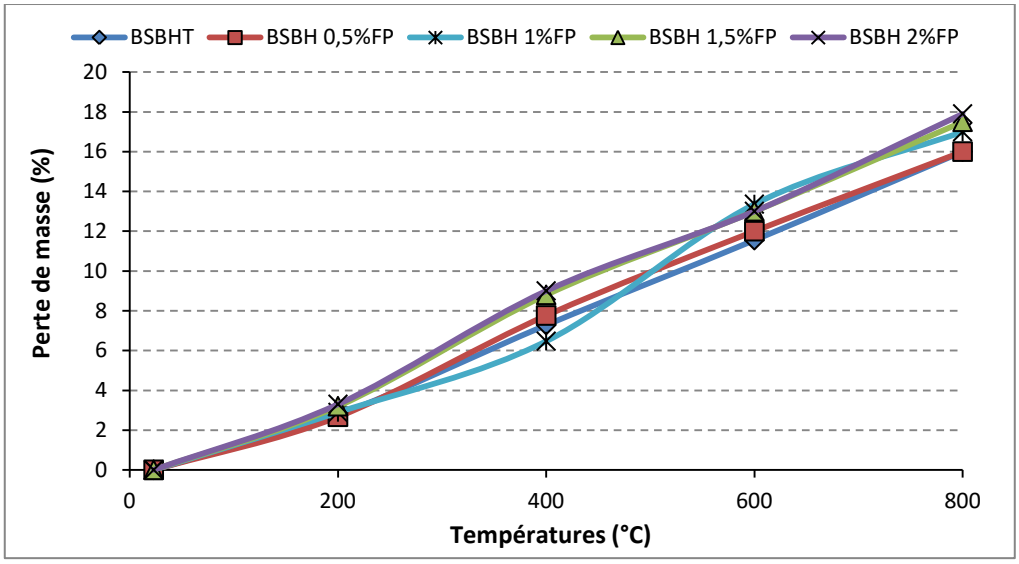


Fig. 5.134. Perte de masse des BSBH FP en fonction de l'élévation de température

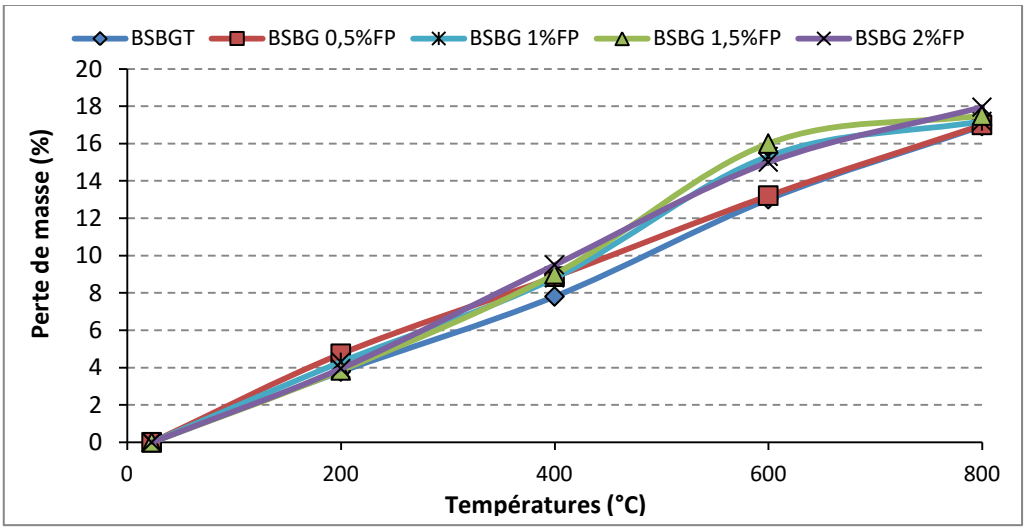


Fig. 5.135. Perte de masse des BSBG FP en fonction de l'élévation de température

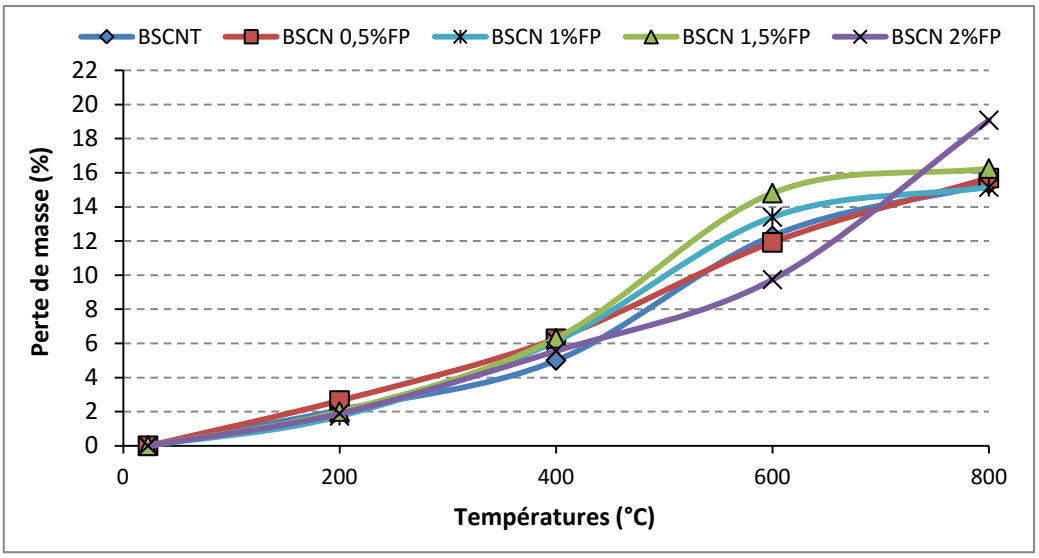


Fig. 5.136. Perte de masse des BSCN FP en fonction de l'élévation de température

Les figures précédentes représentent l'évolution de la perte de masse des différents bétons de sable à base de fibres plastiques en fonction de l'élévation de la température. On constate que quel que soit le type de béton sable, la perte de masse est toujours permanente durant l'échauffement des éprouvettes. On remarque aussi que la perte de masse du béton de sable à base de fibres plastiques est toujours plus importante que celle du béton de sable de référence. Pour tous les types de béton de sable, la perte de masse la plus importante a été présentée par le béton de sable à base de 2 % de fibres. Elle varie entre 16 et 18% sous une température de 800°C. Ces pertes de masse sont dues à la déshydratation progressive du béton, et à la fonte des fibres plastiques. Jusqu'à la température de 200°C, l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite s'évapore et les pores capillaires sont asséchés. La fonte des fibres plastiques a été remarquée sous une température de 300°C. À 600°C il ne reste qu'une toute petite quantité d'eau 0.2 % dans l'éprouvette de béton, cette eau est absorbée par les granulats. Ceci confirme les résultats de Zheng W. et al. [94] qui ont trouvé que la perte de masse des bétons renforcés par des fibres de polypropylène et des fibres métalliques exposés à des hautes températures (jusqu'à 900°C) est toujours permanente et augmente en fonction de l'augmentation de la température.

b) La résistance à la compression

Les résultats obtenus de la résistance à la compression à l'âge de 120 jours des éprouvettes chauffées à 200, 400, 600 et 800°C sont représenté sur les figures 5.137-5.140 ci-dessous.

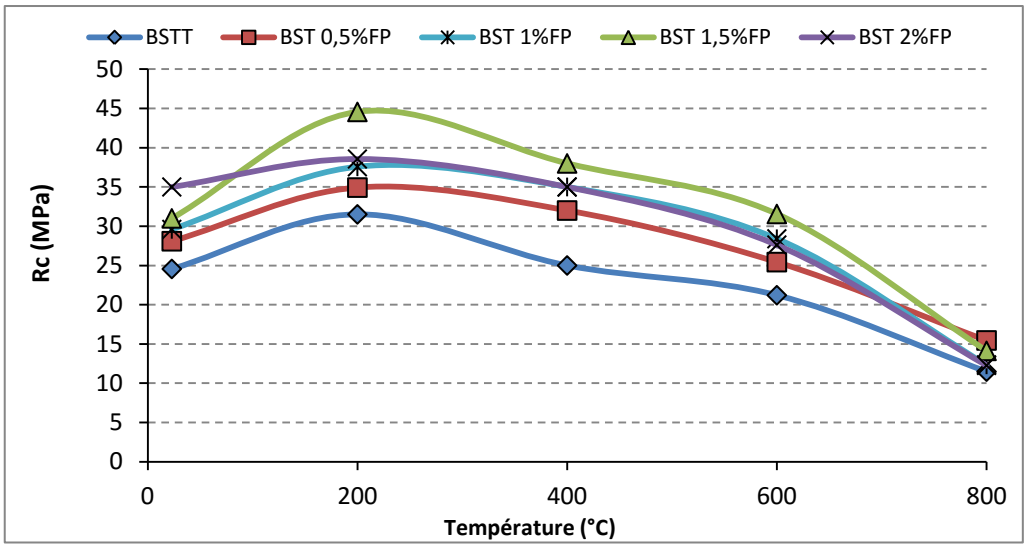


Fig. 5.137. Résistance à la compression des BST FP en fonction de l'élévation de température

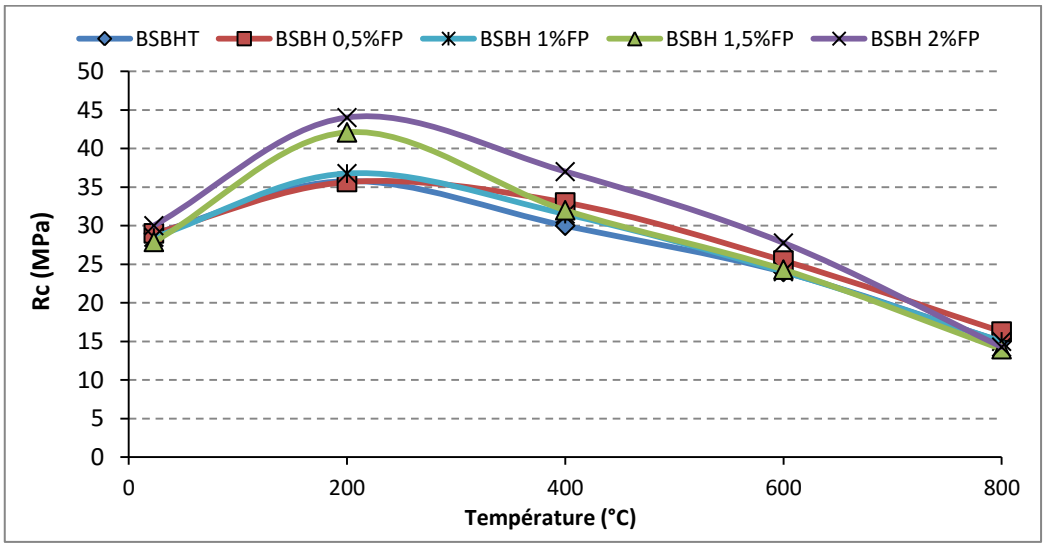


Fig. 5.138. Résistance à la compression des BSBH FP en fonction de l'élévation de température

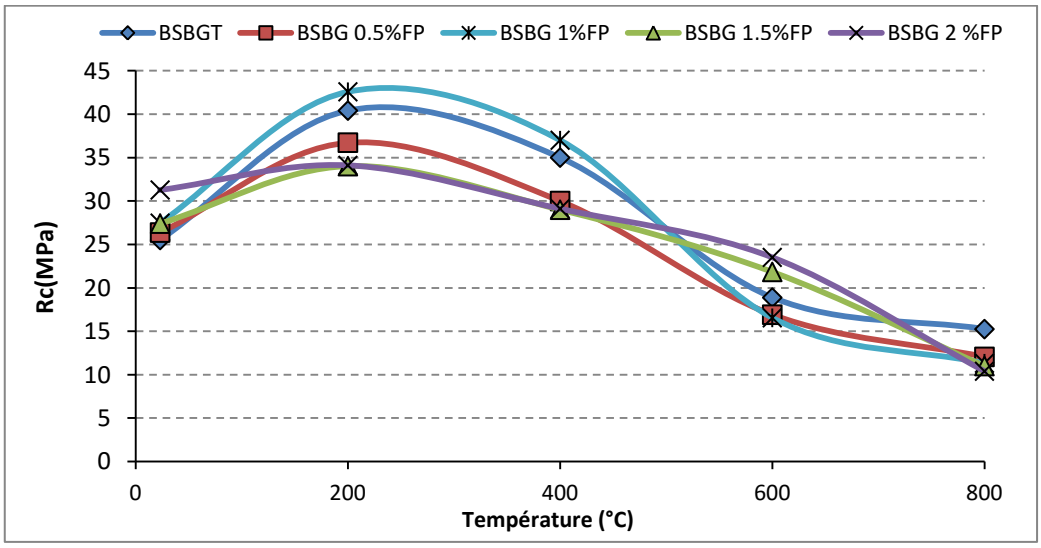


Fig. 5.139. Résistance à la compression des BSBG FP en fonction de l'élévation de température

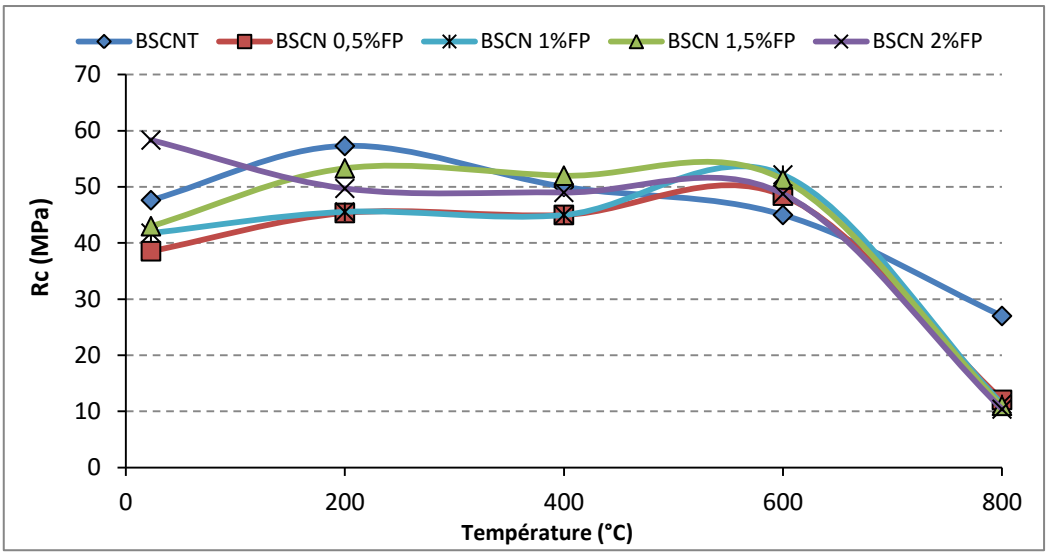
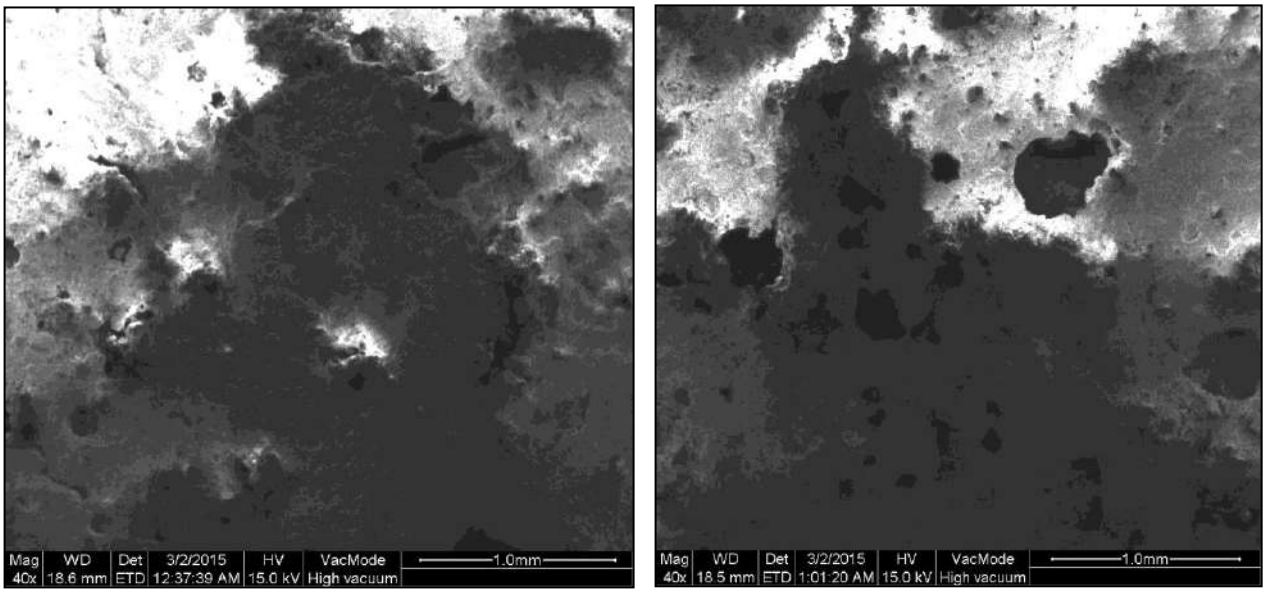


Fig. 5.140. La résistance à la compression des BSCN FP en fonction de l'élévation de température

Les figures précédentes représentent l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons de sable à base de fibres plastiques en fonction de l'élévation de la température. On constate d'après ces résultats qu'il y a toujours un pic de résistance à 200 °C pour tous les types de béton de sable. On enregistre toujours à cette température une augmentation importante de résistance à la compression quelque soit le type de sable et le pourcentage en déchet. Les résultats indiquent aussi que la résistance à la compression des BST et BSBH à base de fibres plastiques chauffées à 200, 400, 600 et 800°C est plus importante que celle du béton de sable témoin (BSTT et BSBHT). Le BSBG à base de 2% de fibres chauffé à 200°C est présente aussi une résistance supérieure à celle de BSBGT. On remarque aussi que au-delà de 200 °C, il y a toujours une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression pour tous les types de bétons de sable sauf pour le cas du BSCN ou elle reste constante et commence à diminué après 600°C. Nous constatons alors que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans les hydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui jouent un rôle de précontrainte et par ceci à une augmentation de la résistance à la compression aux alentours de 200°C. Au-delà de 200°C, le rapport de la résistance à chaud diminue jusqu'à une faible résistance obtenus à 800°C, et cela est due à l'augmentation de la porosité pour tous les bétons chauffés.

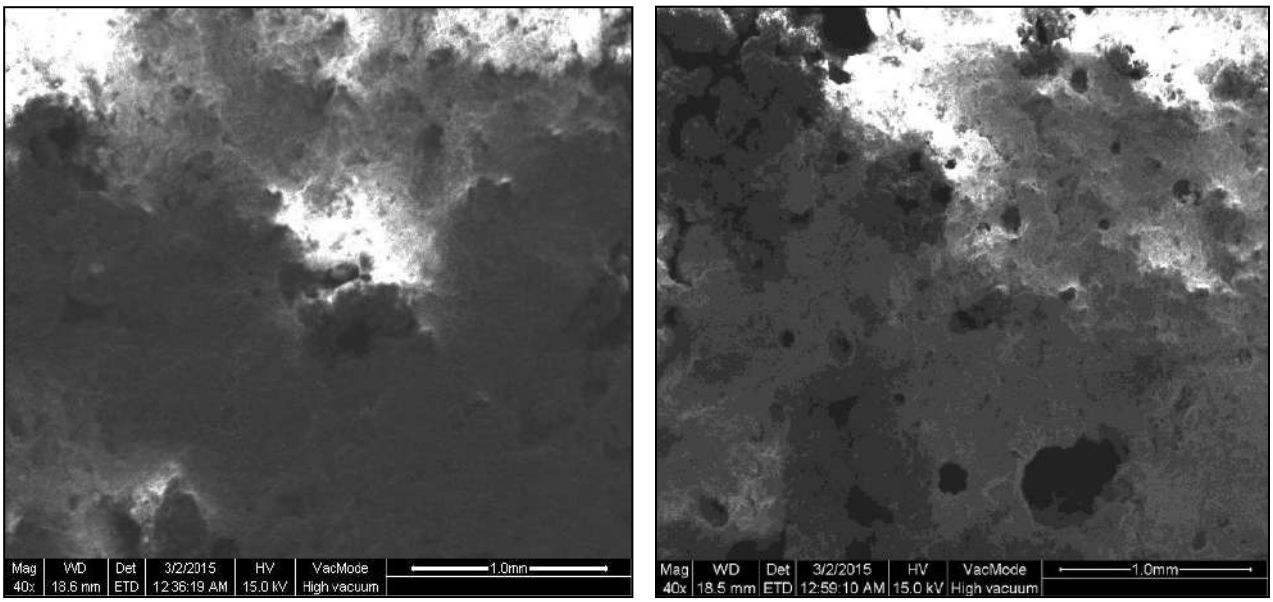
L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de béton de sable à base de 2% de fibres plastiques chauffés à 600°C et leurs témoins respectifs, montre que la porosité des bétons de sable à base de fibres plastiques (2%) est nettement plus importante que celle du béton de sable de référence (Fig.5.141 à 5.143). Cette augmentation de la porosité est liée principalement à la fonte des fibres plastiques qui laisse des macros vides et des

micropores (creux) plus importants à l'intérieur du béton. Ce qui confirme les résultats de Behnood et al. [95] et Zheng et al. [94].



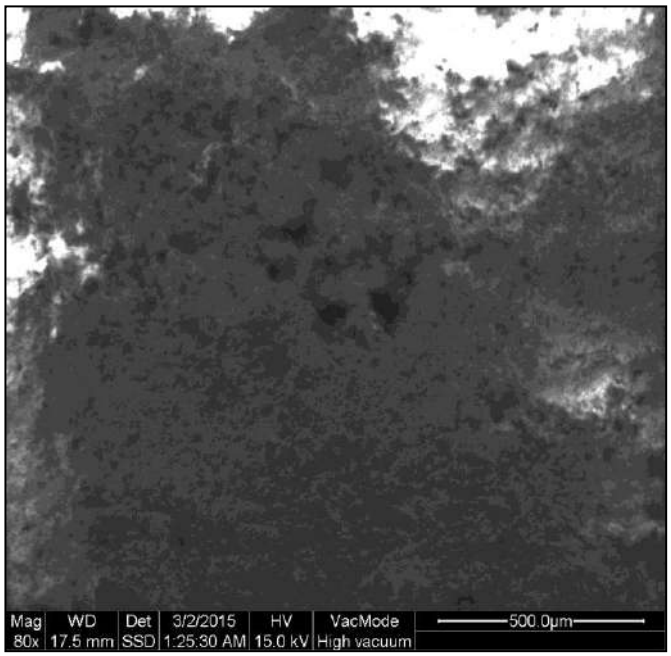
BSTT BST 2% FP

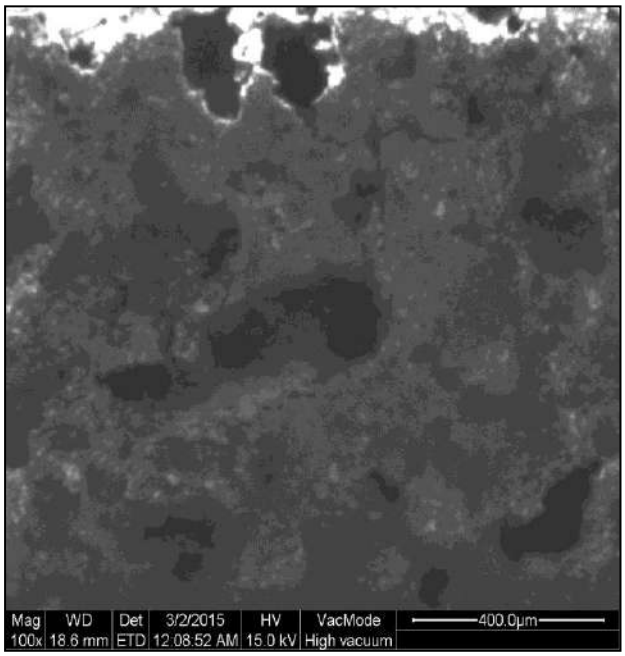
Fig. 5.141. Examen au MEB de BSTT et BST 2%FP chauffés à 600°C



BSBHT BSBH 2% FP

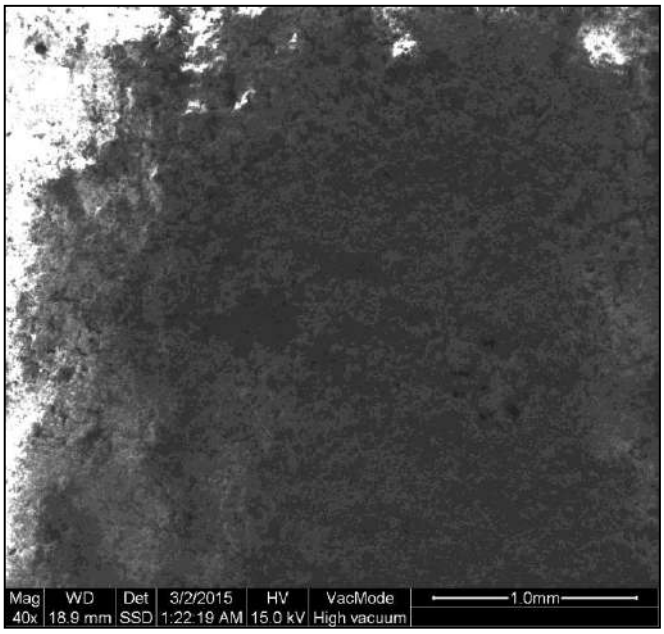
Fig. 5.142. Examen au MEB de BSBHT et BSBH 2%FP chauffés à 600°C

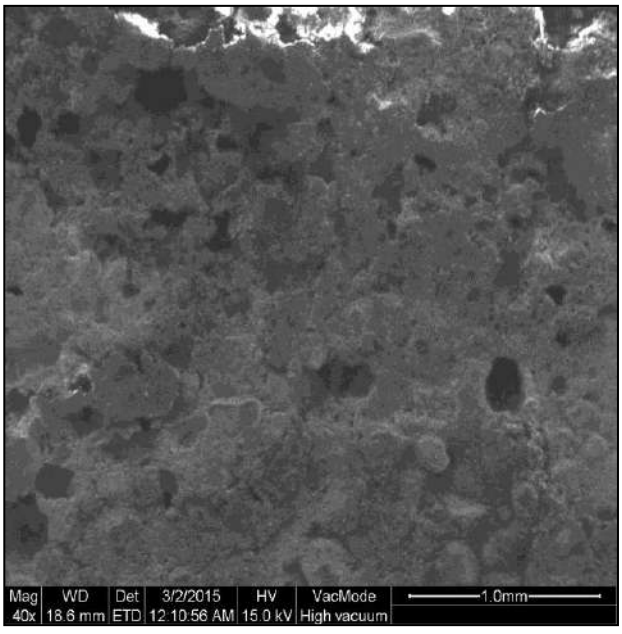




BSBGT BSBG 2% FP

Fig. 5.143. Examen au MEB de BSBGT et BSBG 2%FP chauffés à 600°C





BSCNT BSCN 2% FP

Fig. 5.144. Examen au MEB de BSCNT et BSCN 2%FP chauffés à 600°C

5.10 Conclusion

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes :

- Quelque soit la nature du sable, la maniabilité du béton de sable est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de fibres plastiques ;
- La densité du béton de sable est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage d'ajout de fibres plastiques ;
- L'air occlus du béton de sable est augmenté en fonction d'ajout de fibres plastiques ;
- L'incorporation des fibres plastiques à la matrice cimentaire engendre une légère augmentation ou diminution de la résistance à la compression et du module d'élasticité. Le sable de Tamanrasset avec 1.5 % de fibres plastiques (PET) améliore la résistance à la compression du béton de sable de 26% ;
- Quelque soit le type de sable utilisé, la résistance à la traction du béton de sable est améliorée en fonction du pourcentage d'ajout de fibres plastiques. Le pourcentage optimum de la résistance est en fonction d'ajout de 0.5 à 1.5% de fibres plastiques (le gain maximum de résistance pour les BST avec 1% de fibres, est de 66% à l'âge de 28 jours, 14% pour les BSBH avec un ajout de 1.5 %, 15% pour les BSBG et 9.5% pour les BSCN) ;
- La conductivité thermique du béton de sable est diminuée en fonction d'ajout des fibres plastiques ;
- L'incorporation de fibres plastiques dans le béton de sable induit une augmentation de sa porosité ;
- L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) effectuée sur les quatre types de béton de sable à base de fibres plastiques a montré qu'il y a une bonne adhésivité entre les fibres plastiques à la matrice cimentaire ;
- L'absorption capillaire des bétons de sable est augmentée en fonction d'ajout de fibres plastiques ;
- Quelque soit le type du sable, l'incorporation de fibres plastiques dans la masse du béton de sable engendre une diminution du retrait ;
- les bétons de sable à base de fibres plastiques ont des faible taux du gonflement que celui du BS de référence ;
- La perte en masse du béton de sable est augmentée en fonction d'incorporation de fibres plastiques ;

- Le gain de masse sous l'eau du béton de sable à base de fibres plastiques est nettement moins important que celui du béton de sable témoin ;
- La masse de tous les bétons de sable à base de fibres plastiques, est diminuée avec l'augmentation de la température. Cette perte de masse augmente graduellement jusqu'à 800°C ;
- Tous les bétons de sable à base de fibres plastiques réalisés présentent un pic de résistance à 200°C. On enregistre toujours à cette température une augmentation importante de la résistance à la compression.

Finalement, si on compare les résultats qu'on a trouvés dans cette partie d'étude et les résultats des déférents chercheurs (citées dans la bibliographie) on peut dire qu'il y a une nette concordance entre les deux résultats. Le tableau 5.2 ci-dessous résume les propriétés mécaniques et la durabilité du béton de sable à base de fibres plastiques.

Tableau. 5.2. Résumé des propriétés mécaniques et durabilité du BSFP

			Propriétés								
Déchets	Sable	%.Optim	Rc	Rt	E	CT	Por	Abs	Ret	Gonf	Rc feu
Fibres plastiques	Tamanrasset	1.5 %	26%	49%	7%	16%	17%	33%	2%	67%	50%
	Bahbah	1%	11%	2%	30%	3%	7%	37%	23%	30%	23%
	Boughzoul	1%	Cst	16%	4%	2%	2%	60%	57%	12%	13%
	Concassé	1%	3%	2%	4%	4%	45%	24%	18%	67%	5 %

Avec :

Rc : Résistance à la compression

Rt : Résistance à la traction

E : Module d'élasticité

CT : Conductivité thermique

Por : Porosité

Abs : Absorption capillaire

Ret retrait

Gonf : Gonflement

Rc : Résistance au feu

Conslusions générales et Recommandations

Conclusions générales

Les travaux de recherche de la présente thèse ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la valorisation des sables locaux disponible en Algérie tels que le sable de concassage et le sable de dunes. Ce dernier très abondant dans le sud Algérien et constitue un matériau très économique qui ne nécessite pas une grande énergie dans son exploitation. Le deuxième objectif est d'étudier l'influence des déchets plastiques recyclés (sous forme de poudre et de fibres) sur le comportement rhéologique, mécanique et sur la durabilité du béton de sable.

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Quelque soit la nature du sable utilisé, la maniabilité du béton de sable augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage en poudre plastique, et contrairement diminue en fonction d'augmentation de fibres plastiques.
- Les déchets plastiques sous forme de poudre ou fibres plastiques diminuent la densité du béton de sable et augmente son air occlus.
- Avec la poudre ou les fibres plastiques, le sable Tamanrasset contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques et la résistance au feu du béton de sable.
- Quelque soit le type du sable, la résistance à la traction du béton de sable augmente en fonction du pourcentage d'ajout en fibres plastiques. Le pourcentage optimal de la résistance est atteint avec 1.5%de fibres plastiques.
- Quelque soit le sable (Tamanrasset, Bahbah, Boughezoul, Concassé) et les déchets plastiques utilisés (poudre ou fibres) la conductivité thermique du béton de sable diminue et par conséquent son pouvoir isolant augmente.
- D'une façon analogue, les sables de Bahbah, Boughezoul et Concassé améliore la résistance à la traction et le module d'élasticité du béton de sable avec les fibres plastiques. Ceci n'est pas vrai lorsqu'on utilise la poudre plastique.
- La porosité et l'absorption d'eau du béton de sable augmentent quelque soit le type du sable et le types de déchets utilisés sauf pour le cas du béton de sable à base de Tamanrasset et la poudre plastique dans la porosité décroit d'environ le 20%.

- Les variations dimensionnelles (retrait+gonflement) du béton de sable diminuent avec l'ajout des fibres plastiques. Par contre avec la poudre plastique, le retrait du béton de sable augmente et le gonflement diminue, et ceci est valable quelque soit le sable utilisé.
- La résistance au feu du béton de sable dépend du type de déchets et du sable utilisé et elle est meilleur dans le cas du béton de sable de Tamanrasset et ceci pour les deux types de déchets (poudre +fibres).

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets plastiques avec les matériaux locaux (sables de dunes) constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays. Quelque soit la poudre ou les fibres plastiques utilisés, le béton de sable à base du sable de Tamanrasset constitue un éco-matériau intéressant qui s'ajout à la liste des matériaux disponible au pays.

Recommandations

Cette recherche a été limitée à l'étude de l'influence de déchets plastiques sur le comportement du béton de sable à base de quatre différents types du sable. D'autres aspects restent à élucider et enrichir dans des futurs travaux de recherche, nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la rhéologie du béton de sable à base de déchets plastiques en utilisant un rhéomètre à mortier et à béton afin de déterminer ses caractéristiques rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité).

- Etude d'autres indicateurs de durabilité du béton de sable à base de déchets plastiques tels que les propriétés de transfert d'eau et du gaz, la carbonatation et la pénétration des ions chlore.

- Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BS à base de déchets plastiques.

- Etude du pompage de BS à base de déchets plastique.

-Influence d'autres types de déchets plastiques (PCV, PC) sur le comportement de BS.

-Influence d'autres type de fibres (métallique, végétale, de verre, de carbone,….) sur le béton de sable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

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

[2] PIMIENTA., P & REMOND., "*Bétons de déchets* : prévenir les risques", CSTB magazine, n° 109, novembre 1997, pp. 28-30

[3] SPERANDIO K., *identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales*, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001

[4] Courard L.,"*Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil* ", Notes de cours, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998, 195 p

[5] Kehila Y., *Rapport pays (Algérie) sur la gestion des déchets solides urbains*, édité pour le compte du réseau Sweep-Net, Réseau d'échange et d'expertise entre les pays du Maghreb et du Machreq, 2014, 10 pays. 34 pages

[6] institut national de la statique et des études économiques, www.insee.fr. (Site Internet google.fr) 2008.

[7] Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets, 2011. http ://www.rilem.net/ms.php

[8] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton.Ciment et composé concret, 32, 2010,421-426

[9] Quebaud M., "*Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats"*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996

[10] Plastiques moderne et élastomères, Mémento, paris, 1979-1980

[11] " plastiques, matières." Microsoft® Études 2008 [DVD]. Microsoft Corporation, 2007. Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation. Tous droits réservés

[12] La chimie des polymères, Université Numérique des Sciences Odontologiques Francophones, campus.cerimes.fr (site Internet google.fr).2010-2011.

[13] Dossier Enseignant., « Voyage en industrie », CAP SCIENCES 2006.

[14] Plastics Europe : http://www.plasticseurope.fr/industrie-du-plastique/plasticseurope.aspx

[15] Plastiques A9, techniques de l'ingénieur, paris, 1985.

[16] boucheaoreille77.canalblog.com

[17] Salima KHELOUFI., " *étude de possibilités de recyclage de Déchets plastiques de la wilaya de Bejaia* ", Thèse de magistère, Université A.MIRA –BEJAIA, Algérie, 2012.

[18] Mon environnement : www.mon-environnement.com

[19] Sukontasukkul 06: Sukontasukkul P and Chaikaew C., Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber. Construction and Building Materials, 20,2006, pp. 450–457

[20] S. Palard, E. Fabiew, Espace environnement, Gestion des déchets, Rapport d'activité, Aliapur, France, 2002 .

[21] M. Cuong ., " *Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés "* , Thèse de doctorat, Toulouse, 2010

[22] Aliapur 07: Rapport d'activité 2007.

[23] Gerhard Pretting/Werner Boote., Plastic Planet, Ornage Press, Fribourg 2010, pp. 8.

[24] In depth report Plastic Waste: Ecological and Human Health Impacts, Science for Environment Policy, November 2011, pp.1.

[25] Production mondiale du plastique : http://www.planetoscope.com/petrole/989-production-mondiale-de-plastique.html.

[26] M. Reyne., « Les plastiques : polymères, transformations et applications » Hermes, Paris ,1991.

[27] M. Maes, « Déchets industriels : mode d'emploi », Techniques et documentation, Lavoisier, paris, 1986

[28] S.M. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens, « Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review», Waste Management, 29, 2009,pp.2625–2643.

[29] B. Guillermina ,L.C. Roger ,Olgun G, A. Le Moele, Weiwei L, Ajit S, Jingtian Y., Traian Z,. « Polymer recycling: potential application of radiation technology », Rad. Phys. Chem, 64, 2002, pp.41-51.

[30] M. Carrega, « Matériaux polymères », 2eme édition Dunod, Paris, 2007

[31] Dossier sur l'environnement *'mens sana in terra sana*', 1er trimestre 2001

[32] N. Dotreppe, Grisard « Déchets solides industriels et urbains », édition Cebuoc, liege ,1986.

[33] Environment and Plastics Industry Council: http://www.plastics.ca/epic/

[34] http://maghrebemergent.info/politiques-publiques/algerie/l-algerie-veut-recycler-40-de-ses-dechets-en-2016.html

[35] MATE, Atelier international sur le nouveau mode de gestion des déchets municipaux : Le centre d'enfouissement technique (CET), janvier 2004.

[36] CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, " Bétons de Sable ", Rapport de recherches. Tipaza, Algérie, Décembre 1992.

[37] Desert-Map, 2012 Carte des déserts du monde, téléchargeable du site Internet: http://fr.mapsofworld.com/world-desert-map.htm#

[38] AFNOR, ″Bétons- Bétons de sable″, Projet P 18-500,1995.

[39] SABLOCRETE, « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1994, France

[40] BEDERINA.M, « *Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable* », mémoire de magistère, université de Laghouat 1998.

[41] Z.Boudaoud., « *Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda* » mémoire de Magistère, université Med Boudiaf M'sila 2007.

[42]Sandrine Catinard, « *Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines* ».Thèse Ph.D, Université LAVAL (Québec) CANADA, 2000.

[43]Yanéric Roussel, « *Béton autoplaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton* » Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université Sherbrooke, Québec, CANADA ,2000.

[44] Mélanie SHINK, « *Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres d'aciers* », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA ,2000

[45] Bédérina M., Khenfer M. M., Dheilly R. M. and Quéneudec M. "Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes", Cement and Concrete Research, 35, 2005, 1172-1179

[46] CHAOUCHE A.A., BALI A,. "Étude caractéristique des bétons de sable de dune", Thèse de magister, ENP Alger, 1993.

[47] BENAISSA A., MORLIER, P. ., VIGUIER, C. ., CAUVIN J.J., "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable" , Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504, juin 1992.

[48] BENAISSA A., "Déformations différées d'un béton de sable" - Thèse de doctorat soutenue en novembre 1992, Université de bordeaux, Laboratoire régional des ponts et chaussées.

[49] M .BEDERINA,. « *Caractérisation Mécanique et Microstructure des bétons de sables locaux : Effet des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau* » ; Thèse de Magister, CU de LAGHOUAT 2000.

[50] Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussés. "Les pieux forés : recueil des règles de l'art", Décembre 1979.

[51] Ambroise J., Prea J. et Sari M., "L'adjuvantation des bétons de sable", Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Septembre 1993.

[52] CHAUVIN J.J., GRIMALDI G., « *Les bétons de sable* », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°157, Sept. 1988.

[53] DREUX G et FESTA J., « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, Paris 1998.

[54] V. T. Breslin., U. Senturk., C. C. Berndt., Long-term engineering properties of recycled plastic lumber in pier construction. Resources, Conservation and Recycling, 23, 1998,243-258

[55] K.Flaga., Advanced in materials applied in civil engineering. Journal of Materials Processing Technology, 106,200,173-183

[55] K. S. Rebeiz., Time-Temperature properties of polymer concrete using recycled PET. Cement and Concrete Composites 17, 1995, 119-124

[56] S. Hinislioglu, E. Agar, Use of high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials Letters, 28, 2004, 267-271

[57] F. Debieb , S. Kenai. The use of fine and coarse crushed bricks as aggregates in concrete. Constr Build Mater, 22(5), 2008, 886–93

[58] F. Debieb., L. Courard ., S. Kenai , R. Degeimbre., Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cem Con Comp, 32 (8), 2010, 421-426

[59] Alexandra M. da Silva., Jorge de Brito., Rosário Veiga., Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars, Construction and Building Materials, 71, 2014,226–236

[60] Ismail ZZ., Al-Hashmi EA., Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. Waste Manage, 28, 2008, 2041–7

[61] F. Iucolano., B. Liguori., D. Caputo., F. Colangelo., R. Cioffi., Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties, Materials and Design, 52, 2013, 916–922

[62] Hannawi K., Kamali-Bernard S., Prince W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. Waste Manage, 30, 2010, 2312–20

[63] José Luis Ruiz-Herrero., Daniel Velasco Nieto., Alberto López-Gil., Angel Arranz., Alfonso Fernández., Antolín Lorenzana., Sonia Merino., José Antonio De Saja., Miguel Ángel Rodríguez-Pérez ., Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste, Construction and Building Materials , 104,2016, 298–310

[64] Siddique, R., Naik , T. R., 2004. " Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview ". Waste Management, 24, 2004, 563–569

[65] E. Rahmani., M. Dehestani., M.H.A. Beygi., H. Allahyari., I.M. Nikbin., On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. Construction and Building Materials, 47, 2013, 1302–1308

[66] José Carlos Alves Galvão., Kleber Franke Portella., Alex Joukoski., Roberto Mendesa., Elizeu Santos Ferreira ., Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces, Construction and Building Materials, 25 ,2011, 1049–1055

[67] Semiha Akcaozog˘lu, Kubilay Akcaozog˘lu. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containingwaste PET lightweight aggregate (WPLA). Construction and Building Materials.66, 2013, 66247–258.

[68] B. Liguori., F. Iucolano., I. Capasso., M. Lavorgna., L. Verdolotti., The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars., Mater. Des,57 ,2014,578–584

[69] Chidiac SE., Mihaljevic SN., Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. Cement Concr Compos, 33(8)2011, 855–63

[70] Akcaozoglu S., Atis CD., Akcaozoglu K., An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete, Waste Manage ,30(2),2010,285–90

[71]Mariaenrica Frigione., "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete", Waste Management, 30, 2010 1101–1106

[72] Albano C., Camacho N., Hernandez M., Matheus A., Gutierrez A., Influence of content and particle size of pet waste bottles on concrete behaviour at different w/c ratios. Waste Manage (Oxford) 2009, 29, 2707–16

[73] Soroushian P., Plasencia J., Revanbakhsh S., Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. ACI Mater J, 100(3), 2003, 203–7

[74] Mazaheripour H., Ghanbarpour S., Mirmoradi SH., Hosseinpour I, The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 25(1), 2011, 351–8

[75] Hasan M, Afroz M, Mahmud H. An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fibre reinforced concrete. Int J Civil Environ Eng IJCEE-IJENS, 11(03), 2011, 18–23

[76] Ninoslav Pešic´, Stana Zˇ ivanovic´, Reyes Garcia, Panos Papastergiou. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibers. Construction and Building Materials, 115, 2016, 362–370

[77] Shi Yin, Rabin Tuladhar, Feng Shi, Mark Combe, Tony Collister, Nagaratnam Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: A review, Construction and Building Materials, 93, 2015, 180–188

[78] Bouziani T, Benmounah A, Makhloufi Z, Bédérina M, Queneudec T'kint M. Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers. J Adhes Sci Technol, 28, 2014, 1823–34

[79] Soroushian, P., Mirza, F., Alhozaimy, A., “Permeability characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete”. ACI Materials Journal, 92 (3), 1995, 291–295

[80] Abdulkader Ismail Al-Hadithi , Nahla Naji Hilal, The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers. Journal of Building Engineering 8, 2016, 20–28

[81] Luiz A. Pereira de Oliveira., João P. Castro-Gomes., Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar, Construction and Building Materials, 25, 2011, 1712–1717

[82] Rebeiz KS., Fowler DW., Paul DR. Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. J Mater Civ Eng ASCE ,5(2),1993,237–48

[83] Bayasi, Z., Zeng, J., " Properties of polypropylene fiber reinforced concrete", ACI Materials Journal, 90 (6), 1993, 605–610

[84] Sung Bae Kim., Na Hyun Yi., Hyun Young Kim., Jang-Ho Jay Kim., Young-Chul Song., Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete, Cement & Concrete Composites, 32, 2010, 232–240

[85] Ochi T, Okubo S, Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. Cement and Concrete Composite, 29, 2007, 448–55

[86] Saeid Kakooe., Hazizan Md Akil., Morteza Jamshidi., Jalal Rouhi ., The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, Construction and Building Materials ,27 , 2012, 73–77

[87] Youcef Ghernouti., Bahia Rabehi., Tayeb Bouziani., Hicham Ghezraoui., Abdelhadi Makhloufi., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), Construction and Building Materials ,82 ,2015, 89–100

[88] R. Kandasamy ·, R. Murugesan, Fibre reinforced concrete using domestic Waste plastics as fibres, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences , vol. 6, no. 3, march 2011.

[89] Al-Tulaian. B.S. , M.J. Al-Shannag, A.R. Al-Hozaimy. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar, Construction and Building Materials, 127, 2016, 102–110

[90] Fernando Fraternali, Vincenzo Ciancia, Rosaria Chechile, Gianvittorio Rizzano, Luciano Feo,Loredana Incarnato , Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete, Composite Structures ,93 ,2011, 2368–2374.

[91] Miloud BEDDAR, *Etude de la faisabilité d'utiliser un béton Renforcé de fibres à base de déchets métalliques*, 10.01.2007, Université de El Hadj Lakhdar de Batna

[92] Kim JJ, Park CG, Lee SiW, Lee SaW, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. Composites Part B: Eng, 39, 2007, 442–50

[93] LANDAU et al. "A practical approach to the use of synthetic fibres in concrete." RILEM Symp, Edited by R.N. Swamy, et al Sheffield 13/17 – 07, 1986, 6p.

[94] Wenzhong Zheng, Haiyan Li, Ying Wang Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature Materials and Design ,41 ,2012,403–409

[95] Ali Behnood , Masoud Ghandehari Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures Fire Safety Journal ,44 ,2009, 1015–1022

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

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

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

[99] NF EN 1097-3, 1998, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire* », AFNOR.

[100] NA 442, Normes Algérienne : "*Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*", 1994, 2000.

[101] NF 15-301, Normes Européenne : "*Ciments courants* ",1994.

[102] NF P 18- 452, Normes AFNOR : « *Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre* », Mai 1988.

[103] NF P 18-353, Normes AFNOR : « *Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton* », 2007.

[104]NF EN 12350-6, 1999, « *Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique* », AFNOR.

[105] NF EN 12390-2, 2001, « *Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes* », AFNOR.

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

[107] Norme Francaise, NF P 18-412 « *Béton : Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs*», Norme enregistrée, Déc. 1981.

[108] ISO 1920-10,2010 « *Essais du béton — Partie 10: Détermination du module d'élasticité statique en compression*», norme international, ISO.

[109] AGEDEN - Energies Renouvelables en Isère « Propriétés et performances thermiques des matériaux », Avril 2008. on http://www.ageden.org

[110] http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_thermique

[111] NF EN 993-15 .*Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)* Octobre 2005.

[112] 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.

[113] 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.

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

[115] ISO 834-1, Essai de résistance au feu -- Éléments de construction -- Partie 1: Exigences générales. 1999

[116] Khatib Z. K. and Bayomy F. M., Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering,1999, 206-213.

[117] Marzouk OY., Dheilly RM., Queneudec M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. Waste Manage, 27(2), 2007,310–8

[118] Mehta, P.K..,Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of Third International Conference, ACI SP-114, Trondheim, Norway, vol. 1, 1989, pp. 1–43

[119] Saikia N., De Brito J., Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review. Construction and Building Materials, 34, 2012, 385–401

[120] Choi YW, Moon DJ, Chung JS, Cho SK. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. Cement and Concrete Research, 35(4), 2005, 776–81

[121] Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li ,Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles, Construction and Building Materials ,44 ,2013, 81–86

[122] Kameche , Z.E. 2008, « *Effets de la température sur le comportement du béton: cas des revêtements des tunnels routiers* » Mémoire de Magister de l'ENSE T d'Oran

[123] O.Arioz., Effects of elevated temperatures on properties of concrete, Fire Safety J.42 ,2007,516–522

[124] J. Mora-Ruacho R., Gettu A., Aguado., Influence of the shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, Cem. Concr. Res,39 (3),2009, 141–146.

[125] J.M. Park, K.G., Kim, J.H., Jang, Z.Wang, B.S. Hwang, K.L., DeVries, Interfacial evaluation and durability of modified Jute fibers/polypropylene (PP) composites using micromechanical test and acoustic emission, Compos. Part B, 39, 2008, 1042–1061

[126] MANGAT, P.S et al ., " A Theory for the Free shrinkage of Steel Fibre reinforced cement matrices." J. mater, Sci, Vol.19, N°3,2012, pp 2183-2194.

Annexe

ANNEXE A
BROYAGE DU LAITIER

A.1. Définition

Le broyage consiste à fragmenter la matière jusqu'à l'obtention d'une poudre, pour favoriser les réactions des éléments chimiques. La charge d'un broyeur est constituée généralement des boulets sphériques en acier forgé dont le diamètre peut varier de 30 à 125mm selon les dimensions du produit à broyer et à la granulométrie recherchée à la sortie.

A.2. Type de bayeur

a) Broyeur à meules ou broyeur à galets

Du point de vue technique, ce broyeur entre dans la catégorie des broyeurs à force extérieurs c'est-à-dire que les éléments broyeurs sont pressés positivement sur le lit de matière. L'élément broyeur est constitué par des gales qui roulent librement dans cette auge rotative ou ils sont pressés sur la matière par l'intermédiaire d'un dispositif approprié. Les galets de broyeur, relativement grands, sont raccordés à un anneau stationnaire, de telle façon qu'il dévie vers le haut ou oscille radialement. La matière à broyer est introduite soit latéralement ou verticalement et tombe dans l'auge de mouture par le centre des anneaux. Ce type de broyeur est limité à l'utilisation du broyage de matière des caractéristiques d'humidité <20%, abrasivité6%.

b) broyeur à boulets

Ces appareils ont pour rôle de transformer les matières grossières en poudres très fines. Les broyeurs à boulets sont nés de l'observation de l'action réciproque des galets au bord de la mer qui brassés par les vagues, réduisent en s'entrechoquant, les grains de sable en grains de plus en plus fins, en même temps que leurs usures leurs donnent une forme plus au moins sphérique.

c) broyeur aérofall

Ce broyeur est constitué d'une vérole de grand diamètre et de faible longueur montée sur deux tourillons creux, le rapport diamètre/longueur (dimension interne) est de l'ordre de 2,5 à 4,2 suivant la taille du broyeur.

Cet appareil est équipé de deux sortes de blindages :

- Des rails de relevage garnissant la périphérie du broyeur
- Des blindages déflecteurs garnissant les cotés verticaux du broyeur

A.3. Type d'installation

Il existe deux types d'installation de broyage :

- Broyage à circuit ouvert
- Broyage à circuit fermé

a) Broyage en circuit ouvert :

Les premières installations étaient faites de deux broyeurs en cascades, le premier broyeur appelé préparateur ayant pour fonction de triturer la matière, et un deuxième broyeur appelé finisseur, ayant pour fonction de rendre la matière préparée la plus fine possible.

- **Avantages :** - procéder de broyage simple
  - chaque broyage pouvant : / avoir le diamètre optimal

/ tourner à la vitesse optimale pour l'action demandé aux corps bruyants

- **Inconvénients :** - installation coûteuse
  - débit faible
  - produit fini incontrôlable

b) Broyage en circuit fermé :

Dans ce type de circuit, l'atelier n'est plus limité à l'installation du broyeur, mais à une installation, plus complexe nécessitant l'adjonction d'autre appareilles ; apareil de classification du produit fini (séparateur), Appareil de manutention du produit (élévateurs, vis, aéroglissiére)

- **Avantages :** - Sélection plus soignée
  - Augmentation sensible du débit
  - Plus de production

- **Inconvénients :** - plus chèr à l'achat

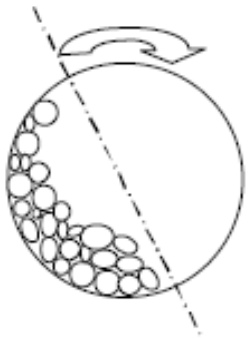
  - réglage difficile

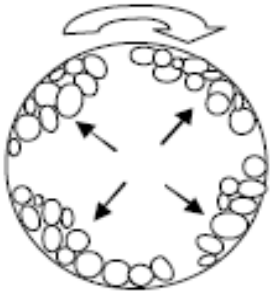
A.4. Théorie de broyage

Broyer c'est réduire un morceau ou particule en plusieurs morceaux, particules plus petites et suivant la loi de RITTINGER (ISO7) qui se vérifie constamment. La puissance nécessaire pour la réduction des éléments est directement proportionnelle à la nouvelle surface obtenue.

D'après la loi de RITTINGER, la puissance employée pour réduire en 64 morceaux de 1cm d'arrête sera double de celle employée pour faire les morceaux de 2 cm d'arrêtes. Donc pour obtenir un laitier ou un ciment à 6000 cm²/gr il faudra théoriquement une puissance double que pour un laitier ou ciment à 3000 cm²/gr.

A.5. Fonctionnement du broyeur





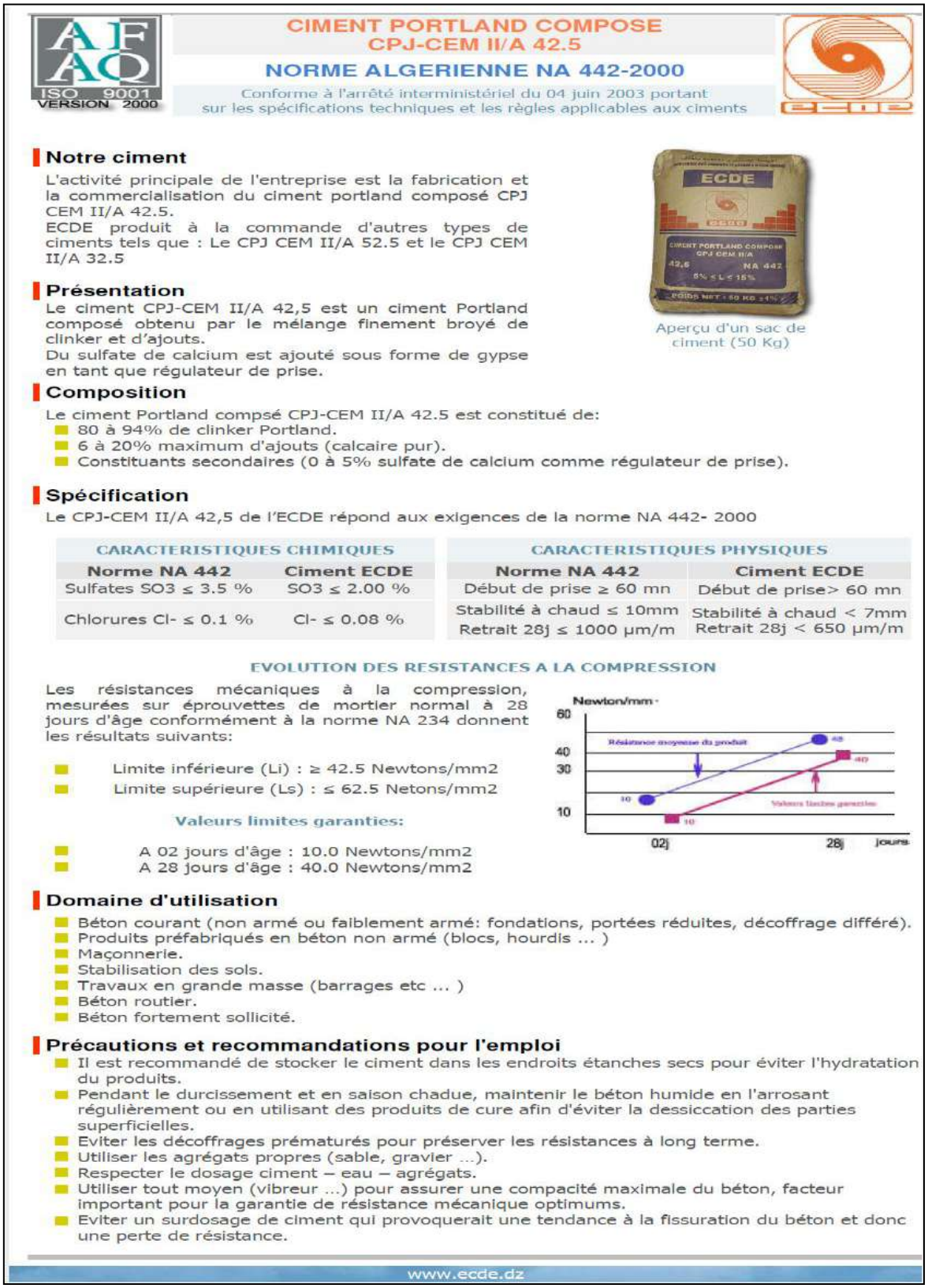
Vitesse normale :	***Vitesse excessive :***
entraînement des boulets par la paroi, puis chute	*centrifugation des boulets contre la paroi*

Fig. A.1. Fonctionnement du Broyeur

- Si la force centrifuge est égale au poids de boulet, il y a centrifugation
- Les engins broyant sont entraînés dans la rotation du broyeur à une vitesse de rotation voisine de 75% de la vitesse critique.

ANNEXE B

Caractérisation des matériaux



CIMENT PORTLAND COMPOSE
CPJ-CEM II/A 42.5

NORME ALGERIENNE NA 442-2000

Conforme à l'arrêté interministériel du 04 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments

Notre ciment

L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland composé CPJ CEM II/A 42.5.
ECDE produit à la commande d'autres types de ciments tels que : Le CPJ CEM II/A 52.5 et le CPJ CEM II/A 32.5

Aperçu d'un sac de ciment (50 Kg)

Présentation

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts.
Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Composition

Le ciment Portland compsé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de:
- 80 à 94% de clinker Portland.
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur).
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

Spécification

Le CPJ-CEM II/A 42,5 de l'ECDE répond aux exigences de la norme NA 442- 2000

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	
Norme NA 442	**Ciment ECDE**
Sulfates SO3 ≤ 3.5 %	SO3 ≤ 2.00 %
Chlorures Cl- ≤ 0.1 %	Cl- ≤ 0.08 %

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	
Norme NA 442	**Ciment ECDE**
Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise> 60 mn
Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Retrait 28j < 650 µm/m

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION

Les résistances mécaniques à la compression, mesurées sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours d'âge conformément à la norme NA 234 donnent les résultats suivants:

- Limite inférieure (Li) : ≥ 42.5 Newtons/mm2
- Limite supérieure (Ls) : ≤ 62.5 Netons/mm2

Valeurs limites garanties:

- A 02 jours d'âge : 10.0 Newtons/mm2
- A 28 jours d'âge : 40.0 Newtons/mm2

Domaine d'utilisation

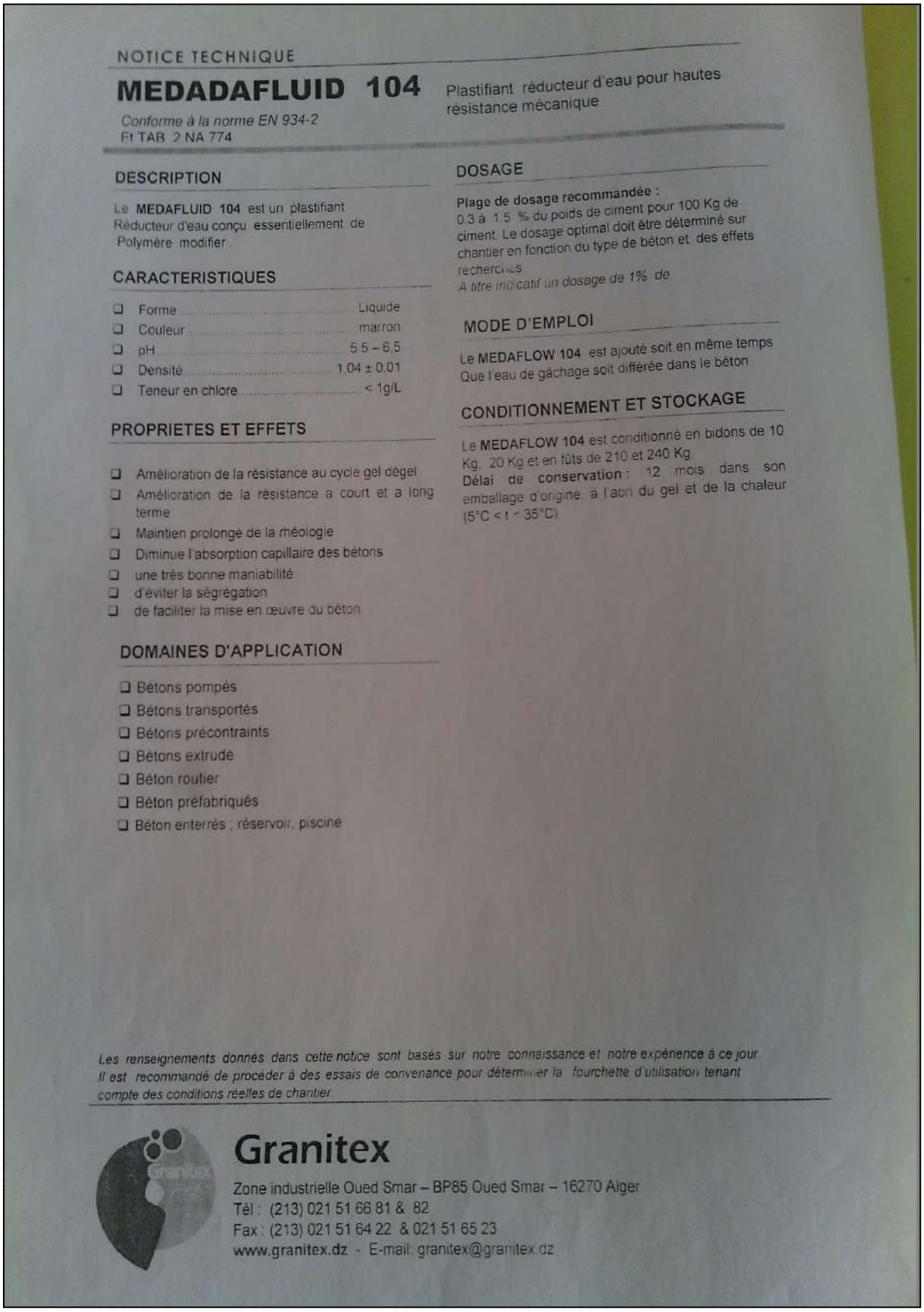
- Béton courant (non armé ou faiblement armé: fondations, portées réduites, décoffrage différé).
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...)
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc ...)
- Béton routier.
- Béton fortement sollicité.

Précautions et recommandations pour l'emploi

- Il est recommandé de stocker le ciment dans les endroits étanches secs pour éviter l'hydratation du produits.
- Pendant le durcissement et en saison chadue, maintenir le béton humide en l'arrosant régulièrement ou en utilisant des produits de cure afin d'éviter la dessiccation des parties superficielles.
- Eviter les décoffrages prématurés pour préserver les résistances à long terme.
- Utiliser les agrégats propres (sable, gravier ...).
- Respecter le dosage ciment – eau – agrégats.
- Utiliser tout moyen (vibreur ...) pour assurer une compacité maximale du béton, facteur important pour la garantie de résistance mécanique optimums.
- Eviter un surdosage de ciment qui provoquerait une tendance à la fissuration du béton et donc une perte de résistance.

www.ecde.dz

Fig. B.1. La fiche technique du ciment de chlef



NOTICE TECHNIQUE

MEDADAFLUID 104

Plastifiant réducteur d'eau pour hautes résistance mécanique

Conforme à la norme EN 934-2
Ft TAB 2 NA 774

DESCRIPTION

Le **MEDAFLUID 104** est un plastifiant Réducteur d'eau conçu essentiellement de Polymère modifier.

CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... marron
- pH ..... 5.5 – 6,5
- Densité ..... 1.04 ± 0.01
- Teneur en chlore ..... < 1g/L

PROPRIETES ET EFFETS

- Amélioration de la résistance au cycle gel dégel
- Amélioration de la résistance a court et a long terme
- Maintien prolongé de la rhéologie
- Diminue l'absorption capillaire des bétons
- une très bonne maniabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons pompés
- Bétons transportés
- Bétons précontraints
- Bétons extrudé
- Béton routier
- Béton préfabriqués
- Béton enterrés ; réservoir, piscine

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0.3 à 1.5 % du poids de ciment pour 100 Kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.
A titre indicatif un dosage de 1% de

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 104** est ajouté soit en même temps Que l'eau de gâchage soit différée dans le béton

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 104** est conditionné en bidons de 10 Kg, 20 Kg et en fûts de 210 et 240 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)

Les renseignements donnés dans cette notice 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

Fig.B.2. La fiche technique de l'adjuvant MEDAFLUID 104

ANNEXE C

Béton de sable frais



Fig.C.1 . Malaxage du béton de sable à base de poudre plastique



Fig.C.2. Aspect du béton de sable à l'état frais

ANNEXE D

Béton de sable durci



Fig.D.1. Aspect du béton de sable à l'état durci



Fig.D.2. Aspect du béton de sable à base de fibres plastiques



Fig.D.3. Aspect des éprouvettes du béton de sable FP après l'écrasement



Fig.D.4. Aspect des éprouvettes du béton de sable à base de fibres plastiques après l'échauffement



Fig.D.5. Aspect des éprouvettes du béton de sable à base de poudre plastiques après l'échauffement

Publication

University Mohammed Premier

JMES

Journal
of Materials & Environmental Science



Vol. 7 N° 2
ISSN 2028 - 2508

J. Mater. Environ. Sci. 7 (2) (2016) 382-389
ISSN : 2028-2508
CODEN: JMESCN

Use of plastic waste in sand concrete

M. Guendouz[1], F. Debieb[1]*, O. Boukendakdji[1], EH. Kadri[2], M. Bentchikou[3], H. Soualhi[2]
[1]*LME Laboratory, University of Medea, Algeria*
[2]*L2MGC Laboratory, University of Cergy Pontoise, France*
[3]*LBMPT Laboratory, University of Medea, Algeria*

**Corresponding:E-mail:debieb.farid@univ-medea.dz, f_debieb@yahoo.com, Tél: +213 773822967, Fax: +213 25785155*

Abstract
This study investigated the utilization of two type of waste plastic (Polyethylene Terephthalate (PET) and Low Density Polyethylene (LDPE) used for bags manufacture) as a fibers and fine aggregates (powder) in sand concrete. Various volume fractions of sand (10%,20%,30% and 40%) were substituted by the same volume of plastic aggregates, and various amount of plastic fibers (0.5%, 1%, 1.5%,2%) were introduced by volume in sand concrete mixes.The physical and mechanical properties of the composites produced was studied.The results showedthat the use of plastic waste as partial replacement of sand contributes to reduce the bulk density,decrease the air content, causing a increase in compressive and flexural strength and especially for 10% and 20% of replacement. In addition, the reinforcement of the cementing matrix with plastic fibers induced a clear improvement of the tensile strength. This study insures that reusing waste plastic in sand concrete gives a positive approach to reduce the cost of materials and solve some environmental problems.

Keywords: Environment, waste, Recycling, Sand concrete, Plastic.

1. Introduction
In Algeria, as in many countries of the world, the amount of plastic waste is increasing and occupies a large part of solid waste. This type of waste is a serious problem for environment because of its non-biodegradable nature. Recycling of this type of waste to produce new materials like concrete or mortar appears as one of the best solution, due to its economic and ecological advantages.Previous studiesshowed that it waspossible to useplastic wastein mortar and concrete suchas polyethylene terephthalate (PET) bottle [1], polypropylene (PP) [2] , poly vinyl chloride (PVC) pipe [3], high density polyethylene (HDPE) [4], thermosetting plastics [5], shredded and recycled plastic waste [6], expanded polystyrene foam (EPS) [7], glass reinforced plastic (GRP) [8]and polycarbonate as an aggregate, a filler or a fiber [9]. Several authors [6, 7]explored the use of light aggregate based on polymeric waste, as a material in reducing the unit weight, the cost, the brittleness and the thermal insulation properties of building materials such as concrete or mortars. However, these aggregates exhibit a series of drawbacks, mainly due to their poor chemical compatibility with inorganic matrix. The in homogeneity between the two phases which causes defects in the internal structure of the inorganic matrix, can result in: (a) a reduction in fresh mortar workability, (b) a decrease in mechanical performances, such as strength and stiffness and (c) a worsening of thermal properties, such as a reduction of thermal degradation temperatures and fire resistance
This workaims to study thepossibility of usingwasteplastic bottles(PET-polyethylene terephthalate)andtanks (low densitypolyethylene-LDPE) in sand concretewithout any transformationexceptgrinding,to minimize the cost of the final material. The influence ofthe proportion ofwaste usedon the physical andmechanical propertiesof the new materialhas been studied andanalysed.

2. Experimental programme
2.1. Materials
Portland cement CEM II/A 42.5 from Ain El-Kebira Factory in Algeria was used throughout this study, with a density of 3100 kg/m^3. Natural dune sand (NDS) from Tamanrasset (south of Algeria) was used for all

mixes.The particle size distributionis shown inFigure1 and the physical properties are presented in Table 1. The X-ray Diffraction analysis of the sand used is presented in Figure 2and shows its siliceous nature. Ultrafine blast furnace slag with a specific surface of 3100 m^2/kg and specific density of 2.857 kg/m^3 are used.

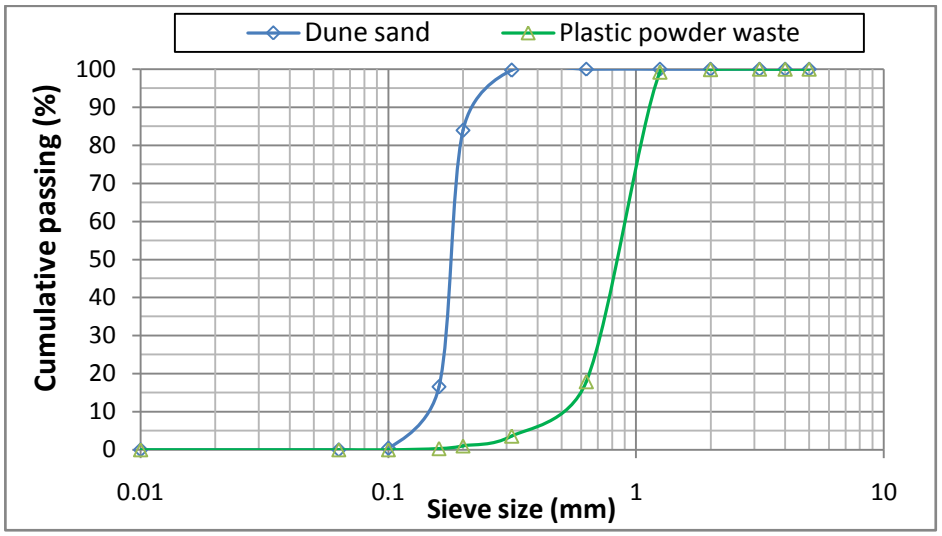


Figure 1: Particle size distribution of used sand and plastic powder waste.

Table 1: Physical properties of sand

Properties	Dune Sand
Apparent density(kg/m^3)	1400
Bulk density (kg/m3)	2560
Water absorption (%)	2.66
Sand equivalent (%)	80.50
Fineness modulus	0.84
Compactness (%)	0.55
Porosity (%)	0.45

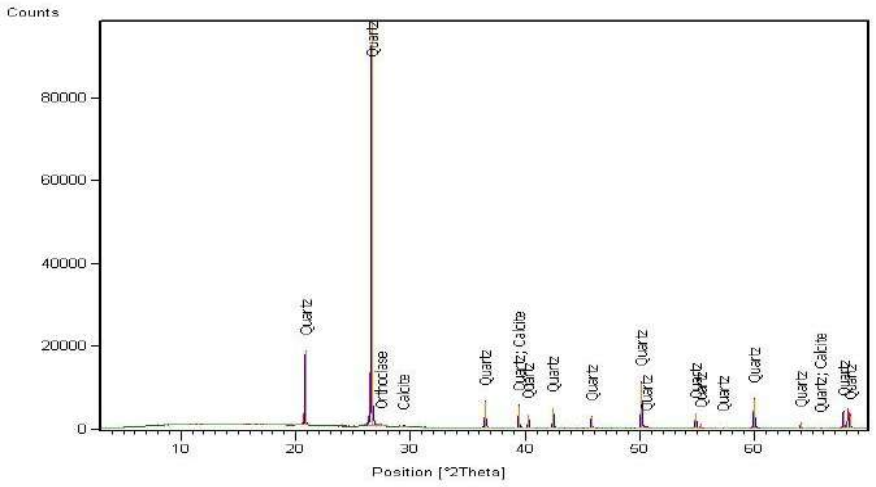
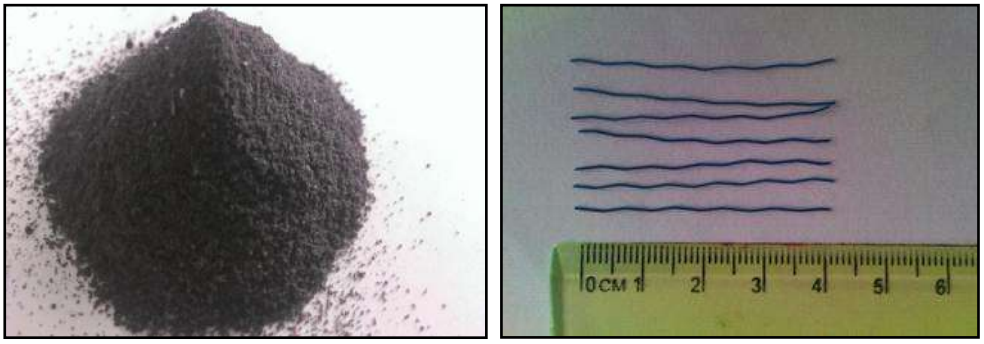


Figure2: X-ray diffractogram analysis of sand

Polyethylene terephthalate(PET) fibers and Low Density-Polyethylene (LDPE) powder,as shown in Figure 3, are used in this study.The PETfibers with 40 mm of length and 0.5 of thicknesswere obtained by mechanical

cutting of lateral sides of PET bottles. The bottlenecks and the bottom of the bottles were discarded. The uniformity of fibers is ensured, especially for the dimensions length and width, by fine adjusting executed in a semi-automatic cutting machine. The LDPEpowder with 2 mm maximum size was obtained from oldbleu jerry-can waterafterhaving beencollected,washed,compressed, and crushed.The physical and mechanical properties of plastic waste used are presented in Table 2.



LDPE plastic powder PET plastic fibers

Figure3: General aspect of plastic waste used.

Table 2: Physical and mechanical properties of plastic waste.

Properties	Plastic powder	Plastic fibers
Diameter (mm)	1.5	0.5
Length (mm)	/	4
Apparent density(kg/m^3)	350	950
Bulk density (kg/m3)	450	1230
Fineness modulus	2.8	/
Young's modulus (MPa)	1900	2400
Tensile strength (MPa)	45	60
Melting point(°C)	135	260

Apolycarboxylate superplasticizer (Medafluid 104) produced by GRANITEX group (Algeria) with solid contents of 35% was used for all mixes. The mixing water used for the different mixes is the distribution drinking water, free of impurities with a pH equal to 7.9.

2.2. Concrete mixes design

SABLOCRETEdesign method [10], with 350 kg/m^3 of cement, 1200 kg/m^3 of sand, 230 kg/m^3 of fillers, 0.86 of water/cement ratio of and1% of plasticizer was used for optimizing the composition of sand concrete.Four volume fractions of sand (10%,20%,30% and 40%) were substituted by the same volume of plastic aggregates, and another four various amount of plastic fibers (0.5%,1%,1,5%, 2%) were introduced by volume in sand concrete mixes. Three concrete mixtures were made. Literary codes identify each mixture in a precise way:

- **CSC**: reference sand concrete containing 100% of NDS
- **SCn%PP**: Sand concrete with n% of plastic powder.
- **SCn%PF**: Sand concrete with n% of plastic fibers.

n: number

The specimens produced were cured in air at 20°C and 50% RH. After 24 h, they were removed from the molds and placed in water for another 24 h and then open-air stored until the day of testing. Such curing has been chosen according the normal manufacturing of sand concrete in Algeria. This procedure was respected for all compositions and all tests.

2.3. Tests procedures

The workability of concrete was measured in terms of slump according to NF P 18-451. The air content was determined by the aerometer according to NF P 18-353. The flexural strength was measured on 40 · 40 · 160 mm specimens at the ages of 7,28 and 90days by a three-point bending test, using a testing machinewith a maximum load capacity of 30 kN (according to EN 196-1).The half-samples resulting from this test were then submitted to compression test.

3. Results and discussion

The variation of concrete slump with powder plastic particles is shown in Figure 4. The use of plastic waste type LDPE as partial replacement of sand contributes to increase the workability of sand concrete about 40%. This is probably due to the presence of more free water in the mixes containing plastic than in other containing only natural aggregate, since unlike natural aggregate, plastic aggregates do not absorb water during mixing. Choi et al. [11] reported an increase in the slump value of concrete with increasing content of two types of treated PET-bottle aggregate in concrete. The aggregates were spherical in shape. Al-Manaseer et al. [6] determined the slump of concrete mixes made with plastic aggregates. They reported that there was increase in slump when plastic aggregates were incorporated in concrete. The concrete containing 50% plastic aggregates had a slightly higher cone slump than the concrete without plastic aggregates.

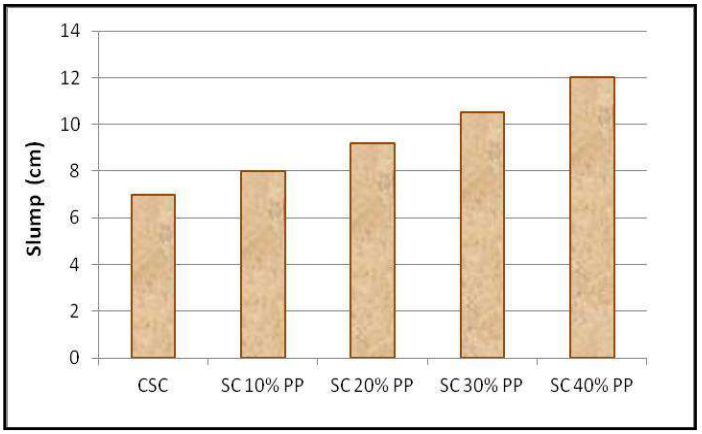


Figure 4: Slump of sand concrete as function of plastic powder content.

Figure 5 shows the the variation of the slump of sand concrete with the percentage of incorporated plastic fiber.The results displayed that the workability of sand concrete decrease up to 60% for40% of plastic fiberscontent. Several papers reported that the introduction of any kind of fibers in the composite, involves a significant reduction in the workability of the concrete [12].

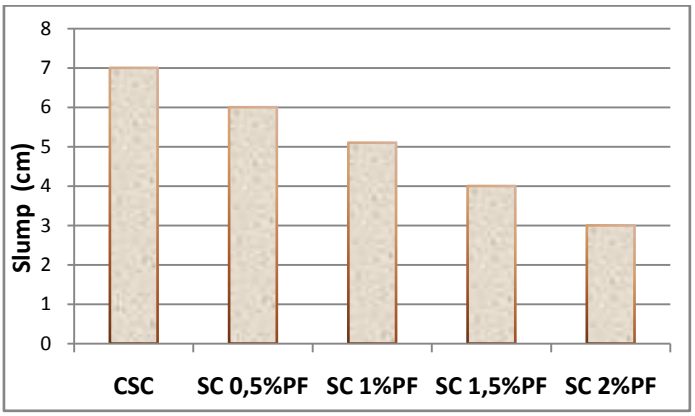


Figure 5: Slump of sand concrete as function of plastic fibers content.

The bulk densitiesof the various mixes are shown in Figures 6 and7. According to the results presented in Figure6, the use of plastic powder as partial replacement of sand contributes to reduce (10%) the bulk density of sand concrete. This is probably due to the lower density of the plastic particles compared with the dune sand. This result is confirmed by da Silva et al. [13] and Iucolano et al. [14]. Indeed, the results obtained by Al-Manaseer et al. [6] showed that density of concrete was reduced by 13% for sand concrete containing 50% of plastic waste as aggregate.

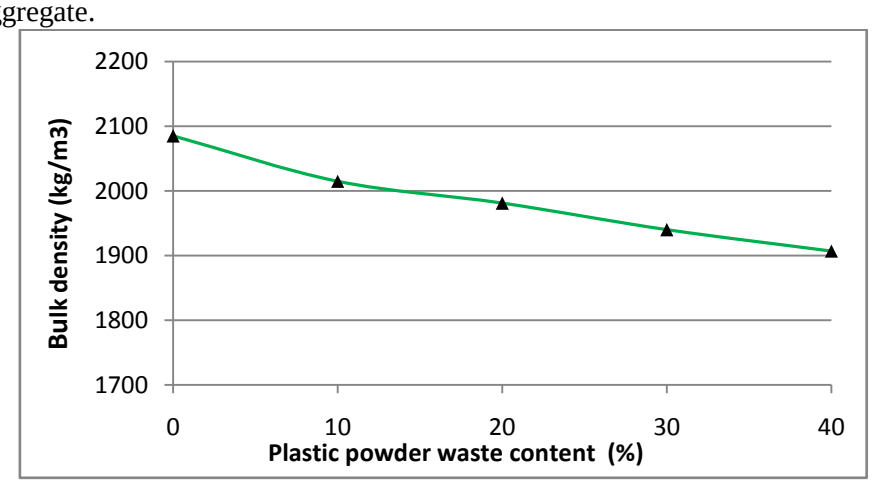


Figure 6: Evolution of bulk density of sand concrete as function of plastic powder wastes content.

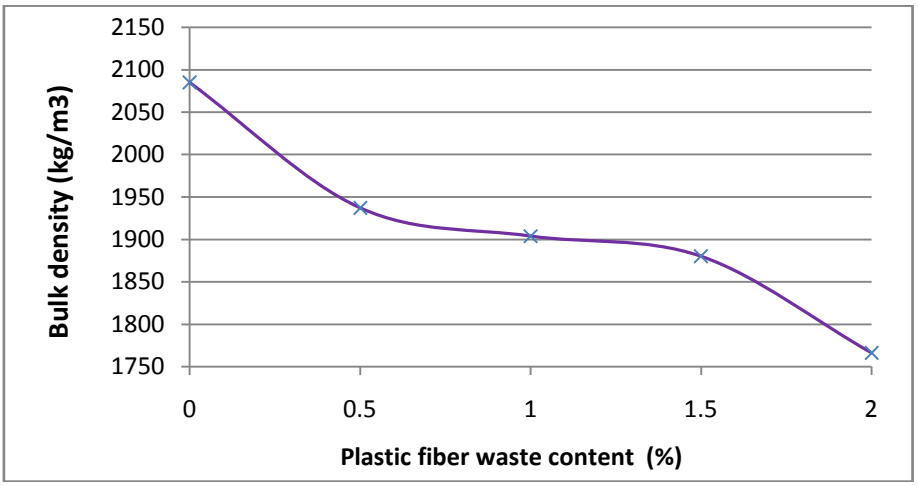


Figure 7: Evolution of bulk density of sand concrete as function of plastic fibers wastes content.

The result presented in figure 7 show a decrease (15%) of the density of sand concrete when the plastic fibers content increases. These results agree with those of Pereora et al.[15]for concrete with recycled PET fibers.

The compressive and flexural strength are presented in Figures 8 to 11 at age of 28 days in accordance with EN 1015-11. From Figures 8 and 9,it clearly appears that compressive and flexural strengths of sand concrete increases of about 30% with 20% of plastic powder content. This increase is agreement with the results of Rahmani et al. [16]. This is a desirable result that a concrete with more ductile behaviour can be obtained using waste PET particles. Contrarily, others papers [17, 18] reported that the use of plastic aggregate as partial substitution of natural aggregate in concrete and/or mortars can affect negatively the mechanical performances.
From Figure 10 it appears that compressive strength of sand concrete increases up to 25% with 1.5% of plastic fibers content. In same way, in Figure 11 it can be clearly observed that flexural strength of sand concrete increases up to 40% with 1% of plastic fibers content. Pereora et al. [15] have reported that 1.5% of PET fibers increase the flexural strength of mortar about 30% at 28 days. In same way Ochi et al. [19] reported approximately the same results and describe methods for manufacturing reinforcing fibers from recycled PET

bottles, and evaluate their beneficial effects in terms of ductility, bending and compressive strengths of concrete specimens.

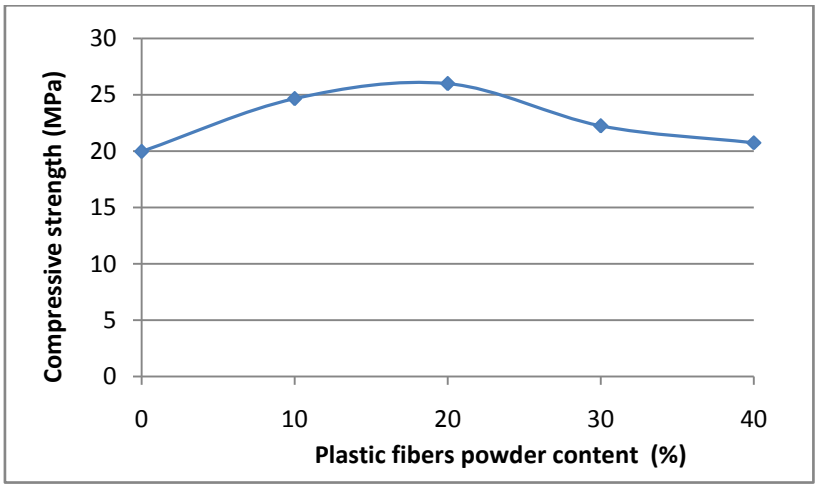


Figure 8: Compressive strength of sand concrete as function of plastic powder content at 28days.

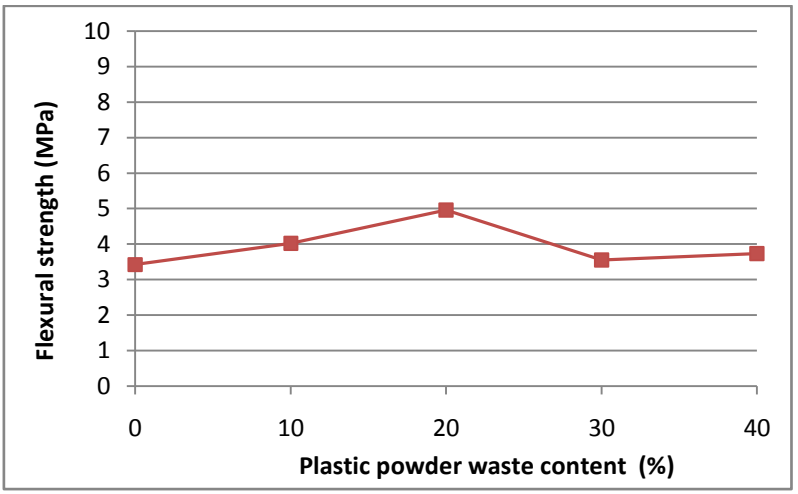


Figure 9: Flexural strength of sand concrete as function of plastic powder content at 28days.

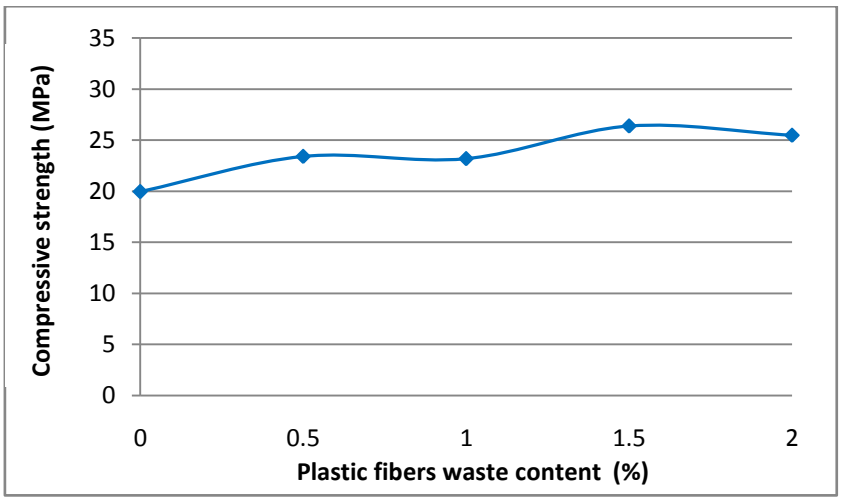


Figure 10: Compressive strength of sand concrete as function of plastic fibers content at 28 days.

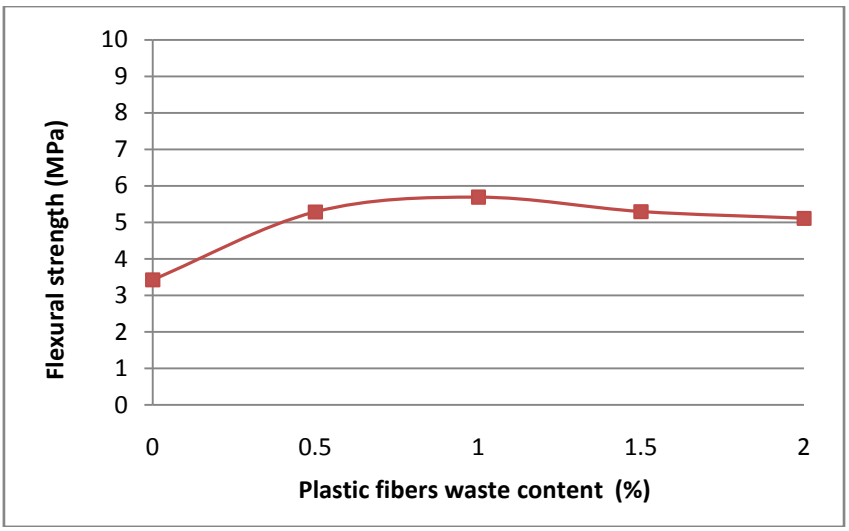


Figure 11: Flexural strength of sand concrete as function of plastic fibers content at 28 days.

Conclusion

The present study is aimed at the use of two type of plastic waste (PET and LDPE) as fibers and aggregates in sand concrete. The conclusions are summarized as follows.

1. The use of plastic (PET and LDPE) waste induces a decrease about 10-15% of density of sand concrete.
2. The workability of sand concrete increases about 40% with plastic powder, however it decreases about 60% with plastic fibers.
3. Mechanical performances of sand concrete seem to be positively influenced by the type of plastic waste added.
4. The increase in compressive strength at 28 days of age was about 30 and 25 % when 20% of plastic powder or 1.5% of plastic fibers are respectively, added.
5. The increase in flexural strength at 28 days of age was about 30 and 25 % when 40% of plastic powder or 1% of plastic fibers are respectively, added.

For an optimal utilization of this type of concrete, the level of substitution should be limited to 20% and 1.5% for plastic powder (LDPP) and plastic fibers (LPE) respectively.

Acknowledgements-The authors would like to thank all persons who helped them throughout the research, particularly the personnel of Civil Engineering Laboratory of university of Medea.

References

1. Harini B., Ramana K.V., Use of Recycled Plastic Waste as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete, *IJIRSET*, 4 (2015) 8596.
2. Yang S., Yue X., Liu X., Tong Y., Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles, *Const. Build. Mater.*, 84 (2015) 444–453.
3. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L., Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Manage*, 29 (2009) 621–8.
4. Naik T.R., Singh S.S., Huber C.O., Brodersen B.S., Use of post-consumer plastic wastes in cement-based composites, *Cem. Concr. Res.*, 26 (1996) 1489–92.
5. Panyakapo P., Panyakapo M., Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Manage*, 28 (9) (2008) 1581–8.
6. Al-Manaseer A.A., Dalal T.R., Concrete containing plastic aggregates, *Concr. Int.*, 19 (1997) 47–52.

7. Kan A., and Demirboga R. A., Novel material for lightweight concrete production, *Cem. Concr. Compos.*, 31 (2009) 489–95.
8. Asokan P., Osmani M., Price A.D.F., Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete, *Constr. Build. Mater.*, 24 (4) (2010) 448-460
9. Hannawi K., Kamali-Bernard S., Prince W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates, *Waste Manage*, 30 (2010) 2312–20.
10. *AFNOR*, Concrete – Sand concrete. Projet P 18-500 (1995).
11. Choi Y.W., Moon D.J., Kim YJ., Lachemi M., Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009) 2829–35.
12. Kim S., Yi N., Kim H., Kim J., Song Y., Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete, *Cem. Conc. Comp.*, 32 (2010) 232–40.
13. da Silva A. M., de Brito J., Veiga R.,Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars, *Constr. Build. Mater.*, 71 (2014) 226–236.
14. Iucolano F., Liguori B., Caputo D., Colangelo F., Cioffi R.,Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties, *Materials and Design*, 52 (2013) 916–922.
15. Pereora de Oliveira L.P., Castro-Gomez J.P., Physical and Mechanical Behaviour of recycled PER fibre reinforced mortar,*Constr Build Mater*,25 (2011) 1712–7.
16. Rahmani E., Dehestani M., Beygi M.H.A., Allahyari H., Nikbin I.M., On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles,*Constr Build Mater*, 47 (2013) 1302–1308.
17. Saikia N., de Brito J., Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review, *Constr. Build Mater*, 34 (2012) 385–401.
18. Ismail Z.Z., Al-Hashmi E.A., Use of plastic waste in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Manage*, 28 (2008) 2041–7.
19. Ochi T., Okubo S., Fukui K., Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber, *Cem. Const. Comp.*, 29 (2007) 448–455.