

République de Côte d'Ivoire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique

Année Universitaire 2017-2018



Université Félix Houphouët Boigny



UFR des Sciences de la Terre
et des Ressources Minières

N° d'ordre :

THÈSE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ FÉLIX HOUPHOUËT-BOIGNY

EN SCIENCES DE LA TERRE

Spécialité : GÉOMATÉRIAUX

Et

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

EN SCIENCES POUR L'INGENIEUR & MICROTECHNIQUES

Spécialité : MATÉRIAUX

Par :

TRAORE BRAHIMAN

THÈME

ELABORATION ET CARACTERISATION D'UNE STRUCTURE COMPOSITE
(SABLE ET DECHETS PLASTIQUES RECYCLES) : AMELIORATION DE LA
RESISTANCE PAR DES CHARGES EN ARGILES.

Soutenue publiquement le 30 Novembre 2018

devant le jury composé de :

M. AKA Kouamé	Professeur titulaire Univ. Félix Houphouët Boigny	Président
M. KONAN Kouadio Denis	Maitre de conférences INPHB -Yamousoukro	Rapporteur
M. ASSIH Jules	Maitre de conférences (HDR) Univ. De Reims(France)	Rapporteur
M. BOA David	Professeur titulaire Univ. Nangui Abrogoa	Examineur
M. EBOTHE Jean	Professeur Emérite Univ.de Reims(France)	Examineur
M.PERREUX Dominique	Professeur des universités Univ. de Franche-comté(France)	Examineur
M. ATCHOLI Kokou Eso	Maitre de conférences (HDR) U.T.B.M(France)	Directeur de thèse

A mon père, à ma mère, à mes frères et sœurs, à mon épouse

Et à ma fille ADYLA

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été possible grâce aux aides, aux idées, aux actions, et à la compréhension de plusieurs personnes auxquelles nous prions de trouver ici, l'expression de ma profonde et sincère gratitude.

La thèse a été réalisée en cotutelle entre l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire) et l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard(France). J'ai eu à travailler au sein de deux équipes formidables à savoir le Laboratoire de Géomatériaux et de Technologie de l'Habitat à Abidjan et le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB-UMR-CNRS, Département COMM : ex. IRTES-M3M, UTBM-Belfort).

Mes premiers remerciements sont dédiés à mon laboratoire d'origine à savoir le Laboratoire de Géomatériaux et de Technologie de l'Habitat à Abidjan. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur EMERUWA Edjikémé (directeur du Laboratoire de Géomatériaux), qui malgré ses occupations a toujours été là pour nous encadrer avec les conseils, les remarques, les aides et les encouragements utiles pour les études mais aussi pour toute la vie. Que DIEU vous bénisse.

Je réitère les mêmes remerciements et gratitude à l'endroit de Professeur BOFFOUE Moro Olivier, pour ses conseils, ses encouragement ses aides, son estime et sa disponibilité malgré ses occupations, pendant tout le temps qu'a duré cette étude. Que DIEU vous bénisse.

Je tiens à remercier très chaleureusement Professeur KOUAKOU Conand Honoré pour son ingéniosité, ses conseils, ses remarques intéressantes et les aides qui m'ont permis de débiter cette étude et d'avoir ces résultats en améliorant significativement à chaque étape cette thèse.

Je remercie également Dr KOUADIO Koffi Clément pour ses conseils, ses encouragements, ses aides et son rôle de grand frère adopté envers moi dans ce laboratoire, et qui m'a permis de progresser dans mes recherches.

J'adresse également ma vive gratitude aux Docteurs ASSANDE A.A., OUATTARA Souleymane, SERIFOU Mamery et JOLISSAINT Oubrè Paul, pas seulement pour les connaissances scientifiques, les conseils et remarques qu'ils m'ont données, mais aussi pour leur gentillesse et leur disponibilité, pour le temps qu'on a passé ensemble sur les rapports, les articles et les présentations.

Les remerciements suivants sont dédiés à mon laboratoire d'accueil en France à savoir le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB-UMR-CNRS, Département COMM : ex. IRTES-M3M, UTBM-Belfort).

Je remercie tout d'abord Professeur ATCHOLI Kokou Ezzo (Directeur de thèse), pour avoir accepté de m'accueillir dans son équipe. J'ai beaucoup apprécié vos conseils sur le plan scientifique, vos encouragements et surtout votre optimisme et enthousiasme en l'avenir de la recherche en Afrique.

Je remercie ensuite Professeur LACHAT Rémy (Co-encadrant en France) pour son aide, ses conseils, sa disponibilité dans les travaux de cette thèse. C'est avec son ingéniosité et ses connaissances scientifiques que nous avons mis au point tout le matériel d'élaboration des échantillons en France.

A mes rapporteurs, KONAN Kouadio Denis et ASSIH Jules, ainsi qu'aux autres membres du jury, Professeur AKA Kouamé, Professeur BOA David, Professeur EBOTHE Jean et Professeur PERREUX Dominique, je veux adresser ma profonde reconnaissance pour avoir accepté de consacrer leur temps à l'examen de ce travail. Si la soutenance de thèse est une épreuve réputée difficile, vous avez tout fait pour rassurer l'impétrant que je suis.

Cette journée restera un excellent souvenir.

Cette thèse fut aussi possible grâce à la collaboration de certaines personnes que je tiens à remercier. Ainsi, mes vifs remerciements vont vers tous mes aînés de laboratoire à Abidjan : DJOMO et DJIRAGBOU pour tous les conseils, les aides et les remarques dont j'ai bénéficiés de leur part. Les mêmes remerciements sont également adressés aux grandes dames du laboratoire à savoir DJOHORE Ange épouse KOUAME, THIEBLESSON Lydie M. et AUGOU Sandrine.

Je remercie également tous les amis que j'ai rencontrés à Belfort en France. Les premiers remerciements sont pour ALMUSAWI AQIL mon compagnon de tous les jours. Merci pour tes conseils et aides. Je tiens à remercier très chaleureusement Mr. Pascal ALDINGER (mon père en France) pour tous ses conseils, son soutien, ses histoires drôles qui m'ont assez faits du bien, jusqu'à oublier que j'étais loin de mon pays et ma famille biologique.

Je remercie également Mme Béatrice ROSSEZ (secrétaire du laboratoire en France) pour son accueil, ses aides et sa disponibilité à chaque fois que j'ai eu besoin d'elle.

J'exprime aussi mes remerciements aux autres amis de laboratoire que sont BODO Michelle, MOURAD et AKIM.

Je témoigne ici ma gratitude et mon amitié inestimable à mes compagnons de tous les jours en Côte d'Ivoire, Mr. GOFFRI B. Fidèle, Mlle AHUA Aîchata, TIECOURA J.Y. ; CISSE Mamadou et CISSE Vazoumana pour leurs prières, soutiens et encouragements sans faille à mon égard.

J'exprime aussi ma gratitude au Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES) qui a financé les travaux en Cote d'Ivoire, en particulier à Docteur SANGARE Yaya son secrétaire exécutif.

J'exprime également ma profonde gratitude au projet d'Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grandes Ecoles de Côte d'Ivoire (AMRUGE-CI) qui a financé mes séjours en France, en particulier au Professeur MERAWA Mohammadou, chef de projet C2D pour l'enseignement supérieur.

Mes remerciements et ma gratitude sont aussi adressés à l'ambassade de France en Côte d'Ivoire, en particulier Madame N'TAPKE Juliette (coordonnatrice bourses C2D) et Madame DIARRASSOUBA Biba (Equipe C2D Enseignement supérieur et recherche scientifique), qui ont tout mis en œuvre pour préparer et faciliter nos séjours en France.

Merci à toute la famille TRAORE en particulier mon père et ma mère, mon grand frère MAMADOU, mes petits frères SIAKA, YAYA, mes petites sœurs DJIDIATA, ROKIA et à ma nièce MARIAM pour leurs soutiens sans faille et leurs prières qui nous ont permis de franchir toutes les étapes de la vie jusqu'aujourd'hui. Sans douter de ce soutien pour le reste de la vie je leur dis que j'ai toujours besoins de leurs bénédictions. Que DIEU vous bénisse et vous donne longue vie.

Je tiens également à remercier toute la grande famille KASSOUM KOUAKOU et alliés à Bouaké pour leurs soutiens et aides depuis le collège jusqu'à aujourd'hui.

Je dédie ici cette thèse, avec une reconnaissance chaleureuse et particulière à mon épouse TOURE N. L. Nathalie, pour tout le soutien qu'elle n'a cessé de m'accorder chaque jour que DIEU fait. Que DIEU te bénisse, prolonge ta vie et qu'il nous permette d'avoir une meilleure vie ici bas et dans l'au-delà. (AMIN).

Je ne saurai terminer mes remerciements sans adresser une vive reconnaissance à tous nos enseignants de l'U.F.R. S.T.RM en particulier le parrain de ma promotion de Maitrise, Professeur AFFIAN Kouadio.

Je souhait exprimer enfin mes remerciements et gratitude à tous les étudiants de notre promotion (ATSE B. ; BOLOU B. ; ZAMBLE B.) et tous les étudiants du laboratoire de Géomateriaux et Technologie de l'Habitat.

Table des matières

Remerciements	ii
Liste des abréviations.....	xii
Liste des figures.....	xiii
Liste des tableaux.....	xvii
Résumé.....	xviii
Abstract.....	xix

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

PREMIERE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

Chapitre I: LE PLASTIQUE

Introduction	3
I.1 Définition et historique	3
I.2 Synthèses des polymères (polymérisation).....	5
I.2.1 Réactions d'addition	5
I.2.2 Réactions de condensation	5
I.3 Structures des polymères	6
I.3.1. Polymères linéaires	6
I.3.2 Polymères ramifiés	7
I.3.3 Polymères réticulés	7
I.3.4 Polymères amorphes et cristallisés	8
I.4 Différents types de plastiques (polymères)	9
I.4.1 Thermoplastiques	9
I.4.2 Thermodurcissables	11
I.4.3 Elastomères	11
I.5 Propriétés mécaniques des polymères	12
I.6 Importance et domaine d'application des polymères	14
I.6.1 Importance.....	14
I.6.2 Domaine d'utilisation.....	15

I.7 Déchets plastiques.....	18
I.7.1 Déchets plastiques industriels	18
I.7.2 Déchets plastiques de post consommation	18
I.8 Recyclage du plastique	19
Conclusion	23

Chapitre II: GÉNÉRALITÉS SUR LES MATIÈRES PREMIÈRES ET MATÉRIAUX COMPOSITES

Introduction	24
II-1 Sable	24
II-1.1 Définition.....	24
II-1.2 Formation des sables.....	24
II- 1.3 Composition minéralogique	25
II-1.4 Classification des sables	25
II.1.5 Utilisation du sable	26
I-2 Argiles	27
I-2.1 Définition	27
I-2.2 Formation des argiles	27
I-2.3 Structure des argiles	29
I-2.4 Classification des argiles	29
I-2.5 Propriétés et intérêt des argiles	31
I-3 Charge	31
1-3.1 Définition	32
I-3.2 Différents types de charges	32
I-3.2.1 Charges minérales	32
I-3.2.2 Charges organiques	32
I-3.2.3 Charges organo-minérales	33
I-3.3 Morphologies et tailles	33
I-4 Composites	33
I-4.1 Définition	33
I-4.2 Différents types de composites	34
I-4.3 Matrices organiques	34
I.4.3.1 Thermodurcissables	35
I.4.3.2 Thermoplastiques	35

Conclusion	36
------------------	----

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

Chapitre III : MATIERES PREMIERES ET METHODES DE CARACTERISATIONS

Introduction	37
III-1 Matières premières.....	37
III-1.1 Déchets plastiques	37
III-1.2 Sable	38
III-1.3 Argile	38
III-2 Caractérisation de la matière première.....	39
III-2.1 Analyses granulométriques.....	39
III-2.2 Analyses thermiques	40
Conclusion	42

Chapitre IV : CONFECTION ET CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS

Introduction	43
IV-1 Méthode de compactage manuel : site d'Abidjan (Côte d'Ivoire).....	43
IV-1.1 Matériel de confection	43
IV-1.1.1 Broyeur de plastique	43
IV-1.1.2 Extrudeuse	44
IV-1.1.3 Presse et moule	44
IV-1.2. Méthodes d'élaboration.....	45
IV- 2 Méthode de thermocompression : site de Belfort(France)	46
IV-2.1 Matériel de confection	46
IV-2.1.1 Moule de malaxage	46
IV-2.1.2 Thermopresse	47
IV-2.1.3 Moule de mise en forme	47
IV.2.2 Méthode d'élaboration	48
IV-3 Caractérisation des échantillons	50
IV-3.1 Site d'Abidjan (méthode de compactage manuelle).....	50
IV-3.1.1 Densité apparente	50
IV-3.1.2 Resistance à la compression	50
IV-3.1.3 Résistance à la flexion	51

IV-3.1.4 Résistance à l'usure	52
IV-3.1.5 Essai d'absorption d'eau	52
IV-3.1.6 Essai au scléromètre	53
IV-3.1.7 Essai à l'ultrason	54
IV-3.2 Site de Belfort (méthode de thermocompression)	56
IV-3.2.1 Densité apparente	56
IV-3.2.2 Résistance à la compression.....	57
IV- 3.2.3 Résistance à la flexion trois (3) points	57
IV-3.2.4 Essai d'absorption d'eau	58
IV-3.2.5 Etude microscopique	58
Conclusion	59

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre V: CARACTERISATION DE LA MATIERE PREMIERE

Introduction	60
V-1 Sable.....	60
V-1.1 Analyse granulométrique	60
V-1.1.1 Sable du site d'Abidjan.....	60
V-1.1.2 Sable du site de Belfort	62
V-2 Plastique(PEBD).....	63
V-2.1 Densité	63
V-2.2 Analyse thermique	63
V-3 Argile	66
Conclusion	68

Chapitre VI: CARACTERISATION DES MATERIAUX DE LA METHODE DE COMPRESSION MANUELLE (Site : Abidjan)

Introduction	69
VI-1 Propriétés physiques	69
VI-1.1 Effet du plastique sur la densité apparente	69
VI-1.2 Essai d'absorption d'eau	70
VI-2 Propriétés mécaniques	71
VI-2.1 Essais destructifs	
VI-2.1.1 Influence du plastique et de la granulométrie du sable sur la résistance en flexion trois(3) points	71

VI-2.1.2 Influence du plastique sur le module en flexion	72
VI-2.1.3 Influence du plastique sur le mode de rupture en flexion	73
VI-2.1.4 Influence du plastique sur la résistance en compression	74
VI-2.1.5 Influence du plastique sur le module en compression	75
VI-2.1.6 Influence du plastique sur le mode de rupture en compression	76
VI-2.1.7 Evaluation du coefficient de poisson	77
VI-2.1.8 Essai d'usure	80
VI-2.2 Essais non destructifs	81
VI-2.2.1 Essai au scléromètre	81
VI-2.2.2 Essai à l'ultrason	82
VI-2.2.2.1 Influence du PEBD sur la vitesse d'ultrason	82
VI-2.2.2.2 Estimation du module élastique dynamique	82
VI-3 Modélisation	84
VI-3.1 Corrélation entre résistance en compression et l'indice sclérométrique	84
VI-3.2 Etude comparative aux modèles proposés dans la littérature	85
VI-3.3 Corrélation entre résistance en compression et la vitesse d'ultrason	86
VI-3.4 Etude comparative aux modèles proposés dans la littérature	87
VI-3.5 Méthodes combinées	88
VI-3.6 Comparaison module élastique dynamique et statique	90
VI-3.7 Valeur standard du coefficient de poisson pour le mélange sable-PEBD	91
VI-3.8 Validation de la valeur standard du coefficient de poisson	92
VI-3.8.1 Comparaison module élastique estimé, statique et dynamique	92
VI-3.8.2 Relation entre résistance en compression, module élastique estimé, statique et dynamique expérimentale	92
Conclusion	94

Chapitre VII: CARACTERISATION DES MATERIAUX ISSUS DE LA THERMOCOMPRESSION (Site : Belfort)

Introduction	95
VII-1 Détermination de la pression à exercer	95
VII-1.1 Cohésion sable-plastique(PEBD)	95
VII-1.2 Effet de la pression sur la cohésion interne du matériau	96
VII-1.3 Effet de la pression sur la résistance	97

VII-2 Influence du taux de plastique sur la résistance du matériau.....	99
VII-2.1 Effet de la granulométrie du sable sur la résistance en compression.....	99
VII-2.2 Résistance à la compression et module d'élasticité	100
VII-2.3 Résistance à la flexion et module d'élasticité	101
VII-2.4 Influence du taux de plastique sur la densité et l'absorption en eau	102
Conclusion	104
Chapitre VIII: CARACTERISATION DU MATERIAU COMPOSITE SABLE-P.E.B.D	
CHARGE D'ARGILE PAR LA METHODE DE THERMOCOMPRESSSION (Site :	
Belfort)	
Introduction	105
VIII-1 Détermination du taux de charge en argile	105
VIII-2 Influence de la charge sur la résistance en compression et le module d'élasticité.	107
VIII-3 Influence de la charge sur la résistance en flexion et le module d'élasticité	109
VIII-4 Influence de la granulométrie de la charge sur résistance à la compression	110
VIII-5 Effet de la charge sur l'absorption d'eau	112
VIII-5.1 Influence du taux de charge sur l'absorption d'eau.....	112
VIII-5.2 Influence de la granulométrie de la charge sur l'absorption d'eau.....	113
Conclusion	114
Chapitre IX: COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX	
(COMPOSITES) ET DOMAINE D'APPLICATION	
Introduction	115
IX-1 Comparaison des résistances en compression	115
IX-2 Comparaison des résistances en flexion trois(3) points	116
IX-3 Comparaison de la résistance à l'absorption d'eau.....	117
IX-4 Comparaison des résistances avec des matériaux de revêtement	117
IX-4.1 Pavés et exemples de quelques normes	118
IX-4.1.1 Définition de pavés et utilisation	118
IX-4.1.2 Résistances mécaniques et à l'absorption d'eau exigées selon les normes.....	119
IX-4.1.3 Comparaison des résistances obtenues avec les normes	120
IX-4.2 Revêtement de sol et exemples de quelques normes	121
IX-4.2.1 Définition et utilisation	121
IX-4.2.2 Classification et caractéristiques	121
IX-4.2.3 Comparaison de résistances obtenues avec les normes	122

Conclusion	123
CONCLUSION GENERALE	124
PERSPECTIVES	126
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127
ANNEXES	
Résultats globaux des essais mécaniques	
Résultats globaux des essais d'absorption d'eau.....	
Articles et communications	

Liste des abréviations

A.F.NOR : Agence Française de Normalisation

A.I.R.T.A.E : Association pour l'Innovation et la Recherche Technologique Appropriée en Environnement.

A.S.T.M: American Society for Testing of Materials

CD : Compact Disc

DVD : Digital Versatile Disc

G.A.F.R.E.H : Groupe d'Action des Femmes pour la Relance Economique du Houet

ICB : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

IRTES-M3M : Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société-Mécatronique, Méthodes, Modèles et Métiers

M.S.T : Maladies Sexuellement Transmissibles

P.E : Polyéthylène

P.E.B.D : Polyéthylène Basse Densité

P.E.H.D : Polyéthylène Haute Densité

P.E.T : Polyéthylène téréphtalate

P.P : Polypropylène

P.V.C : Chlorure de Polyvinyle

R.E.S.E.D.A : Réseau d'Entreprises pour le Développement de l'Artisanat

U.F.R S.T.R.M : Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières

UTBM : Université de Technologie Belfort-Montbéliard

Mab : Matériaux d'Abidjan (méthode de compression manuelle),

Mbt : Matériaux de Belfort thermoformés (méthode de thermocompression),

Mbtca : Matériaux de Belfort thermoformés chargés d'argile

Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique de polymères linéaires : a. homopolymère, b. copolymère statistique, c. copolymère alterné, d. copolymère séquencé.....	6
Figure 2: Représentation schématique de polymères ramifiés (a: Homopolymère ramifié et b : copolymère ramifié).....	7
Figure 3 : Représentation schématique de polymères réticulés.....	7
Figure 4 : Structure des polymères (A : amorphe partiellement cristallise et B : fortement réticulé par de nombreux ponts covalents interchaînes).....	8
Figure 5: Modes de fabrication des principaux thermoplastiques.....	10
Figure 6 : Production du plastique dans le monde (A : évolution ; B : répartition).....	17
Figure 7 : Demande des différents types de plastique par secteur d'activité.....	17
Figure 8 : Mode de formation des argiles.....	28
Figure 9: Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite).....	29
Figure 10 : Représentation schématique de quelques groupes de minéraux argileux	30
Figure 11 : Déchets plastiques (A : déchets plastique d'Abidjan ; B : déchets plastique de Belfort)	37
Figure 12 : Echantillons de sable : Sable de Belfort(A), sable de lagune d'Abidjan(B)..	38
Figure 13 : Granulomètre à diffraction laser Mastersizer 2000, Malvern Instruments ...	40
Figure 14 : Appareil TGA de type Q10 V6.3	41
Figure 15 : Appareil DSC de type Q50 V 9.0	42
Figure 16 : Broyeur de plastique	43
Figure 17 : Extrudeuse	44
Figure 18 : Presse et moule	45
Figure 19 : Schéma de la procédure d'élaboration des échantillons	45
Figure 20 : Schéma du moule de malaxage et du couvercle	46

Figure 21 : Moule de malaxage (A : vue de haut, B : vue de face).....	46
Figure 22 : Thermopresse	47
Figure 23 : Mise en forme de l'échantillon	48
Figure 24 : Schéma de la procédure d'élaboration des échantillons	49
Figure 25 : Presse hydraulique pour essais mécaniques (A : compression ; B : flexion 3 points)	51
Figure 26 : Dispositif de mesure de l'usure	52
Figure 27 : Mise en œuvre de l'essai au scléromètre	53
Figure 28 : Dispositif de l'essai à l'ultrason	54
Figure 29 : Schéma des différents types de mesure du temps de propagation	55
Figure 30 : Mesure du temps de propagation de l'onde en transmission direct	56
Figure 31 : Appareil Universal tester Analyser (TA-XT2i) pour compression	57
Figure 32 : Microscope Electronique à Balayage de type BRUKER	58
Figure 33 : Courbe de l'analyse granulométrique du sable d'Abidjan	60
Figure 34 : Courbe de l'analyse granulométrique des différents types de sable de Belfort.....	62
Figure 35 : courbe DSC (A : plastique d'Abidjan ; B : plastique de Belfort)	64
Figure 36 : Courbes TGA (A : plastique d'Abidjan ; B : plastique de Belfort)	65
Figure 37 : Résidu après la TGA	66
Figure 38 : Courbe de l'analyse granulométrique des différents types d'argile	67
Figure 39 : Densité apparente en fonction du taux de PEBD	69
Figure 40 : Variation du coefficient d'absorption en fonction du taux de PEBD	70
Figure 41 : Variation de la résistance en fonction du tau de plastique	71
Figure 42 : Variation du module en fonction du taux de plastique	72
Figure 43 : Courbe contrainte-déformations	73
Figure 44 : Image de la rupture en flexion et schéma explicatif de la propagation de la fissure	74
Figure 45 : Variation de la résistance en fonction du taux de plastique	75
Figure 46 : Variation du module en fonction du taux de plastique	75

Figure 47 : Courbe contrainte-déformation	76
Figure 48 : Image de la rupture en compression et schéma explicatif de la propagation des fissures	77
Figure 49: Matériau contenant 40% de plastique	78
Figure 50 : Courbe $\epsilon_{xx}=f(\epsilon_{yy})$ et valeur du coefficient de poisson a) 15% PEBD; b) 20 %PEBD; c) 25 %PEBD; d) 30 % PEBD; e) 35 % PEBD; f) 40 % PEBD	79
Figure 51 : Variation de l'usure en fonction du taux de PEBD	80
Figure 52 : Variation de l'indice de rebond(A) et résistance probable(A) en fonction du taux de PEBD	81
Figure 53: Variation de la vitesse en fonction du taux de PEBD	82
Figure 54 : Variation du Module E dynamique en fonction du taux de PEBD	83
Figure 55 : Corrélation Résistance à la compression – Indice de rebondissement	84
Figure 56 : Résistance en compression par écrasement et par équation en fonction du taux de PEBD.....	85
Figure 57 : Corrélations Résistance à la compression–Indice de rebond établies par divers auteurs	85
Figure 58: Corrélation Résistance à la compression-vitesse d'ultrason	86
Figure 59 : Résistance en compression par écrasement et par équation en fonction du taux de PEBD.....	87
Figure 60: Comparaison entre les résistances estimées et différents modèles	87
Figure 61 : Corrélation entre la résistance à la compression, la vitesse d'ultrason et l'indice sclérométrique	88
Figure 62 : Résistance en compression par écrasement et par méthode combinée en fonction du taux de PEBD	89
Figure 63: Variation du module élasticité en fonction du taux de plastique	90
Figure 64 : Estimation du module de Young pour $0,19 \leq \nu \leq 0,39$	91
Figure 65 : courbe des modules dynamiques et statiques expérimentaux en fonction du module dynamique estimé	92
Figure 66 : Courbe module élastique en fonction de la résistance en compression	93

Figure 67 : Image de la liaison entre le sable et le plastique	95
Figure 68 : Image de l'aspect interne à différentes pressions (a : 2 MPa, b : 5 MPa, c : 8 MPa, d : 10 MPa)	96
Figure 69 : Courbe résistance en fonction de la pression avec les images de cohésion sable-PEBD	97
Figure 70 : Schéma explicatif du réarrangement des grains lors du compactage (A : 6 MPa ; B : 10 MPa et C : 11 MPa)	98
Figure 71: Résistance en fonction de la granulométrie et du taux de PEBD	99
Figure 72 : Schémas explicatifs de la propagation de la fissure en fonction de la granulométrie du sable (A : sable 1 ; B : sable 2 et C : sable 3)	100
Figure 73 : Résistance en compression et du module d'élasticité en fonction du taux de PEBD.....	100
Figure 74 : Résistance en flexion en fonction du taux de PEBD	101
Figure 75 : Densité et absorption en fonction du taux de PEBD	102
Figure 76 : Image des pores ouverts	103
Figure 77 : Variation de l'absorption en fonction de la pression	104
Figure 78 : Resistance en fonction du taux de charge de 20 à 40% de PEBD	105
Figure 79 : Taux d'argile en fonction du taux de PEBD	106
Figure 80 : courbe contrainte-déformation en compression (A : 20 % PEBD ; B : 25 % PEBD)	107
Figure 81: Image des grains d'argile dans le composite	109
Figure 82 : Courbe contrainte-déformation en flexion (A : 20 % PEBD, B : 25 % PEBD)	109
Figure 83 : Variation de la résistance en fonction de la granulométrie de la charge	110
Figure 84 : Image des grains d'argile entre grains de sable	111
Figure 85 : Absorption en fonction du taux de charge	112
Figure 86 : Variation de l'absorption en fonction de la taille des grains	113
Figure 87 : Pavés posés	120
Figure 88 : Image des échantillons Mbt et Mbtca	122

Liste de Tableaux

Tableau I : Dates détaillées de l’histoire du plastique.....	4
Tableau II : Quelques propriétés mécaniques des polymères	13
Tableau III : Symboles et caractéristiques des différents types de plastiques recyclables	21
Tableau IV : Répartition granulométrique	61
Tableau V : Diamètres des particules des sables en fonction des pourcentages de la fréquence cumulée.....	63
Tableau VI : Diamètres des particules des argiles en fonction des pourcentages de la fréquence cumulée.....	67
Tableau VII : Valeurs des coefficient de poisson en fonction du taux de plastique...	77
Tableau VIII : Taux de charge idéal pour différents pourcentages de PEBD	106
Tableau IX : Valeurs des résistances en compression	115
Tableau X : Valeurs des résistances en flexion	116
Tableau XI : Valeurs des coefficients d’absorption	117
Tableau XII : Caractéristiques de pavés en fonction du trafic	118
Tableau XIII : Résistances mécaniques en fonction du trafic	119
Tableau XIV: Résistances des matériaux obtenus comparées aux normes	119
Tableau XV : Types et caractéristiques des matériaux de revêtement	121
Tableau XVI : Comparaison des résistances obtenues avec les normes	122

Résumé

Notre étude consiste à proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques en confectionnant des matériaux utilisables dans le revêtement routier et de sol intérieur ou extérieur. Pour ce faire deux techniques ont été adoptées : la technique par compactage manuelle et la technique par thermocompression. Dans les deux cas, le sable est mélangé avec du plastique fondu.

Dans l'optique d'améliorer les résistances mécaniques afin d'élargir le domaine d'utilisation des matériaux, un apport en charge d'argile a été fait dans la méthode de thermocompression. Les résultats obtenus ont permis de faire des observations. Ainsi, l'on observe que les résistances mécaniques augmentent avec le taux de déchets plastiques jusqu'à un taux optimal avant de baisser. Pour la technique de compression manuelle ce taux idéal est de 30 % et pour celle de la thermocompression le taux est de 50 %. Dans les deux cas, plus la granulométrie du sable est fine, plus la résistance augmente. Les essais non destructifs (scléromètre et ultrason) ont été faits et comparés avec ceux des essais destructifs. Les résultats ont permis d'établir des modèles prédisant le comportement des matériaux. Les résistances mécaniques de la thermocompression sont plus élevées que celles de la compression manuelle à cause de la pression exercée qui renforce la cohésion entre sable et les déchets plastiques.

L'ajout de l'argile comme charge permet d'augmenter la résistance mécanique et la rigidité du matériau. Cette résistance est élevée quand les particules d'argiles sont plus fines. Le taux de charge idéal est fonction du taux de déchets plastiques. C'est ainsi que pour 20 et 25 % de déchets plastiques, le taux de charge idéal en argile est respectivement de 5 et 7 %. Les différents résultats obtenus ont été aussi comparés avec les exigences des normes concernant les matériaux de revêtement routiers (pavés) et de sol. Il en ressort que les matériaux peuvent être utilisés comme pavés et carreaux de sol.

Mots clés : Déchets plastiques, recyclage, charge, composite, thermocompression, résistance.

Abstract

Our study consists of proposing a method for recycling plastic waste by making materials that can be used in road and interior or exterior flooring. To do this, two techniques have been adopted: the technique by manual compaction and by thermocompression. In both methods, the sand is mixed with molten plastic.

In order to improve the mechanical strength, and to widen the field of use of the materials, a load of clay was made in the thermocompression method.

The results obtained made it possible to make observations. Thus, it is observed that the mechanical strength increase with the plastic waste rate to an ideal rate before falling. For the manual compression technique this ideal rate is 30 % and for the thermocompression the rate is of 50 %. In both cases, when the particle size of the sand is fine, the strength increases.

The non-destructive tests (sclerometer and ultrasound) were made and compared with the destructive tests. The results allowed establishing models predicting the behavior of materials. The mechanical strengths of the thermocompression are higher than those of the manual compression because of the pressure exerted which reinforces the cohesion between sand and plastic waste.

The addition of clay as filler increases the mechanical strength and stiffness of the material. This strength is high when the clay particles are finer. The ideal load rate is a function of the plastic waste level. Thus, for 20 and 25 % plastic waste, the ideal clay loading rate is 5 % and 7 %, respectively. The various results obtained have also been compared with the requirements of the standards for road surfacing materials (paving) and flooring. It emerges that the materials can be used as pavers and floor tiles.

Key words: Plastic waste, recycling, load, composite, thermocompression, strength.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'accroissement démographique, le mode de vie (apparition des supermarchés, conservation d'aliment dans les emballages plastiques...) et la forte demande en infrastructure (logements, routes, nourritures...) s'accompagnent d'une dégradation de l'environnement de façon alarmante. Cette dégradation est incompatible avec le développement durable prôné par nos nations. L'une des causes de cette dégradation est la prolifération des sachets plastiques d'emballage rejetés dans la nature par leurs utilisateurs. Ces plastiques sont omniprésents dans notre vie. Au-delà de leurs atouts, une fois la contenance consommée, ces àplastiques deviennent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Ils occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques et les décharges. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car ils sont non biodégradables par le faite que leur durée de vie peut atteindre jusqu'à 500 ans environ. Les déchets plastiques:

- sont à l'origine de la transmission de plusieurs maladies comme : le paludisme (ils sont à l'origine des eaux stagnantes, gîtes larvaires des moustiques) et la peste.
- bouchent les canaux d'évacuation des eaux usées.
- constituent une pollution visuelle lorsqu'ils sont emportés par le vent, en s'éparpillant dans la nature et parfois, en s'accrochant aux arbres.
- sont à l'origine d'une certaine imperméabilité des sols contribuant ainsi, à la dégradation du milieu naturel (**Zombre, 1997**).... bref ces dechets plastiques dégradent l'environnement.

On estime la quantité de sachets plastiques rejetés à 2 kg au minimum par an et par habitant (**Doublier, 2008**). Ce qui est énorme vue qu'ils sont non biodégradables. Les déchets plastiques constituent environ 11 % des ordures ménagères selon **Balet (2007)**. En Côte d'Ivoire, 80 % de ces déchets plastiques sont des thermoplastiques (**Thiriez et al, 2011**). Selon cette même source seules 8 % de ces plastiques font l'objet de valorisation. Il est alors important de songer au recyclage de ces sachets, pour assainir notre environnement. Aussi, le recyclage des plastiques, issus principalement de la transformation de pétrole, permet de préserver notre ressource non renouvelable qu'est le pétrole, car selon **Chamarande et al (2015)**, chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 à 800 kilos de pétrole brut.

Ainsi, c'est pour être en phase avec les objectifs et les grandes lignes que devrait être le monde futur autour des axes de l'élimination de la pauvreté, de la protection de l'environnement et du développement durable (**Charte de la terre sur l'environnement, 1992**), que cette étude a été initiée. Pour résoudre ces problèmes environnementaux, de nombreuses réflexions sont axées sur la conception de nouveaux matériaux. De nos jours le recyclage des déchets plastiques fait l'objet de nombreuses études. Dans la plupart des travaux les déchets plastiques sont incorporés dans des matrices cimentaires. D'autres méthodes d'utilisation de ces déchets plastiques pour la conception de nouveaux matériaux font également l'objet de nombreuses études.

L'objectif général visé est alors de résoudre un problème environnemental en valorisant les déchets plastiques par la conception de matériaux utilisables et respectant les normes de qualité pour le revêtement. Les objectifs spécifiques visés pour atteindre cet objectif général sont :

- Établir un procédé d'utilisation des déchets plastiques comme liant
- Optimiser les teneurs de déchet plastique
- Caractériser les matériaux élaborés

Pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, notre étude sera structurée autour de trois grandes parties et composée de 9 chapitres :

- ✓ la première constituée du chapitre I et II, traite des généralités relatives à notre sujet.
- ✓ la deuxième partie comprend les chapitres III et IV, où il sera question des différentes techniques de caractérisation de la matière première, de la méthodologie de confection
- ✓ la troisième partie présente les résultats suivie des conclusions et perspectives

La troisième partie est subdivisée en plusieurs chapitres. Ainsi le chapitre V, présentera les résultats de la caractérisation de la matière première. Le chapitre VI sera consacré aux résultats de la caractérisation des matériaux confectionnés à Abidjan. Les chapitres VII et VIII aborderont les résultats de la caractérisation des matériaux confectionnés à Belfort. La troisième partie du document se termine avec le chapitre IX qui présente une comparaison entre les différents échantillons afin de leur attribuer un domaine d'application. Puis nous terminerons par une conclusion, des perspectives et les références bibliographiques.

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

Chapitre I :

LE PLASTIQUE

Introduction

Depuis l'apparition des supermarchés et le mode de conservation de certains produits, l'emballage en plastique est devenu inévitable dans le quotidien du consommateur. Une fois son rôle rempli, l'emballage est rejeté avec les ordures ménagères. La prolifération des emballages en plastiques qui sont des produits non biodégradables pose des problèmes pour l'environnement qu'il faut absolument résoudre. Une solution serait le recyclage de ces déchets en les utilisant pour la confection de matériaux de construction.

Ce chapitre fait un point bibliographique sur le plastique et des définitions à la compréhension de ce travail.

I.1 Définition et historique

Le plastique est une matière synthétique composée de polymères, qui a la propriété d'être moulée ou modelée facilement après chauffage et qui peut être souple ou rigide. On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes (**Weiss, 2009**). La majorité des plastiques (99%) utilisée dans le monde est fabriquée à partir de pétrole et de gaz naturel (**Doublier, 2008**). L'histoire des matières plastiques débute en 1869 (**Aubry, 2014**). A la suite d'un concours, dont l'objet était de trouver une matière destinée à remplacer l'ivoire naturel des boules de billard, les frères HYATT(USA), mirent au point le celluloid (ou nitrate de cellulose) produit d'origine végétale (bois, coton). En effet à la fin du XIX^{ème} siècle, il existait plutôt à l'échelle artisanale qu'industrielle, quelques matériaux plastiques dont les plus importants à base de matières naturelles étaient le celluloid et la galalithe.

C'est en 1909 qu'un chimiste belge Baekeland a découvert les résines formo-phénoliques dont l'exploitation dès 1920 sous le nom de BAKELITE marque véritablement le début de l'ère des plastiques (**Aubry, 2014**).

De 1920 à 1940 on assiste au développement de ces résines de condensation phénol/formol qui grâce à leurs propriétés isolantes, ont contribué à l'essor de l'électricité.

De 1940 à 1950 naît industriellement la première matière thermoplastique utilisée à grande échelle. C'est le chlorure de polyvinyle (PVC) plastifié, employé pendant la guerre pour remplacer le caoutchouc impossible à importer. En 1950 on assiste au développement des transports automobiles et au besoin croissant en pétrole comme source d'énergie. La pétrochimie permet alors la naissance d'une multitude de matériaux thermoplastiques, dérivés des carbures oléfiniques obtenus par cracking des produits pétroliers : éthylène, benzène, propylène, phénol etc.... Le tableau 1 résume l'histoire du développement du plastique.

Tableau I : Dates détaillées de l'histoire du plastique (Aubry, 2014)

INVENTION	DATE	HISTORIQUE
Caoutchouc	1736	Caoutchouc naturel découvert par le français Charles Marie en mission au Pérou.
Nitrate de cellulose	1833	Première application industrielle de poudre de coton par l'allemand Schoenbein
vulcanisation	1839	Stabilisation des propriétés du caoutchouc le rendant utilisable par l'américain Goodyear
Caoutchoucs artificiels	1860	Isolation de l'isoprène par l'anglais C.Williams
Acétate de cellulose	1869	Les frères HYATT fabriquent des boules de billard en mélangeant à chaud un plastifiant le camphre et une substance végétale la nitrocellulose
Bakélite	1909	Première matière plastique synthétisée par le Belge Baekeland installé aux Etats Unis.
PVC	1913	Polymérisation du chlorure de vinyle par l'allemand Klatte.
polymères	1922	Mise en évidence de la structure particulière des polymères par l'allemand H. Staudinger
plexiglas	1924	Barker et Skinner obtiennent un verre organique le poly méthacrylate de méthyle connu sous le nom de plexiglas
Polystyrène	1933	Mise au point par l'allemand Wuff
Polyamide (nylon, kevlar)	1935	Mise au point chez Du Pont de Nemours(USA) les premières fibres polyamides par W.Carothers
polyuréthanes	1937	Inventés par Otto Bayer
Téflon	1938	Le Tétrafluoréthylène (téflon) est découvert par R.J.Plunkett ingénieur chez Du Pont de Nemours
polyesters	1938	Premières polyesters thermodurcissable par Ellis
polyéthylènes	1939	Première gammes de polyéthylènes basse densité(PEBD) obtenues par Fawcett et Gobson suivit du polyéthylène Haute Densité(PEHD) par l'allemand Karl Ziegler en 1953
polypropylène	1954	Polymérisation du propylène par l'italien Natta
PEba	1981	Nouvelle famille de matières synthétiques créée par Gérard Deleens, intermédiaire entre les élastomères (caoutchouc) et les plastiques

I.2 Synthèse des polymères (polymérisation)

Il y a deux types de réactions permettant de produire les polymères (**Weghe, 2010**):

- les réactions d'addition (mécanisme en chaîne)
- les réactions de condensation (mécanisme par étapes)

I.2.1 Réactions d'addition

Les polymères d'addition résultent de **réactions en chaîne** provoquées par des centres actifs prenant naissance dans le milieu. Il y a création d'un site actif localisé à l'extrémité du polymère en croissance. Une fois que la formation de cette entité réactive (ou site actif) a eu lieu, il n'y a plus de barrière à la création d'un très grand nombre de liaisons successives.

Trois sortes de site actif:

- électron célibataire = polymérisation radicalaire
- charge positive = polymérisation cationique
- charge négative = polymérisation anionique

Il existe un quatrième mode, particulier, pour déclencher la polymérisation, c'est la polymérisation par coordination.

La polymérisation en chaîne comporte 3 étapes (en général):

- **amorçage** = étape au cours de laquelle il y a création d'un nombre limité d'espèces actives,
- **propagation** = réactions successives de molécules de monomères sur une extrémité active ou activée conduisant à l'allongement de la chaîne macromoléculaire,
- **terminaison** = désactivation de l'espèce ou de l'extrémité active et arrêt de la croissance de la chaîne.

I.2.2 Réactions de condensation

Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes.

Les polyamides, les polyester et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par polycondensation.

Dans ce cas, les réactions qui démarrent la polymérisation, appelées réactions d'initiation, sont de type ionique.

Par un choix judicieux du groupement ionique initiateur, on peut dans certains cas obtenir une réaction stéréospécifique, c'est-à-dire que la disposition des monomères dans le polymère n'est pas aléatoire, mais au contraire orientée. C'est la seule façon d'obtenir des polymères semi-cristallins aux propriétés mécaniques particulières, et qui ont, par exemple, donné lieu à des applications dans le domaine des élastomères de synthèse. Alors que dans la polymérisation par addition, tous les atomes des monomères se retrouvaient dans le polymère, la polymérisation par condensation entraîne des réactions chimiques qui produisent la formation de sous-produits. Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes. Les deux monomères en présence donnent naissance à une molécule intermédiaire, laquelle constitue l'élément fondamental qui se répète dans la macromolécule.

I.3 Structures des polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés (**Lecomte-Beckers, 2009a**). Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être partiellement, cristallisés.

I.3.1 Polymères linéaires

Ces polymères sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. La figure 1 donne différents exemples de polymères linéaires.

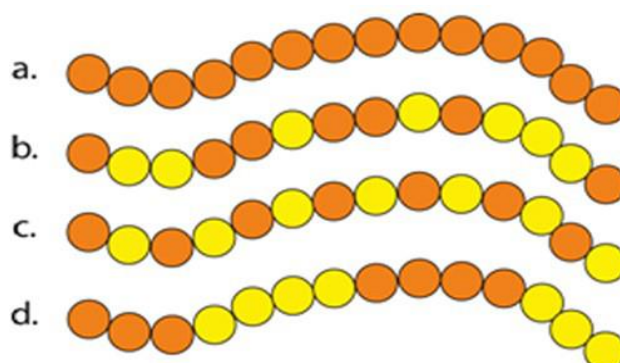


Figure 1 : Représentation schématique de polymères linéaires :

a : homopolymère ; b: copolymère statistique ; c: copolymère alterné ; d : copolymère séquencé (**Weiss, 2009**).

I.3.2 Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.

La figure 2 montre les différents types de polymères ramifiés.

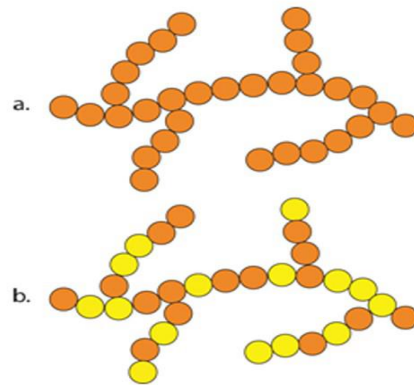


Figure 2 : Représentation schématique de polymères ramifiés (a:Homopolymère ramifié et b : copolymère ramifié) (Weiss, 2009).

I.3.3 Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau (Figure 3).

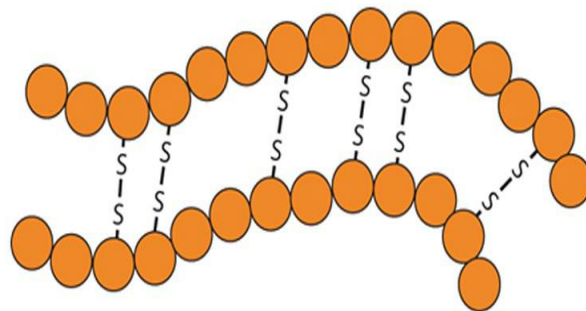


Figure 3 : Représentation schématique de polymères réticulés (Weiss, 2009).

I.3.4 Polymères amorphes et polymères cristallisés

En fonction de la structure physique des polymères, on peut les classer en trois types d'état (Seyni, 2008, Charmet, 2015) :

- **l'état amorphe**, dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux (où le matériau se comporte comme un verre, c'est-à-dire dur et cassant) à un état caoutchouteux (où les chaînes peuvent glisser plus facilement), ainsi qu'une transparence dans le visible comme cela est le cas du polystyrène « cristal » ou du poly (chlorure de vinyle) « cristal » qui sont tous deux amorphes.
- **l'état cristallin**, caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le polymère est décrit par son réseau et son motif. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.
- **l'état semi cristallin** constitué de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement élevées.

Ces trois états sont représentés sur la figure 4.

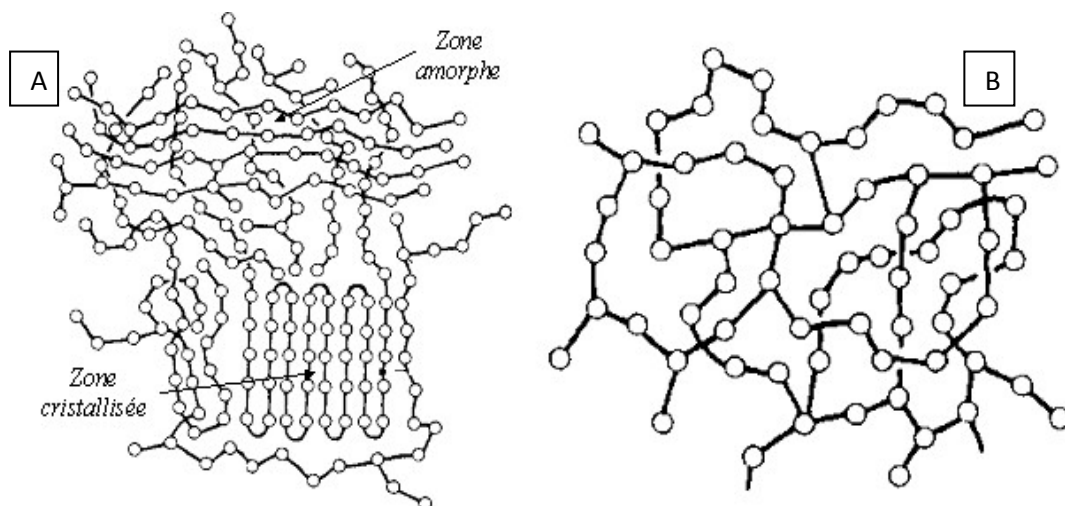


Figure 4 : Structure des polymères (A : amorphe partiellement cristallisé et B : fortement réticulé par de nombreux ponts covalents interchaînes).

I.4 Différents types de plastiques (polymères)

Il existe trois grandes catégories de polymères : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.4.1 Thermoplastiques

Les polymères ou les résines thermoplastiques sont des composés, dérivés d'éléments constitutifs organiques se formant naturellement, qui fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières «transformables à l'état fondu », ce qui signifie qu'on peut leur donner des formes utilisables lorsqu'elles sont en phase liquide (fondues) ou visqueuse. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage par injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme.

En fonction de la polymérisation on obtient différents produits qui sont :

- les PVC (Chlorure de Polyvinyle),
- les polyéthylènes,
- les polystyrènes et
- les polypropylènes.

La figure 5 résume le mode de fabrication des principaux thermoplastiques.

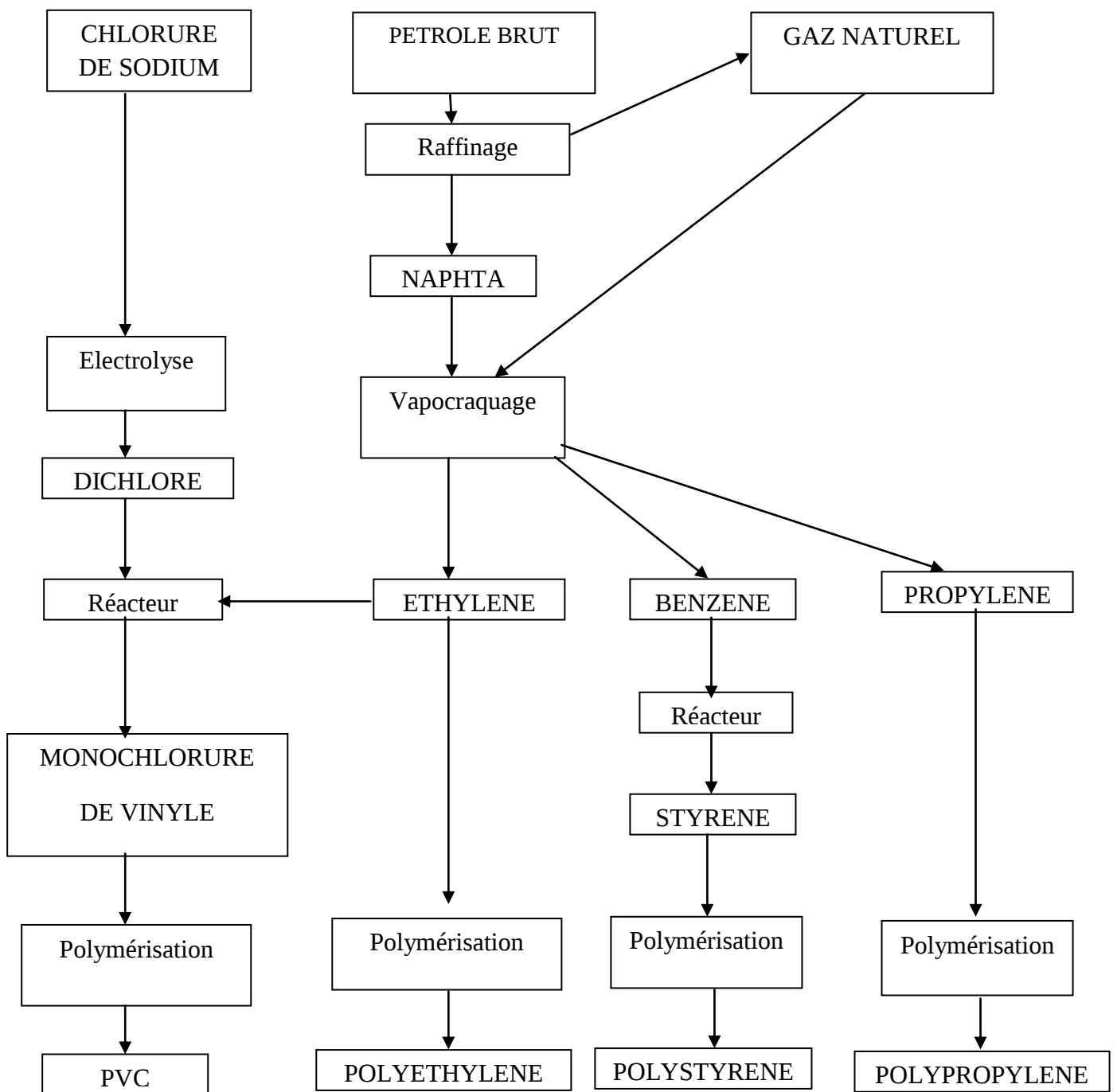


Figure 5 : Modes de fabrication des principaux thermoplastiques (Balou, 2009).

I.4.2 Thermodurcissables

Une matière thermodurcissable est un polymère qui durcit sous l'action de la chaleur.

Les molécules le constituant (monomères) se lient les unes aux autres pour le rendre plus rigide en formant un réseau tridimensionnel.

Une matière thermodurcissable ne peut être mise en œuvre qu'une seule fois. Il n'est donc pas recyclable. La mise en œuvre des thermodurcissables implique la réalisation d'un réseau tridimensionnel dans le moule. C'est-à-dire que la matière liquide ou visqueuse va devenir définitivement solide : c'est **la réticulation**. Lorsque la matière est solide, on dit qu'elle est réticulée. Il existe 3 méthodes de transformation :

- L'injection : un ensemble vis / piston semblable à celui de l'injection des thermoplastiques permet un préchauffage et une plastification de la matière thermodurcissable, puis l'injection dans le moule chaud, où va se produire la réticulation.
- La compression : La matière est placée dans un moule chaud. Ce dernier se ferme sur la matière.
- La compression transfert : La matière est placée dans un cylindre chauffant et un piston pousse la matière dans les empreintes.

I.4.3 Elastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale), et sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles.

Ces polymères sont donc des liquides très visqueux. Pour être utilisées comme caoutchouc, des liaisons pontales (nœuds de réticulation) doivent être introduites entre les chaînes, conférant ainsi aux matériaux une structure tridimensionnelle qui assure la réversibilité de la déformation mécanique. Les nœuds de réticulation sont introduits par une réaction chimique appelée vulcanisation après la mise en forme du matériau.

I.5 Propriétés mécaniques des polymères

Les résistances mécaniques sont variables suivant la composition chimique. Dans l'ensemble les polymères sont souvent plus résistants et plus légers que les pièces métalliques assurant les mêmes fonctions. La résistance à la traction et à la compression ainsi que la dureté dépendent essentiellement de la nature et de la cohésion entre les chaînes de polymères.

La résistance au choc est liée non seulement à la cohésion intermoléculaire, mais aussi à la dissipation de l'énergie dans le matériau: un plastique mou est moins cassant qu'un plastique dur. L'incorporation de micro-granules d'élastomères dans le polystyrène, par exemple, rend cette matière très résistante aux chocs.

Quelques résistances des plastiques usuels sont résumées dans le tableau II suivant (**Marc, 2016 ; Fond, 2015 ; Lecomte-beckers, 2009b ; Vivier, 2006**) :

Tableau II: Quelques propriétés des polymères

Polymères		Densité	T° fusion (°C)	Résistance compression (MPa)	Limite d'élasticité	Module de Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Thermoplastiques	PEHD (polyéthylène haute densité)	0,94 à 0,95	200	15 à 23	25	1	50
	PEBD (polyéthylène basse densité)	0,90 à 0,93	120 à 170	7 à 10	15	0,2	500
	PVC (polychlorure de vinyle)	1,4	125	20 à 50	40	2 à 3	20 à 70
	PET (polyéthylène téréphtalate)	1,34	200 à 255	12 à 15	20	2,7 à 4,1	40
	P.S (poly styrène)	1,04	160	10 à 30	15	2,3 à 4,1	3
	P.P (poly propylène)	0,90	165	12 à 35	15	1,3	20
	Polyester	1,7	260	40 à 60	10 à 20	2	400 à 500
	Epoxyde	1,1	260	50 à 80	10 à 20	2	400 à 500
Thermo durcissables							
Elastomères	Poly Isoprene (latex)	0,95	280	28	30 à 60	1	100 à 800
	Poly butadiène	0,97	280	50 à 100	30 à 60	1	100 à 800

I.6 Importance et domaine d'utilisation des plastiques

I.6.1 Importance

Les plastiques, relativement rares dans notre environnement au milieu du XX^e siècle, sont bien présents aujourd'hui autour de nous. C'est parce que ces plastiques possèdent beaucoup de qualités.

- **Les plastiques sont peu coûteux.** Ils sont fabriqués à partir d'une matière première encore relativement abondante et, jusqu'à récemment, pas chère : le pétrole.
- **Les plastiques ont des propriétés physico-chimiques variées.** Suivant leur composition, ils peuvent être élastiques ou rigides, durs ou malléables, résistants à la chaleur, aux chocs, aux produits agressifs et dangereux comme les acides.
- **Les plastiques peuvent être facilement modelés ou moulés,** pour prendre les formes souhaitées les plus variées, même les plus complexes. Ainsi, le toit du grand stade de Pékin, le fameux « nid d'oiseau » temple des jeux olympiques d'été 2008, est en plastique armé d'acier.
- **Les plastiques sont légers** et donc moins coûteux à transporter que les matériaux à base de métal ou de bois. Grâce aux plastiques, le poids moyen d'une automobile a été ainsi réduit de 200 kg (**Doublier, 2008**). Cela a permis une baisse importante de la consommation d'essence. De la même manière, le poids des emballages de toutes sortes (nourriture, conteneurs divers, marchandises variées...) a été fortement réduit grâce à l'utilisation des plastiques, tout en leur conservant leurs qualités de résistance : un grand plus pour les économies de carburant utilisé pour les transports.
- **Les plastiques sont d'excellents isolants thermiques.**
- **Les plastiques sont relativement durables.** Ils sont peu sensibles à la corrosion et aux intempéries. Ainsi, des tuyauteries en plastique peuvent facilement durer au-delà de cinquante ans. Et les peintures des automobiles, en polyuréthane, sont particulièrement résistantes.
- **Les plastiques sont faciles à nettoyer.**
- **Les plastiques utilisés comme une barrière de protection.** Les aliments se conservent plus longtemps dans des boîtes plastiques. Etant imperméable le plastique contribue ainsi à limiter la contamination venant de l'extérieur.

Les sacs poubelles en plastique sont très hygiéniques. Les jouets en plastique sont plus sûrs pour les enfants. Le casque de la moto, composé de différents plastiques, et les airbags d'automobile sont des éléments essentiels de survie en cas d'accident grave. Et le préservatif est indispensable pour la lutte contre les MST.

▪ **Les plastiques permettent un stockage massif de données** sur un support de petite taille (CD, DVD, cartes mémoire...).

▪ **Les plastiques permettent d'économiser l'énergie** et de lutter contre le réchauffement climatique. Si on remplaçait les plastiques d'emballage par des matériaux traditionnels, la consommation mondiale d'énergie serait doublée (**Doublier, 2008**).

▪ **Les plastiques sont en partie recyclables**. Pour ceux qui ne le sont pas, on peut les incinérer et ainsi récupérer de l'énergie sous forme de chaleur.

I-6.2 Domaine d'utilisation

Les plastiques sont utilisés dans de nombreux domaines. En voici quelques-uns :

- **Les emballages** : ce secteur est le plus gros consommateur de plastiques. On les utilise pour stocker, transporter, protéger et conserver toutes sortes de produits, en particulier des produits alimentaires. .

- **Le bâtiment et la construction** : les plastiques y sont souvent cachés, cependant indispensables. Ils sont utilisés pour leurs propriétés vitales :

- durabilité et résistance à la corrosion (châssis de fenêtres, tuyauteries),
- isolation contre le froid, la chaleur et le bruit (cloisons),
- faible coût,
- maintenance minimale ou nulle (par exemple pas besoin de les repeindre),
- hygiène et propreté (faciles à nettoyer),
- économie de ressources (faible coût + facilité d'installation + longue durée de vie).

- **Les transports** : les nouvelles générations de plastiques légers permettent des économies d'énergie notables. Les voitures, les trains, les avions deviennent plus légers en intégrant de plus en plus de matières plastiques. Ils apportent en même temps un confort agréable aux usagers, par exemple en permettant une augmentation de pression et de taux d'humidité dans les avions.

- **L'électricité et l'électronique** : les plastiques permettent d'améliorer les performances dans ce secteur : réduction du poids, miniaturisation, isolation électrique et thermique. Les plastiques sont solides, flexibles et faciles à mouler, d'où leur présence importante dans beaucoup d'équipements. Les plastiques sont connus pour leur qualité d'isolation électrique.

- **L'agriculture** : l'utilisation des plastiques dans l'agriculture permet des rendements accrus, des récoltes plus précoces, une moindre dépendance vis-à-vis des herbicides et des pesticides, une meilleure protection des produits alimentaires et une conservation plus efficace de l'eau. Par exemple, dans les régions arides, des systèmes de drainage en plastique peuvent diviser les frais d'irrigation par deux ou trois et en même temps doubler le rendement.

- **Le secteur médical** : les soins médicaux modernes nécessitent l'utilisation des plastiques (seringues jetables, poches de sang, valves cardiaques...). Beaucoup d'appareils orthopédiques et de prothèses sont aujourd'hui en plastique. Certains comprimés sont entourés d'un polymère qui se dégrade lentement, et libère le médicament peu à peu ou au bon moment.

- **Le sport** : les plastiques ont révolutionné les équipements sportifs, les rendant plus efficaces et techniques que jamais. Ainsi pour :

- les ballons de football sont résistants à l'eau et à l'abrasion, et les trajectoires sont plus prévisibles,
- les chaussures de sport sont légères, résistantes,
- les raquettes de tennis sont plus solides, légères et puissantes, absorbant mieux les chocs,
- les équipements nautiques en plastiques composites sont légers et très résistants pour la coque, les structures et le mât des navires, pour les planches à voile et de surf...;
- équipements de ski.

De ces utilisations diverses découle une production importante de plastique dans le monde.

Les figures suivantes (6 et 7) montrent quelques données sur le plastique.

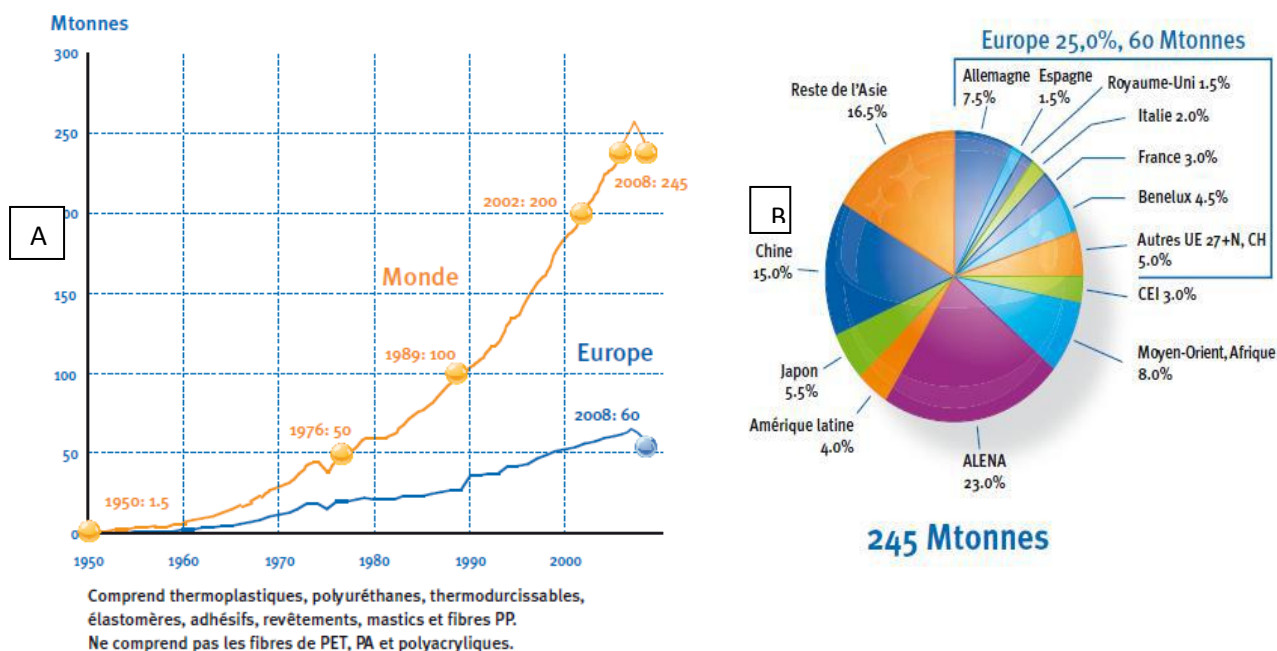


Figure 6 : Production du plastique dans le monde [A : évolution ; B : répartition] (Duranel, 2011).

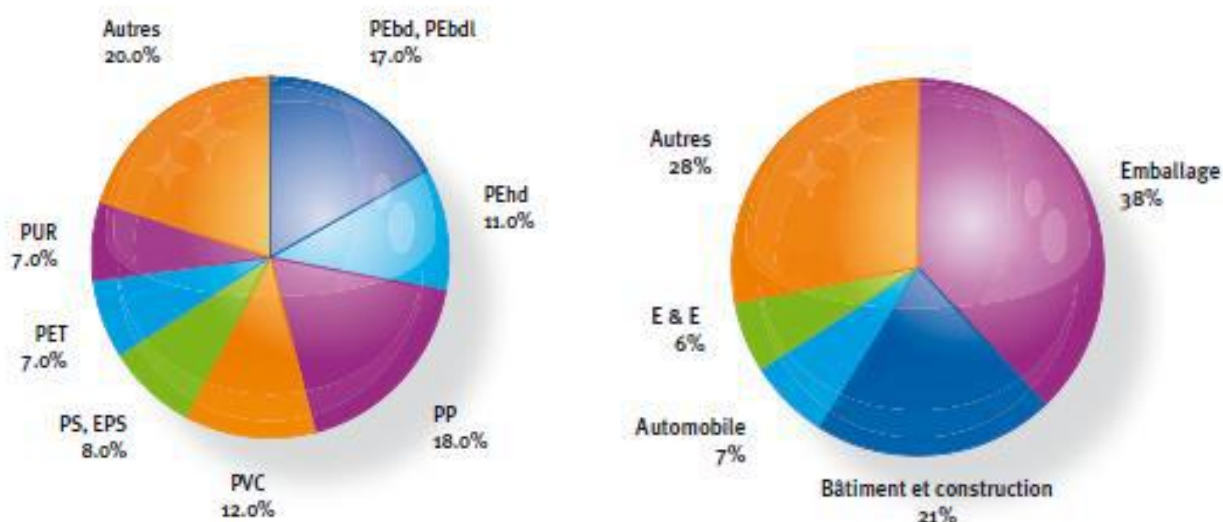


Figure 7 : Demande des différents types de plastique par secteur d'activité (Duranel, 2011).

I.7 Déchets plastiques

Les déchets plastiques proviennent des résidus de processus de production, de transformation et de consommation. Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques.

I.7.1 Déchets plastiques industriels

Ces déchets sont constitués de l'ensemble des déchets issus des processus de production des résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets. Les déchets de production proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des lots déclassés.

Ils présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC).

Quant aux déchets de transformation, elles proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage, . . .). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine.

Ces déchets qui peuvent être homogènes comme fortement hétérogènes (mélanges provenant de la co-extrusion, co-injection, . . .) sont, en général, très peu souillés.

I.7.2 Les déchets plastiques de post-consommation

C'est l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. Les déchets plastiques utilisés au cours de cette étude se classent dans cette catégorie.

On distingue :

- Les déchets agricoles constitués essentiellement de films, sacs, fûts et bidons de produits phytosanitaires. La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution. Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PEBD, PEHD et PP).
- Les déchets commerciaux ou de distributions constituées d'emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, bidons, sacs de grande contenance dans les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits.

Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés pour le calage lors du transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticole.

- Les déchets électriques et électroniques issus de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre.
- Les déchets ménagers qui sont essentiellement constitués par les emballages.

Pour ce gisement, les matières principales concernées sont: le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales, . . .), le PEHD (bouteilles de lait, produits lessiviels, . . .), le PEBD (sacs d'emballage) et le PVC (bouteilles d'eau minérale, . . .).

- Les déchets du bâtiment et des travaux publics proviennent de l'huissierie, les tuyaux, revêtements de sols, profilés de fenêtre, conduits électriques, câbles, mousses d'isolation. Ces matériaux sont très fortement mélangés et leur degré de pollution est souvent élevé.
- Les déchets de véhicules de transport sont représentés par l'ensemble des plastiques constituant les véhicules hors d'usage (VHU) (en moyenne 14% en masse du véhicule). Ces déchets constituent une fraction très hétérogène par rapport à la nature et l'âge. On y retrouve des polyoléfines, du PVC, des polycarbonates, ABS et des polyamides, des polyuréthanes, des résines thermodurcissables diverses, sans oublier les élastomères. Cette fraction ne cesse de croître du fait que les véhicules s'allègent de plus en plus et les équipements de sécurité sont en plein développement.

I.8 Recyclage du plastique

Le recyclage du plastique est considéré comme l'une des meilleures voies de prise en compte du développement durable. Il est devenu, à cet effet, une priorité en termes de gestion du développement durable (**Coulibaly, 2008**).

Jusqu'à récemment, la plupart des objets plastiques en fin de vie étaient mis en décharge. La tendance, aujourd'hui, est de valoriser au maximum ces plastiques usagés (non biodégradables), soit en les recyclant, soit, si cela n'est pas possible pour des raisons techniques ou économiques, en les brûlant dans des incinérateurs pour produire de l'énergie.

Pour le recyclage de ces plastiques, il n'existe pas de bon ou de mauvais moyen, ni de voie unique. En la matière, les systèmes de gestion varient selon les pays en fonction de leurs particularités, de leurs choix stratégiques et des technologies disponibles. En outre, les conditions n'étant pas les mêmes en zone rurale et en zone urbanisée, plusieurs solutions différentes peuvent être mises en œuvre dans un même pays.

La valorisation des matières plastiques prend une ampleur de plus en plus considérable, du fait de l'évolution des réglementations sur l'écologie et les demandes sociétales et associatives pour la préservation et la qualité de l'environnement. Quelques codes d'identification de matières plastiques en fonction de leur recyclabilité ont été déterminés **(Gervais ,2010 ; CSEMP, 2004 ; Society of Plastic Engineers, 2008 ; Hannequart, 2004)** et sont énumérés dans le tableau III.

Tableau III : Symboles et caractéristiques des différents types de plastiques recyclables (Gervais, 2010 ; CSEMP ,2004 ; SPI, 2008 ; Hannequart, 2004)

N° de recyclage	Abréviations	Nom du polymère	Utilisation
	PETE ou PET	Polyéthylène téréphtalate	Recyclable pour produire des bouteilles de limonade, des plateaux de traiteur et de boulangerie, des vêtements, des tapis, des pinceaux, etc.
	HDPE ou PEHD	Polyéthylène haute densité	Recyclable pour produire des bouteilles, sacs à provisions, poubelles, tuyaux agricoles, sous-tasses, barrières, équipement de terrains de jeu, bûches plastiques, Conteneur d'acide (le PEHD est un plastique qui résiste aux acides)
	PVC	Polychlorure de vinyle	Recyclable pour produire des tuyaux, des profilés pour la construction (fenêtres, lames de terrasses, portails...) des grillages et des bouteilles non-alimentaires.
	LDPE ou PEBD	Polyéthylène basse densité	Recyclable pour fabriquer des sacs et films plastiques.
	PP	Polypropylène	Recyclable en pièces de voiture, cabarets, tapis et fibres géo-textiles et industrielles.
	PS	Polystyrène	Recyclable dans une grande variété de produits incluant accessoires de bureau, cabarets, jouets, cassettes vidéos et boîtiers, et panneaux isolants.
	OTHER	Autres plastiques, incluant le polycarbonate, l'acrylique et le nylon	

Il existe en général trois grandes méthodes de valorisation du plastique (**Bruneau, 2015**) :

- **La valorisation énergétique** consiste à incinérer les déchets plastiques pour récupérer l'énergie qu'ils contiennent sous forme de chaleur. Les plastiques, composés de pétrole raffiné, ont une capacité calorifique proche de celui-ci. Cette méthode de valorisation permet de recycler une grande partie des déchets plastiques.

En revanche si elle est mal maîtrisée elle peut présenter des risques majeurs pour l'environnement et la santé des êtres vivants par l'émission de dioxines et de HAP, molécules cancérigènes présentes dans les fumées.

- **La valorisation mécanique,** consiste à réutiliser les déchets plastiques avec un minimum de transformation de la matière. Cette technique est utilisée pour le traitement des déchets thermoplastiques. Elle repose avant tout sur une collecte sélective ou un tri des déchets plastiques à partir des ordures ménagères. Il est très souvent nécessaire d'avoir des déchets plastiques triés par type de résine plastique. Plus le tri est efficace, plus le produit obtenu est de bonne qualité. Les techniques de recyclage des déchets plastiques par cette méthode les plus connus sont : La régénération et la fabrication d'éléments de construction.

La régénération des matières plastiques est la technique la plus employée à travers le monde, que ce soit dans les pays du nord comme ceux du sud, puisque ce procédé permet de valoriser tous les thermoplastiques, soit 75 % de la production mondiale de plastique. La régénération consiste à produire de la poudre, des granulés ou du broyat à partir de déchets plastiques, comparables aux résines vierges, pour les réintroduire sur le marché international des résines plastiques.

Cette technique impose une grande rigueur sur le tri des plastiques (car les différentes résines thermoplastiques sont non miscibles entre elles) et sur la propreté de la résine, pour qu'elle soit reprise par les industriels. La régénération est la technique la plus efficace en termes de rendement de valorisation matière des déchets plastiques. Mais elle nécessite un équipement relativement coûteux et des compétences techniques.

La fabrication d'éléments de construction consiste à utiliser le plastique (et notamment les sachets plastiques) comme liant, en remplacement du ciment, afin de produire différents éléments de construction comme des pavés, des briques, des tuiles... Cette technique, qui présente l'avantage de nécessiter de faibles investissements et permet de valoriser les sachets même non lavés, a beaucoup attiré l'attention en Afrique. Elle a été testée par de nombreuses structures avec plus ou moins de succès.

La méthode la plus aboutie aujourd'hui est celle de Garoua au Cameroun, améliorée par la suite par Madacompost à Madagascar, au Burkina Faso avec GAFREH (Groupe d'Action des FEMMES pour la Relance Economique du Houet) à Bobo Dioulasso et AIRTAE (Association pour l'Innovation et la Recherche Technologique Appropriée en Environnement) à Ouagadougou et au Niger avec le RESEDA.

- **La valorisation chimique** consiste à transformer la matière plastique en molécule de base (polymère, ester...), pouvant servir à la synthèse d'une nouvelle matière plastique, ou pour la pétrochimie. Ces technologies sont encore peu développées ou limitées à certaines natures de résines plastiques. On ne les utilise que dans les pays du Nord et les pays émergents.

Conclusion

Le plastique est fabriqué à partir du pétrole ou du gaz naturel. En raison des propriétés qu'on leur connaît, les matières plastiques occupent une place prépondérante dans l'ensemble des produits de consommation. Leur présence dans la nature et la longévité qui leur est associée créent des impacts sur les écosystèmes terrestres et marins. Leur recyclage s'avère être nécessaire afin de protéger notre environnement.

Chapitre II :

GÉNÉRALITÉS SUR LES

MATIÈRES PREMIÈRES

ET MATÉRIAUX

COMPOSITES

Introduction

L'objectif de notre étude est de proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques par la conception de matériaux utilisables dans la construction. Les matières premières utilisées lors de cette étude sont : le plastique, le sable et l'argile. Les matériaux confectionnés, sont des composites. Aussi, pour améliorer les propriétés de ceux-ci, une charge en argile est envisagée. Dans ce chapitre, une bibliographie sur le sable et l'argile est faite afin d'avoir quelques informations sur leur formation et leur utilités dans la construction. De même, les différents types de charge et de composites seront énumérés.

II. 1 Sable

II.1.1 Définition

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation de roches sous l'action de divers agents (vent, eaux courantes, gel). C'est une matière première qui est souvent le produit de la décomposition du granite du fait de l'altération. Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : noir ou blanc.

II.1.2 Formation des sables

Le sable se forme à la suite de phénomènes physiques et chimiques auxquels sont soumises les roches. Les processus physiques fragmentent les roches en des éléments de taille réduite qui sont les blocs, les graviers, les sables, les limons et les argiles. Dans le processus de formation des sables l'action physique est prépondérante.

Sous l'action de processus physiques (vent, eau) ou chimiques (action dissolvante de l'eau), ces éléments sont entraînés par les eaux de ruissellement. Au cours du transport, ils vont subir des variations de taille et de morphologie en fonction du moyen de transport. Les particules vont se déposer ou être drainées généralement jusqu'à la mer. C'est ainsi que les sables se retrouvent sur les plages ou dans les lits des cours d'eau.

II.1.3 Composition minéralogique

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

II.1.4 Classification des sables.

➤ Classification suivant la nature du sédiment :

Les sables sont classés suivant beaucoup de paramètres et suivant le domaine d'activité. Ainsi en géologie en fonction de la nature du matériel à l'origine de sa formation on parlera de sable détritiques (issus de roches préexistantes), ou de sables bioclastiques (issus de la fragmentation puis accumulation de squelettes ou coquilles d'organismes marins).

En géologie de l'ingénieur ou génie civil, on classe les sables en fonction de l'origine ou de la granulométrie.

➤ Classification suivant l'origine :

Sable naturel

On parle de sable naturel lorsque le sable est issu de l'altération des roches préexistantes. Il s'agit de sable extrait des lits des cours d'eau (fleuves et rivières), de la lagune (cas de la ville d'Abidjan) ou de la mer (dans certains pays, même si de plus en plus l'exploitation de ce sable est interdite)

Sable artificiel

Il s'agit de sable obtenu par concassage des roches. C'est le sable qui est directement lié à l'action de l'homme. Ce sont très souvent les sous produits des carrières de concassés de roches.

➤ **Classification suivant la granulométrie :**

Dans ce type de classification, le critère principal est la taille des particules. La classe des sables varie selon le système de classification ou le domaine d'activité. Tous les systèmes de classification admettent principalement cinq (5) sous classes qui sont :

- le sable très fins (diamètre des grains de 0,0625 à 0,125 mm)
- le sable fin (de 0,125 à 0,25 mm),
- le sable moyen (de 0,25 à 0,5 mm),
- le sable grossier (de 0,5 à 1 mm),
- le sable très grossier (de 1 à 2 mm).

II.1.5 Utilisation du sable

Le sable est l'une des matières premières dans la construction. Il constitue également la principale matière première de l'industrie du verre.

Le sable, du fait de son abondance et de sa facilité d'exploitation, est utilisé dans de nombreux domaines d'activités.

C'est l'une des principales matières premières utilisées dans le génie civil. Il est utilisé aussi bien dans le domaine routier que dans celui du bâtiment.

Dans la construction des routes, le sable est utilisé comme matière première de remblai, couche de base et couche de finition.

Dans le bâtiment, il est employé dans la composition de béton, du mortier et la confection des briques (parpaing sable ciment).

Le sable est le principal composant de la plate forme sur laquelle sont posés les pavés, pour les chemins et les routes secondaires, les parkings et les garages etc.

Le sable est encore très utilisé en fonderie, où il est employé pour la réalisation des moules. Par ailleurs, il intervient dans la fabrication de céramiques.

Le sable est également largement utilisé pour ses propriétés abrasives (cas du papier de verre recouvert de sable). Il peut aussi être utilisé pour un décapage à la sableuse afin de nettoyer certaines surfaces (la pierre, par exemple) ou pour aplanir des surfaces de métal grossier (avec de la vapeur sous pression chargée de sable).

En milieu naturel, le sable accumule des minéraux lourds alluvionnaires, permettant l'extraction de certains minéraux dont l'or, les diamants, la cassitérite (minerai d'étain), la magnétite (oxyde de fer) ou l'ilménite (oxyde de fer et de titane).

Le sable est un élément important dans le domaine touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte **(Enongo et Dongo, 2009)**.

II.2 Argile

II.2.1 Définition

Il n'existe pas de définition unique pour le mot «argile». La définition dépend de la discipline d'étude ou du domaine d'activité (Géologie, Génie civil, Pédologie, Céramique).

L'origine du terme Argile vient du grec ARGILOS dont la racine ARGO signifie blanc ou du latin ARGILLA, couleur blanche des matériaux utilisés en céramique.

Ce terme désigne actuellement à la fois

- une taille de particule,
- un minéral,
- et une roche.

Une argile est donc soit une particule dont le diamètre est inférieur à deux microns ($< 2\mu\text{m}$), soit un minéral appartenant au groupe des phyllosilicates ; soit une roche essentiellement composée de minéraux argileux. L'homme utilise les argiles depuis longtemps pour les nombreuses propriétés qu'elles possèdent.

II.2.2 Formation des argiles.

Les argiles se forment à la suite de phénomènes physiques et chimiques connus sous l'appellation d'altération auxquels sont soumises les roches. Les processus physiques débitent les roches en des éléments de petite taille à savoir les blocs, les graviers, sables, les limons et les argiles ; ces processus sont favorisés par le climat (variation de température). Quant aux processus chimiques ils entraînent une évolution minéralogique et sont dus essentiellement au phénomène d'hydrolyse. L'hydrolyse correspond à l'attaque d'une roche par l'eau pure ou chargée en CO_2 dans les conditions de pH moyen. Elle consiste en une réaction chimique entre les minéraux (les sels) et l'eau pour former un acide ou une base et se traduit par la soustraction progressive d'ions à partir de matériel parental. L'hydrolyse attaque les parties les plus exposées des roches (les fissures, les surfaces externes).

Les ions les plus mobiles sont soustraits en premiers (K, Na, Ca, Mg, Sr). Les éléments de transition sont évacués plus tard (Mn, Ni, Cu, Co, Fe) mais avant Si. Il reste alors Al, l'élément le moins mobile (**Chamley, 1987 in Kouadio, 2010**). Selon les conditions de drainage et d'évacuation des solutions, il se forme différents minéraux argileux. Pour un drainage peu intense, les minéraux secondaires conservent un rapport Si/Al élevé (rapport de 2; on parle de bisialitisation) conduisant à la formation de minéraux argileux de type 2/1 (smectites). Un drainage moyen permet la formation de minéraux argileux de types 1/1 (rapport Si/Al de 1, on parle de monosialitisation) lorsque le drainage est intense, toute la silice est évacuée (on parle dans ce cas d'allitisation) et il se forme plutôt des oxydes (gibbsite). En fonction du type d'hydrolyse on distingue différents gisements d'argile (figure 8) :

- les argiles héritées,
- les argiles transformées,
- les argiles néoformées.

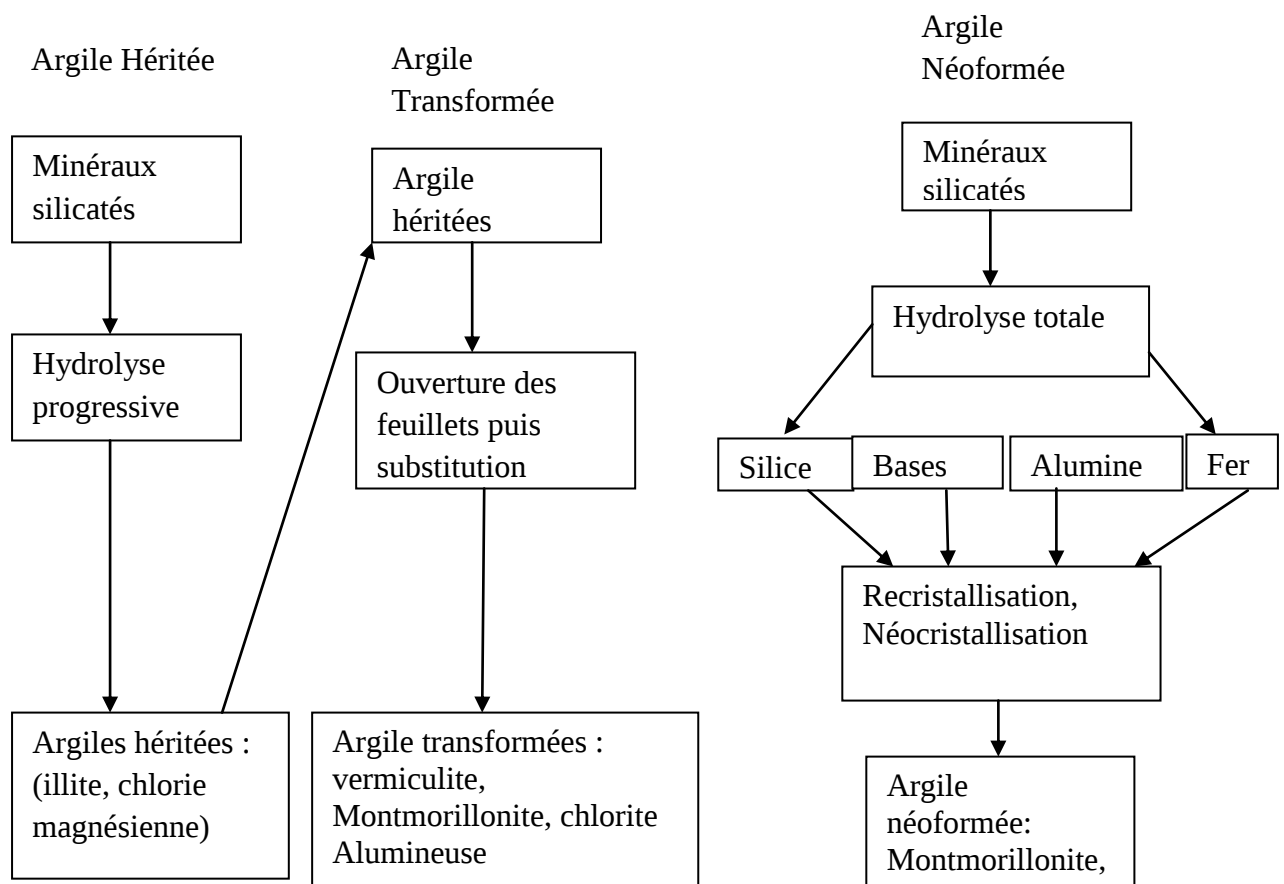


Figure 8 : Mode de formation des argiles (Kouadio, 2010).

II.2.3 Structure des argiles

Les argiles sont des matériaux lamellaires constitués par l'empilement de feuillets. Elles ont quatre niveaux :

- Les plans sont constitués par les atomes ;
- Les feuillets, tétraédriques ou octaédriques, sont formés par une combinaison de plan ;
- Les couches correspondent à des combinaisons de feuillet ;
- Le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches.

Un feuillet est formé par l'association de couche tétraédrique et de couche octaédrique. La couche tétraédrique est formée par un enchainement des tétraèdres constitués par des atomes Si^{4+} , Al^{3+} et Fe^{3+} .

La couche octaédrique est constituée par un enchainement des octaèdres, dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles et les centres sont occupés par des atomes d' Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} ou Fe^{2+} .

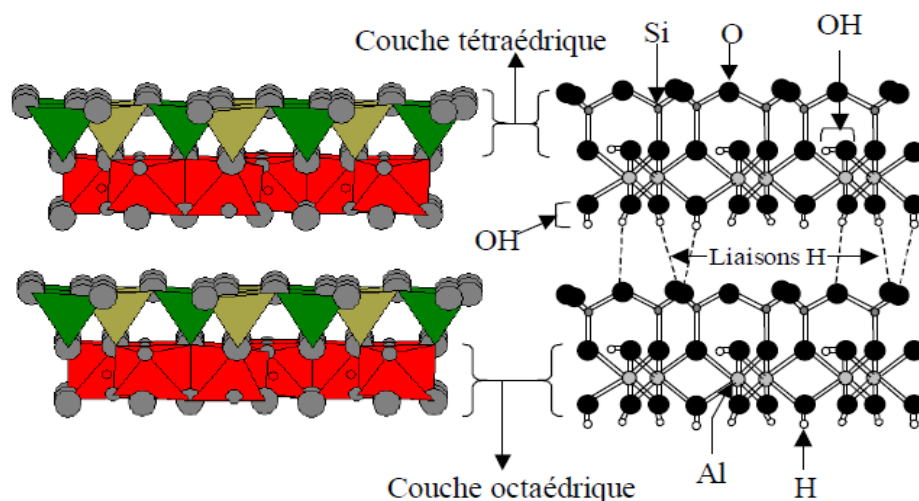


Figure 9 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite).

II.2.4 Classification des argiles

Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on distingue deux (2) grandes familles de minéraux argileux :

- a) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple les palygorskites (attapulgite) et les sépiolites (Charradi, 2010).

b) Les minéraux phylliteux à structure lamellaire. Ce sont les plus répandus et les plus étudiées. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites octaédriques. Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques, on distingue les minéraux de types: 1/1(T-O), 2/1(T-O-T) et 2/1/1(T-O-T-O). (Figure 10), (Medjnoun, 2014).

- **Les minéraux de type 1:1 (ou T-O)**, ont une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1 Å. Ce type correspond aux groupes de la kaolinite.
- **Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T)**, ont une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å, et cela est selon le contenu de l'inter feuillet. Ce type correspond aux groupes du talc, des smectites, et celui des micas.
- **Les minéraux de type 2:1:1 (ou T-O-T-O)**, ont une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques, et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å; à ce type correspond le groupe du chlorite.

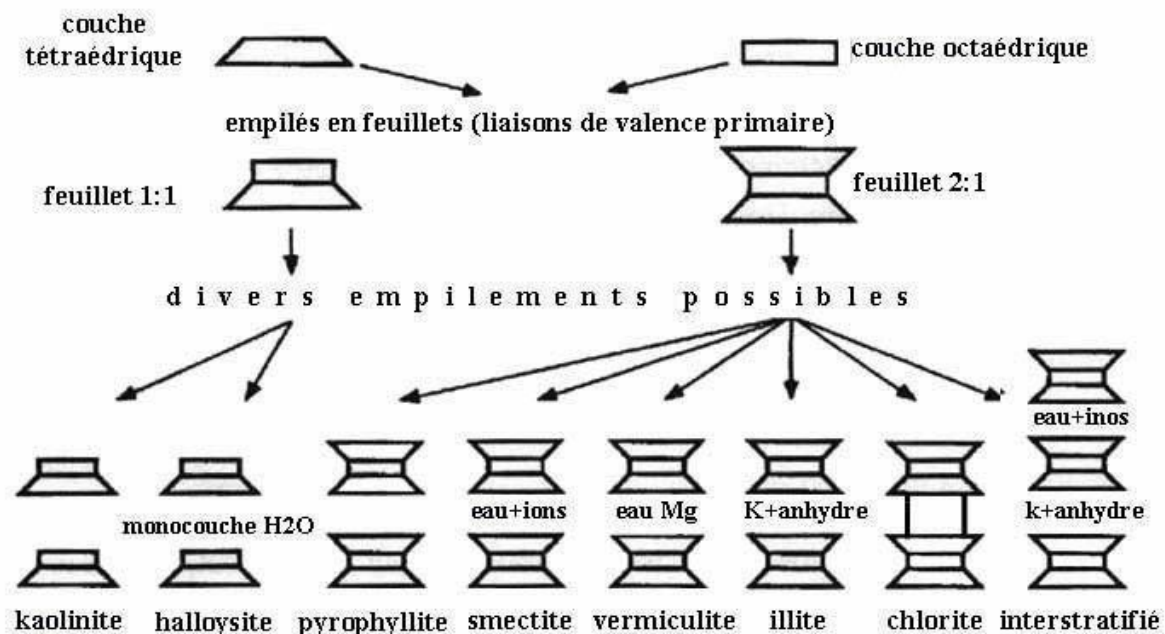


Figure 10 : Représentation schématique de quelques groupes de minéraux argileux (Grunberger, 1995 in Kouadio, 2010).

II.2.5 Propriétés et intérêt des argiles

Traditionnellement utilisées comme matière première par les potiers, les argiles ont de nombreux débouchés dans l'industrie grâce à leurs caractéristiques chimiques (adsorption et absorption des molécules, composition) et physiques (taille des particules) (**Konan, 2006**). Dans l'industrie chimique, elles amorcent certaines réactions (craquage des huiles minérales ou polymérisation de certaines molécules organiques). Les smectites (ensemble des argiles gonflantes), quant à elles, ont des capacités d'adsorption très poussées et sont de ce fait employées pour filtrer les vins, bières, clarifier les eaux souillées, dégraisser les laines par piégeage des impuretés. Utilisées comme source de silice et d'alumine les argiles forment les minéraux de base de l'industrie des matériaux de construction, des réfractaires, des isolants. D'autres argiles, notamment les smectites sodiques et les attapulgites servent à épaissir un grand nombre de liquides : eau douce, eau salée, solvants aliphatiques, huiles végétales, glycols. Exploitée comme charge minérale, l'argile joue un rôle important dans la papeterie et l'industrie du caoutchouc. Dans les industries pharmaceutiques et médicales, l'argile trouve aussi un usage. Elle constitue la base des pansements stomacaux et intestinaux. Leurs propriétés absorbantes permettent la fabrication de médicaments à effets retardés. Les smectites en particulier interviennent dans la fabrication de nombreux cosmétiques : savons et shampoings, pommades, crèmes dentifrice où elles remplacent les matières grasses. Notons cependant que certaines espèces d'argiles fibreuses très utilisées pour leurs propriétés isolantes peuvent avoir des effets néfastes ; c'est le cas par exemple du chrysotile ou amiante qui s'est révélée être une substance cancérigène. Les sépiolites et palygorskites qui appartiennent à cette famille sont suspectées d'avoir des effets nocifs.

De tous les minéraux argileux, les argiles kaolinitiques sont sans doute celles dont les usages sont les plus variés et les plus « nobles » (**Konan, 2006**).

L'argile intervient à tous les niveaux de l'édification du bâtiment : elle intervient comme brique pour la réalisation des murs, comme carreau pour les sols et tuiles pour la toiture.

II.3 Charge

III.3.1 Définition

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à une matrice de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé (**Naudin et Clozza, 1987**).

II.3. 2 Différents types de charge.

Il existe trois grands types de charge (**Raskin, 2009**) : les charges minérales, les charges organiques et les charges organo-minérales.

II.3.2.1 Charges minérales

Les charges minérales sont formées de :

- silice (SiO_2) qui se présente sous différentes formes :
 - sous formes cristallines (cristobalite, tridymite, sable, argile) : ces formes sont dures et résistantes.
 - sous forme non cristalline (le verre : verre boro-silicate) : qualités mécaniques et esthétiques intéressantes.
- verres de métaux lourds qui confèrent au matériau sa radio opacité :
 - silicate de verre de baryum ou de strontium,
 - verre de dioxyde de zirconium,
 - yttrium ou ytterbium trifluorés (YbF_3).

Depuis les années 70, l'argile est la charge la plus fréquemment utilisée car elle est très stable chimiquement et a un indice de réfraction élevée (**Raskin, 2009**). C'est pour cette raison que dans notre étude, nous utiliserons de l'argile comme charge.

III.3.2.2 Charges organiques

Ces charges se présentent sous différentes formes (**Naudin et Clozza, 1987**) :

- **Charge cellulosique** : Les poudres cellulosiques sont utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes). Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité (≈ 1).
- **Farines de bois** : Elles sont obtenues par broyage de bois tendre (pin de Scandinavie, sapin, peuplier). Elles sont utilisées avec les résines phénoliques et aminoplastes, pour augmenter la résistance aux chocs, abaisser le retrait au moulage et conférer une meilleure stabilité dimensionnelle aux pièces moulées.

- **Pâte de cellulose**

On obtient un dérivé de la pâte à papier, de structure fibreuse, par purification alcaline de la pâte à bois. Cette alpha-cellulose traitée, obtenue très blanche et très absorbante, est couramment utilisée comme charge des aminoplastes. Un très bon mouillage est obtenu entre mélamine formol et fibres. On constate un faible retrait au moulage et une résistance modérée au choc et à l'humidité.

- **Amidons**

Ce sont des hydrates de carbone contenus dans les plantes, en particulier des polysaccharides ayant pour formule générale $(C_6H_{12}O_5)_n$. On obtient les polysaccharides à partir des graines de céréales (blé, orge, riz, maïs) et de tubercule (manioc, pomme de terre). Les amidons sont utilisés comme charge pour obtenir des plastiques biodégradables.

- **Poudres de polymères.**

Les caractéristiques de surface des résines polyester renforcées sont améliorées par addition de matières thermoplastiques finement divisées, telles que du polyéthylène à un taux compris entre 1 et 2 %. Certains polymères fluorés finement broyés sont utilisés à la fois dans les matières thermoplastiques et dans les matières thermodurcissables, comme lubrifiants, pour réduire l'usure et améliorer les limites de température d'utilisation. On utilise par exemple le PTFE en poudre fine dans le poly (oxyméthylène) et les polyamides.

II .3.2.3 Charges organo-minérales

Les charges organo-minérales possèdent un noyau minéral et une matrice résineuse polymérisée qui enrobe le noyau. Les micro-charges sont utilisées exclusivement sous cette forme.

II.3.3. Morphologie et taille

La forme des charges varie suivant le mode de préparation :

- anguleuse : obtenue par broyage et attrition,
- arrondie : résultent d'un frittage,
- sphérique : procédé sol-gel (émulsion) ou atomisation.

Selon la taille des particules les charges sont classées en trois grands groupes :

- les macrocharges dont la taille des particules est comprise entre 10 et 100 μm .
- les microcharges dont la taille des particules est comprise entre 0,4 et 10 μm .
- les nano charges dont la taille des particules est comprise entre 7 et 40 nm.

II.4 Composites

II.4.1 Définition

Un composite est un matériau constitué par l'assemblage d'au moins deux composants non miscibles (**Marquis, 2010**). Dans un matériau composite, différentes phases coexistent. Il est généralement constitué d'une matrice (matériau de base) renforcée par des fibres ou des particules plus ou moins grosses d'un autre matériau qu'on appelle les renforts.

L'association des matériaux de base, de propriétés différentes génère un nouveau matériau multiphasé dont les propriétés sont supérieures à celles de ces constituants considérés séparément. Les composites présentent certains avantages par rapport aux matériaux métalliques en raison de:

- leur légèreté,
- coût modéré de réalisation d'éléments de construction et d'entretien,
- leur réponse à certaines exigences (rigidité, résistance mécanique, légèreté, résistance à la corrosion, etc.).

II.4.2 Différents types de composites

Selon **Mahfoudh (2013)**, **Bourai (2010)**, **Clyne et Hull (1996)**, il existe plusieurs types de matériaux composites. Cependant, deux grandes familles se distinguent en fonction des caractéristiques de la matrice et des renforts :

- Les composites de grande diffusion, qui sont peu coûteux et occupent une grande part du marché;
- Les composites à hautes performances, qui se trouvent le plus souvent renforcés par des fibres de carbone ou d'aramide, et sont surtout réservés à des secteurs de forte valeur ajoutée comme le secteur médical, l'aéronautique, les sports et les loisirs.

Les composites peuvent aussi être classés selon la nature de leur matrice, en cinq familles principales:

- Les composites à matrice céramique CMC (Ceramic Matrix Composites),
- Les composites à matrice métallique MMC (Metal Matrix Composites),
- Les composites à matrice intermétallique IMC (Intermetallic Matrix Composites),
- Les composites carbone-carbone CCC (Carbon-Carbon Composites),
- Les composites à matrice polymère PMC (Polymer Matrix Composites) ou à matrice organique. Les renforts utilisés en général, sont des fibres telles que les fibres de verre, de carbone ou d'aramide, les fibres naturelles et des particules telles que l'argile, poudre d'amidon etc.

II.4.3 Matrices organiques

Les matrices jouent un rôle très important au sein des matériaux composites. Elles assurent définitivement la qualité de la cohésion du composite. Une matrice organique est formée par un ou plusieurs polymères. Ces derniers se subdivisent en deux grandes familles, à savoir les thermoplastiques (polypropylène PP, polyéthylène PE, polychlorure de vinyle PVC) et les thermodurcissables (époxy, polyuréthane PU, colles phénoliques).

Ces familles se différencient entre elles, par leurs propriétés chimiques, thermiques et mécaniques, par leurs méthodes de mise en œuvre ainsi que les propriétés obtenues dans les composites.

II.4.3.1 Thermodurcissables

Les thermodurcissables représentent en grande partie les résines adhésives. Ils sont très utilisés pour le collage du bois, et comme colles dans les composites à base de fibres cellulosiques (**Gillespie, 1984**). Ces polymères assurent la liaison des fibres entre elles dans les panneaux composites afin d'assurer la cohésion de l'ensemble. Les thermodurcissables les plus utilisés sont l'urée-formaldéhyde (**Dunky, 1998**), les résines phénoliques (phénol-formaldéhyde PF) et les colles isocyanates (**Zhuang et Steiner, 1993 ; Kawai et Sasaki, 1986**).

II.4.3.2 Thermoplastiques

Les thermoplastiques se subdivisent en deux classes, à savoir les semi-cristallins et les amorphes. Les polymères amorphes, composés d'une phase vitreuse, se caractérisent par leur état transparent à l'état solide, contrairement aux semi-cristallins. Les semi-cristallins, constitués en partie d'une phase amorphe, se caractérisent par leur capacité à cristalliser.

Sous l'action de la chaleur, la fusion du polymère a lieu, et mène progressivement à l'état liquide. Le polymère thermoplastique étant ramolli et les molécules étant excitées, certains mouvements dans les chaînes moléculaires s'en suivent, sur des distances relativement grandes (**Bourai, 2010 ; Bourban et al, 2004**). Par refroidissement, le thermoplastique peut donc être solidifié en épousant la forme souhaitée. Les thermoplastiques se caractérisent par des propriétés de recyclage très intéressantes car ce processus de ramollissement par effet thermique et de durcissement par refroidissement peut être répété plusieurs fois (**Bourai, 2010**). Même d'une manière indéfinie, il n'en résulte que très peu de modifications chimiques qui viennent altérer les thermoplastiques. S'il y a lieu, il s'agirait plutôt d'une modification de l'agencement intermoléculaire (volume libre). Cette aptitude à être recyclés distingue les thermoplastiques des thermodurcissables.

Conclusion

La prolifération des déchets plastique constitue l'un des problèmes environnementaux à résoudre de nos jours. Ces plastiques étant des matériaux recyclables il est important de proposer une méthode qui va freiner cette prolifération. Le sable et l'argile constituent des matières premières les plus utilisées dans la construction et aussi dans plusieurs domaines (poterie, céramique ...) à cause de leurs propriétés mécaniques élevées. Les thèmes abordés dans cette partie permettent de se familiariser aux mots qui seront employés au cours de notre étude.

DEUXIEME PARTIE :

MATERIEL ET

METHODES

Chapitre III :
MATIÈRES PREMIÈRES
ET METHODES DE
CARACTERISATION

Introduction

Les propriétés des matières premières destinées à la confection d'un matériau doivent être connues afin de prévoir les comportements et les améliorations à apporter lors de l'utilisation éventuelle du matériau. Cette parfaite connaissance passe par la caractérisation de ces matières premières. C'est dans cette optique que les matières premières que nous utiliserons à savoir le sable, les sachets plastiques et l'argile vont être caractérisées. Puis les différents essais que nous effectuerons sur ces matières premières vont être énumérés.

III.1 Matières premières

III.1.1 Déchets plastiques

Les déchets plastiques sont les plastiques d'emballage rejetés dans la nature après utilisation de leurs contenus par les consommateurs. Ces déchets plastiques sont essentiellement des polyéthylènes. Le polyéthylène, ou polyéthène (sigle générique **PE**), est l'un des polymères les plus simples et les moins chers. Le polyéthylène est le plastique le plus employé. Il compose notamment la moitié des emballages plastiques. L'utilisation la plus visible du polyéthylène est le sac plastique.

Les plastiques que nous avons utilisés pour notre étude sont essentiellement constitués de PE car ce sont les plus utilisés donc les plus rejetés dans la nature. Les plastiques utilisés à Abidjan sont issus des différents dépotoirs d'ordure de la ville (Figure 11.A). Par contre ceux utilisés au laboratoire ICB (ex. IRTES-M3M) en France sont issus des emballages de matériel livrés (Figure 11.B). Ces plastiques sont essentiellement du Polyéthylène Basse Densité (PEBD). Les plastiques sont broyés afin de faciliter l'homogénéité du mélange sable-plastique.



Figure 11 : Déchets plastiques (A : déchets plastique d'Abidjan ; B : déchets plastique de Belfort)

III.1.2 Sable

Le sable est constitué de sédiments détritiques dont les grains ont une taille comprise entre 63 μm et 2 mm. Le plus fréquent de ces composants est le quartz, le constituant non altérable du granite. Le sable utilisé est le sable de lagune (figure 12.B), extrait de la carrière de Port-Bouet (Abidjan-CI). Après prélèvement, le sable est d'abord lavé à l'eau de robinet, séché au soleil et passé au tamis de 1 mm. C'est donc la fraction passante de ce tamis qui sera utilisée au cours de notre étude.

Cette fraction a été soumise à l'analyse granulométrique afin de déterminer certaines caractéristiques intrinsèques liées à ce sable.

En France, le sable utilisé (Figure 12.A) est extrait de la Savoureuse : fleuve qui traverse la ville de Belfort. Il est obtenu grâce à la société **BELFORT- BETON** qui l'extrait et l'utilise pour ses travaux.

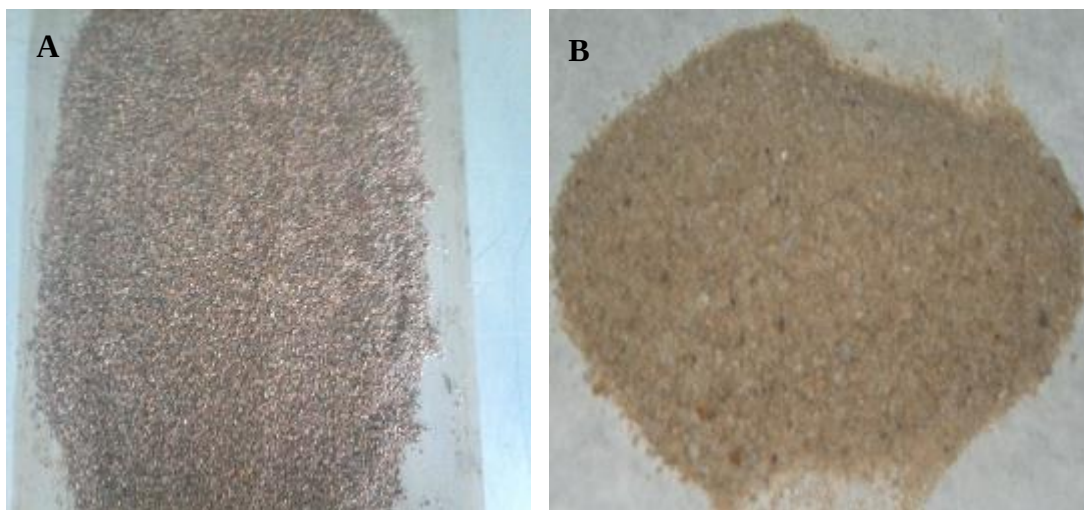


Figure 12 : Echantillons de sable : Sable de Belfort(A), sable de lagune d'Abidjan(B)

III.1.3 Argile

L'argile utilisée comme charge, est obtenue par broyage au laboratoire de Géomatériaux à Abidjan (Côte D'Ivoire), de l'argile brut. C'est une argile extrait sur le site de Dabou (Côte D'Ivoire). C'est une argile qui a déjà fait l'objet d'autres études (**Kouadio, 2010 ; Kouakou, 2000**). Il s'agit d'une argile de couleur brune. Ce gîte d'argile est localisé autour des coordonnées géographiques 5°19'70'' N et 4°22'80'' W.

Les échantillons prélevés sont séchés pendant deux semaines au laboratoire de Géomatériaux dans une salle où la température moyenne est d'environ 27° C avec un taux d'humidité

variant entre 60 et 75 %. Après le séchage, ils sont réduits en morceaux de deux centimètres environ grâce à un concasseur à mâchoire. Ces morceaux sont ensuite broyés dans un broyeur à billes pendant deux heures. La poudre obtenue est passée au tamis de 63 μm . C'est le passant ainsi recueilli qui sert de matière première de base pour nos travaux. Toutes les analyses de caractérisation ont été effectuées sur cette matière première.

III.2 Caractérisation de la matière première

III.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer la répartition en poids des particules de sol en fonction de leurs dimensions. La détermination de la granulométrie s'effectue par tamisage pour les éléments de taille supérieure à 80 μm (AFNOR, 1996) et par sédimentation pour les éléments de taille inférieure ou égale à 80 μm (AFNOR, 1992).

Dans le cadre de notre étude c'est la méthode par tamisage qui sera utilisée pour le tamisage du sable à Abidjan. Après prélèvement, lavage et séchage, le sable est passé au tamis afin d'obtenir deux types de sable. Le sable A est issu la fraction passant au tamis de 1 mm. Le sable B est composé du refus du tamis 0,5 mm et du passant du tamis de 2 mm. C'est l'analyse granulométrique de ces deux portions de sable qui seront faites.

A Belfort en France, le sable prélevé est tamisé pour obtenir quatre (4) types de granulométries :

- le sable 1 composé du passant du tamis de 0,35 mm,
- le sable 2 composé du refus du tamis de 0,35 mm et du passant 0,63 mm
- le sable 3 composé du refus du tamis de 0,63 mm et du passant 1,5 mm,
- le sable 4 composé du refus de 0,75 mm et du passant de 2 mm.

Les distributions granulométriques ont été mesurées avec un granulomètre à diffraction laser Mastersizer 2000 équipé du module voie liquide Hydro 2000 de marque Malvern Instruments. (Figure 13). Le principe de cette technique repose sur la déviation de la lumière par les particules. Lorsque les particules passent devant le faisceau laser, elles dévient la lumière d'un angle inversement proportionnel à leur taille avec une intensité proportionnelle à leur taille. L'interprétation de ces mesures est réalisée à l'aide de la théorie de Mie (implantée dans le logiciel d'exploitation) et permet d'obtenir des distributions de tailles en volume et en nombre.



Figure 13 : Granulomètre à diffraction laser Mastersizer 2000, Malvern Instruments.

III.2.2 Analyses thermiques

Les analyses thermiques permettent de faire l'étude des changements d'état d'une substance en fonction de la température. Ces méthodes thermiques reposent toutes sur la mesure en fonction de la température ou du temps :

- soit d'une ou plusieurs grandeurs physiques caractéristiques (dimension, poids, conductivité électrique etc...),
- soit de la quantité de chaleur mise en jeu au cours de la transformation du système considéré.

Pour notre étude, la méthode thermogravimétrique (ATG) (Figure 14) et la calorimétrie différentielle à balayage (en anglais, Differential Scanning Calorimetry ou DSC) (Figure 15) ont été utilisées. La méthode thermogravimétrique(ATG) consiste à suivre, en continu, l'évolution de la masse d'une substance soumise à un chauffage ou à un refroidissement pour une température ou un profil de température donné.

L'expérience consiste à placer l'échantillon dans une nacelle suspendue au fléau d'une balance, qui se trouve dans une enceinte à température programmée.

Le contrôle de la température de l'enceinte utilise des thermocouples et l'équilibre de la balance est assuré en permanence par un dispositif de rattrapage automatique.

Une des manières d'enregistrer la variation de masse consiste à maintenir le fléau de la balance en position horizontale, et à mesurer la force nécessaire, donc la différence de poids entre l'ensemble suspente-échantillon et le contrepoids, pour maintenir cette position.



Figure 14 : Appareil TGA de type Q10 V6.3.

Par contre la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est une technique d'analyse thermique basée sur la mesure du flux de chaleur différentiel entre un échantillon et une référence inerte soumis à une même loi de chauffage ou de refroidissement linéaire.

Cette technique repose sur le fait que lors d'une transformation physique, telle qu'une transition de phase, une certaine quantité de chaleur est échangée avec l'échantillon pour être maintenue à la même température que la référence. Le sens de cet échange de chaleur entre l'échantillon et l'équipement dépend de la nature endothermique ou exothermique du processus de transition. Ainsi, par exemple, un solide qui fond va absorber de la chaleur pour pouvoir augmenter sa température au même rythme que la référence. La fusion (passage de l'état solide à l'état liquide) est en effet une transition de phase endothermique car elle absorbe la chaleur. De même, l'échantillon peut subir des processus exothermiques, tels que la cristallisation lorsqu'il transmet de la chaleur au système. En mesurant la différence de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence, un calorimètre différentiel à balayage (DSC) peut mesurer la quantité de chaleur absorbée ou libérée au cours d'une transition. Cette technique peut également être utilisée pour observer des changements de phase plus subtils, comme les transitions vitreuses. La DSC a été utilisée pour déterminer la température de fusion.



Figure 15 : Appareil DSC de type Q50 V 9.0

Conclusion

Les matières premières utilisées pour l'élaboration des échantillons sont le sable, l'argile et les déchets plastiques comme liant. La parfaite connaissance de ces matières premières passe par leur caractérisation. C'est ainsi que les analyses granulométriques, minéralogiques et thermiques ont été effectuées. La description du matériel utilisé pour la caractérisation a permis de comprendre le mode de fonctionnement de chaque appareil.

Chapitre IV :
CONFECTION ET
CARACTERISATION DES
ECHANTILLONS

Introduction

A travers cette étude nous devons proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques. Pour ce faire deux méthodes de confection ont été expérimentées : par compactage manuelle au laboratoire de Géomatériaux à l'Université Félix Houphouët Boigny Cocody-Abidjan en Côte d'Ivoire et par thermocompression au laboratoire ICB (ex IRTES-M3M) de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM) en France. Ce chapitre présente le matériel utilisé lors des différentes étapes de la confection et les différents essais de caractérisations de chaque site.

IV.1 Méthode de compactage manuel : Site d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

IV.1.1 Matériels de confection

Pour l'élaboration des échantillons le plastique est fondu. Cette méthode a été choisie dans l'intention d'exploiter la propriété de liant thermoplastique des polyéthylènes. Pour ce faire la mise au point d'un appareillage spécifique s'avère nécessaire.

IV.1.1.1 Broyeur de plastique

Pour un bon mélange, nous avons besoin d'émietter le plastique. Pour cela nous avons mis au point un broyeur (Figure 16). C'est un broyeur à couteaux constitué d'une série de couteau fixe et mobile. Le plastique s'émiette lorsque les dents mobiles en tournant s'emmanchent dans les dents fixes. Le plastique ainsi broyé passe au travers d'un tamis posé en dessous des dents. Celui qui ne peut passer par les mailles du tamis est automatiquement entraîné entre les dents jusqu'à ce qu'il soit à son tour bien broyé.



Figure 16 : Broyeur de plastique.

IV.1.1.2 Extrudeuse

Pour le mélange de l'ensemble sable plastique nous avons aussi mis au point une extrudeuse (Figure 17).



Figure 17 : Extrudeuse.

C'est une extrudeuse bavis. Chaque vis mesure 70 cm de long et 8 cm de diamètre. Les vis sont contrarotatives c'est-à-dire qu'elles tournent en sens inverse l'une de l'autre. Chaque vis ne pénètre pas dans le chenal de la vis voisine. On dit alors que les vis sont non interpénétrées. C'est par l'entonnoir que le mélange sable-plastique est introduit dans l'extrudeuse. Le plastique contenu dans le mélange est fondu lors du malaxage par les vis, grâce à un circuit de chauffage alimenté par du gaz butane.

IV.1.1.3 Presse et moule

Pour la mise en forme, le mélange est mis dans un moule puis comprimé par une presse manuelle (Figure 18). Les dimensions du moule sont 200X100X80 mm³.

La presse possède un niveau de réglage permettant de choisir l'épaisseur des échantillons.



Figure 18 : Presse et moule

IV.1.2 Méthode d'élaboration

Le sable et le plastique sont mélangés selon la proportion (massique) souhaitée. Les échantillons ont été confectionnés avec les proportions de plastique suivant :

$$P(\%) = \frac{M_p}{M_s + M_p} \times 100 \quad (1)$$

où

P (%) est le pourcentage massique du plastique

M_p est la masse de plastique

M_s est la masse du sable

Au cours de notre étude la méthodologie adoptée est la suivante (Figure 19):

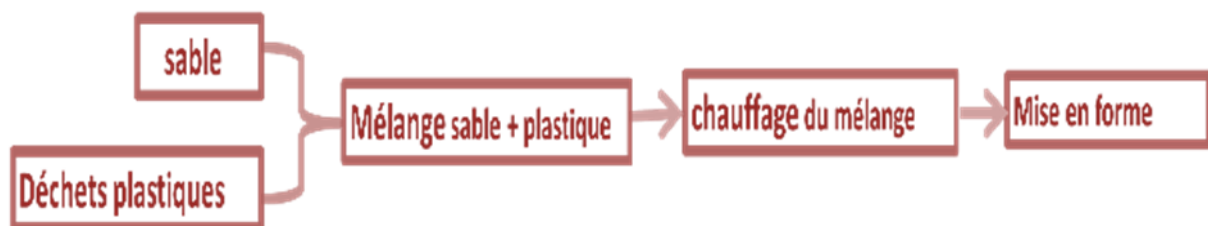


Figure 19 : Schéma de la procédure d'élaboration des échantillons.

IV.2 Méthode de thermocompression : Site de Belfort(France)

IV.2.1 Matériel de confection

IV.2.1.1 Moule de malaxage

Le moule de malaxage est constitué d'une plaque d'aluminium de longueur 20 cm, de largeur 10 cm et d'épaisseur 5 cm et d'un couvercle. L'ensemble est schématisé sur la Figure 20.

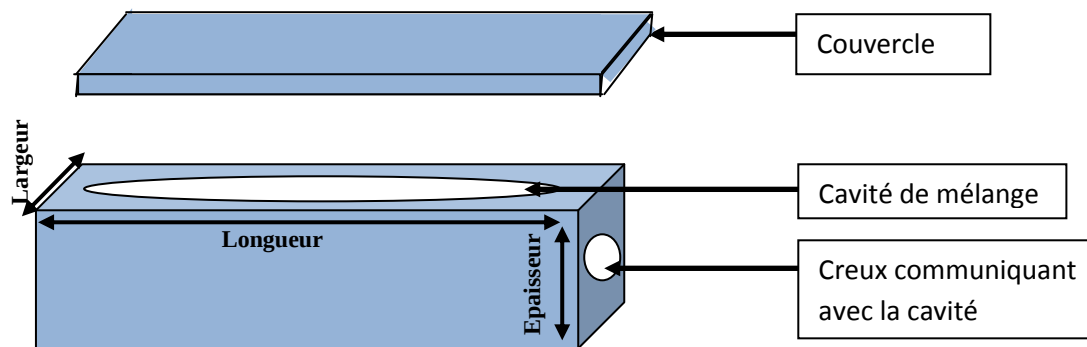


Figure 20 : Schéma du moule de malaxage et du couvercle

Sur l'une des faces constituée de la longueur et de la largeur, est percée, une cavité de longueur 15 cm, de profondeur 3 cm et d'épaisseur 1cm. C'est dans cette cavité qu'est mis le mélange pour le malaxage. Un couvercle permet de fermer cette cavité afin d'empêcher le mélange de s'échapper lors du mélange (Figure 21.A). Sur l'une des faces (vue de profil) constituée de l'épaisseur et de la largeur, un creux qui communique avec la cavité est aussi percé. C'est par ce creux qu'on met le foret (mèche) de la perceuse pour faire le mélange (Figure 21.B).

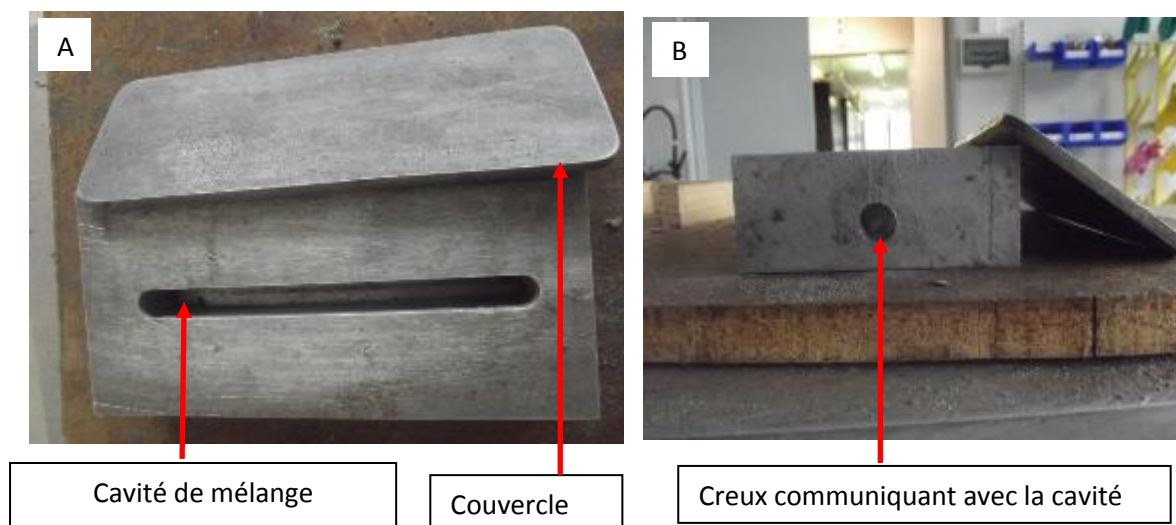


Figure 21 : Moule de malaxage (A : vue de haut, B : vue de profil).

IV.2.1.2 Thermopresse

La thermopresse hydraulique permet de faire fondre le plastique contenu dans le mélange.

Elle est de marque PINETTE EMIDÉCAU INDUSTRIES de pression 250 bars.

Elle comporte deux plateaux chauffants régulés en température. Le plateau supérieur est fixe tandis que l'inférieur est mobile. Lorsque les deux plateaux sont en contact avec le moule, celui-ci contenant le mélange est chauffé. Le chauffage et le mélange se font simultanément. Le mélange est fait par un foret (mèche) qui tourne dans la cavité de mélange en sens inverse, lorsque la perceuse (Figure 22) est actionnée.



Figure 22 : Themopresse.

IV.2.1.3 Moule de mise en forme

Après malaxage, le mélange est mis dans un moule (Figure 23) puis porté sous la thermopresse pour une mise en forme. Le moule est en aluminium de dimension 200X35X30 mm³. Le couvercle du moule en barre d'aluminium de dimension 160X15X40 mm³, s'enfonce dans la cavité contenant le mélange lorsque les deux plateaux chauffants de la thermopresse se rapprochent.

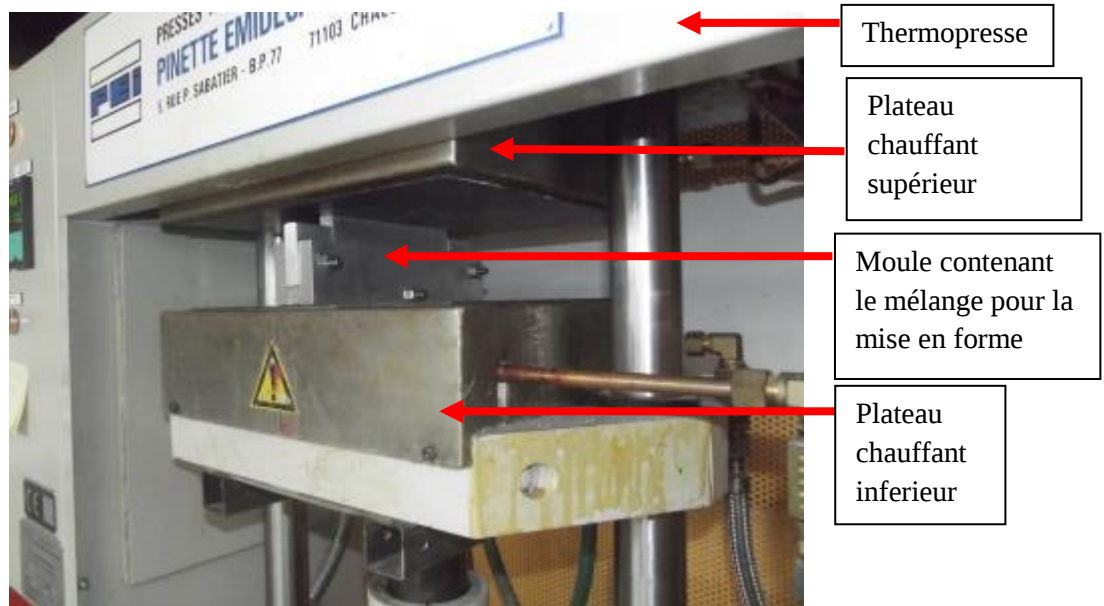


Figure 23 : Mise en forme de l'échantillon.

IV.2.2 Méthode d'élaboration

Il y a deux types d'échantillon : échantillon sable-plastique et échantillon sable-plastique-argile. Comme sur le site d'Abidjan, le sable, le plastique et l'argile sont mélangés selon la proportion (massique) souhaitée. La proportion massique du plastique est obtenue selon l'équation 1(cf. IV.1.2). Celle de l'argile est obtenue selon l'équation suivante:

$$A(\%) = \frac{M_a}{M_a + M_s + M_p} \times 100 \quad (2)$$

où

A (%) est le pourcentage massique de l'argile,

M_p est la masse de plastique,

M_s est la masse du sable,

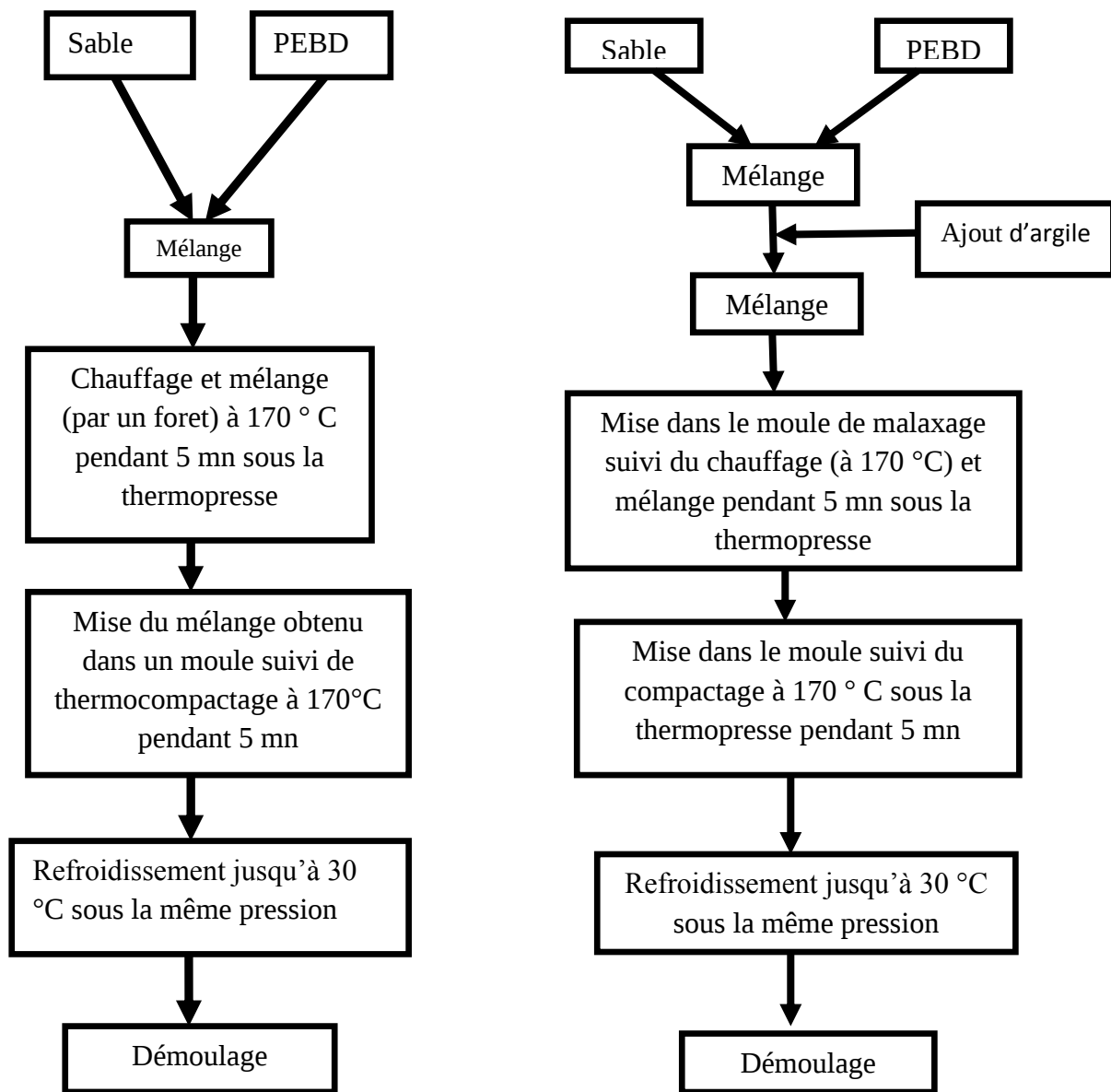
M_a est la masse de l'argile.

Après mélange, l'ensemble est chauffé grâce à la thermopresse jusqu'à 170°C. Le mélange est ainsi soumis à cette température (170 °C) pendant cinq (5) minutes. Lors du chauffage, le mélange est fait simultanément, grâce au foret (mèche) actionné par la perceuse.

Après cette étape le mélange est mis dans un moule, suivi d'un thermocompactage à 170 °C pendant cinq (5) minutes.

Lorsqu'on fait descendre le levier d'actionnement, le plateau inférieur se rapproche du plateau supérieur grâce à la montée du piston. Ce rapprochement des plateaux engendre le compactage du matériau contenu dans le moule. Afin de déterminer la pression idéale à exercer, des échantillons avec différentes pressions (2 ; 5 ; 8 et 10 MPa) ont été élaborés. Le refroidissement se fait sous la même pression jusqu'à 30 °C.

Les méthodologies sont résumées selon les schémas suivants (Figure 24) :



a) Echantillon sable + PEBD

b) Echantillon sable + PEBD + Argile

Figure 24 : Schéma de la procédure d'élaboration des échantillons

Les échantillons ont été confectionnés avec les mêmes proportions de PEBD que sur le site d'Abidjan.

IV.3 Caractérisation des échantillons

IV.3.1 Site d'Abidjan (méthode de compactage manuelle)

IV.3.1.1 Densité apparente

Les dimensions sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. A partir des dimensions (longueur, largeur et épaisseur), le volume des échantillons est calculé. La densité est donnée grâce à la formule suivante :

$$d = \frac{M}{V} \quad (3)$$

où M est la masse de l'échantillon, et V, son volume (cm³).

IV.3.1.2 Résistance à la compression

Des échantillons sortis des moules, nous confectionnons des éprouvettes de dimension 8X4X4 cm³ avec un élanement deux (2) selon la norme 13225 (**Bavelard et Beinisch, 2006**). L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de 500 KN de marque Controls (Figure 25. A).

Les capteurs de déplacement de précision 0,01 mm et de distance de mesure de 10 mm, sont connectés sur l'échantillon afin de mesurer les déformations longitudinales et transversales.

Au cours de l'essai, les capteurs de déplacement et de charge soigneusement disposés sur les échantillons permettent d'enregistrer en continue la charge et les variations de dimension longitudinale et transversales de l'échantillon.

La résistance en compression exprimée en MPa ou N/mm² est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (4)$$

où F est la force appliquée en Newton (N) ; S, la surface de contact des échantillons avec le plateau en mm² et **R_c** la résistance à la compression en MPa.

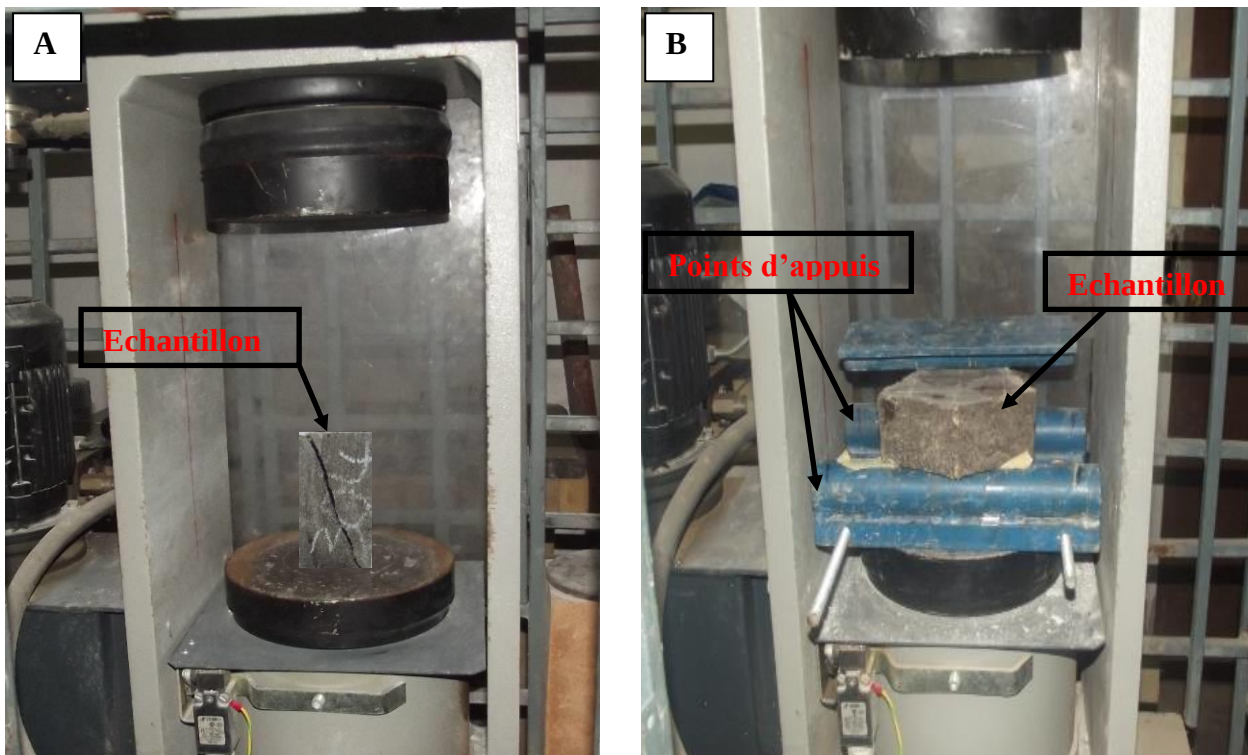


Figure 25 : Presse hydraulique pour essais mécaniques
(A : Compression ; B : Flexion 3 points)

IV.3.1.3 Résistance à la flexion

La connaissance de cette caractéristique est indispensable pour des applications structurales (revêtements de façade, dalles sur plots, traverses supérieures, ...) où le matériau sera sollicité en flexion. L'essai est fait selon la norme **NF B 51-008** et est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de 500 KN de marque Controls (Figure 25.B).

Comme en compression les capteurs de déplacement et de charge soigneusement disposés sur les échantillons permettent d'enregistrer en continue la charge et les variations de dimension.

La résistance en flexion trois (3) points exprimée en MPa ou N/mm² est donnée par la

$$\text{formule : } \mathbf{Rf} = \frac{3FL}{2be^2} \quad (5)$$

où F : la charge mesurée à la rupture,

L : distance entre les deux points d'appui,

b : largeur de l'éprouvette,

e : épaisseur de l'éprouvette.

IV.3.1.4 Résistance à l'usure

Cet essai permet de caractériser la durabilité d'un matériau, d'évaluer l'ampleur de certains types de dégradation et d'apprécier la capacité des matériaux à résister à l'érosion de surface.

Pour la mesure de l'usure, le dispositif utilisé a été mis au point par **Kouakou (2000)** (Figure 26):



Figure 26 : Dispositif de mesure de l'usure

Le dispositif est constitué d'un petit chariot reposant sur quatre roues, en dessous duquel se trouve fixée une pointe en acier. Le chariot est monté sur deux rails qui, s'emboîtent par leurs deux extrémités. Le dispositif est fixé au support à travers les tiges métalliques. Les roues ont un mouvement de translation le long des tiges métalliques.

Le chariot est chargé avec une masse de 3 kg. Un poignet permet de tirer le chariot qui se déplace sur les roues. Nous caractérisons la résistance à l'usure de l'échantillon par la profondeur de l'entaille laissée par l'enfoncement de la pointe en acier au bout de 25 cycles d'usure de la face de l'échantillon. La profondeur est mesurée et donnée en mm.

IV.3.1.5 Essai d'absorption d'eau

La pénétration de l'eau dans un matériau se fait par absorption. Cette absorption est responsable de nombreux dommages. Il existe plusieurs types d'essai d'absorption.

L'essai d'absorption par immersion fait au cours de notre étude est déterminée selon les directives de la norme NBN B 15-215:1989 (**Ployaert, 2009**).

Les échantillons sont immergés dans un bac à eau de robinet à 20 ± 2 °C durant 24 h.

Avant la pesée 24 h après, les échantillons sont essuyés de manière à les débarrasser de l'eau superficielle. L'absorption d'eau par immersion est exprimée en pourcentage et est calculée par la relation suivante :

$$Abs = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100 \quad (6)$$

avec :

m_{humide} , la masse humide après immersion ;

$m_{sèche}$, la masse sèche.

IV.3.1.6 Essai au scléromètre ou de dureté au choc

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un matériau de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage. En fait il s'agit de tester la dureté de surface du matériau. Cette dureté est d'autant plus élevée que le matériau est plus résistant. Au cours de notre étude, nous avons utilisé le scléromètre digital à microprocesseur 58-C0181/Gde marque CONTROLS (Figure 27).



Figure 27: Mise en œuvre de l'essai au scléromètre.

La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un dispositif mobile (commandé par un ressort) à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du matériau. La résistance probable du matériau en fonction de la mesure du recul ne peut être déterminée qu'avec un abaque de transformation établi pour chaque type d'appareil.

Le scléromètre digital CONTROLS 58-C0181/G, permet d'effectuer des essais de manière traditionnelle mais également le traitement automatique des résultats. Une estimation de la résistance à la compression du matériau est obtenue par corrélation avec des courbes établies par CONTROLS ou avec celles obtenues par voie expérimentale. Au cours de notre étude l'estimation de la résistance est faite avec les courbes établies et intégrées dans l'appareil.

Neuf (9) mesures sont effectuées sur chaque échantillon.

IV.3.1.7 Essai à l'ultrason

L'objectif de cet essai est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité du matériau. Cette méthode permet de déterminer, à partir de la vitesse de l'ultrason, les caractéristiques mécaniques du matériau ausculté et d'en apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminages et microfissurations).

Au cours de notre étude, nous avons utilisé l'appareil d'auscultation sonore PULSONIC 58-E4900 de marque CONTROLS (Figure 28).



Figure 28 : Dispositif de l'essai à l'ultrason.

C'est un appareil à ultrasons toute performance, alimenté par batteries, pour essais non destructifs sur matériaux de construction et comporte un microprocesseur haute vitesse incorporé et un oscilloscope digital (**Controls, 2013**).

Il permet la mesure du temps de transmission d'ondes ultrasoniques au travers des matériaux tels que poutre, colonnes, murs, cubes, cylindres ou autres. L'appareil génère des ondes ultrasonores introduites dans le matériau par une sonde émettrice appliquée sur la surface à examiner. Ces ondes sont captées par une sonde réceptrice, appliquée de même manière. Bien le maximum d'énergie soit propagé par rapport à la face d'émission, il est possible de détecter des impulsions se propageants dans le matériau en d'autres directions. Il est possible donc de faire des mesures de vitesse de propagation en plaçant les deux transducteurs en opposition (transmission directe), adjacents (transmission semi-directe) ou sur le même plan (transmission indirecte ou de surface), voir figure 29.

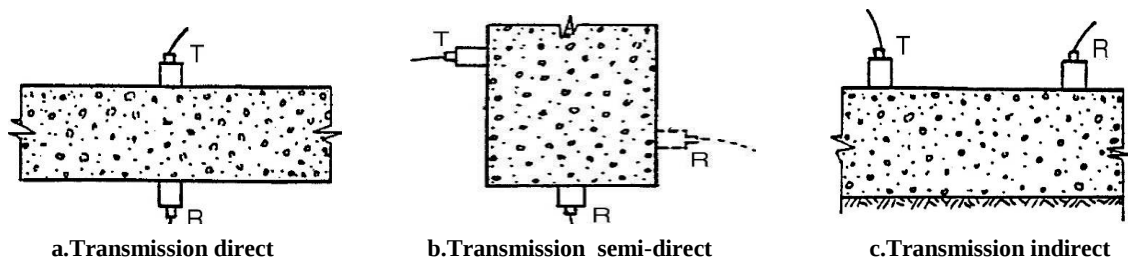


Figure 29: Schéma des différents types de mesure du temps de propagation

Au cours de notre étude, nous avons adopté la méthode en opposition (transmission directe), car c'est cette méthode qui est généralement utilisée. Les transducteurs sont mis de part et d'autre de l'échantillon (Figure 30). Le temps mis par l'onde pour traverser l'échantillon de l'émetteur au récepteur est affiché sur l'appareil. Neuf (9) mesures du temps sont effectuées sur chaque échantillon. Le temps ainsi obtenu, va permettre de calculer la vitesse de l'onde dans le matériau selon la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad (7)$$

où :

V = est la vitesse de propagation, en km/s,

L = est la longueur de parcours, en mm,

T = est le temps de propagation en μ s.

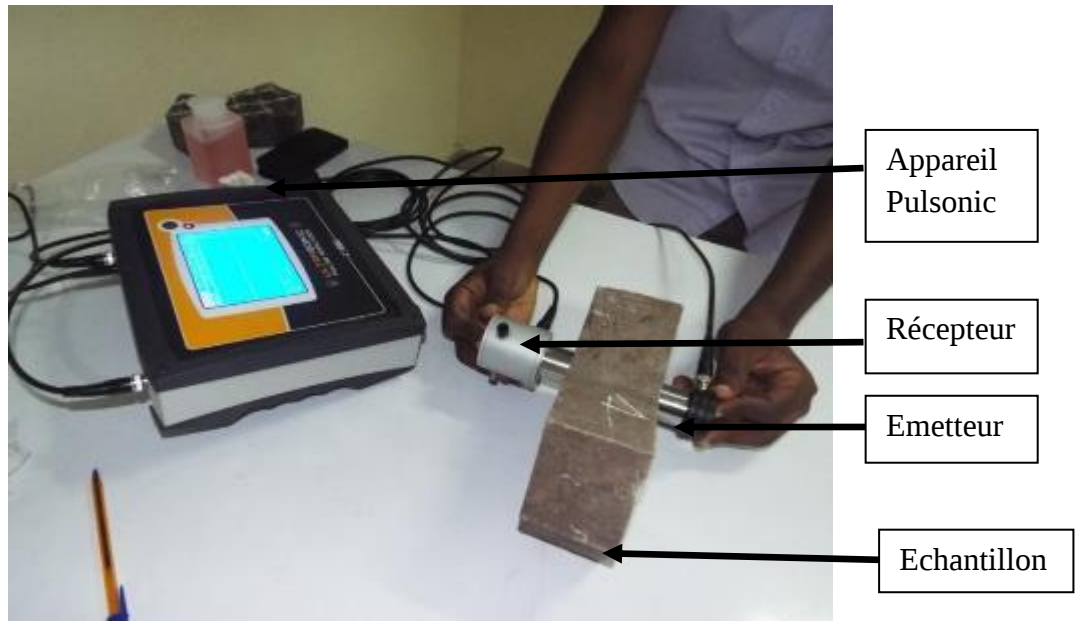


Figure 30 : Mesure du temps de propagation de l'onde en transmission direct.

A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module élastique dynamique E_D selon la formule :

$$E_D = V^2 \varphi \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (8)$$

où :

V = vitesse du son en km/s,

φ = densité du matériau en kg/m^3 ,

ν = coefficient de Poisson,

E_D = Module élastique dynamique (MPa),

IV.3.2 Site de Belfort (méthode de thermocompression)

IV.3.2.1 Densité apparente

La technique d'élaboration étant la thermocompression, nous voulons alors savoir son effet sur la densité du matériau. Le principe de détermination est le même que précédemment (cf. IV.3.1.1).

IV.3.2.2 Résistance à la compression

L'essai de compression a été réalisé à l'aide de l'appareil Universal Tester Analyser (TA-XT2i) (Figure 31). Après démoulage nous obtenons des échantillons de dimensions $160 \times 15 \times 3,5 \text{ mm}^3$. Pour l'essai de compression nous confectionnons des échantillons de dimensions $80 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ en respectant l'élancement deux (2) selon la norme 13225 (**Bavelard et Beinisch, 2006**). La résistance en compression exprimée en MPa ou N/mm^2 est donnée par la formule (4) (Cf. IV.3.1.2).



Figure 31 : Appareil Universal Tester Analyser (TA-XT2i) pour compression et flexion.

IV.3.2.3 Résistance à la flexion trois points

L'essai à la flexion a été également réalisé à l'aide du même appareil Universal Tester Analyser (TA-XT2i). Pour l'essai, nous préparons des échantillons de dimensions $80 \times 10 \times 3,5 \text{ mm}^3$ selon la norme ASTM D790.

La résistance en flexion trois (3) points exprimée en MPa ou N/mm^2 est donnée par la formule (5) (cf. IV.3.1.3.)

IV.3.2.4 Essai d'absorption eau

La technique de thermocompression favorisant le compactage du matériau, nous avons effectué l'essai d'absorption d'eau pour connaître l'effet de cette technique sur la capacité du matériau à absorber l'eau. Le principe de l'essai est le même adopté précédemment (cf. IV.3.1.5) Les échantillons sont complètement immergés dans un bac à eau.

IV.3.2.5 Etude microscopique

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectuées sur les différents matériaux, afin d'observer la répartition et les rapports entre les constituants. Les observations ont été faites par le microscope électronique à balayage (MEB) FEG JEOL JSM 7800F de la marque BRUKER (Figure 32).



Figure 32 : Microscope Electronique à Balayage à émission de champ de type BRUKER.

Le principe d'un canon à émission de champ est d'utiliser une cathode métallique en forme de pointe très fine et d'appliquer une tension de l'ordre de 2 000 à 7 000 volts entre la pointe et l'anode. On produit ainsi, par « effet de pointe », un champ électrique très intense, de l'ordre de $10^7 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, à l'extrémité de la cathode. Les électrons sont alors extraits de la pointe par effet tunnel. Pendant l'émission de champ assistée thermiquement (TFE en anglais), la pointe est alors portée à une température typique de 1 800 K. Pour des raisons pratiques d'utilisation du MEB, les observations ont été faites sur des échantillons de taille maximale égale à $3 \times 3 \text{ cm}^2$ confectionnés à partir des échantillons sortis des moules.

Conclusion

Dans le but de concevoir des matériaux de qualités, différents essais ont été effectués sur nos échantillons. Dans un premier temps les matières premières ont été caractérisées, puis des essais ont été effectués sur les échantillons obtenus.

La caractérisation des matières premières se résume en l'analyse granulométrique du sable et de l'argile, la mesure de la densité du plastique. L'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'analyse par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont été faites sur le plastique (PEBD) afin de connaître son comportement thermique. Diverses autres propriétés importantes ont été obtenues à partir de cette caractérisation.

Quant à la caractérisation des échantillons, elle se résume à la mesure des résistances en compression, en flexion trois (3) points, à la résistance à l'usure et à l'absorption d'eau.

Une observation au microscope des matériaux a été réalisée afin d'observer leur structure interne. L'analyse des résultats obtenus (chapitre suivant), permettra de mieux connaître les qualités et les particularités des matériaux.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET
DISCUSSION

Chapitre V :
CARACTERISATION DE
LA MATIÈRE PREMIÈRE

Introduction

La mise en œuvre d'un matériau suppose une bonne connaissance des propriétés physiques et chimiques des matières qui le composent.

Dans ce chapitre nous allons, procéder à la caractérisation physique, chimique, minéralogique et thermique des matières premières afin de mettre en évidence les propriétés essentielles qui pourraient influencer le comportement des matériaux.

V.1 Sable

V.1.1 Analyse granulométrique

V.1.1.1 Sable d'Abidjan

Les répartitions granulométriques des sables A et B utilisés pour la confection de nos échantillons sont présentées par la figure 33.

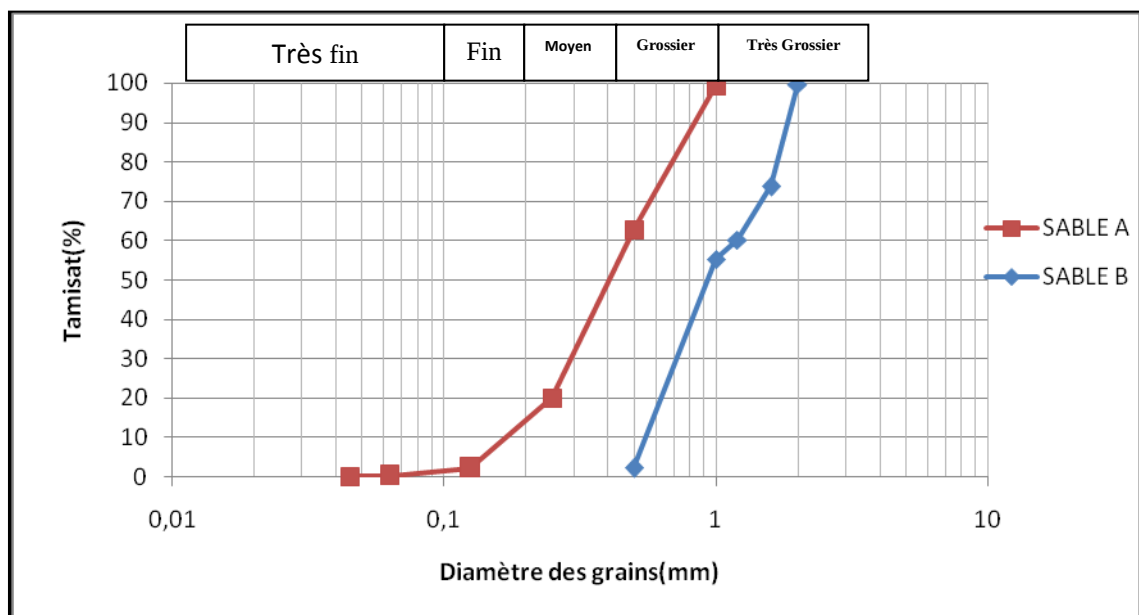


Figure 33: Courbe de l'analyse granulométrique du sable d'Abidjan.

La composition des deux sables selon les normes SCCS, USDA, Wentworth, Gradistat et UNIFIED (USCS) (Cyr, 2002) est représentée dans le tableau IV suivant :

Tableau IV : Répartition granulométrique

Diamètre des particules (mm)	Pourcentage des particules	Pourcentage des particules
	SABLE A (%)	SABLE B (%)
0,1 à 0,25	18	0
0,25 à 0,5	42	0
0,5 à 1	38	55,25
1 à 2	0	44,75

Le sable A, a une classe granulaire 0/1 tandis que celle du sable B est 0/2. Leur module de finesse selon la norme **EN 12620 (Ghomari et Bendi-ouis, 2007)**, est de 2,15 pour le sable A et de 3,4 pour le sable B. Selon cette même norme lorsque le module de finesse est compris entre 1,8 et 2,2, le sable est à majorité de grains fins. De même quand le module est supérieur à 2,8 le sable est grossier. On en déduit alors que le sable A est fin, tandis que le sable B est grossier.

Pour caractériser la répartition en taille des particules dans chaque type de sable, le coefficient d'uniformité ou Hazen (C_u = rapport du diamètre de 60% du passant cumulé sur le diamètre de 10% du passant cumulé sur la courbe) a été déterminé.

Ainsi le sable A et le sable B ont respectivement le C_u égale à 3,3 et 2. Selon les classifications proposées par **Benghazi (2015) ; Thiesson (2014), Degoutte et Royet (2009), et Dysli (1997)**, le sable A possède une granulométrie étalée et B une granulométrie uniforme. Ce qui veut dire que dans le sable A (étalé), toutes les tailles de grains sont représentées avec une majorité de fine et dans le sable B (uniforme) les grains sont à peu près tous de la même taille avec une majorité de grains grossier.

V.1.1.2 Sable de Belfort

Le sable brut prélevé a été tamisé de sorte à obtenir quatre types de sable. La figure 34 présente la courbe granulométrique de quatre types de sable.

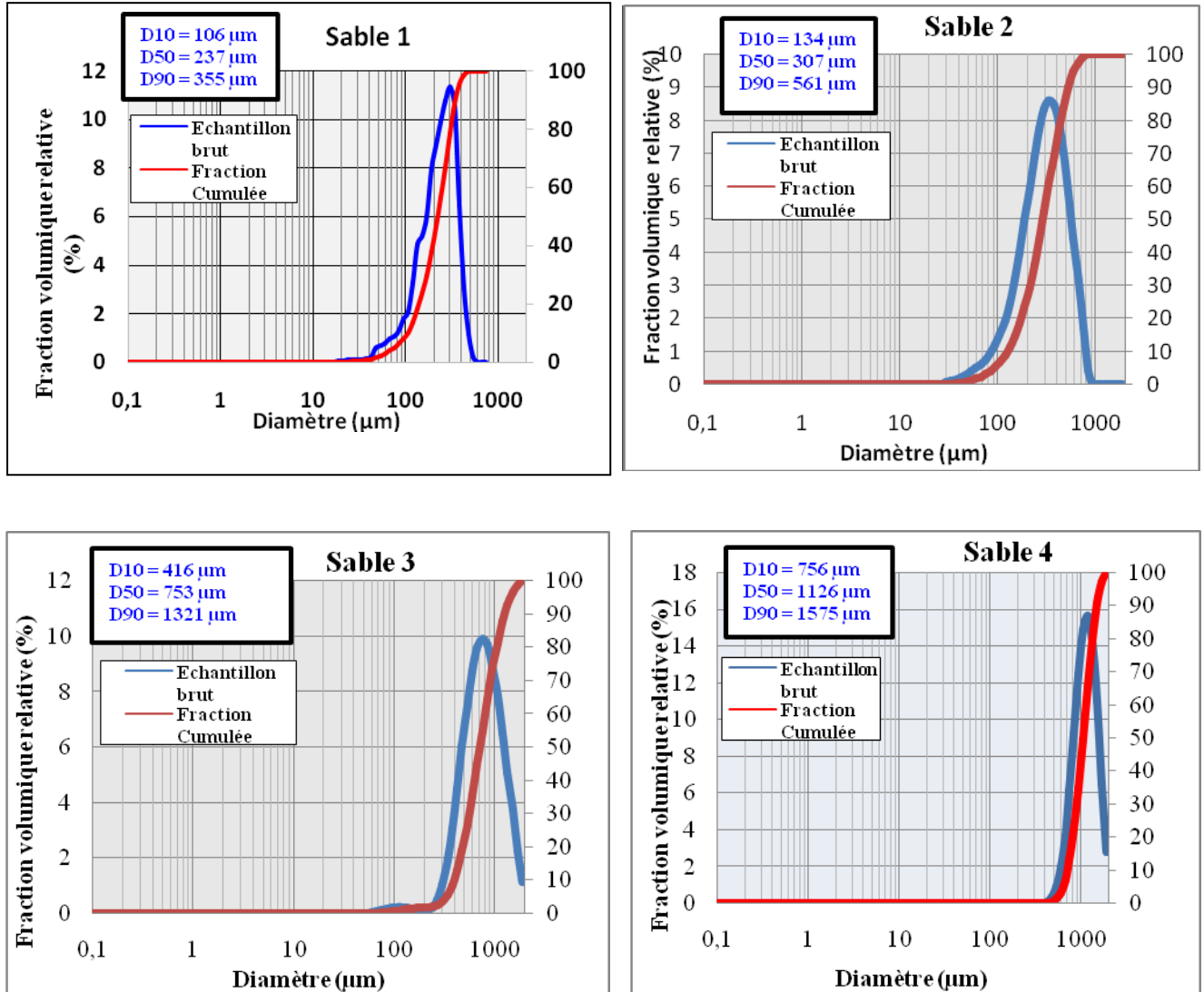


Figure 34 : Courbe de l'analyse granulométrique des différents types de sable de Belfort.

Les diamètres des particules sont déterminés par le granulomètre laser qui fournit directement la répartition en classe et la fonction de distribution à partir des diamètres équivalents en volume. C'est ainsi que les diamètres correspondants à 10, 50 et 90 % de la fraction cumulée en volume ont été déterminés. Les résultats sont résumés dans le tableau V suivant:

Les diamètres des particules de sables sont inférieurs ou égaux aux valeurs indiquées dans le tableau.

Tableau V : Diamètres des particules des sables en fonction des pourcentages de la fraction cumulée.

Types de sable	Diamètre des particules (μm)		
	10 %	50 %	90 %
Sable 1	106	237	355
Sable 2	134	307	561
Sable 3	416	753	1321
Sable 4	750	1126	1575

Selon les normes Wentworth modifiée et UNIFIED(USCS) (Cyr, 2002), ces sables sont classés comme suit :

- Sable 1 = sable très fin,
- Sable 2 = sable fin,
- Sable 3 = sable moyen,
- Sable 4 = sable grossier.

V.2 Plastique

V.2.1 Densité

Pour déterminer la densité du plastique, nous avons d'abord confectionné des échantillons constitués de 100 % de plastique. Ensuite la densité est obtenue à partir de la formule (3) (cf. IV.3.1.1). La densité ainsi obtenue est de 0,93 à Abidjan et 0,92 à Belfort. Selon la norme ASTM D1248, les deux plastiques utilisés sont du Polyéthylène Basse Densité (PEBD).

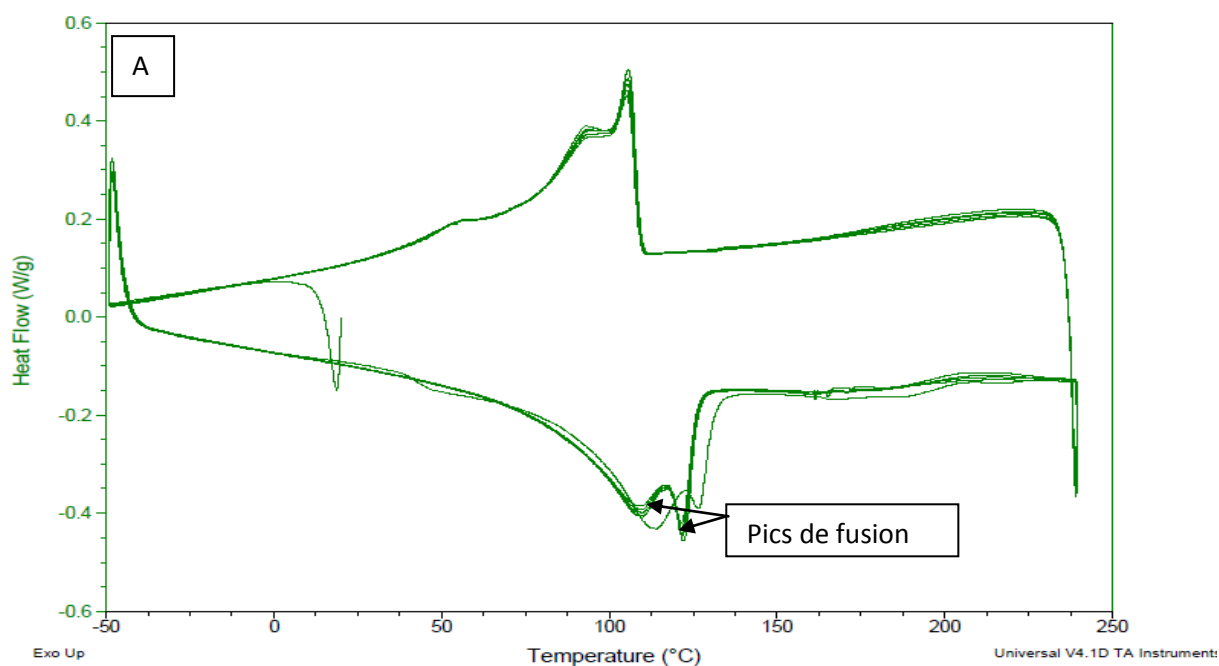
V.2.2 Analyse thermique

Les résultats de l'analyse thermique permettent d'observer le comportement thermique du plastique. La figure 35 représente les courbes de DSC des plastiques.

Sample: PE recyclé pressé
Size: 11.0000 mg
Method: test standard

DSC

File: C:\...BRAHIMAN\brahiman\DSC PE 100.001
Operator: RL
Run Date: 2016-06-01 16:21
Instrument: DSC Q10 V9.0 Build 275



Sample: PE recyclé abidjan
Size: 11.0000 mg
Method: test standard

DSC

File: C:\...brahiman\DSC PE 100 abidjan.001
Operator: RL
Run Date: 2016-07-05 09:47
Instrument: DSC Q10 V9.0 Build 275

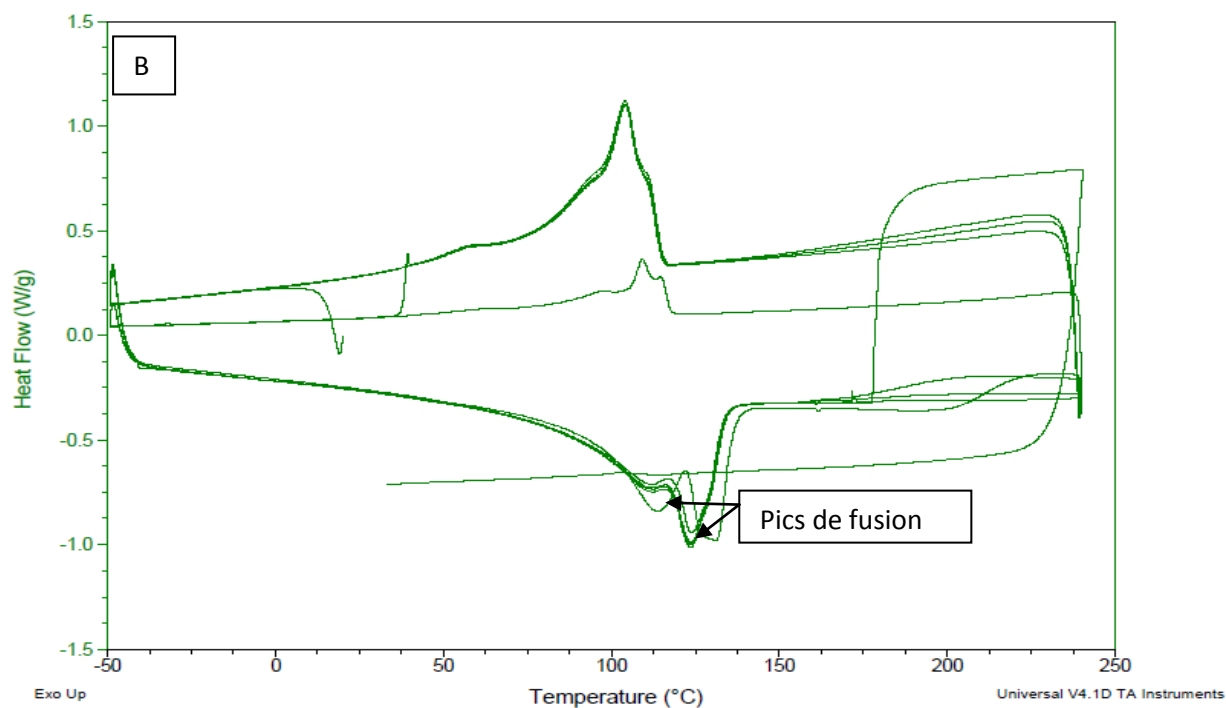


Figure 35 : Courbe DSC (A : plastique d'Abidjan ; B : plastique de Belfort).

Les deux courbes présentent presque les mêmes caractéristiques. On observe deux pics de fusion. Les pics se trouvent entre 110°C et de 130 °C. Selon **Matra Plast (2004)**, les deux types de plastiques sont du Polyéthylène Basse Densité (PEBD). Pour déterminer la température d'élaboration, les échantillons ont été confectionnés à 140, 160 et 170 ° C. Il a été constaté qu'à 170 ° C le plastique est plus fluide par rapport aux autres températures (140 et 160 ° C). La température de 170 ° C a donc été choisie pour la confection des échantillons parce que nous avons vu qu'à cette température le plastique est bien fondu. Et surtout pour ne pas atteindre 200 ° C qui est proche de la température de dégradation du PEBD. La figure 36 présente aussi les courbes ATG des plastiques.

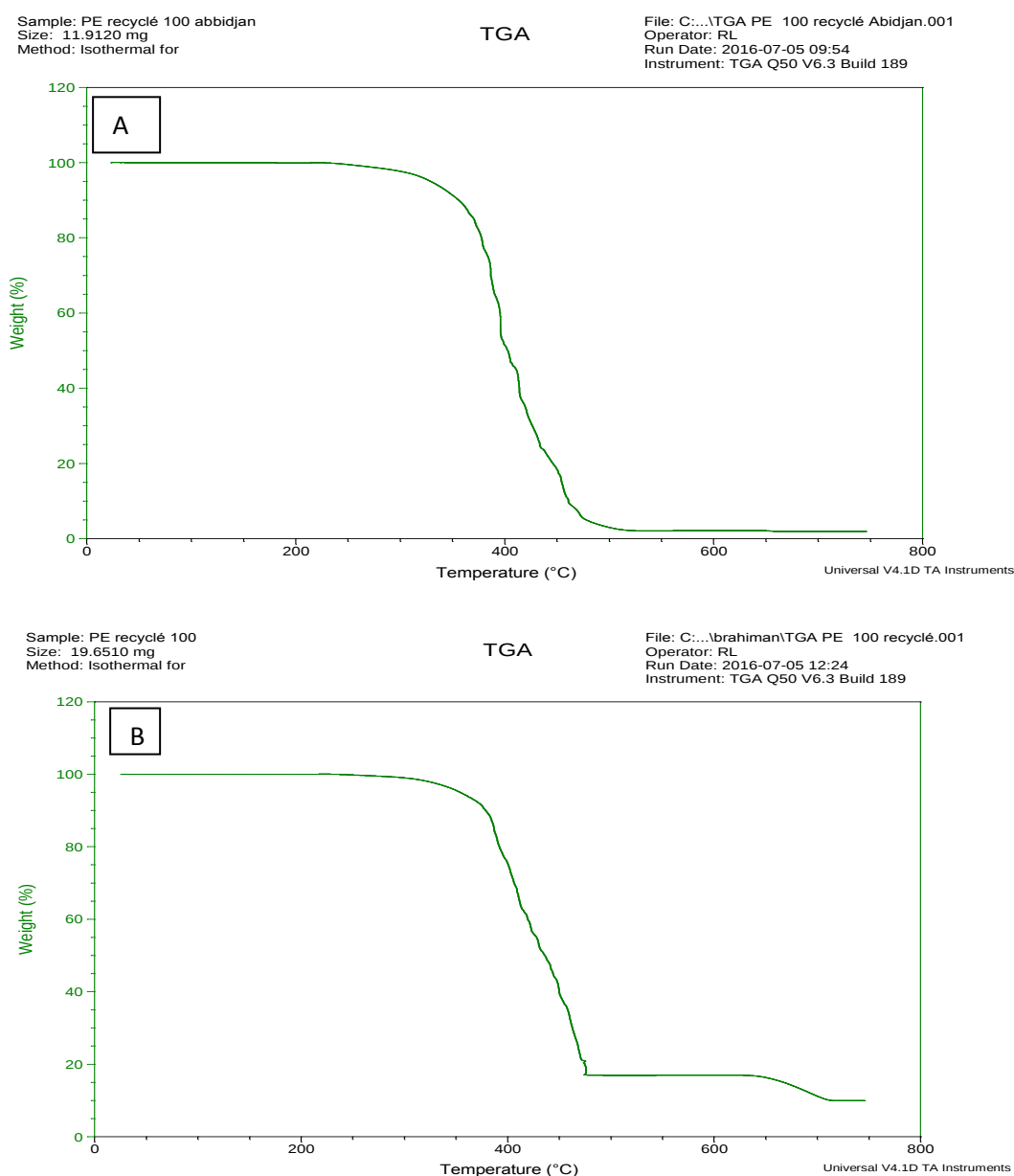


Figure 36 : Courbes TGA (A : plastique d'Abidjan ; B : plastique de Belfort)

On observe que le plastique est pratiquement décomposé (reste environ 2%) aux alentours de 450 °C pour le plastique d'Abidjan (Figure 36.A). Par contre le plastique de Belfort, ne se décompose pas complètement (reste environ 15 %) à cette température et il reste environ 8 % jusqu'à la fin de l'essai (650 °C) (Figure 36.B).

A 650 °C, il reste un résidu blanc (Figure 37), qui pourrait être la charge ou des composés utilisés pour la fabrication du plastique qui ne se décomposent pas à cette température.



Figure 37 : Résidu après l'ATG

V.3 Argile

V.3.1 Analyse granulométrique

L'argile brute broyée est d'abord passée au tamis de 500 μm . Le passant récupéré a permis de préparer trois types d'argile à différentes granulométries. La figure 38 présente la courbe granulométrique des trois types d'argile.

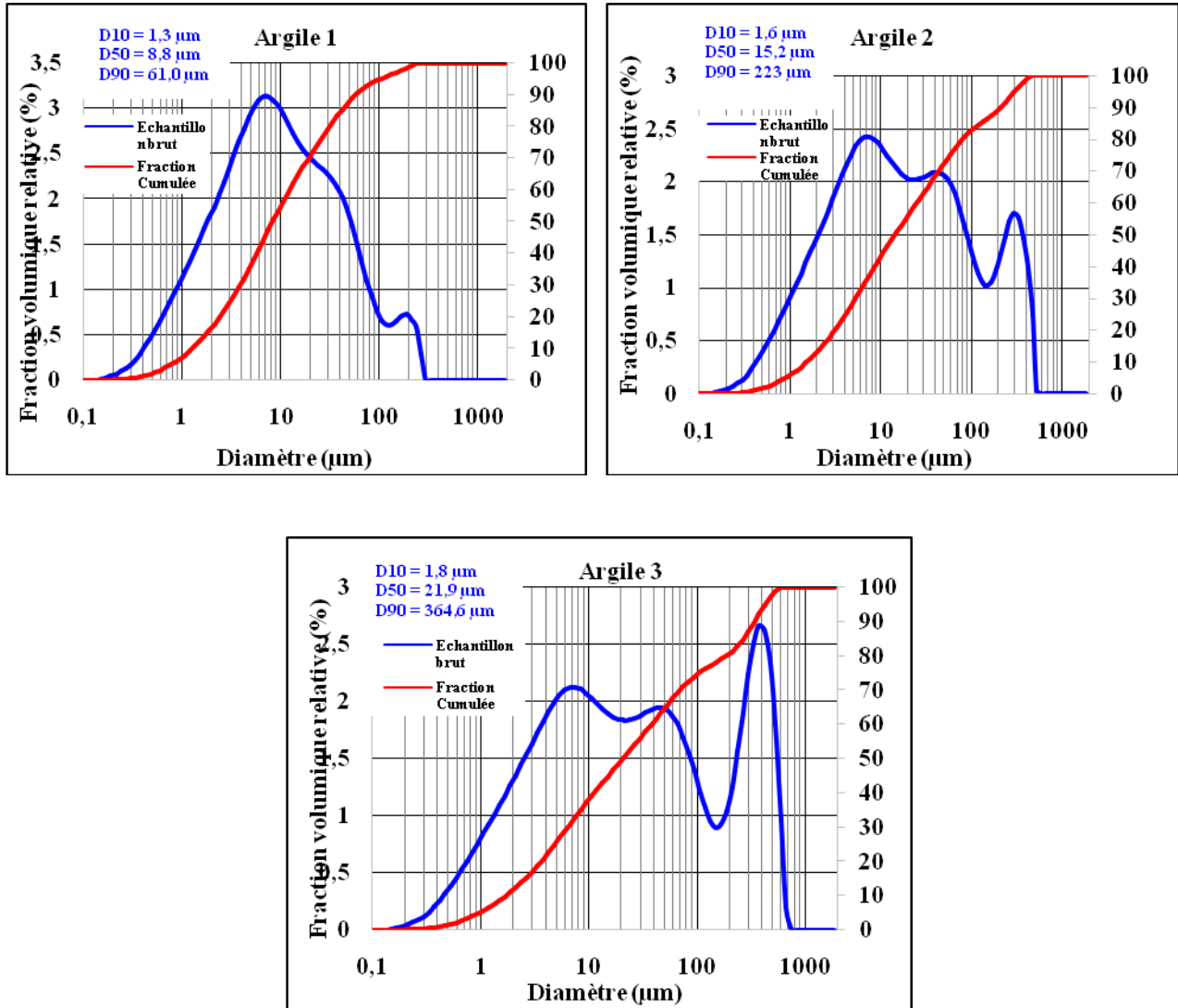


Figure 38 : Courbe de l'analyse granulométrique des différents types d'argile

Les diamètres correspondants à 10, 50 et 90 % de la fraction cumulée en volume ont été déterminés. Les résultats sont résumés dans le tableau VI suivant :

Les diamètres des particules d'argile sont inférieurs ou égaux aux valeurs indiquées dans le tableau.

Tableau VI : Diamètres des particules des argiles en fonction des pourcentages de la fraction cumulée.

Types d'argile	Diamètres des particules (μm)		
	10 %	50 %	90 %
Argile 1	1,3	8,8	61
Argile 2	1,6	15,2	223
Argile 3	1,8	21,9	364

Selon les normes Wentworth modifiée et UNIFIED(USCS) (Cyr, 2002), ces trois argiles sont classées comme suit :

- Argile 1= argile fine
- Argile 2 = argile moyenne
- Argile 3 = argile grossière.

Conclusion

L'analyse granulométrique montre la répartition et la proportion des différents grains de sable et d'argile. Les analyses thermiques ont permis de connaître les températures de fusion du plastique (PEBD). A partir de cette température de fusion, des échantillons ont été confectionnés à différentes températures afin de faire le choix de la température d'utilisation (170 ° C) du plastique. Les résultats du calcul de la densité du plastique sont de 0,93 pour celui d'Abidjan et 0,92 pour celui de Belfort.

Chapitre VI :
CARACTERISATION DES
MATERIAUX ISSUS DE LA
COMPRESSION
MANUELLE
(SITE : ABIDJAN)

Introduction

Pour l'élaboration d'un matériau à base de déchet plastique et de sable, il est nécessaire de chercher les proportions optimales des constituants afin d'obtenir un produit qui respecte les normes. Cependant leur entrée véritable dans la gamme des produits de construction sera basée sur leurs performances physiques et mécaniques. Ce chapitre présentera l'influence de chaque proportion sur les résistances mécanique obtenues à partir des essais destructifs et non destructifs.

VI. 1 Propriétés physiques

VI.1.1 Effet du taux de plastique sur la densité apparente

La figure 39, présente la variation de la densité apparente en fonction du taux de PEBD pour le sable A et le sable B.

Pour le sable A, la densité augmente (1,7 à 2,9) de 15 à 25 % de PEBD avant de baisser (2,9 à 2) de 25 à 40 % de PEBD. Par contre celle du sable B, augmente (1,5 à 2,9) de 15 à 30 % de PEBD avant de baisser (2,9 à 2,7) de 30 à 40 % de PEBD.

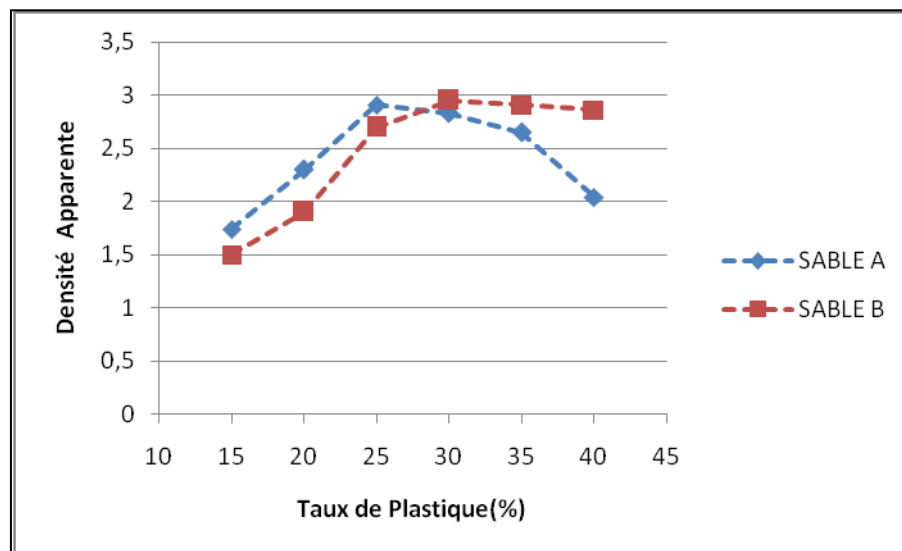


Figure 39: Densité apparente en fonction du taux de PEBD

De 15 à 30 % de PEBD la densité des échantillons avec le sable A se trouve au-dessus de celle du sable B. Tandis que de 30 à 40 % de PEBD, c'est l'inverse qui se réalise.

Les grains du sable A étant plus fins, sont enrobés ou liés plus facilement avec peu de plastique. Ainsi, les espaces inter-granulaires constituant les vides sont moindres.

Par contre dans le sable B, il faut plus de plastique pour lier ou enrober les grains qui sont plus grossiers. Il existera alors plus de vides entre les grains induisant une densité basse.

A partir de 30 % de PEBD, les courbes s'inversent parce que le matériau avec le sable A contient trop de plastique et donc la densité va tendre vers celui du PEBD (faible), tandis que le matériau avec le sable B devient plus consolidé avec peu de vide.

VI.1.2 Essai d'absorption d'eau

La figure 40 montre la variation du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en plastique.

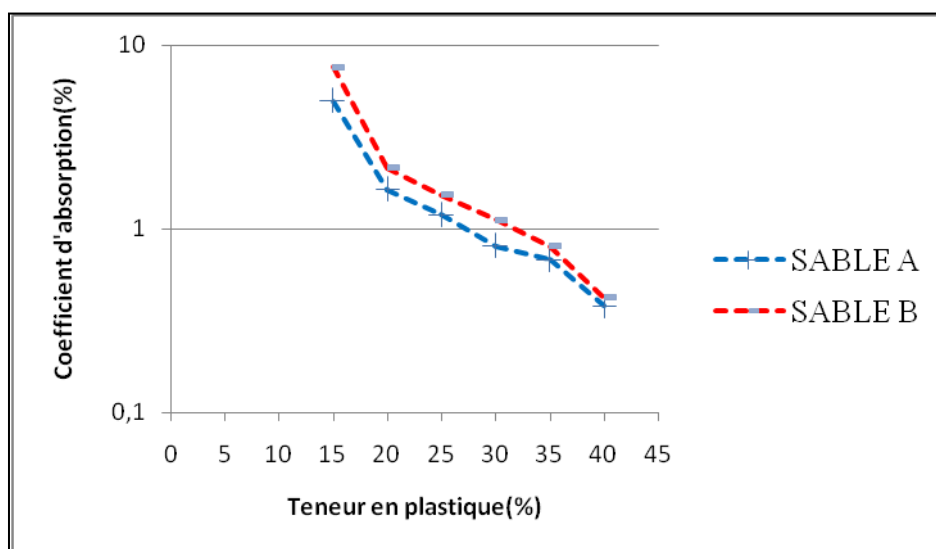


Figure 40 : Variation du coefficient d'absorption en fonction du taux de PEBD.

L'absorption baisse de 5 à 0,38 % lorsqu'on passe de 15 à 40 % de PEBD pour le sable A tandis que celle du sable B baisse de 7,56 à 0,42 %.

Ce résultat vient confirmer en partie celui de la densité car un matériau avec plus de vides inter-granulaires (matériau moins dense) absorbe plus d'eau. Par contre la courbe d'absorption du sable A reste toujours en dessous de celle du sable B car l'apport croissant de plastique qui est hydrophobe, va empêcher l'eau d'entrer dans le matériau.

La norme NBN EN 1338 exige une absorption ≤ 6 % alors que l'absorption obtenue sur les échantillons varie de 5 à 0,38 % pour le sable A et de 7,56 à 0,42 pour le sable B.

VI.2 Propriétés mécaniques

VI.2.1 Essais destructifs

VI.2.1.1 Influence du plastique et de la granulométrie du sable sur la résistance en flexion.

La figure 41 présente les courbes de résistance en flexion des matériaux obtenus à partir de deux types de sable : sable A et sable B dont les granulométries ont été déterminées (cf. V.1.1.1).

Les résultats montrent une variation de la résistance en fonction du taux de plastique dans le matériau.

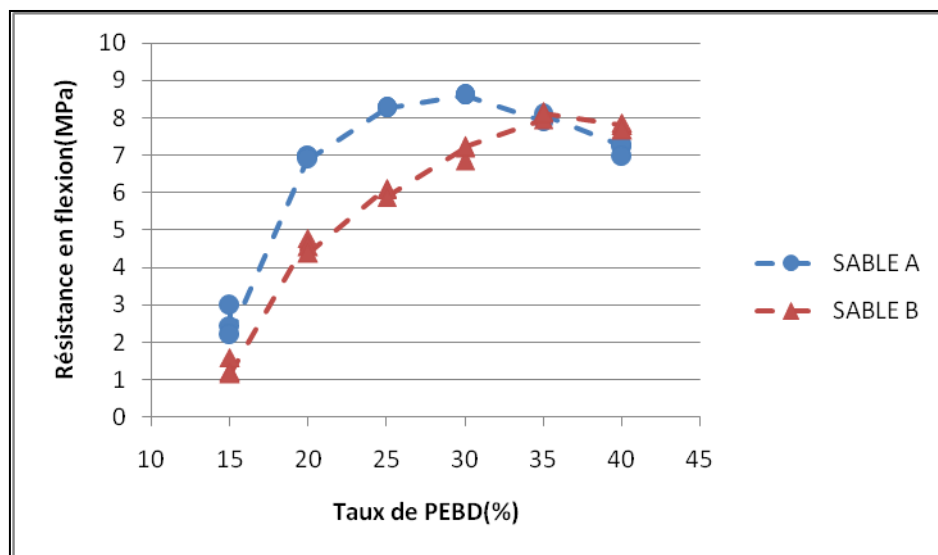


Figure 41: Variation de la résistance en fonction du taux de plastique.

Pour le sable A, on observe une augmentation de la résistance (2,54 à 8,6MPa) lorsqu'on passe de 15 à 30 % de plastique. Puis la résistance baisse (8,6 à 7 MPa) lorsqu'on passe de 30 à 40 % de plastique (PEBD).

Avec le sable B, la résistance augmente (1,33 à 8, 9MPa) de 15 à 35 % de plastique.

Lorsque le taux de plastique augmente, nous obtenons de plus en plus un mélange contenant une quantité suffisante de PEBD pour lier ou enrober les grains de sable. Au-delà de 30 % de PEBD (sable A) et 35 % (sable B), la résistance chute car le mélange contient trop de plastique qui a une résistance faible.

Sur la figure 42, on remarque deux parties : la première où la courbe de résistance du sable B se trouve en dessous de celle du sable A (Jusqu'au taux de 35 %) et la deuxième (entre 35 et 40 %) où l'inverse se produit. Cela montre que lorsque les grains sont grossiers il faut alors plus de plastique pour les lier ou enrober.

Ces résultats concordent avec ceux de **Rakotosaona et al (2014) ; Doublier (2012), Cascade (2011)**. Par contre nous obtenons des résultats plus élevés. Cette différence de résistance est due à la méthodologie de mise en forme.

Ces auteurs font une coulée lors de la mise en forme du matériau, alors que nous faisons un compactage, ce qui renforce la cohésion entre le sable et le plastique induisant ainsi une résistance plus élevée.

VI.2.1.2 Influence du plastique sur le module d'élasticité en flexion

La figure 42 montre une variation du module en flexion en fonction du taux de plastique avec les deux types de sable.

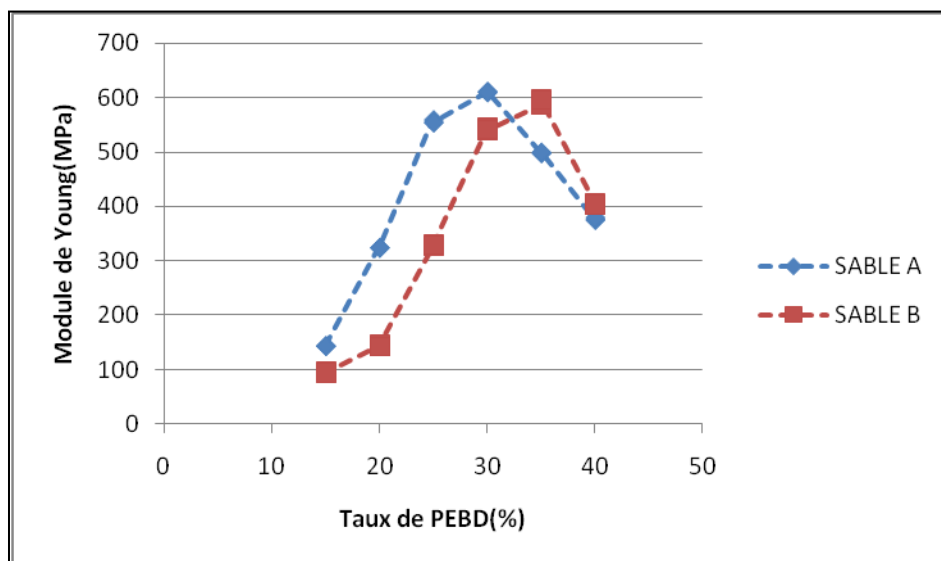


Figure 42 : Variation du module en fonction du taux de plastique.

Le module en flexion du sable A augmente (120 à 600 MPa) de 15 à 30 % de plastique, puis baisse de 600 à 380 MPa quand le taux de plastique passe de 30 à 40 %. Pour le sable B, il augmente (96,5 à 593,4) de 15 à 35 % de PEBD, puis baisse à 405 MPa avec 40 % de PEBD.

Ces résultats confirment les résultats de la résistance en flexion, car plus le module est élevé, plus le matériau est rigide (**Chateigner, 2012**), et donc le matériau est résistant.

Les grains de sable bien enrobés entraînent une rigidité du matériau jusqu'au taux idéal (30 % PEBD pour le sable A et 35 % pour le sable B). Au-delà de ce taux, le matériau tend plus vers un matériau constitué de plastique qui n'est pas un matériau rigide.

Les meilleurs résultats étant obtenus avec le sable A, nous avons alors choisi ce dernier pour la suite des travaux.

VI.2.1.3 Influence du plastique sur le mode de rupture en flexion

Des observations ont été faites sur le mode de rupture des matériaux en fonction du taux de plastique. Les résultats sont représentés sur la figure 43.

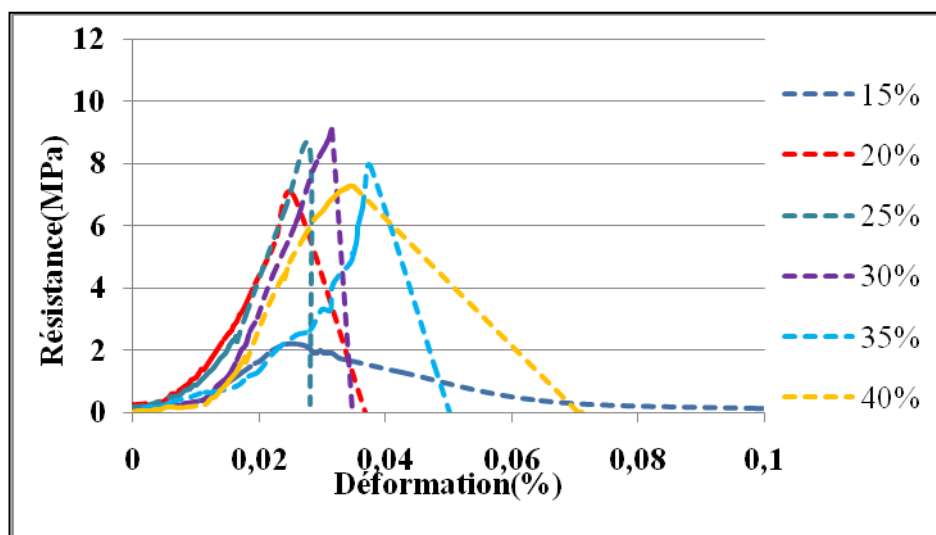


Figure 43 : Courbe contrainte-déformations

Cette figure montre que la rupture se produit brusquement lorsque la valeur maximale de la résistance est atteinte sans déformation plastique. La rupture est donc fragile dans la plupart des cas. Néanmoins cette rupture fragile est moins prononcée pour les taux de 15 et 40 % de plastique. Ce mode de rupture pourrait s'expliquer par la rupture du matériau qui se fait par ouverture (Figure 44). En effet, lors de l'essai, la demi-éprouvette supérieure travaille en compression tandis que la demi éprouvette inférieure travaille en traction, cette traction est d'autant plus forte que l'on se rapproche de la face inférieure et du centre de l'éprouvette. La rupture se produit à partir de cette face à l'aplomb de l'appui exerçant la force. Dans notre cas

la rupture intervient lorsque le plastique fondu est rompu. Ce dernier étant fondu et refroidi, devient cassant.

Il y a donc rupture simultanée de toutes les liaisons qui peuvent exister. Selon les études de **Charmet (2015)**, lorsqu'on est dans ce cas, la fissure est orientée perpendiculairement à la contrainte, et les pointes de l'ellipse sont soumises à une forte traction provoquant la propagation instable de la fissure conduisant donc à rupture brutale.

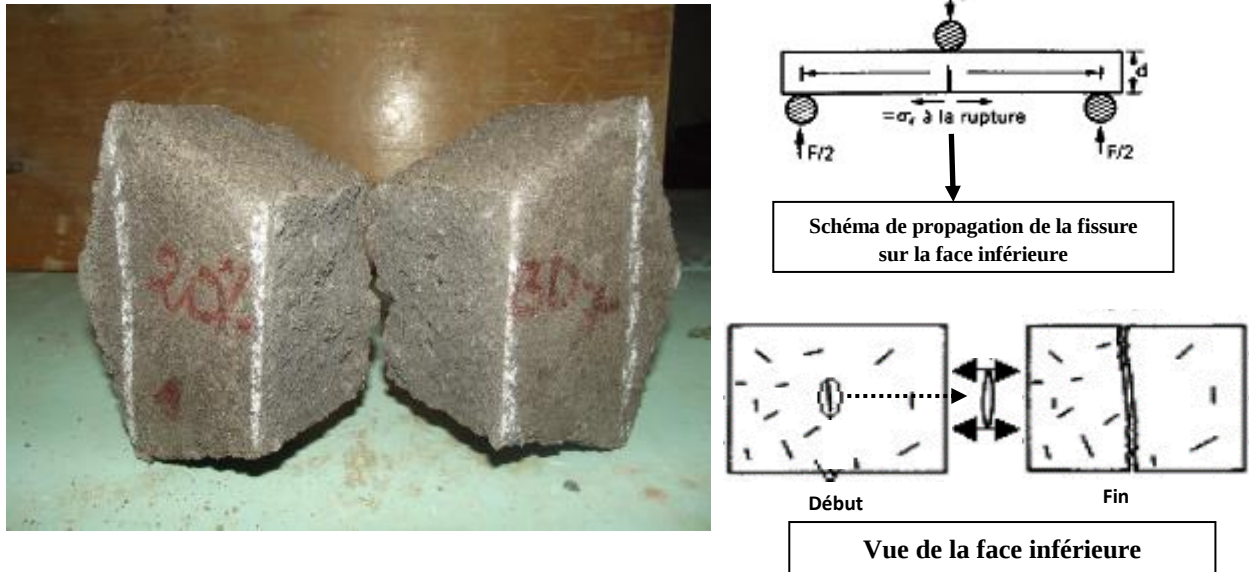


Figure 44: Image de la rupture en flexion et schéma explicatif de la propagation de la fissure.

VI.2.1.4 Influence du plastique sur la résistance en compression

A partir des courbes contrainte-déformation obtenues, le tableau 4 mis en annexe, a été construit. Avec les valeurs de la résistance à la compression, la figure 45 a été réalisée. Cette figure présente la variation de la résistance en compression en fonction du taux de plastique.

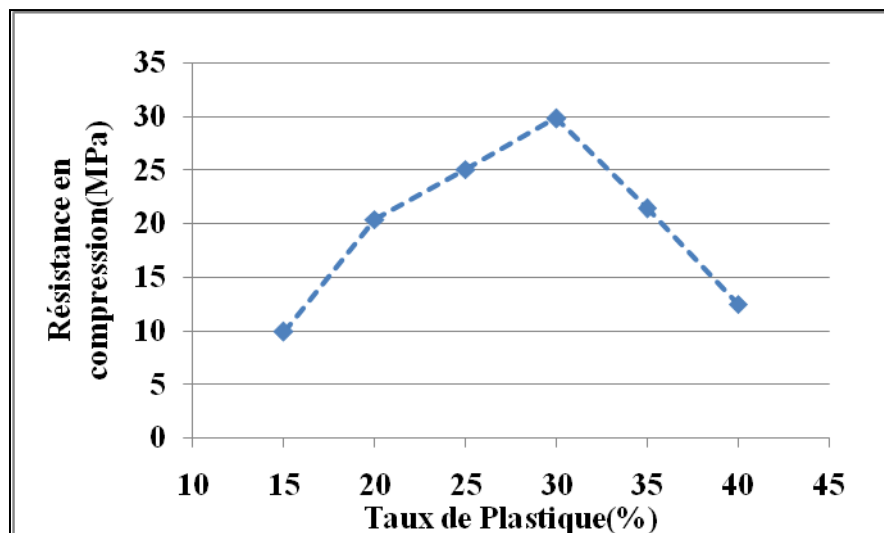


Figure 45 : Variation de la résistance en fonction du taux de plastique

Elle montre une augmentation de la résistance (10 à 30 MPa) lorsque la teneur en PEBD passe de 15 à 30 %. Puis la résistance baisse de 30 à 13 MPa quand on passe de 30 à 40 % de PEBD. Comme en flexion, la résistance croît lorsque les grains de sable sont liés ou enrobés, jusqu'au taux optimal. Au-delà de ce taux, le matériau contient de plus en plus du plastique, le rendant moins résistant car le plastique a une résistance en compression faible.

Certains auteurs (**Guendouz et al, 2016 ; Ganiron, 2014 ; Praveen et al, 2013 ; Ghernouti et Rabehi, 2011**) qui utilisent les déchets plastiques comme agrégats grossiers dans des matrices cimentaires obtiennent également des résultats où la résistance augmente jusqu'à la proportion idéale avant de baisser. Cela est dû au fait que l'augmentation du plastique dans le mélange réduit l'adhérence du plastique avec la pâte cimentaire induisant ainsi la baisse de la résistance.

VI.2.1.5 Influence du plastique sur le module en compression

La figure 46 présente la variation du module de Young en fonction du taux de PEBD.

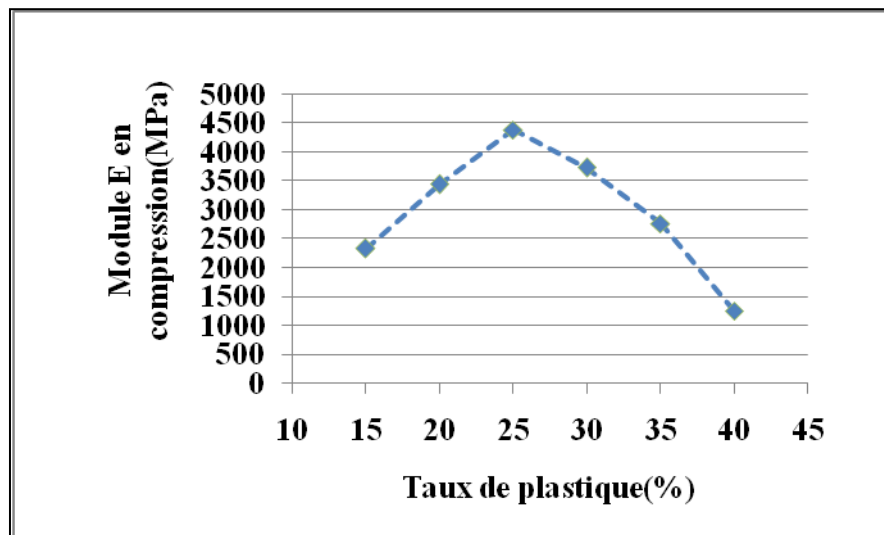


Figure 46 : Variation du module en fonction du taux de plastique.

Le module de Young évolue (2338 à 4393 MPa) avec le taux de plastique de 15 à 25 % de PEBD. Ensuite le module baisse (3742 à 1275 MPa) quand le taux de PEBD passe de 30 à 40 %. Ainsi entre 15 et 25 % de plastique le matériau devient plus rigide à cause de la teneur en sable qui est élevée comprise entre 85 et 75 %. La sollicitation exercée sur l'échantillon est

portée à la fois par le plastique et les grains de sable. En effet à 100 % de sable ou 0 % de plastique, il n'y a pas de cohésion car le sable est meuble. Ensuite l'apport de plastique crée progressivement une cohésion et passe par un maximum à 25 %.

Par contre, au-delà de 25 % de plastique, la rigidité du matériau chute avec l'augmentation de la teneur en PEBD, à cause de la faible rigidité du PEBD qui est en excès.

VI.2.1.6 Influence du plastique sur le mode de rupture en compression

Comme en flexion des remarques ont été faites sur le mode de rupture en compression. La figure 47 représente un échantillon des courbes contrainte-déformation à différents taux de plastique. Les courbes ont une allure en cloche très aplati au sommet. Elles peuvent être divisées en deux domaines : un domaine de comportement élastique réduit et un domaine de comportement plastique très étendu. L'ampleur de ce domaine plastique augmente avec le taux de plastique dans les échantillons.

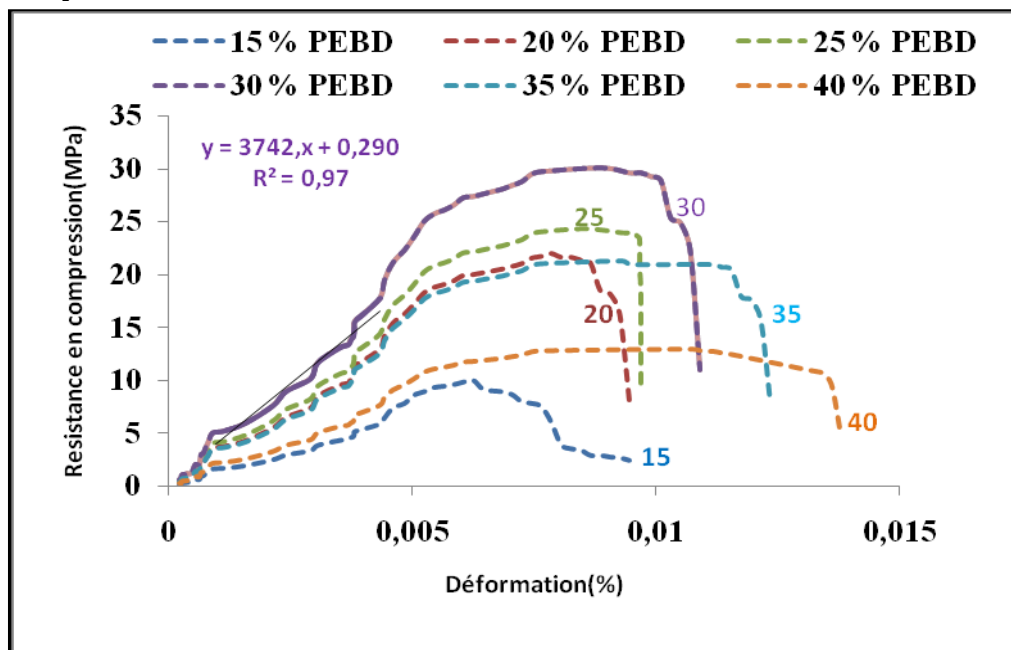


Figure 47 : Courbe contrainte-déformation.

Les pentes à ces courbes dans le domaine élastique sont données dans le tableau 4 en annexe. Chacune des valeurs est une moyenne calculée sur 3 échantillons et correspond au module d'élasticité E du matériau (Mesta et Reiffsteck, 2002).

Lorsque le taux de PEBD augmente, la sollicitation est majoritairement supportée par le PEBD. Ainsi à partir d'une valeur relativement faible de la sollicitation, les déformations plastiques deviennent supérieures voire largement supérieures aux déformations élastiques.

Le matériau se retrouve dans une situation quasiment incompressible (**Al Akhrass, 2014 ; Michel-Ponnelle, 2013**). La résistance de l'échantillon est alors faible.

C'est pourquoi, à partir de 35 % de plastique les résistances à la compression des échantillons chutent pendant que la teneur en PEBD augmente.

Cependant, la plus forte résistance est obtenue à 30 % de PEBD quoi que sa valeur de E soit moins élevée que celle des échantillons à 25 % de PEBD.

Une déformation ductile est observée quelque soit le taux de PEBD, contrairement à la déformation en flexion. Ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'en compression la rupture se fait par cisaillement généralement sans séparation des blocs (Figure 48).



Figure 48: Image de la rupture en compression et schéma explicatif de la propagation des fissures.

Les fissures se propagent de manière progressive et devient de leur orientation initiale pour se propager parallèlement à l'axe de compression. La rupture n'est pas provoquée par la progression rapide d'une fissure unique comme en flexion, mais par la coalescence des microfissures qui forment une zone d'écrasement. Selon les travaux de **Charmet (2015) ; Molimard (2011) ; Le Corre (2007)**, la propagation des fissures se fait par déchirement ductile en consommant beaucoup d'énergie par déformation plastique.

Dans notre cas, plus il y a du PEBD et plus il y a déformation plastique.

VI.2.1.7 Evaluation du Coefficient de poisson

La maîtrise des déformations des matériaux permet de prévoir leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des efforts divers. Cette maîtrise passe par la connaissance du module d'élasticité et aussi du coefficient de poisson.

A partir de la technique proposée par **Badel et Perre (1999)**, les courbes $\epsilon_{yy} = f(\epsilon_{xx})$ ont été tracées. Les coefficients de Poisson donnés par la formule $\nu = \frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}}$ correspondant à la pente ont été déterminés pour les différentes teneurs en PEBD (figure 50).

Le coefficient de poisson évolue de 0,19 à 0,39 en fonction du taux de plastique (Tableau VII). Lorsque l'échantillon contient plus de plastique, il ressemble à du caoutchouc (figure 49) qui a une valeur de $\nu \approx 0,5$ (**Lecomte-Beckers, 2009b**).



Figure 49: Matériau contenant 40% de plastique.

Tableau VII : Valeurs des coefficient de poisson en fonction du taux de plastique

Taux de plastique	Coefficient de Poisson
15	0,197
20	0,229
25	0,272
30	0,303
35	0,353
40	0,393

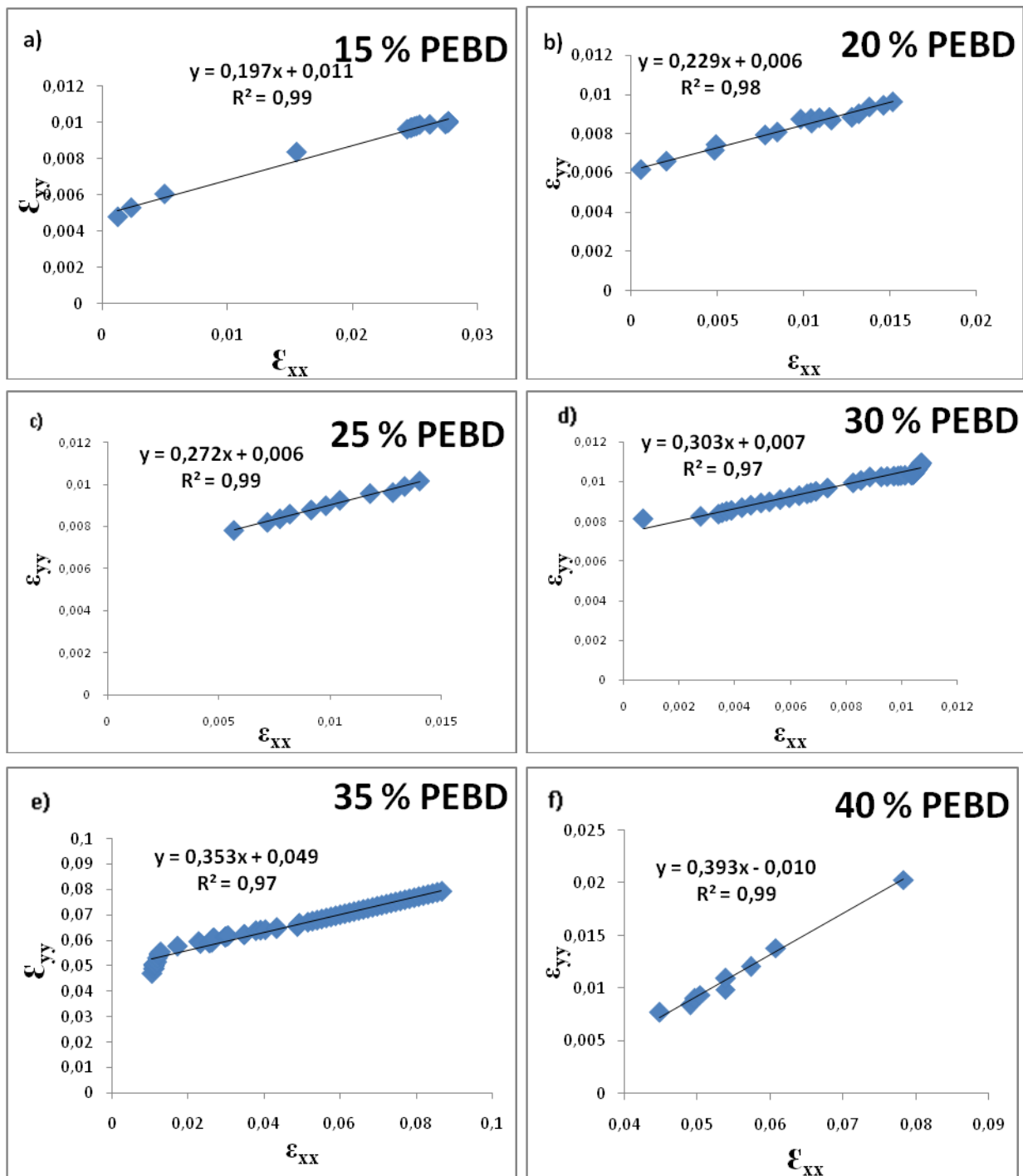


Figure 50 : Courbe $\epsilon_{xx} = f(\epsilon_{yy})$ et valeur du coefficient de poisson

a) 15% PEBD; b) 20 %PEBD; c) 25 %PEBD;
d) 30 % PEBD; e) 35 % PEBD; f) 40 % PEBD.

L'évolution du coefficient de poisson s'explique par la capacité considérable du matériau à se déformer dans la direction perpendiculaire à la sollicitation. Cependant dans sa direction de sollicitation, il devient incompressible avec l'augmentation de la teneur de PEBD. Cela est conforme aux résultats d'**Elias (2014)**.

VI.2.1.8 Essai d'usure.

La figure 51 montre l'usure (enfoncement de la pointe) en fonction du taux de PEBD.

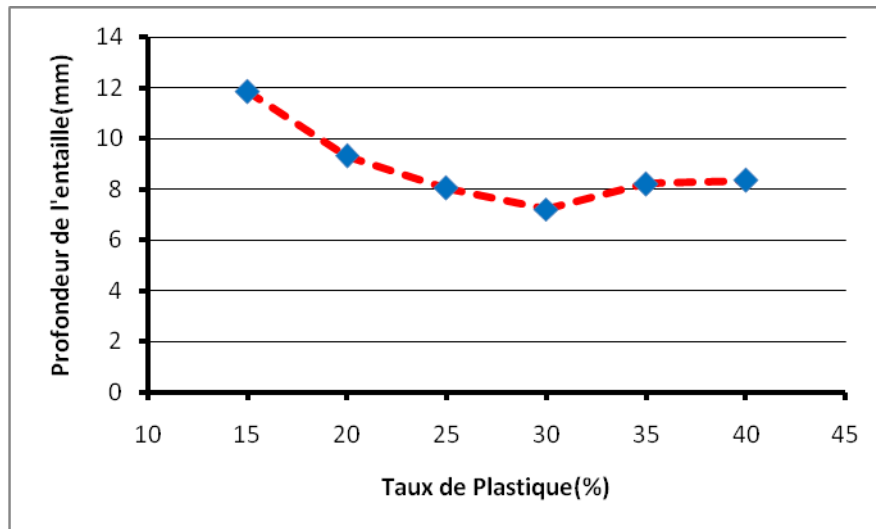


Figure 51 : Variation de l'usure en fonction du taux de PEBD.

La profondeur baisse de 15 à 30 % de PEBD. Cette baisse est due à la consolidation des grains par l'apport croissant de PEBD. Au-delà de 30 %, il y a une augmentation de la profondeur due au fait qu'on a trop de PEBD dans le mélange. Le matériau est constitué en grande proportion de PEBD qui est moins résistant.

VI. 2.2 Essais non destructifs

VI.2.2.1 Essai au scléromètre

L'indice de rebond est la valeur donnée par le scléromètre lors de la mesure de la dureté de surface au choc du matériau.

La résistance probable du matériau en fonction de la mesure de l'indice de rebond est déterminée avec un abaque de transformation établi et intégré dans l'appareil.

La figure 52.A montre les valeurs de l'indice de rebond obtenues en fonction du taux de PEBD. Aussi la figure 52.B montre les moyennes de l'indice de rebond et la résistance probable correspondant pour chaque taux de plastique.

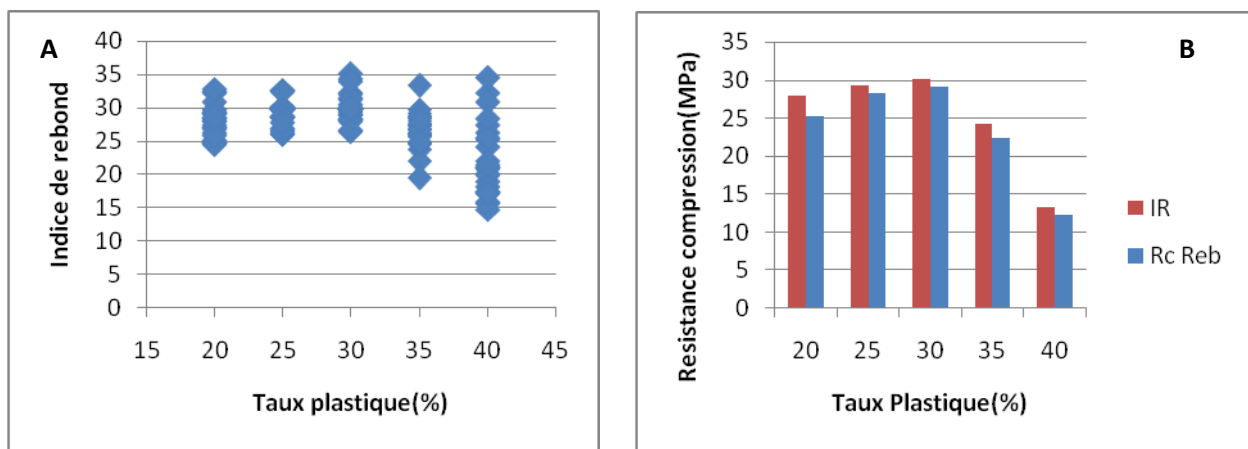


Figure 52 : Variation de l'indice de rebond (A) et résistance probable (B) en fonction du taux de PEBD.

La moyenne des indices de rebond augmente de 24 à 35 (figure 53.A) quand le taux de PEBD évolue de 20 à 30%. A partir de 35 % de PEBD l'indice de rebond baisse et présente une plus grande dispersion.

La dispersion serait due à l'hétérogénéité du matériau. Plus le matériau est hétérogène et plus on aura une grande variation des valeurs du rebond. La baisse de l'indice de rebond et la chute de la résistance probable seraient également dues au fait que le matériau est constitué en grande partie par du PEBD qui a une résistance faible au choc du scléromètre.

VI.2.2.2 Essai à l'ultrason

VI.2.2.2.1 Influence du taux de PEBD sur la vitesse d'ultrason

Le temps de propagation des ondes dans le matériau a permis de calculer la vitesse de l'onde à partir de l'équation (7) (cf. IV.3.1.7). Les résultats sont présentés sur le graphe de la figure 53.

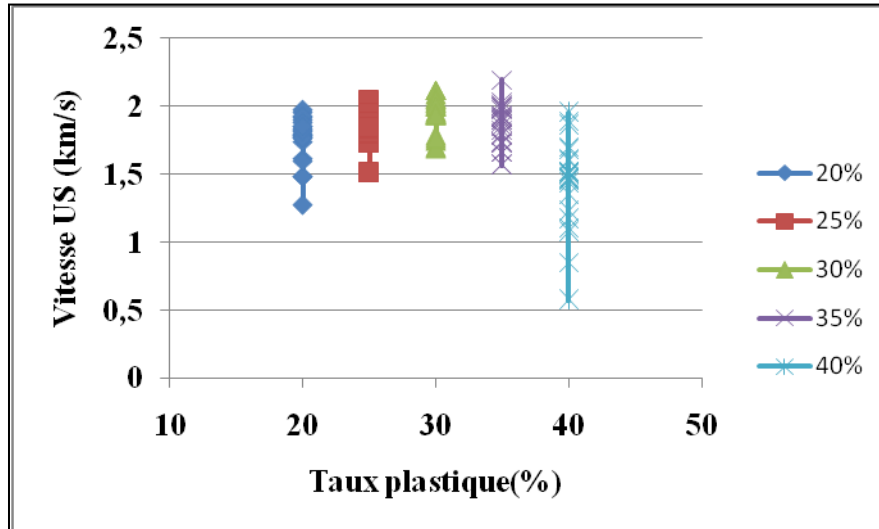


Figure 53 : Variation de la vitesse en fonction du taux de PEBD.

Cette figure montre une augmentation de la moyenne des vitesses de 1,5 à 2,3 km/s lorsque le taux de PEBD passe de 20 à 30 % de PEBD. Puis la moyenne baisse (2,3 à 0,5 km/s) de 35 à 40 % de PEBD.

Cette figure montre également une dispersion de la vitesse à 35 et 40 % de PEBD. Cette dispersion vient confirmer les résultats de l'indice de rebond. Plus le matériau est hétérogène, et plus on aura une dispersion des valeurs de la vitesse et aussi de l'indice de rebond.

VI.2.2.2.2 Estimation du module élastique dynamique

Les caractéristiques physiques d'un matériau qui influencent la vitesse de propagation sont le module élastique et la densité. A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module élastique dynamique (ED) selon la formule (8) (cf. IV.3.1.7).

Le coefficient de poisson utilisé pour le calcul est celui obtenu par essai d'écrasement (cf. VI.2.1.7).

Les résultats du module élastique dynamique en fonction du taux de PEBD sont présentés sur la figure 54.

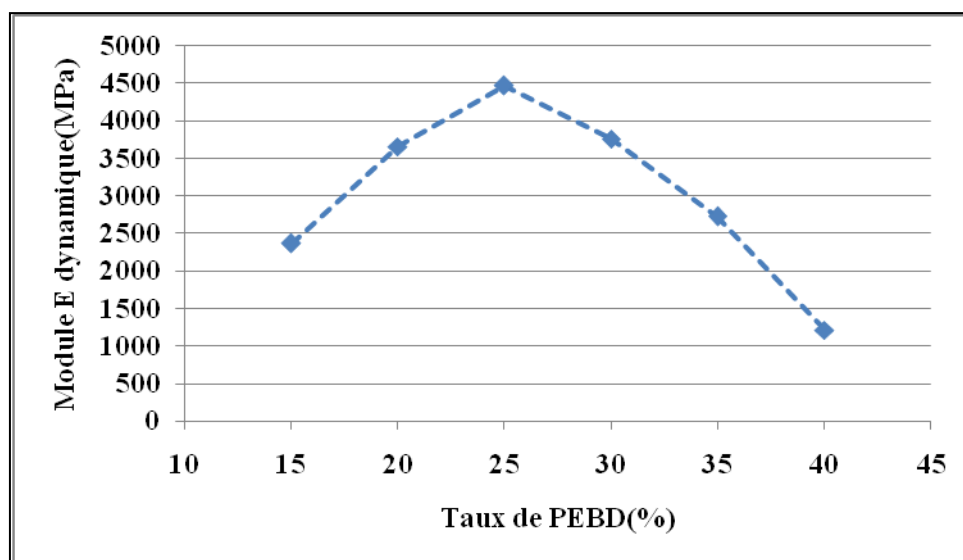


Figure 54 : Variation du Module E dynamique en fonction du taux de PEBD.

Le module d'élasticité dynamique augmente jusqu'à 25 % de PEBD avant de baisser.

Ainsi entre 15 et 25 % de plastique le matériau devient plus raide à cause de la teneur en sable qui est élevée comprise entre 85 et 75 %. La sollicitation exercée sur l'échantillon est portée à la fois par le plastique et les grains de sable. Par contre, au-delà de 25 % de plastique, la rigidité du matériau chute avec l'augmentation de la teneur en PEBD car la sollicitation est majoritairement supportée par le PEBD qui a un faible module d'élasticité.

Le matériau devient de plus en plus rigide lorsqu'on passe de 15 à 25 % de PEBD car selon **Chateigner (2012)**, une valeur du module élevée indique une rigidité élevée du matériau.

Ces résultats viennent confirmer ceux obtenus par la méthode statique c'est-à-dire par écrasement (cf. VI.2.1.5) où le module augmente de 15 à 25 % PEBD avant de baisser.

VI.3 Modélisation

VI.3.1 Corrélation entre la résistance et l'indice de rebondissement

Pour trouver l'équation de régression qui s'applique le mieux à la détermination de la résistance du matériau à l'aide de l'équation uniparamétrique exprimant le rapport $R_c = f(IR)$, le coefficient de corrélation R^2 a été choisi comme critère de validation.

- R_c : résistance à la compression par écrasement,
- IR : indice de rebond.

La figure 55 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants pour des échantillons contenant 20 %, 25 %, 25 %, 30 %, 35 % et 40 % de PEBD.

L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 9.

$$R_c = 0,004X^{2,556} \quad \text{avec } R^2 = 0,95 \quad (9)$$

Où R_c (MPa) : résistance en compression et X = indice de rebond.

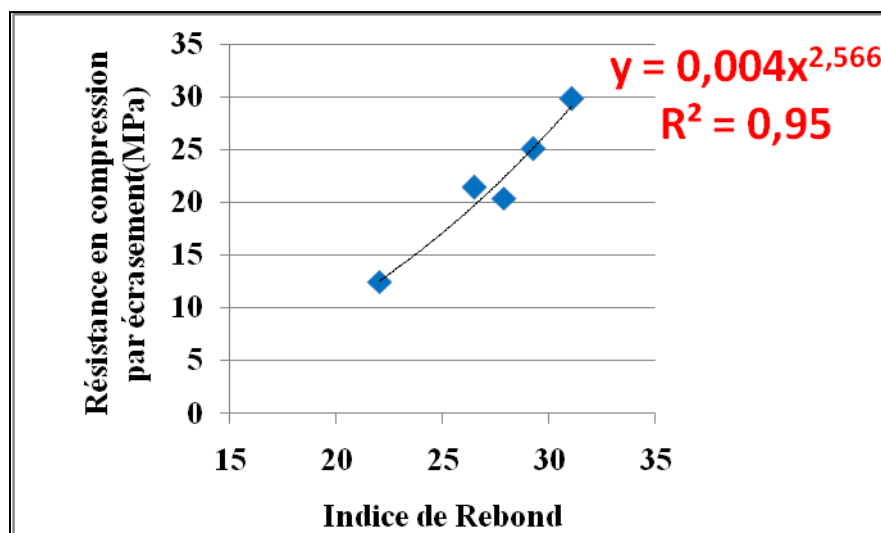


Figure 55 : Corrélation Résistance à la compression – Indice de rebondissement.

L'équation de corrélation obtenue a permis de calculer la résistance en compression en fonction du taux de PEBD. Les résultats sont présentés sur la figure 56.

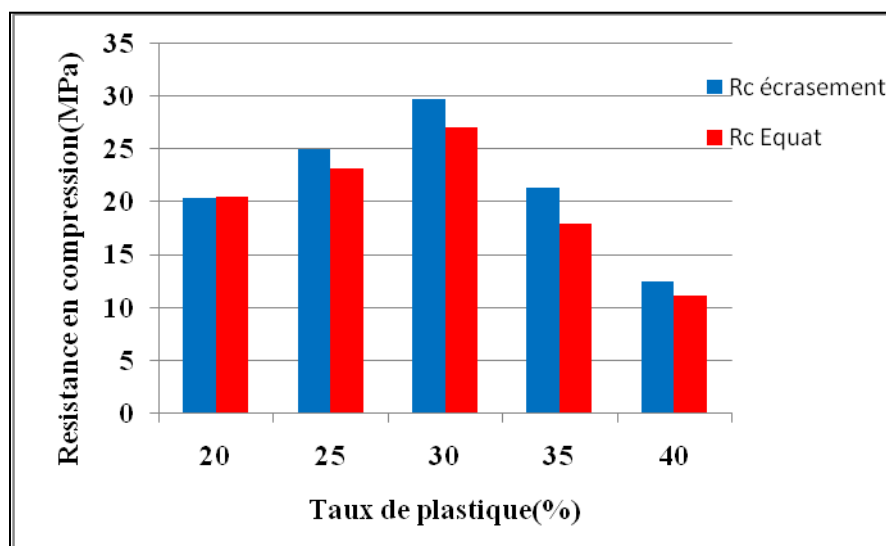


Figure 56 : Résistance en compression par écrasement et par équation en fonction du taux de PEBD.

Les résultats obtenus à partir de l'équation sont semblables aux résultats en compression par écrasement avec un écart type variant de 0,05 à 2,43 selon la proportion du PEBD.

Cette équation (9) semble être une bonne, car les résultats convergent vers ceux obtenus par écrasement.

VI.3.2 Etude Comparative aux modèles proposés dans la littérature

La figure 57 présente des études comparatives entre les différents modèles de corrélation proposés dans la littérature par différents chercheurs (**Tarsem et al, 2013 ; Keder 2 in Hannachi et Guettache, 2011 ; Khodja et al, 2010**) pour des bétons et celui établi dans cette étude par l'équation (9).

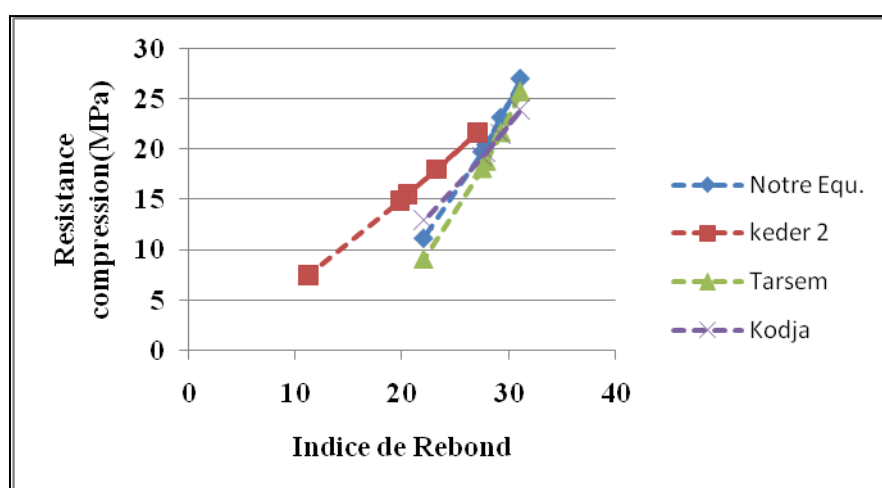


Figure 57: Corrélations Résistance à la compression–Indice de rebond établies par divers auteurs.

On observe en générale la même évolution de la résistance avec certains auteurs (**Tarsem et al, 2013 ; Keder 2 in Hannachi et Guettache, 2011 ; Khodja et al, 2010**) sauf celui de Keder 2 qui est un peu décalé.

L'utilisation de cette courbe de corrélation, permet une meilleure approche de la résistance réelle de notre matériau comparativement aux courbes usuelles établies par d'autres auteurs. Cette petite différence serait due au fait que ces auteurs utilisent une matrice cimentaire alors que dans notre matériau la matrice est thermoplastique (PEBD).

VI.3.3 Corrélation entre la résistance et la vitesse d'ultrason

La corrélation entre la résistance en compression et la vitesse d'ultrasons pour des échantillons contenant 20 %, 25 %, 30 %, 35 % et 40 % de PEBD, est donnée par la courbe de la figure 58. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 10.

$$R_c = 4,499X^{2,719} \text{ avec } R^2 = 0,94 \quad (10)$$

où R_c (MPa) : résistance en compression et X (km/s) = vitesse d'ultrason.

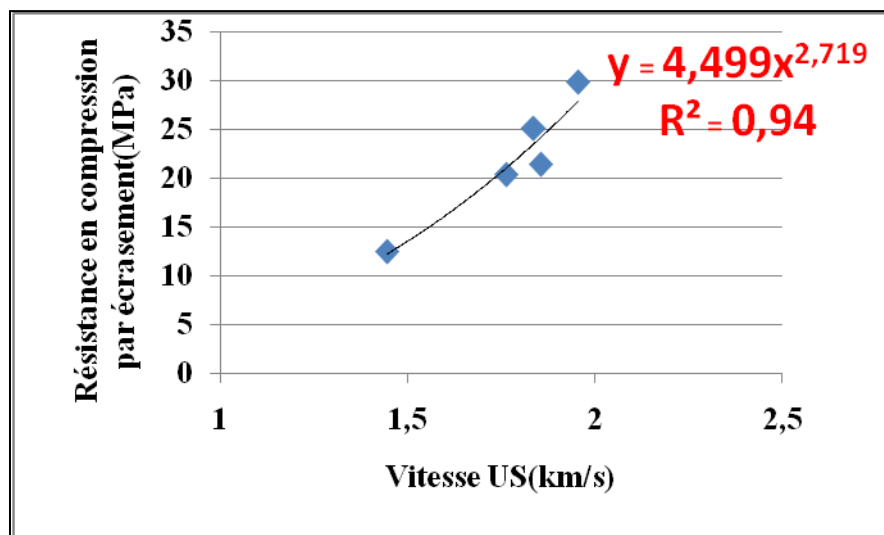


Figure 58: Corrélation Résistance à la compression-vitesse d'ultrason

L'équation de corrélation obtenue a également permis de calculer la résistance en compression en fonction du taux de PEBD. Les résultats sont présentés sur la figure 59.

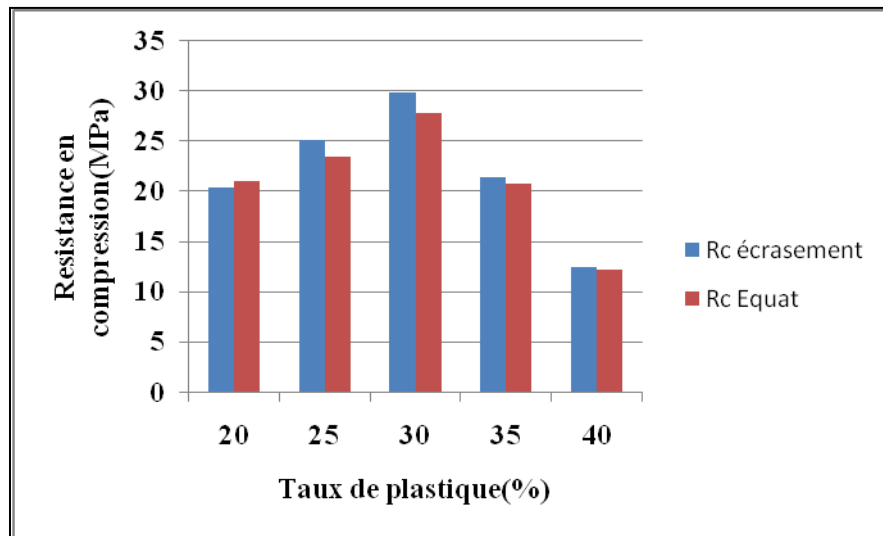


Figure 59: Résistance en compression par écrasement et par équation en fonction du taux de PEBD.

Les résultats par écrasement sont semblables à ceux obtenus avec l'équation avec un écart-type variant de 0,16 à 1,92 selon la proportion du PEBD. C'est donc une équation qui permet d'estimer les résistances réelles du matériau.

VI.3.4 Etude Comparative aux modèles proposés dans la littérature

Les études comparatives entre les différents modèles de corrélation proposés dans la littérature par certains auteurs (**Boukhelkhal et Kenai, 2015 ; Keder 1 in Hannachi et Guettache, 2011 ; Khodja et al, 2010**) pour des bétons et celui établi dans cette étude par l'équation (10) sont représentées sur la figure 60.

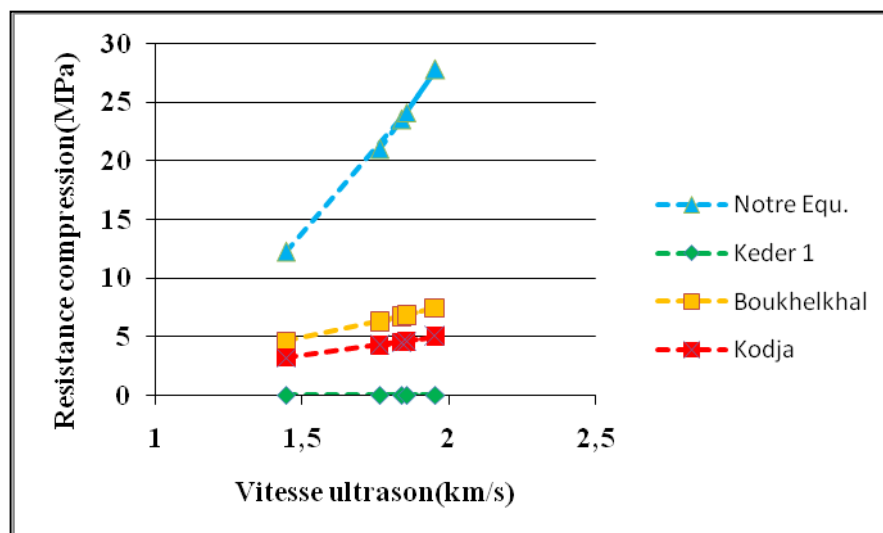


Figure 60 : Comparaison entre les résistances estimées et les résistances d'autres modèles.

La résistance évolue en fonction de la vitesse d'ultrasons chez tous les auteurs. Les résistances obtenues par les modèles des auteurs sous-estiment la résistance à l'écrasement sur notre matériau et celle obtenue par notre équation. Cette grande différence est due au fait que dans les matériaux à matrice cimentaire, la vitesse est grande. Or dans notre matériau, la vitesse étant petite, lorsqu'on l'utilise dans leurs équations on ne peut obtenir que de petites résistances. Les équations de ces auteurs ne sont donc pas utilisables pour estimer les résistances d'un matériau à matrice thermoplastique (PEBD).

VI.3.5 Méthodes combinées

Pour pallier à des résultats erronés et améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression par le contrôle non destructif, il est indispensable de calibrer les valeurs des mesures issues des deux essais (scléromètre+ultrasons). C'est ainsi que des relations de corrélation entre les résultats des essais mécaniques et ceux issus du contrôle non destructif (scléromètre et ultrasons) ont été établis. Les valeurs sont plotées dans des graphes, puis le logiciel Matlab est utilisé pour tracer une courbe en donnant une équation. La figure 61 montre une surface estimant une relation entre la résistance en compression, la vitesse d'ultrasons et l'indice de rebond.

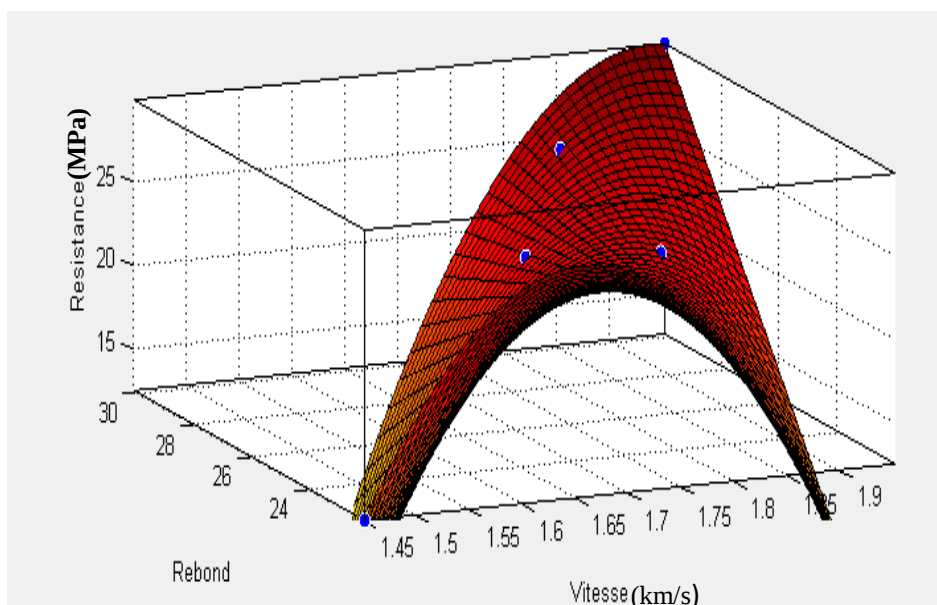


Figure 61 : Corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à la compression estimée.

L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme polynôme présentée par l'équation 11.

$$R_c = 23,5 + 577,6V - 40,44Ir - 325,6V^2 + 22,75VIr \text{ avec } R^2 = 1 \quad (11)$$

où R_c (MPa): résistance en compression ; V (km/s) : vitesse d'ultrason et Ir : Indice de rebond.

L'équation de corrélation obtenue a également permis de calculer la résistance en compression en fonction du taux de PEBD. Les résultats sont présentés sur la figure 62.

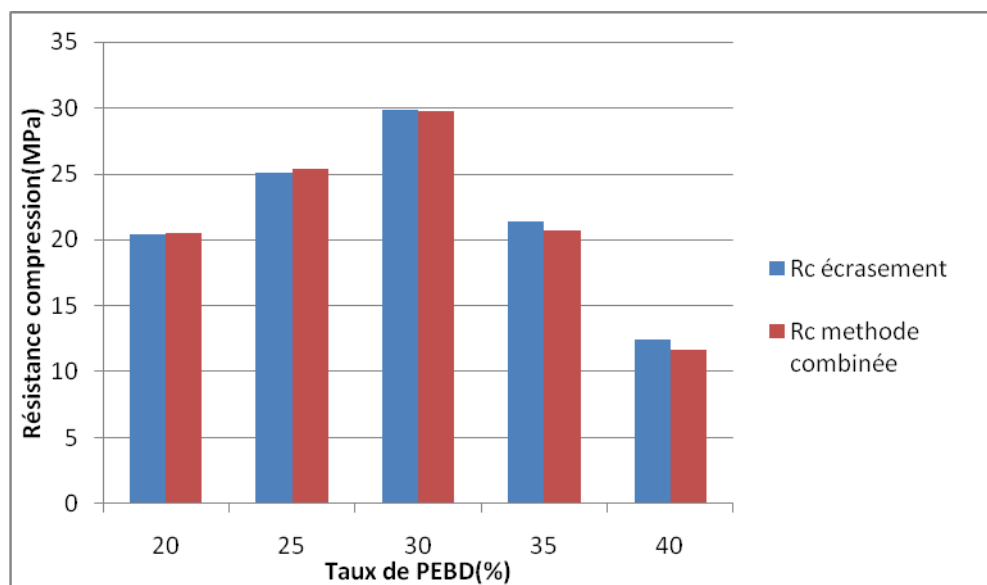


Figure 62 : Résistance en compression par écrasement et par méthode combinée en fonction du taux de PEBD.

On remarque que les résultats obtenus expérimentalement sont peu différents de ceux obtenus par l'équation avec un écart type variant de 0,05 à 0,6 selon la proportion du PEBD. L'équation de corrélation est acceptable avec un coefficient de corrélation $R^2 = 1$. Ainsi, ce coefficient de corrélation vient confirmer les assertions de certains auteurs comme **Yagoubi (2016)**, **Dallshad et Muhammed (2013)**, **Arioglu et al (2001)**, **Nobile et Bonagura (2013)**, **Hannachi et Guettache(2011)**, **Khodja et al (2010)**, lors de leurs études sur du béton. Selon ces auteurs les résultats obtenus par la méthode combinée (scléromètre - ultrason) lors de la corrélation avec la résistance à la compression donnent généralement un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur type faible comparativement aux méthodes uniparamétriques. Avec cette méthode on obtient donc des résultats plus fiables et une réduction des erreurs de mesures sur les résultats.

VI.3.6 Comparaison module élastique dynamique et statique

Les différents coefficients de poisson obtenus ont été utilisés pour calculer le module de Young dynamique avec la formule (8) pour les différents teneurs en plastique.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 63, de même que la courbe du module élastique statique (cf. VI.2.1.5).

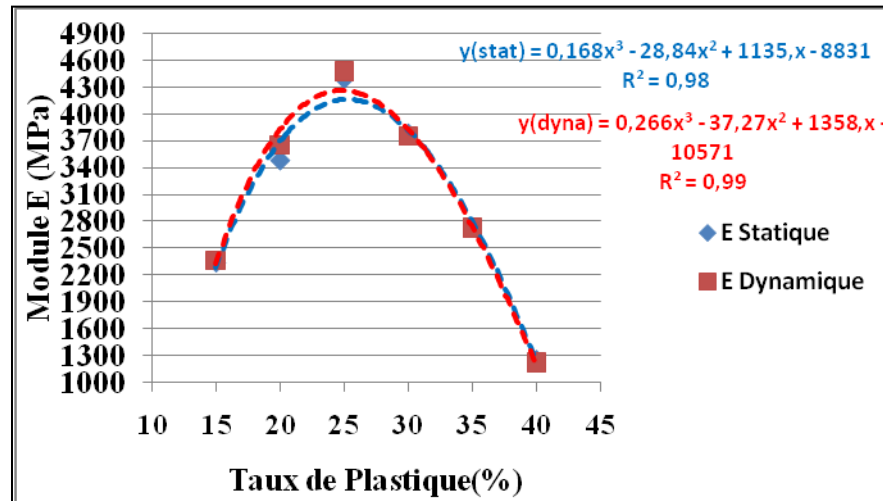


Figure 63 : Variation du module élasticité en fonction du taux de plastique

L'allure de la courbe des modules dynamiques calculés avec les différents coefficients de poisson obtenus pour les teneurs en PEBD comprise entre 15 et 40 % est la même que celle des modules statiques. Elles suivent une loi polynomiale et la valeur la plus élevée de E dynamique et statique est obtenue à 25 % de PEBD. De plus les valeurs de E dynamique sont très voisines des valeurs de E statiques. Les coefficients de poisson déterminés par la méthode statique permettent de calculer par la méthode des ultrasons la valeur du module élastique. L'essai à l'ultrason est donc utilisable pour déterminer E des mélanges sable-plastique. En général, le module élastique dynamique est supérieur au module élastique statique (**Bouakkaz, 2012 ; Salman et Al-amawee, 2006 ; Bucur et Perrin, 1981**). Cette différence est due à la nature de la sollicitation. L'essai statique induit dans l'éprouvette des changements des propriétés rhéologiques, tandis que l'essai dynamique n'entraîne pas des modifications de structure. Pour le calcul du module dynamique, une valeur standard du coefficient de poisson est utilisée. Par exemple pour les bétons de faible résistance et de très haute résistance la valeur standard du coefficient de poisson est respectivement 0,30 et 0,15 (**Controls, 2013**).

VI.3.7 Valeur standard du coefficient de poisson pour les mélanges sable-PEBD

La figure 64 présente l'enveloppe des E dynamique (théorique) pour l'intervalle ν compris entre 0,19 et 0,39 et les valeurs de E dynamique expérimental calculé pour les différents teneurs en plastique. Toutes les valeurs de E théorique varient autour des valeurs obtenues expérimentalement. Lorsque ν est faible (0,19) les valeurs de E théorique s'éloignent des valeurs expérimentales avec des erreurs allant de 54 à 81 %. Par contre, quand ν est élevée (0,39), les valeurs expérimentales s'écartent très peu des valeurs de E théorique. Les erreurs variant entre 0 et 56 % de la valeur expérimentale. Ces valeurs extrêmes du coefficient de poisson ne permettent donc pas d'avoir une valeur de E dynamique significative.

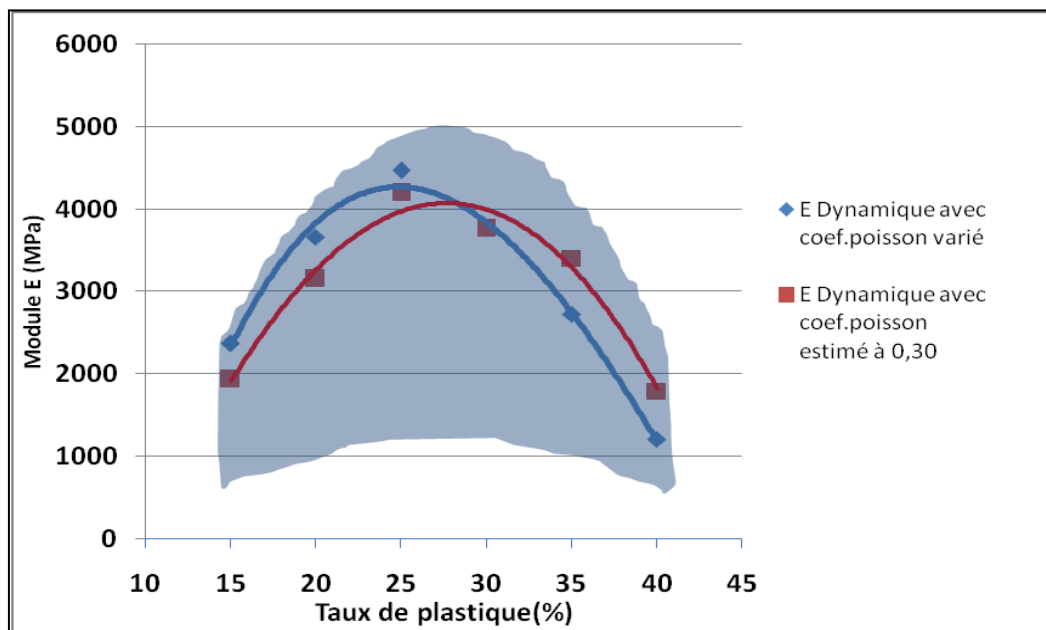


Figure 64 : Estimation du module de Young pour $0,19 \leq \nu \leq 0,39$.

Sur cette même figure, les valeurs de E théorique calculées avec $\nu = 0,30$ sont représentées. Cette courbe a la même forme que celle obtenue expérimentalement. Cependant, lorsque la teneur en PEBD passe de 15 à 30 %, la courbe avec le coefficient de poisson standard de 0,30 se trouve en dessous de l'expérimentale avec un pourcentage d'erreur de 6 à 22 % de la valeur expérimentale. Par ailleurs quand la teneur en PEBD passe de 30 à 40 %, la courbe avec le coefficient de poisson standard se trouve au-dessus de l'expérimentale avec un pourcentage d'erreur de 24 à 48 % de la valeur expérimentale. La valeur standard du coefficient de poisson de 0,30 semble être la meilleure approximation car elle permet d'avoir des valeurs proches de E dynamique expérimentale. C'est donc une valeur admise pour avoir une marge de sécurité, puisqu'elle permet de minimiser les erreurs sur les valeurs expérimentales de E dynamique.

VI.3.8 Validation de la valeur standard du coefficient de poisson

VI.3.8.1 Comparaison module élastique estimé, statique et dynamique

La figure 65 propose une comparaison entre les valeurs du module élastique estimé à partir de la valeur du coefficient de poisson de 0,30 et les modules dynamiques et statiques déterminés expérimentalement sur les différents échantillons. La relation module élastique estimé et module élastique dynamique est pratiquement identique à celle entre le module élastique estimé et le module statique. Le module élastique estimé peut être utilisé pour calculer les modules élastiques dynamiques et statiques. Le rapport entre les différents modules est d'environ 1 car toutes les valeurs sont proches de la première bissectrice ($y=x$).

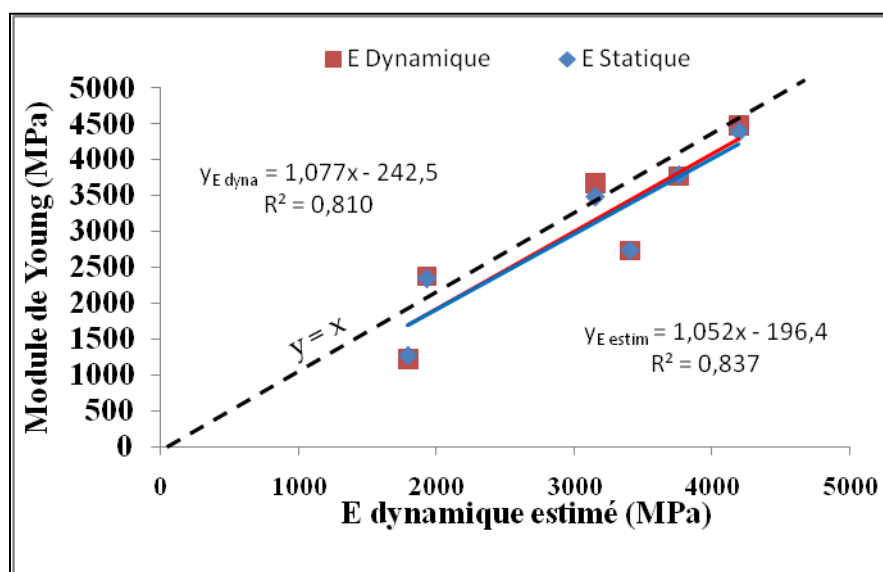


Figure 65 : Courbe des modules dynamiques et statiques expérimentaux en fonction du module dynamique estimé.

VI.3.8.2 Relation résistance en compression, module élastique dynamique estimé, statique et dynamique expérimental

Les relations entre la résistance à la compression et les différents modules sont pratiquement identiques (figure 66). Par contre, il y a une différence au niveau de leur corrélation R^2 . Les équations obtenues avec le module E dynamique varié et le module E statique, ont une corrélation faible ($R^2 = 0,6$). Cependant l'équation obtenue avec le module E estimé a une bonne corrélation ($R^2 = 0,9$). Cette estimation du module élastique dynamique à partir du coefficient de poisson de 0,3 est donc une bonne estimation car elle va dans le sens de la sécurité.

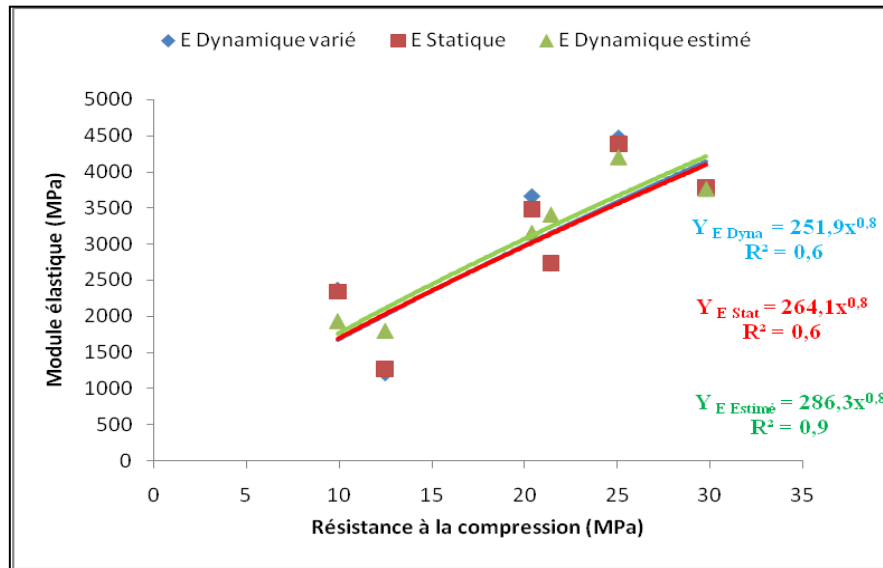


Figure 66: Courbe module élastique en fonction de la résistance en compression

Une relation similaire est proposée par **Multon (2012)** dans Eurocode 2 ($E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0,3}$) pour calculer le module élastique statique instantané des bétons de granulat de quartz. Les valeurs du module élastique statique déduite de cette formule est réduite de 10 % pour le granulat de calcaire, de 30 % pour les granulats de grès et augmente de 20 % pour les granulats de basalte. De même selon **Helson et al (2015)**, cette relation semble ne pas être adaptée pour les bétons de terre à cause du rôle de la masse volumique.

Pour les travaux théoriques la valeur standard du coefficient de poisson de 0,3 peut être admise. Cette valeur permet à partir de l'essai à l'ultrason de déterminer très rapidement le module de Young avec une erreur de 22 % par rapport à la valeur expérimentale pour des teneurs en PEBD variant entre 15 et 40 %. Elle permet donc d'une part d'estimer le module de Young du matériau sable-PEBD et d'autre part de calculer la résistance à la compression à partir de la formule : $E = 286f_c^{0,8}$.

Où E : module de Young et f_c : la résistance en compression (MPa).

Conclusion

Les essais mécaniques effectués sur les échantillons sont satisfaisants. Les plus fortes résistances sont obtenues à 30 % de PEBD.

Les essais non destructifs ont permis de confirmer les résistances obtenues par les essais destructifs. Différentes corrélations ont été établies afin de déterminer les relations qui lient la résistance à la vitesse d'ultrason et à l'indice de rebond, de même que la résistance au module de Young. De ces corrélations, des équations ont été obtenues permettant de calculer les différentes résistances en fonction du taux de PEBD.

Chapitre VII :

CARACTERISATION DES

MATERIAUX ISSUS DE LA

THERMOCOMPRESSION

(SITE : BELFORT)

Introduction

La valorisation de la méthode de recyclage du PEBD prendra de l'ampleur lorsqu'on proposera à la fin cette étude, des matériaux encore plus performants du point de vue résistance mécanique et utilisables dans plusieurs domaines. Après avoir constaté qu'une simple compression manuelle a permis d'obtenir des matériaux plus résistants par rapport aux matériaux issus de coulage, nous avons confectionné des matériaux avec un nouveau procédé : la thermocompression.

Ce chapitre présentera les résultats de la caractérisation mécanique et physique des échantillons.

VII.1 Détermination de la pression à exercer

VII.1.1 Cohésion sable-plastique

La figure 67 montre les images au MEB du contact entre le sable et le plastique.

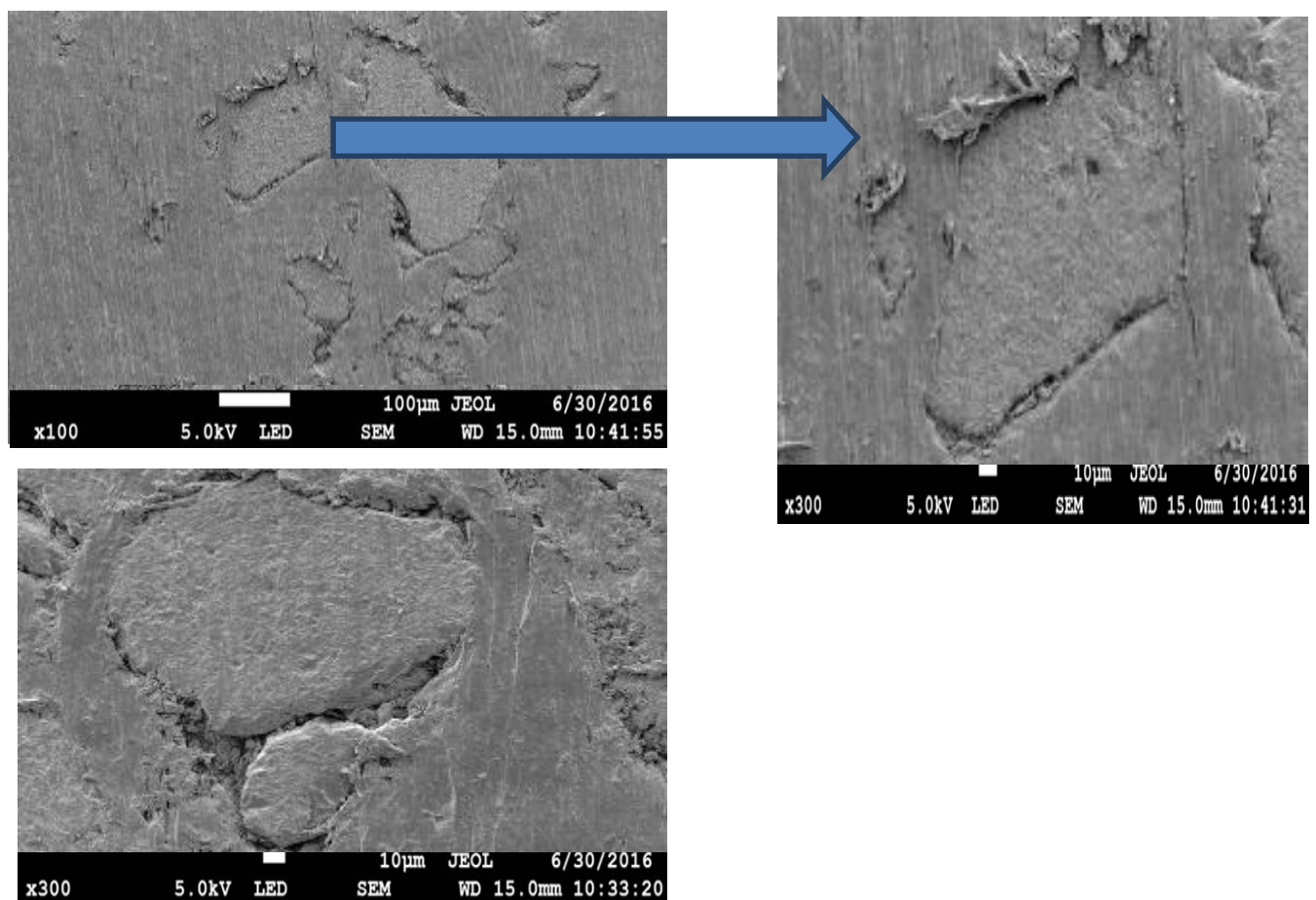


Figure 67 : Image de la liaison entre le sable et le plastique

Les grains sont plongés dans la pâte de plastique fondue. Le Plastique entoure les grains donc les enrobe. Comme **Oddes et al (2008)** ; **Wiboon (2006)**, il n'y a pas d'affinité entre le sable et le plastique induisant ainsi une faible cohésion.

Il faut donc exercer une pression pour renforcer le contact et l'adhésion entre le plastique et le grain.

IX.1.2 Effet de la pression sur la cohésion interne du matériau

Des échantillons ont été élaborés à différentes pressions. Ces échantillons obtenus, ont été sectionnés pour observer l'aspect interne. La Figure 68 montre les observations faites.

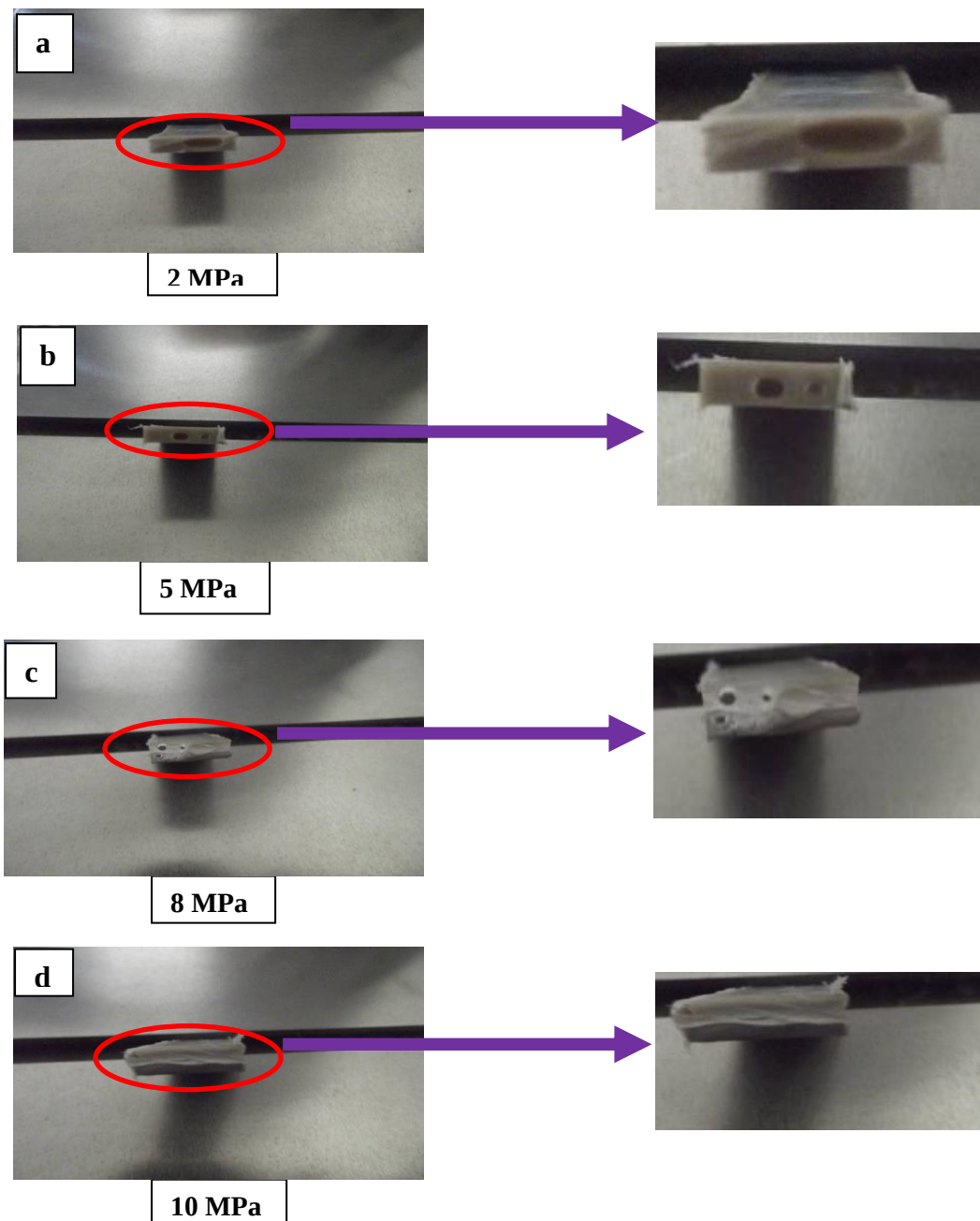


Figure 68 : Image de l'aspect interne à différentes pressions (a : 2 MPa, b : 5 MPa, c : 8 MPa, d : 10 MPa).

On observe des creux à l'intérieur du matériau. L'ampleur de ces creux diminue avec l'augmentation de la pression. L'existence de ces creux serait due à l'air emprisonnée à l'intérieur, mais aussi à la faible affinité entre le plastique et le sable. Il faut donc une certaine pression pour chasser l'air et aussi pour renforcer le contact sable-plastique.

VII.1.3 Effet de la pression sur la résistance

Des essais ont été menés, afin de déterminer la pression nécessaire pour obtenir un matériau résistant. La Figure 69 montre une courbe de résistance en flexion en fonction de la pression.

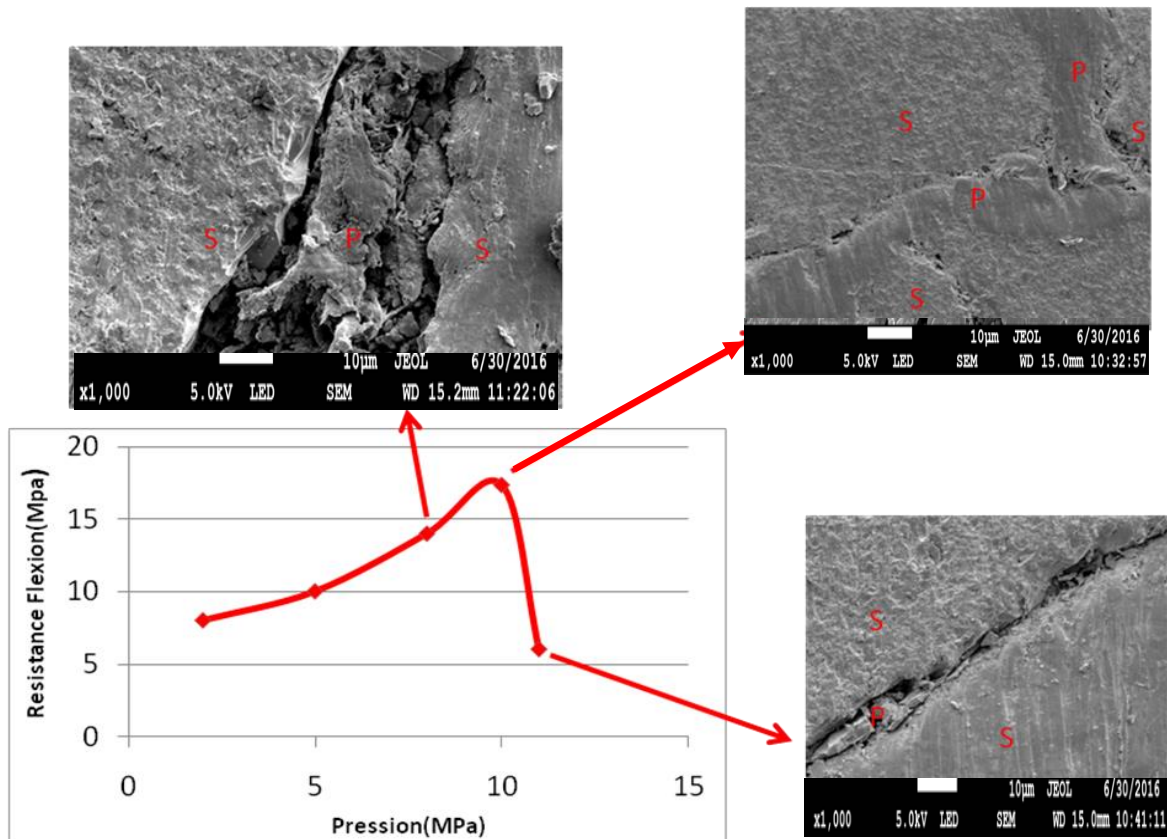


Figure 69 : Courbe résistance en fonction de la pression avec les images de cohésion sable-PEBD.

La résistance en flexion augmente (8 à 17 MPa) avec la pression (2 à 10 MPa). A partir de 11 MPa de pression la résistance baisse à 6 MPa. Ces résultats viennent confirmer l'aspect interne observé au chapitre précédant. En effet plus la pression exercée est grande, plus le contact sable-plastique est renforcé, induisant ainsi une résistance en flexion élevée. Au delà de la pression idéale (10 MPa), une augmentation de la force va favoriser le contact sable-sable avec peu de liant entre les grains, fragilisant ainsi le matériau. Les images montrant les contacts entre plastique et le sable à des pressions variables sont également représentées sur la figure 71. Nous pouvons conclure alors que la pression de 10 MPa est la meilleure pour avoir un bon contact entre le sable et le plastique, entraînant ainsi une résistance élevée.

La force de compactage est donc un élément important lors de la mise en forme. Elle permet de réduire les espaces entre grains et de renforcer le contact entre grains de sable et PEBD. Ce résultat est conforme aux résultats de **Karray (2015)**, selon lesquels la résistance d'un matériau augmente avec l'énergie de compactage. Cependant, la résistance chute lorsqu'on applique une force de compactage au-delà de 10 MPa. En effet lors de la thermocompression, la force de compactage provoque un réarrangement des grains de sable. Ainsi, le réarrangement des particules sous l'effet de la force de compactage, favorise d'abord un bon contact entre le sable et le plastique et le rapprochement des grains jusqu'à 10 MPa de pression, entraînant ainsi des résistances élevées (Figure 70.A et 70.B). Puis avec l'augmentation progressive de la force de compactage au-delà de 10 MPa, l'espace entre les grains de sable devient très réduit et finalement certains grains se trouvent superposés les uns sur les autres avec peu ou pas de liant (PEBD), induisant une baisse de la résistance (Figure 70.C). **Larrard (1999)** fait la même remarque dans ses études sur du béton.

Les résistances mécaniques augmentent avec le taux de PEBD jusqu'à 50 % avant de baisser. Mais il faut remarquer qu'à partir de 30 % de PEBD, cette augmentation de la résistance varie peu. Le module d'élasticité augmente également jusqu'à 30 % de PEBD, puis baisse malgré une faible augmentation de la résistance. Ce qui veut dire qu'à partir de ce taux, le matériau contient trop de PEBD. Ces résultats sont conformes avec ceux obtenus par (**Rakotosaona et al, 2014**). Par contre nous obtenons des résultats plus élevés, qui sont dûs à la pression appliquée (10 MPa) dans notre méthodologie. Cette pression va renforcer la cohésion entre le plastique et le grain de sable. C'est donc cette pression (10 MPa) qui a été choisi pour la suite des travaux.

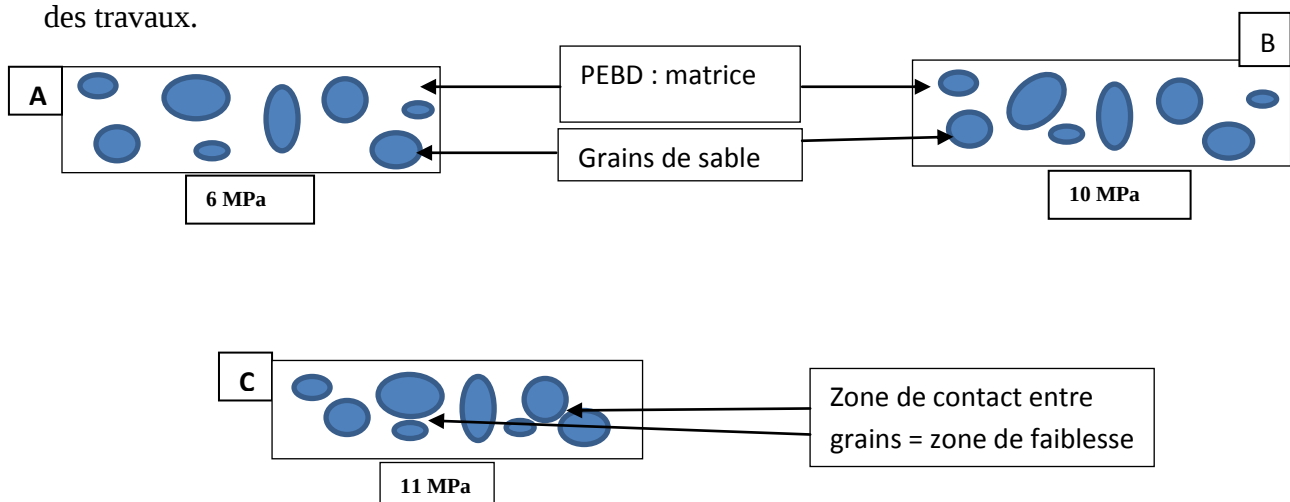


Figure 70 : Schéma explicatif du réarrangement des grains lors du compactage (A : 6 MPa ; B : 10 MPa et C : 11 MPa)

VII.2 Influence du taux de plastique sur la résistance du matériau

VII.2.1 Effet de la granulométrie du sable sur la résistance en compression

La figure 71 montre l'influence de la granulométrie sur les résistances en compression. Elle présente les résistances de 20 et 25 % de PEBD.

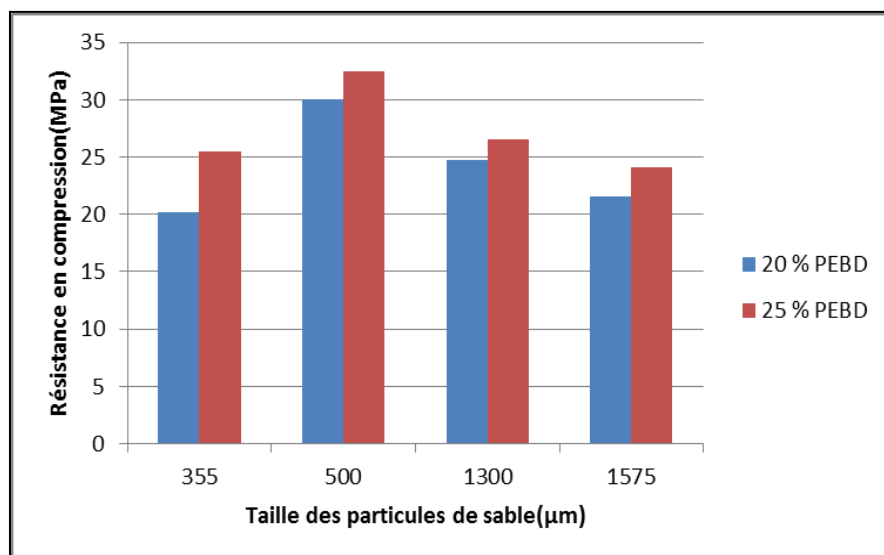


Figure 71 : Résistance en fonction de la granulométrie et du taux de PEBD.

L'évolution de la résistance en fonction de la granulométrie est similaire quelque soit le taux de PEBD. Lorsque les grains sont trop petits ($<355\mu\text{m}$), ils sont complètement noyés dans le plastique fondu, de sorte que la contrainte n'est portée que par le plastique. Sous l'effet de la pression, il n'y a donc aucune résistance opposée par les grains, la fissure se propage directement dans le matériau (figure 72.A). Le plastique ayant une faible résistance, alors la résistance en compression du composite baisse.

Lorsque les grains ont un diamètre inférieurs ou égale à $500\mu\text{m}$, la résistance augmente de 20 à 30 MPa (20 % PEBD) et de 25 à 32 MPa (25 % PEBD). La taille des grains (qui a augmentée) fait qu'ils ne sont plus noyés dans le plastique fondu. La contrainte serait alors portée par le plastique, les grains et la plus ou moins forte liaison qui existerait entre le sable et le plastique enduisant ainsi une résistance élevée. Aussi, les fissures qui naissent dans le PEBD contournent les grains, ralentissant ainsi leur propagation, entraînant une résistance élevée (figure 72.B). La chute de la résistance des échantillons contenant des grains de $1300\mu\text{m}$ et $1575\mu\text{m}$ de diamètre, serait dûe au fait que, plus les grains sont grossiers, plus les contacts entre grains de sable sont favorisés. Sous l'effet de la contrainte exercée, il y a création de contact sable-sable de sorte que les fissures qui naissent dans le PEBD se propagent facilement entre les grains en contact, entraînant ainsi la fragilisation du matériau (figure 73.C).

Ce phénomène d'augmentation, puis de diminution de la résistance s'observe dans les matériaux consolidés à base d'argile selon **Essaïdi et al (2014)**. Les résultats ainsi obtenus permettent de dire que la bonne granulométrie de sable est celle dont le diamètre des grains est inférieur à 500 μm (sable 2). C'est cette granulométrie qui a été utilisée pour la suite des travaux.

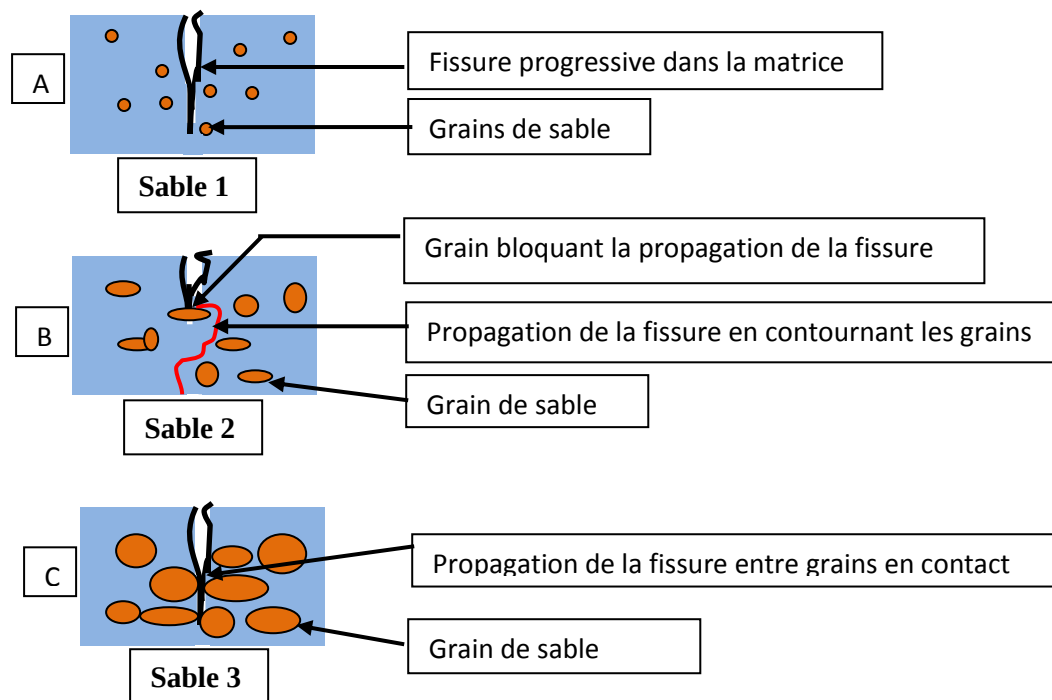


Figure 72 : Schémas explicatifs de la propagation de la fissure en fonction de la granulométrie du sable (A : sable 1 ; B : sable 2 et C : sable 3)

VII.2.2 Résistance à la compression et module d'élasticité.

La figure 73 montre la résistance (figure 73.A) et le module d'élasticité en compression (figure 74.B) en fonction du taux de plastique.

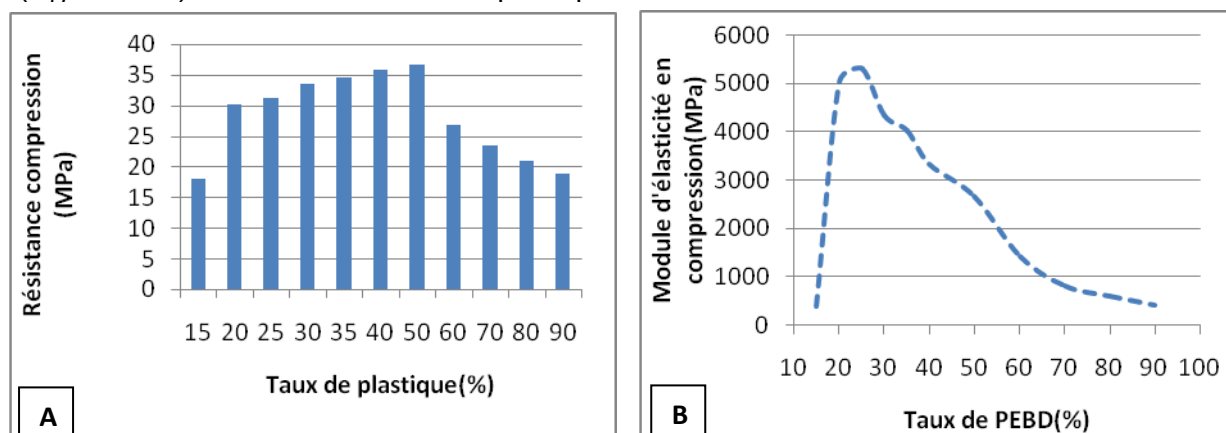


Figure 73 : Résistance en compression et du module d'élasticité en fonction du taux de PEBD.

La résistance augmente avec le taux de PEBD, jusqu'à un taux (pic) maximal, avant de baisser. Elle augmente de 17 à 36 MPa lorsqu'on passe de 15 à 50 % de PEBD, puis baisse de 28 à 17 MPa lorsqu'on passe de 35 à 90 % de PEBD.

Lorsque le taux de plastique augmente, nous obtenons de plus en plus un mélange contenant une quantité suffisante de plastique pour lier les grains de sable. Au-delà de 50 % de PEBD, la résistance chute car le mélange contient trop de plastique. La résistance tend alors vers celle du PEBD qui est faible. Le module d'élasticité augmente (376 à 5313 MPa) aussi avec le taux de PEBD jusqu'à 25 % avant de baisser (4346 à 400 MPa). On remarque une chute du module à 30 % de PEBD, malgré l'augmentation de la résistance. Cela veut dire qu'à partir de ce taux (30 %), le matériau contient un taux élevé de plastique et commence à avoir les propriétés d'un plastique.

VII.2.3 Résistance à la flexion et module d'élasticité.

Les résultats de l'effet du taux de plastique sur la résistance et le module d'élasticité sont présentés respectivement sur les figures 74.A et 74.B.

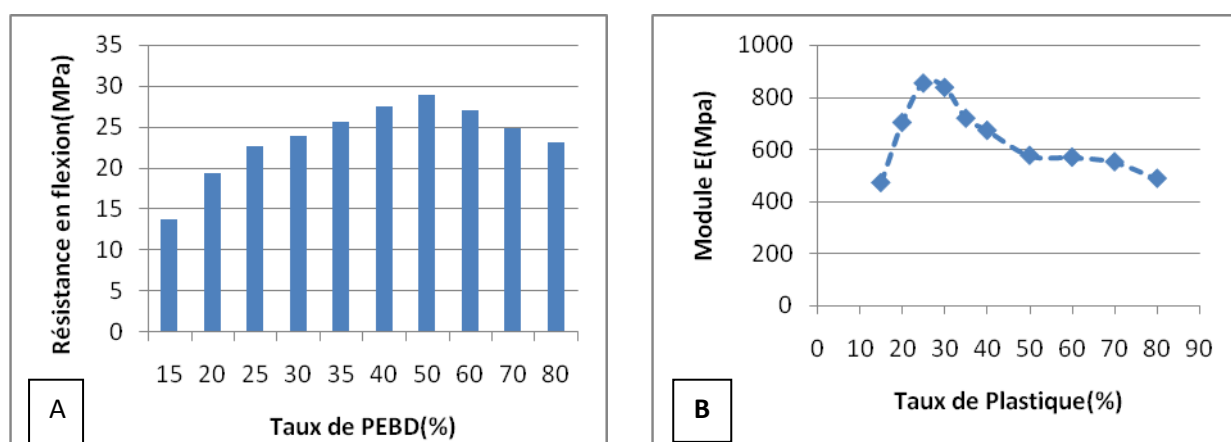


Figure 74 : Résistance en flexion en fonction du taux de PEBD.

La résistance à la flexion augmente (13 à 28 MPa) également jusqu'au taux maxi (50%) avant de diminuer. Comme en compression, la résistance va croître avec la proportion du plastique car plus il y a du PEBD, plus les grains de sable sont enrobés ou liés. Après le taux idéal (50%), la résistance va baisser pour tendre vers la résistance du plastique. Cette évolution de la résistance se confirme avec la variation du module d'élasticité.

Avec l'augmentation du PEBD, les grains vont être bien enrobés et éloignés les uns des autres, induisant ainsi un matériau résistant et rigide.

Lorsque le matériau contient plus de plastique, sa rigidité va tendre vers celle du PEBD qui est d'environ 200 MPa (Fond, 2015 ; Lecomte-Beckers, 2009b).

VII.2.4 Influence du taux de plastique sur la densité et l'absorption

Les figures 75 (A et B) montrent respectivement la variation de la densité et l'absorption d'eau en fonction du taux de PEBD dans le matériau.

Concernant l'absorption deux méthodes d'essais ont été faites. La première méthode a consisté à immerger dans l'eau les échantillons en entier.

Sachant que lors de l'utilisation du matériau (produit), l'utilisateur peut être emmené à le sectionner afin de faire des ajustements, une deuxième méthode a aussi consisté à immerger le matériau sectionné et observer son comportement face à l'eau. Les deux résultats sont représentés sur la figure 75.B.

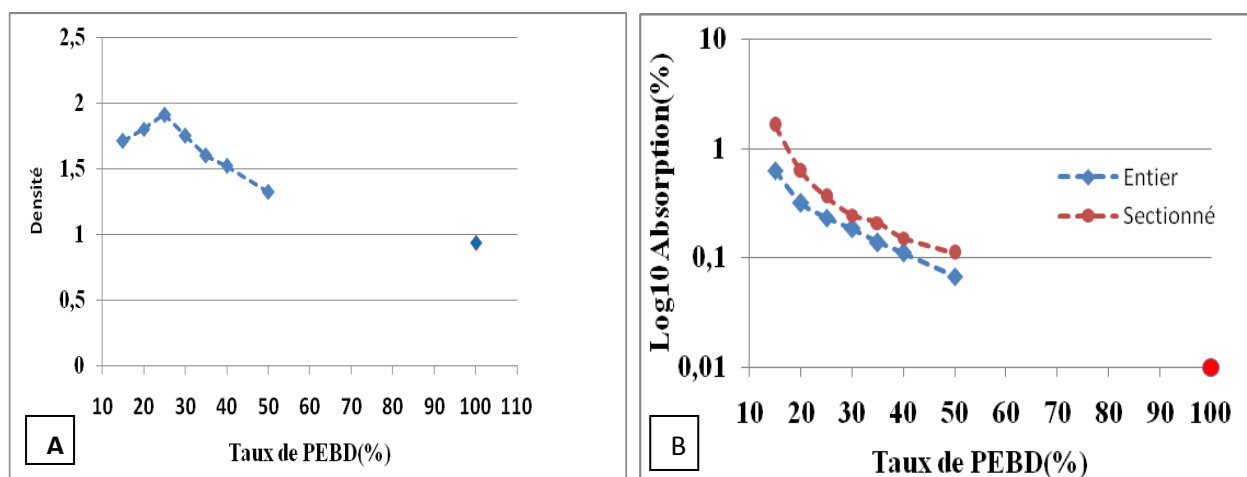


Figure 75 : Courbe de densité (A) et absorption (B) en fonction du taux de PEBD

La densité augmente (1,7 à 1,9) lorsqu'on passe de 15 à 25 % de PEBD. A partir de 30 % de PEBD la densité baisse jusqu'à 0,93 qui est la densité réelle du PEBD.

L'augmentation de la densité avec l'apport de PEBD est due à la consolidation du matériau (sable-PEBD), entraînant ainsi la diminution de la porosité entre les grains de sable. La tendance étant une évolution vers la densité du sable (2,6).

La chute de la densité au-delà de 25 % de PEBD est due à la proportion élevée du plastique dans le matériau. Le matériau étant de plus en plus constitué en majorité de plastique (en volume), il tend alors vers la densité d'un PEBD qui est d'environ 0,93.

L'absorption diminue avec l'augmentation du taux de PEBD.

Cette baisse de l'absorption est due d'une part, à la diminution des pores et d'autre part à l'augmentation du PEBD qui est une matière hydrophobe. Cependant l'absorption est plus importante pour un matériau sectionné par rapport au matériau immergé en entier. En effet selon **Ledru (2009)**, on distingue dans un composite les porosités ouvertes composées de vides inter-communicants connectés à la partie extérieure du matériau et, les porosités fermées, isolées à l'intérieur du matériau et ne permettant aucune perméabilité.

Dans un matériau sectionné l'eau est absorbée à la fois par les pores ouverts et par les pores fermés sectionnés (figure 76). Ce qui explique une absorption importante de l'eau.

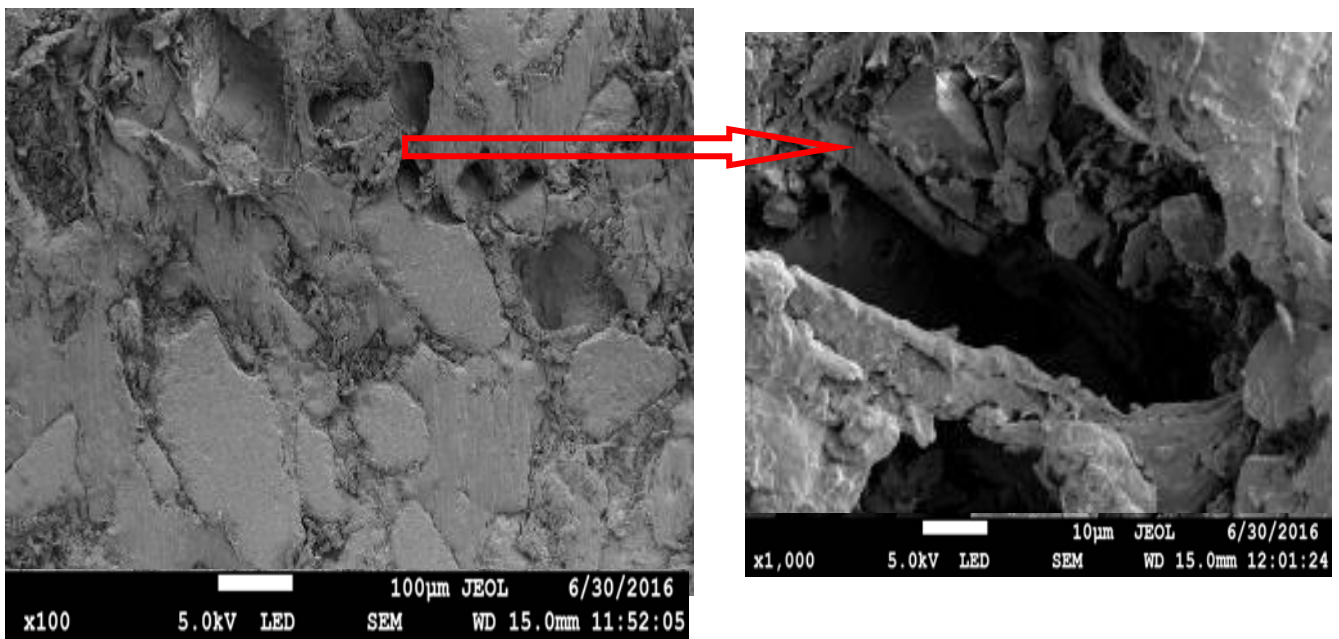


Figure 76 : Image des pores fermés sectionnés.

Les différents pores (ouverts ou fermés) proviennent de l'emprisonnement mécanique de l'air par le plastique dans le matériau. L'air ainsi emprisonnée diminue de volume ou disparaît sous l'effet de la pression. La figure 77 illustre bien l'effet de la pression sur l'absorption d'eau d'un échantillon sectionné.

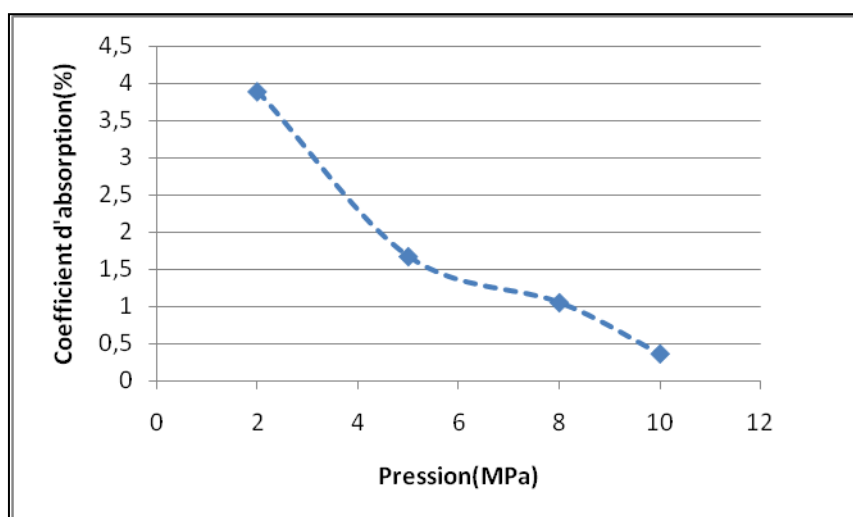


Figure 77 : Variation de l'absorption en fonction de la pression.

En effet la pression fait diminuer le volume ou l'ampleur des pores en chassant l'air emprisonnée, réduisant ainsi les pores disponibles pouvant absorber l'eau.

Conclusion

La thermocompression permet d'avoir des matériaux plus résistants par rapport à la méthode par compactage manuelle. La pression exercée permet de renforcer la cohésion entre le sable et le plastique induisant ainsi des résistances élevées. La pression idéale à exercer pour obtenir des matériaux performants est de 10 MPa. Au-delà de cette pression, la résistance chute, à cause des contacts entre grains de sable. La pression exercée permet de réduire les pores ouverts. Ce qui fait baisser la capacité d'absorption d'eau des matériaux composites.

Chapitre VIII :
CARACTERISATION DU
COMPOSITE SABLE-PEBD
CHARGÉ D'ARGILE
(SITE : BELFORT)

Introduction

Afin d'élargir le domaine d'utilisation des matériaux élaborés dans le chapitre précédent, une charge en argile est alors envisagée dans ce chapitre. Des essais seront faits afin de déterminer le taux de charge idéale et les résistances mécaniques qui vont avec. De même, une étude sur l'effet de la granulométrie de l'argile sur les résistances sera faite.

VIII.1 Détermination du taux de charge

Sur la figure 78, nous présentons les résistances en compression en fonction du taux de charge pour des composites de 20 à 40 % de PEBD avec le sable 2.

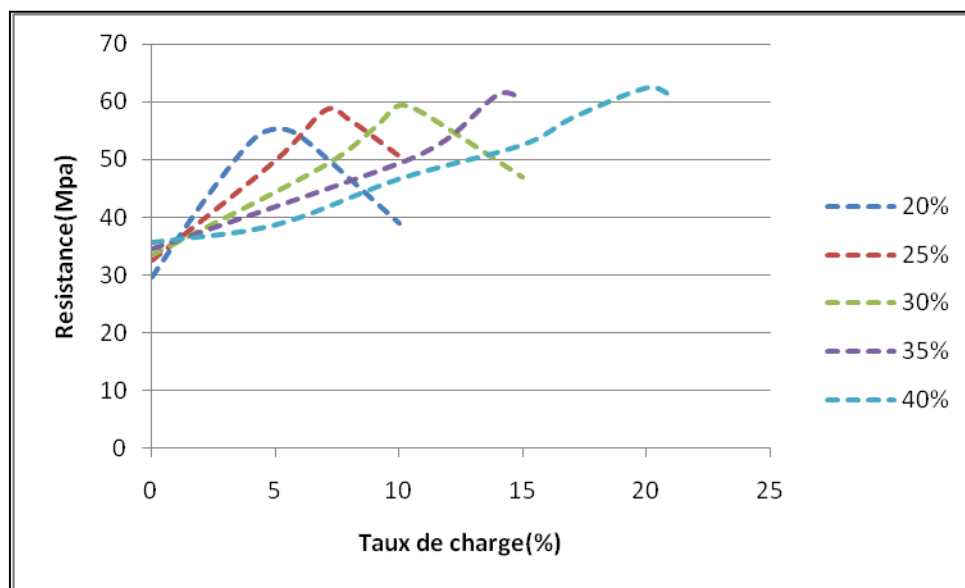


Figure 78 : Résistance en fonction du taux de charge de 20 à 40% de PEBD.

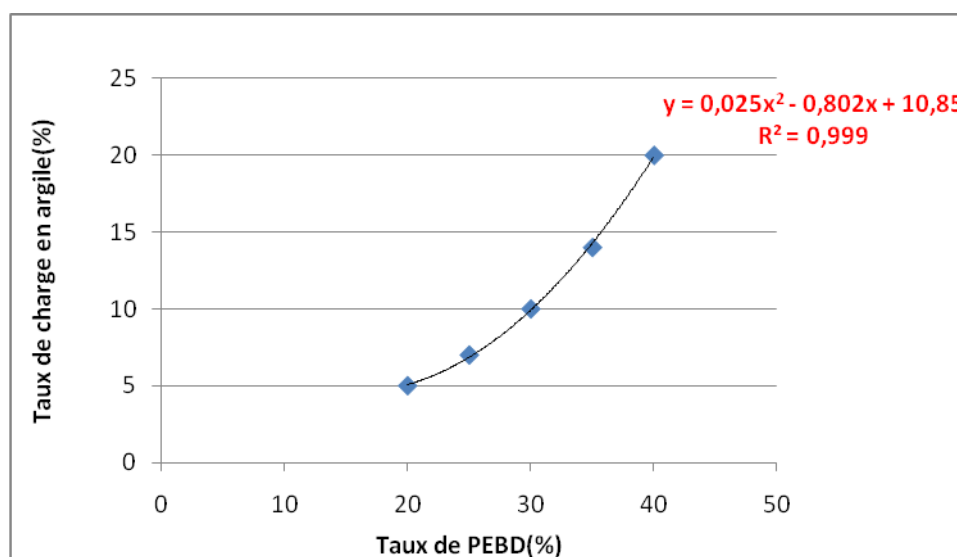
Le taux de charge pour atteindre la résistance maximale augmente avec le pourcentage de PEBD dans le composite. Ainsi les résistances sont maximales lorsque le taux de charge passe de 5 % à 20 % pour des pourcentages de PEBD évoluant de 20 à 40 % de PEBD. Au delà de ces taux, la résistance chute. Les résultats sont résumés dans le tableau VIII suivant.

Tableau VIII : Taux de charge idéal pour différents pourcentages de PEBD

20 % PEBD		25 % PEBD		30 % PEBD		35 % PEBD		40 % PEBD	
charge(%)	Rc(MPa)	charge(%)	Rc(MPa)	charge(%)	Rc(MPa)	charge(%)	Rc(MPa)	charge(%)	Rc(MPa)
0	29,74	0	32,46	0	33,48	0	34,56	0	35,72
2	42,31	5	49,91	7	49,05	10	49,32	15	52,63
4	53,12	6	57,19	9	55,5	12	53,7	17	57,28
5	55,28	7	58,64	10	59,4	14	61,2	20	62,5
6	54,01	8	56,92	11	58,02	15	60,6	21	61,2

Il y a donc un taux idéal de charge d'argile en fonction du pourcentage de plastique confirmant ainsi les travaux de certains auteurs comme **Benbayer (2014)**, **Mbey (2013)**, **Peurton (2008)**, **Wiboon (2006)**.

A partir de ces résultats, une courbe (figure 79) est tracée afin d'établir un rapport entre le taux de charge nécessaire et le pourcentage de PEBD dans un composite.

**Figure 79 : Taux d'argile en fonction du taux de PEBD.**

Ainsi une régression polynomiale donne l'équation $y = 0,025x^2 - 0,802x + 10,85$ avec $R^2 = 0,99$. Où y est le taux de charge en argile et x le taux de PEBD. A partir de l'équation il serait alors possible de prévoir la charge optimale en argile pour un taux de PEBD donné. Equation valable pour des matériaux contenant au moins 20 % de PEBD.

Pour le respect et la protection de l'environnement, un matériau doit être de nos jours, en grande partie recyclable. Il faut rappeler que l'objectif principal de cette étude est le recyclage du PEBD. Il est donc légitime de s'interroger quant à la recyclabilité du matériau obtenu. Dans le cadre de l'éco-conception, dès la conception d'un produit il faut réduire ses impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie (**Bodard, 2016 ; Eco-3e, 2013 ; A.D.E.M.E, 2001**). Ainsi selon **Bretagne (2009)** et **Halada (2003)**, de nos jours il faut concevoir des matériaux contenant moins de substances dangereuses pour l'environnement. Alors, un matériau contenant une grande quantité de plastique (non biodégradable) pourrait à la longue nuire à l'environnement par rapport à celui qui en contient peu. C'est pourquoi, dans la suite des travaux, les études seront axées sur les composites comportant 20 et 25 % de PEBD. A partir de ces pourcentages, les composites contiennent suffisamment de plastique pour lier ou enrober les grains de sable.

VIII.2 Influence de la charge sur la résistance en compression et le module d'élasticité

Les figures 80.A et 80.B représentent respectivement les courbes contrainte-déformation des composites de 20 et 25 % de PEBD et ceux des composites contenant 20 % et 25 % de PEBD avec respectivement 5 %, et 7 % de charge.

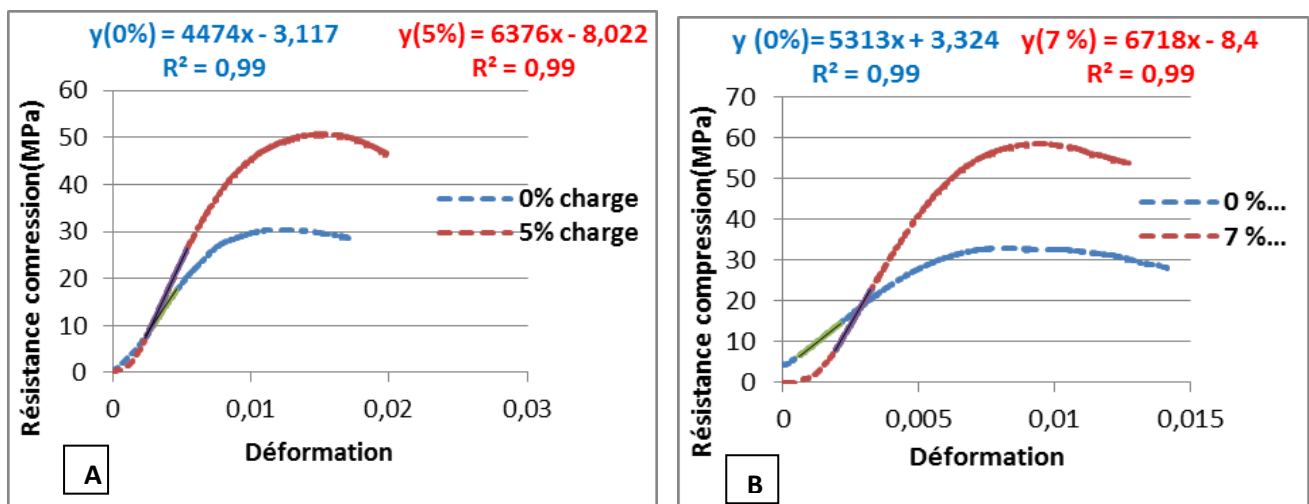


Figure 80 : Courbe contrainte-déformation en compression (A : 20 % PEBD ; B : 25 % PEBD).

Les résistances augmentent avec l'apport de charge d'argile. Ainsi la résistance évolue de 30,39 à 50,7 MPa pour un composite contenant 20 % PEBD avec une charge de 5 % d'argile.

De même, le composite contenant 25 % de PEBD avec 7 % de charge en argile, a sa résistance qui augmente de 32,97 à 58,66 MPa.

Les particules d'argile étant très fine (μm) s'intercalent entre les particules grossières du sable (Figure 81). Les contraintes sont alors portées par les grains de sable et les particules fines de l'argile insérées entre ces grains. Ces particules fines viennent ainsi augmenter les forces qui s'opposent à la contrainte. Ce qui engendre une augmentation de la résistance.

La résistance chute au-delà du taux idéal (charge), car les espaces inter-granulaires (sable) sont comblés et les particules se trouvent en excès, fragilisant ainsi le matériau. Une explication soutenue par **Ragouilliaux (2007)**. Cette baisse de la résistance pourrait aussi s'expliquer par le fait que l'augmentation des particules fines d'argile qui sont pulvérulentes entraînerait une agglomération. Les particules d'argiles ainsi agglomérées non liées par le plastique du fait de leur viscosité constitueraient des zones de faiblesse.

Les résultats obtenus permettent de dire que l'ajout d'argile comme charge favorise une augmentation de la résistance mécanique des échantillons, car les charges opposent une résistance à la force appliquée. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par certains auteurs (**Ragoubi, 2010 ; Elbaz, 2005 ; Célini, 2004**) lors de l'élaboration de nanocomposites à matrice thermoplastique.

Ainsi, par exemple pour les échantillons contenant 20 et 25 % de PEBD, il faut respectivement 5 et 7 % d'argile pour obtenir la résistance maximale. Au-delà de ces proportions de charge idéale, la résistance chute. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par **Tcharkhtchi et al (2001)** où le taux de charge maximum varie entre 3 et 5 % lorsqu'il charge le polyéthylène par du mica.

Par ailleurs, la charge permet également une augmentation du module d'élasticité, représenté par la pente du domaine élastique de la déformation.

Pour le composite contenant 20 % de PEBD, le module E évolue de 4474 à 6376 MPa, tandis que celui contenant 25 % de PEBD augmente de 5313 à 6718 MPa. Avec l'augmentation des modules d'élasticité, on peut donc conclure que la charge permet d'améliorer la rigidité du matériau car un module élevé est synonyme de rigidité. Cette augmentation du module de Young et donc de la rigidité du matériau par l'apport de charge, est observé par **Do (2011) ; Ambid (2007) ; Tcharkhtchi et al (2001)**, au cours de leurs études sur les composites. Ces auteurs ont montré que la charge fournit un renfort au matériau en opposant une résistance sous l'effet de la contrainte, augmentant ainsi la rigidité du matériau.

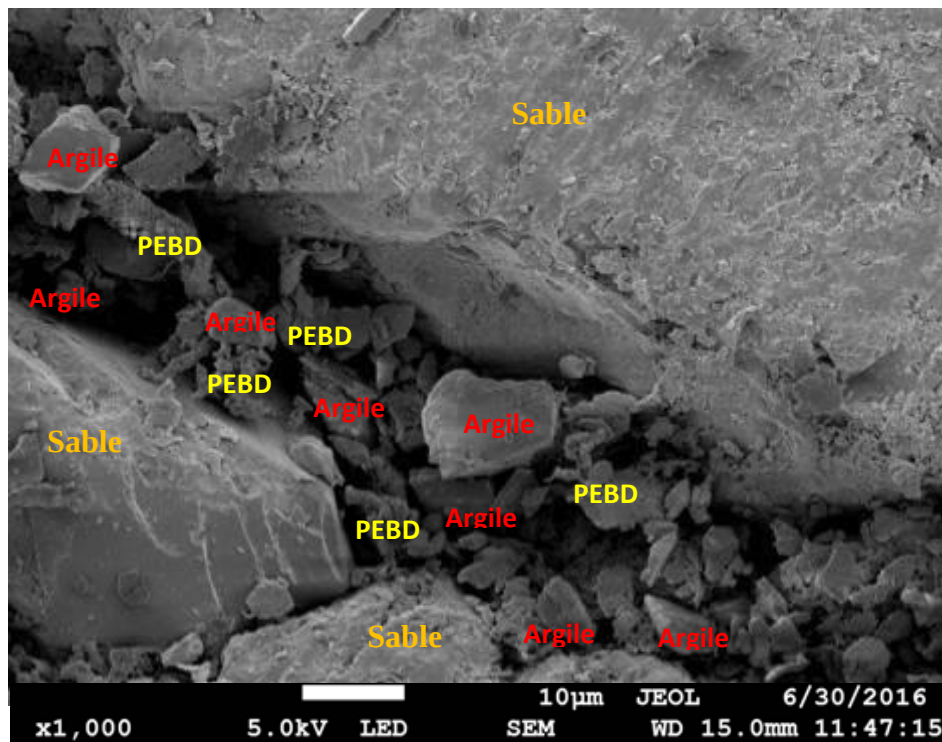


Figure 81: Image des grains d'argile dans le composite.

VIII.3 Influence de la charge sur la résistance en flexion et le module d'élasticité

La figure 82 présente la courbe contrainte-déformation en flexion des composites contenant 20 % de PETD (A) et 25 % de PETD (B).

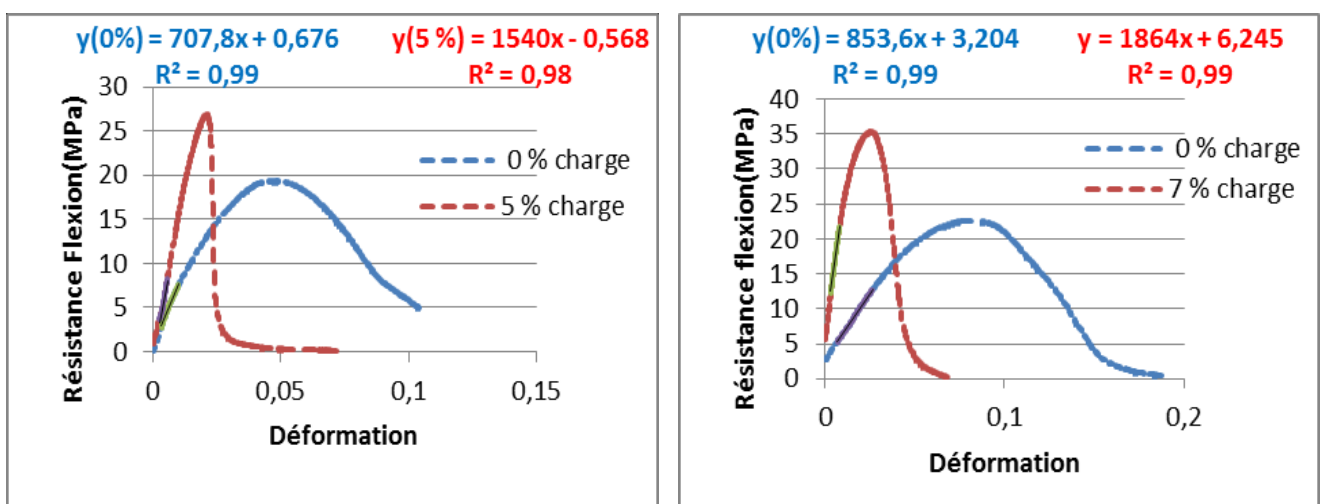


Figure 82 : Courbe contrainte-déformation en flexion (A : 20 % PETD, B : 25 % PETD).

Comme en compression, la résistance en flexion augmente avec l'apport de la charge d'argile. Ainsi, elle augmente de 19,34 à 26,87 MPa pour 20 % de PEBD avec une charge de 5 % et de 22,64 à 35,31 MPa pour 25 % de PEBD à 7 % de charge et au-delà elle chute.

Le module d'élasticité représentée par la pente de la courbe, évolue également dans le même sens. Le module en flexion passe de 707,8 à 1540 MPa pour 20 % de PEBD et de 853,6 à 1864 MPa pour 25 % de PEBD.

En flexion et en compression la rigidité du matériau s'améliore avec l'ajout de charge.

VIII.4 Influence de la granulométrie de la charge sur la résistance en compression

Nous avons remarqué que la granulométrie du sable a un effet sur les résistances(cf.VII.2.1) Pour vérifier également l'influence de la granulométrie de la charge en argile sur les résistances, une série d'essais a été effectuée avec trois types de granulométrie de l'argile en respectant les charges idéales déjà déterminée. La figure 83 montre la résistance en compression en fonction de la granulométrie de la charge (argile).

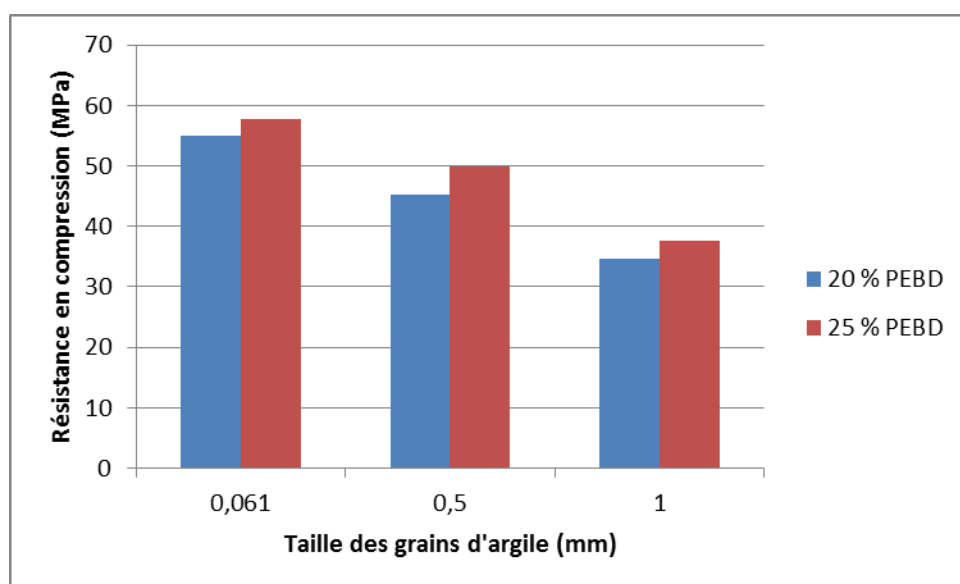


Figure 83 : Variation de la résistance en fonction de la granulométrie de la charge.

La résistance baisse lorsque la taille des grains augmente quelque soit le taux de PEBD (20 et 25 %). Dans les deux proportions de PEBD, lorsqu'on passe d'une granulométrie avec la taille des gros grains inférieurs à 0,061 mm (**Argile 1**) à une granulométrie avec la taille des gros grains inférieurs à 0,5 mm (**Argile 2**), la résistance baisse d'environ 18 %.

Tandis que lorsqu'on passe de grains inférieurs à 0,061 mm (**Argile 1**) à des grains compris entre 0,5 et 1 mm (**Argile 3**), la résistance baisse d'environ 50 %.

Les particules de l'argile 1 et 2 (cf.**Figure 39, V.3.1**) ont une grande proportion de diamètre inférieure aux diamètres des grains de sable (100 % pour le **sable 1** et environ 90 % pour le **sable 2**). Dans ces deux types d'argile, les particules inférieures aux particules des grains de sables se trouvent en excès par rapport à l'argile 3. Ainsi, on peut supposer qu'une partie de ces particules fines s'est insérée entre les grains de sables tandis que le reste est dispersé dans la matrice. Cette disposition des grains renforce la matrice et comble les espaces entre grains de sable entraînant ainsi une augmentation des renforts qui s'opposent aux sollicitations lors des contraintes. Lorsque la proportion des particules grossières devient importante, on assiste à un rapprochement de ceux-ci, voire un contact entre d'abord grains d'argile, puis entre grains de sable et argile. Le contact ou le rapprochement des grains avec peu ou absence de matrice (Figure 84), induit une baisse de résistance face aux sollicitations.

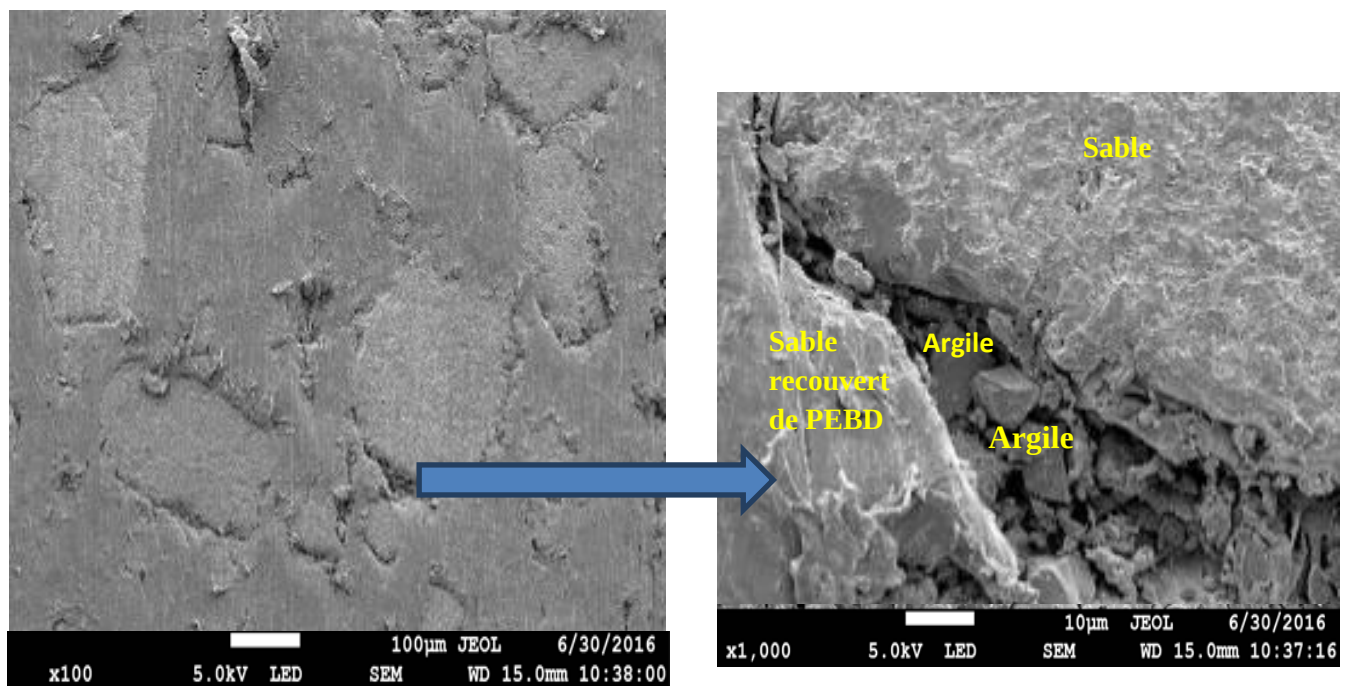


Figure 84 : Image des grains d'argile entre grains de sable.

Des résultats similaires ont été obtenus par **Andrianatrehina et al (2015)** ; **Martias (2011)**, **Reiffsteck et al (2007)**, en faisant varier la granulométrie de la charge dans du plâtre et les matériaux de revêtement. Les résultats ainsi obtenus permettent de dire que l'argile 1 (la plus fine) utilisée comme charge permet d'avoir les meilleures résistances mécaniques.

Cependant, les résistances obtenues par tous ces auteurs restent toujours supérieures à celles obtenues au cours de notre étude. Cette différence est due, au fait que ces auteurs ont utilisé des méthodes permettant de modifier l'argile afin d'augmenter son affinité avec la matrice polymère. Le renforcement de l'affinité matrice thermoplastique et l'argile augmente la force de contact argile-matrice, induisant ainsi une forte résistance mécanique.

VIII.5 Effet de la charge sur l'absorption d'eau

La réaction d'un matériau soumis à l'action de l'eau est l'un des critères important lors du choix pour son utilisation. C'est ainsi que des essais d'absorption ont été menés sur les matériaux en faisant varier certains paramètres. La charge utilisée est l'argile 1.

VIII.5.1 Influence du taux de charge sur l'absorption

La figure 85 présente l'évolution du coefficient d'absorption en fonction du taux de charge pour les deux types de composite (20 et 25 % de PEBD).

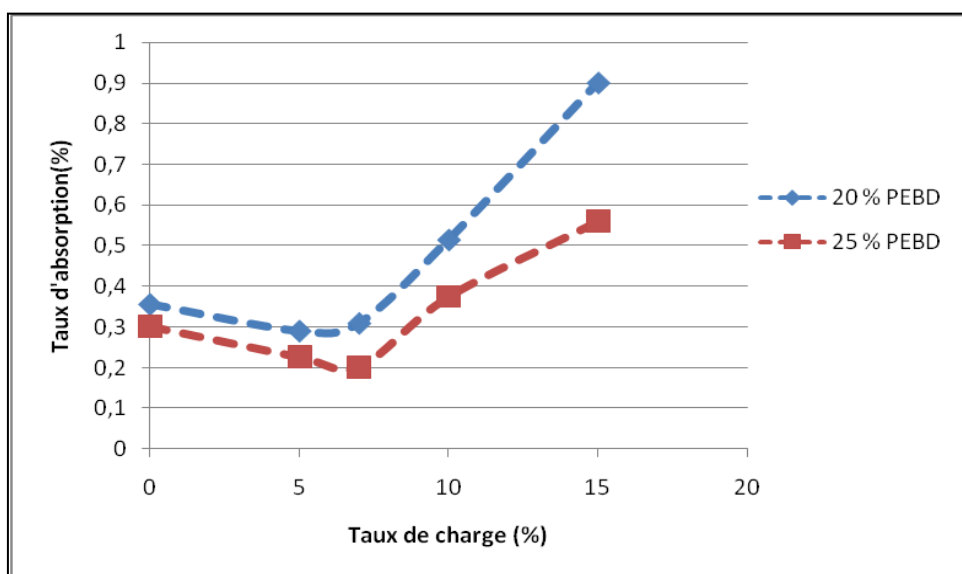


Figure 85 : Absorption en fonction du taux de charge

Les deux courbes ont la même allure. Les résultats montrent que le taux d'absorption baisse (0,35 à 0,31 pour 20 % de PEBD et 0,30 à 0,20 pour 25 % de PEBD) avec l'apport de charge jusqu'au taux idéal. Au-delà de la charge idéale (5 ou 7 %), l'absorption d'eau augmente (0,31 à 0,90 pour 20 % de PEBD et 0,20 à 0,56 pour 25 % de PEBD) à cause des espaces entre particules qui sont en nombre important lorsqu'il y a excès de charge. La baisse de l'absorption est favorisée par le remplissage de la charge dans les espaces entre grains de sable et des porosités (**figure 78**, cf. **VII.2.4**).

En effet, cette diminution est due au fait que, quand le matériau est formé seulement par la fraction grossière (sable), l'espace entre les grains est élevé. Au fur et à mesure que le pourcentage des fines (argile) augmente, l'espace entre les gros grains se réduit. Au delà du taux de charge idéal, les grains se superposent les uns sur les autres sans être liés favorisant la création d'espace inter-granulaire: zones d'absorption d'eau. Selon **Andrianatrehina et al (2015)**, après la teneur idéale en particules fines, les indices des vides ré-augmentent dans un matériau. L'absorption va être alors accrue grâce à ces vides et aussi par l'argile, elle-même hydrophile à cause de sa surface spécifique élevée. L'excès de charge provoque une porosité dans le matériau. Porosités par lesquelles l'eau s'infiltre. Ces résultats sont confirmés par ceux obtenus par **Balthazard (2015)**, **Durier et al (2007)**, au cours de leurs travaux sur l'incidence de la porosité sur l'absorption d'un composite à matrice thermoplastique. On observe que les charges idéales au-delà desquelles l'absorption augmente sont 5 et 7 % pour les composites contenant respectivement 20 et 25 % de PEBD. Ces résultats viennent confirmer que c'est à ces taux que sont obtenus les composites avec de meilleures résistances mécaniques.

VIII.5.2 Influence de la granulométrie de la charge sur l'absorption

La figure 86 montre la variation de l'absorption en fonction de la taille des grains de la charge (argile). Le taux de charge utilisée est celle déterminée dans les chapitres précédant à savoir 5 % pour 20 % de PEBD et 7 % pour 25 % de PEBD.

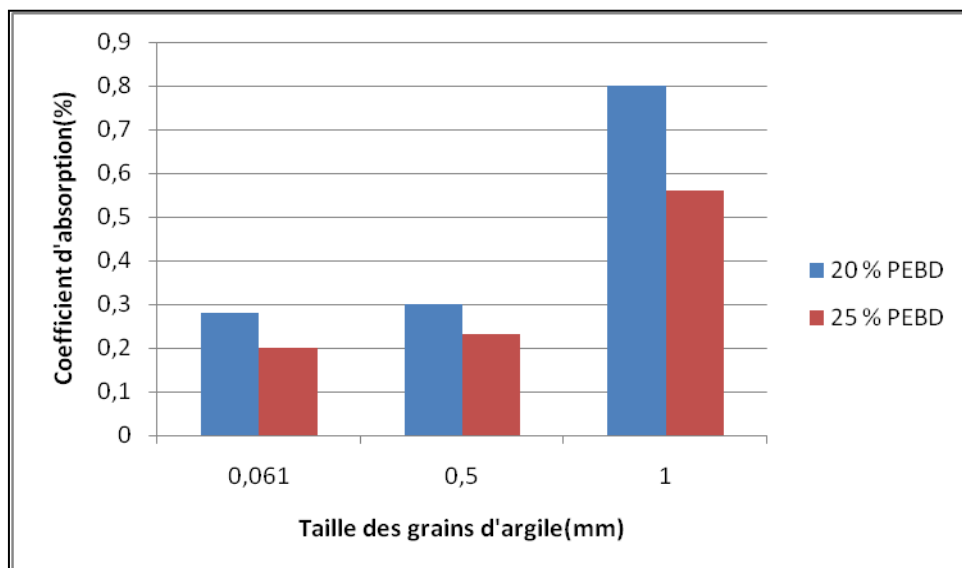


Figure 86 : Variation de l'absorption en fonction de la taille des grains.

Le coefficient d'absorption évolue avec la taille des grains de la charge. Elle augmente de 0,27 à 0,8 lorsqu'on passe de 0,061 à 1 mm pour 20 % de PEBD et de 0,20 à 0,56 lorsque la taille des grains passe de 0,061 à 1 mm pour 25 % de PEBD.

Il y a peu de variation de l'absorption (environ 15 %) lorsque la taille passe des grains inférieurs à 0,061 (argile 1) à celle des grains inférieurs à 0,5 mm (argile 2). Par contre la variation de l'absorption devient grande (environ 66 %) quand la taille passe de 0,061 mm (argile 1) à 1 mm (argile 3). Les résultats confirment alors que ce sont les matériaux contenant la charge la plus fine qui absorbent peu. Ce qui vient conforter le choix du taux de 5 % (20 % PEBD) et 7 % (25 % PEBD) de la charge la plus fine (argile 1).

Ces résultats sont conformes à ceux de **Raskin (2009)** qui dit: « **Il y a tout intérêt à augmenter les charges jusqu'au taux idéal et à diminuer leur dimension.** »

Conclusion

L'ajout de l'argile améliore considérablement les résistances mécaniques du composite.

Elle permet également d'augmenter le module de Young en l'augmentant d'environ deux fois. Ces améliorations sont effectives à partir d'un taux idéal (5 % pour 20 % PEBD et 7 % pour 25 % PEBD). Au-delà de ce taux les résistances chutent à cause de la présence de charge en excès. La faible absorption à l'eau est également obtenue avec les taux optimaux de charge en argile. Ces différentes performances s'améliorent lorsque les particules sont plus fines.

L'argile joue donc efficacement le rôle de renfort.

Chapitre IX :

COMPARAISON DES

DIFFERENTS TYPES DE

MATERIAUX

(COMPOSITES) ET

DOMAINES

D'APPLICATION

Introduction

La valorisation des différentes méthodes de recyclage du PEBD proposées au cours de cette étude prendra de l'ampleur, lorsqu'on proposera un domaine d'application aux différents matériaux obtenus. Pour ce faire, des comparaisons seront faites avec les matériaux de revêtement. A la suite de ces comparaisons, des propositions seront alors faites.

Les trois types de matériaux obtenus au cours de notre étude sont nommés comme suit :

Mab : Matériaux d'Abidjan (méthode de compression manuelle),

Mbt : Matériaux de Belfort thermoformés (méthode de thermocompression),

Mbtca : Matériaux de Belfort thermoformés chargés d'argile.

Les comparaisons sont faites avec un taux de PEBD de 20 et 25 %.

IX.1 Comparaison de la résistance en compression

Le tableau IX présente les valeurs des résistances en fonction du taux de PEBD pour chaque type de matériau. Chaque valeur est une moyenne effectuée sur cinq (5) échantillons pour chaque proportion.

Tableau IX : Valeurs des résistances en compression

Matériaux	Taux de PEBD(%)	Résistance (MPa)
Mab	20	20,4 ± 1
	25	25,17 ± 0,37
Mbt	20	30,09±0,92
	25	31,20±0,81
Mbtca	20	50,02±1,32
	25	58,6±0,44

Les résistances de la thermocompression (Mbt et Mbtca) sont plus élevées que celles de la compression manuelle (Mab). De la compression manuelle à la thermocompression, l'augmentation de la résistance est d'environ 47 % pour 20 % de PEBD et d'environ 24 % pour 25 % de PEBD. Ce qui montre l'importance de l'effet de la thermocompression sur la résistance du matériau.

Il faut signaler que l'augmentation de la résistance des matériaux contenant 25 % de PEBD est plus basse par rapport à celui contenant 20 % de PEBD. Cela serait dû à la proportion élevée de PEBD (faible résistance) dans le matériau, qui aurait atteint la quantité suffisante ne permettant plus une grande variation de la résistance.

L'ajout de l'argile permet une augmentation de la résistance de plus de 20 MPa. L'argile joue donc le rôle de renfort en améliorant les résistances.

IX.2 Comparaison de la résistance à la flexion trois points

Le tableau X présente les valeurs des résistances en fonction du taux de PEBD pour chaque type de matériau. Chaque valeur est une moyenne effectuée sur cinq (5) échantillons pour chaque proportion.

Tableau X : Valeurs des résistances en flexion

Matériaux	Taux de PEBD(%)	Résistance (MPa)
Mab	20	7±0,12
	25	8,26±0,2
Mbt	20	17,3±1,45
	25	22,6±0,6
Mbtca	20	26,7±0,7
	25	34,9±0,2

Comme en compression, la résistance s'améliore de la compression manuelle(Mab) à la thermocompression (Mbt). Il y a une amélioration d'environ 10 MPa pour le matériau contenant 20 % de PEBD et d'environ 14 MPa pour 25 % de PEBD.

Le mode de rupture favorise la grande variation de la résistance en flexion. En effet lors de la rupture, le PEBD est sollicité dans son allongement. Or le PEBD a une élongation maximale d'environ 800 % (**Bottin, 2014 ; Galez, 2011 ; Landscape, 2010 ; Matra Plast, 2004**) avant rupture. Avec l'ajout de l'argile, la résistance augmente de plus 200 % quelque soit le taux de PEBD. La charge et la thermocompression améliore donc efficacement la résistance du matériau.

IX.3 Comparaison de la résistance à l'absorption d'eau

Le tableau XI, présente les valeurs des coefficients d'absorption des trois types de matériaux.

Tableau XI : Valeurs des coefficients d'absorption

Matériaux	Taux de PEBD(%)	Coefficient d'absorption(%)
	20	1,63
Mab	25	1,19
Mbt	20	0,35
	25	0,30
Mbtca	20	0,29
	25	0,20

L'absorption baisse considérablement de la compression manuelle à la thermocompression. Ainsi lorsqu'on passe de la compression manuelle à la thermocompression, elle baisse de 1,63 à 0,35 (soit 78,5 %) pour le matériau contenant 20 % de PEBD. De même, elle baisse de 1,19 à 0,30 (soit 74 %) pour 25 % de PEBD. La méthode de thermocompression avec 10 MPa de pression fait diminuer ou disparaître l'air emprisonnée par le plastique dans le matériau (cf. VII.1). Ce qui entraîne une baisse de la proportion des cavités dans le matériau, induisant de facto la baisse de l'absorption. Elle baisse encore plus avec l'apport de charge. Ce qui est dû au remplissage par l'argile, des cavités pouvant exister entre les grains de sable.

IX.4 Comparaison des résistances avec des matériaux de revêtement

Dans le but de proposer les matériaux dans le revêtement (routier et maison), une comparaison est faite avec les pavés et les carreaux de sol et de mur.

Avant chaque comparaison des informations seront données sur les matériaux précités.

IX.4.1 Pavés et exemple de quelques normes

IX.4.1.1 Définition de pavés et utilisation

Un **pavé** est un bloc en pierre, en béton ou en terre cuite, couramment employé comme revêtement de chaussée accueillant un trafic occasionnel ou continu, de zones piétonnes, de parkings, d'aires industrielles (Creabéton, 2016 ; Gatine, 2011, Cerib, 2009).

Les pavés permettent d'une façon générale, de répondre aux trois besoins suivants :

- le besoin fonctionnel : assurer ou contribuer à la lisibilité de l'espace public en matérialisant des zones dédiées ou des limites élaborées par les urbanistes.
- le besoin architectural : leurs formes, couleurs favorisent une esthétique ou une perception architecturale des aménagements urbains.
- le besoin structurel : de par leurs caractéristiques mécaniques à résister aux sollicitations, ils pourront résister à des trafics routiers plus ou moins importants.

Ainsi, les pavés sont classés en fonction du type de trafic selon les normes **NF P 98-082, NF P 98-335 (Cerib, 2009)**. Le tableau XII résume les différentes caractéristiques des pavés en fonction du trafic.

Tableau XII: Caractéristiques de pavés en fonction du trafic

Classe de trafic	Type de trafic	Nombre PL ⁽¹⁾ /Jours/Sens	Equivalent en nombre de véhicules sans distinction de charge	Epaisseur minimum des pavés (mm)
T5	Voies pitonnés, véhicules de service et/ou livraison, Parkings résidentiels ou urbains	$0 < PL \leq 25$	$0 < V \leq 500$	60
T4		$25 < PL \leq 50$	$500 < V \leq 700$	80
T3		$50 < PL \leq 150$	$700 < V \leq 1500$	80
T2	Voies urbaines et Parkings poids lourds	$150 < PL \leq 300$	$1500 < V \leq 3000$	100
T1		$300 < PL \leq 750$	$V > 3000$	100

⁽¹⁾ Poids Lourds (PTAC $\geq 3,5$ tonnes)

IX.4.1.2 Résistances mécaniques et résistances à l'absorption d'eau exigées selon les normes

Dans le tableau XIII, sont présentées les résistances en flexion et en compression des pavés selon les normes **NF EN 12390-3 (InfoCiment, 2015)**, **NF EN 1339 (Cerib, 2009)** et la résistance à l'absorption d'eau des pavés selon les normes **EN 771-1(Wallonie, 2015)**, **NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2004 (Ployaert, 2009)**.

Tableau XIII: Résistance mécaniques et absorption d'eau en fonction du trafic

Classe de trafic	Résistance en compression (MPa)	Résistance en flexion (MPa)	Absorption d'eau (%)
T5	20	3,5	≤ 3
T4	25	4	≤ 5
T3	25	5	≤ 6
T2	$25 < R_c \leq 60$	6	≤ 7
T1	$R_c > 60$	≥ 6	Pas de spécification

IX.4.1.3 Comparaison des résistances obtenues avec les normes et applications

Le tableau XIV est un récapitulatif des résistances obtenues comparées aux normes.

Tableau XIV : Résistances des matériaux obtenus comparées aux normes

	Matériaux confectionnés						Classe de trafic				
	Mab		Mbt		Mbtac		T5	T4	T3	T2	T1
	20 %	25 %	20 %	25 %	20 %	25 %					
Résistance Compression (MPa)	20,4	25,2	31,2	30	50,02	58,6	20	25	25	$25 < R_c \leq 60$	$R_c > 60$
Résistance Flexion (MPa)	7	8,3	17,3	22,6	26,7	34,9	3,5	4	5		> 6
Absorption (%)	1,63	1,19	0,35	0,3	0,29	0,2	≤ 3	≤ 5	≤ 6	≤ 7	Pas spécifié

Selon les normes et en fonction des trafics, le minimum de résistance en compression est fixé à 20 MPa.

Les résultats rentrent dans ce canevas car la résistance obtenue avec 20 % de PEBD est 20,4 MPa. Quant à la résistance en flexion, les normes exigent une résistance minimum de 3,5 MPa. Or nous obtenons une résistance minimum de 7 MPa à partir de 20 % de PEBD. Concernant la résistance à l'absorption d'eau, les normes tolèrent une absorption comprise entre 3 et 7 %. L'absorption obtenue sur nos matériaux est comprise entre 1,63 et 0,20 %. Ce qui est largement inférieur aux exigences des normes. Cette grande différence est due à la matrice PEBD qui est hydrophobe. En se référant aux résistances obtenues, nous pouvons alors proposer les différents matériaux aux applications suivantes :

- Mab (20 % PEBD) = pavés pour trafic de classe T5,
- Mab (25 % PEBD) + Mbt (20 et 25 % PEBD) = pavés pour trafic de classe T4 et T3,
- Mbtac(20 et 25 % PEBD) = pavés pour trafic de classe T2.

Les dimensions des pavés étant 20X8X (6 ou 7) cm³, il faut alors environ 49 pour un mètre carré (Figure 88).



Figure 87 : Pavés posés.

Les résistances obtenues sont plus élevées que ceux des pavés à base de sachets plastiques élaborés dans les projets au Niger (**R.E.S.E.D.A. ,2014**) ; au Burkina (**Zigani, 2010**), au Togo (**Tain, 2010**), et au Tchad (**Cervald, 2003**).

IX.4.2 Revêtement de sol et exemple de quelques normes

IX.4.2.1 Définition et utilisation

Un **revêtement de sol** est un matériau de construction, naturel ou manufacturé, qui couvre le sol. Comme tout autre revêtement, il sert de protection ou de décoration mais il est spécifiquement adapté pour résister aux passages des personnes, des animaux.

Pendant la construction, la transformation ou de l'assainissement des locaux, les matériaux de revêtement de sol occupent une place importante.

IX.4.2.2 Classification et caractéristiques

Selon les normes NF DTU 52.1 P1-2(AFNOR, 2010), NF DTU 54.1 P1-1(AFNOR, 2008) et NF EN 13451-1(AFNOR, 2008), les matériaux de revêtement de sol sont classés en fonction de la sollicitation. Le tableau XV présente les classes avec leurs caractéristiques exigées.

Tableau XV : Types et caractéristiques des matériaux de revêtement

Types de sollicitation	Epaisseur (mm)	Résistance mécanique (MPa) Flexion compression	Absorption d'eau(%)
Intérieurs à faibles sollicitations(P2)	10 à 20	>16	
Intérieurs à sollicitations modérées(P3)	20 à 30	>20	< 7
Intérieurs à fortes sollicitations(P4)	>30	> 4 >25	
Sols extérieurs(P4S)	> 30	>25	< 6

IX.4.2.3 Comparaison des résistances obtenues avec les normes

Le tableau XVI fait un rappel en comparant les résistances obtenues avec l'exigence des normes.

Tableau XVI : Comparaison des résistances obtenues avec les normes

	Matériaux						Normes			
	Mab		Mbt		Mbtca		P2	P3	P4	P4S
	20%	25%	20%	25%	20%	25%				
Résistance en flexion (MPa)	7	8,3	17,3	22,6	26,7	34,9		>4		
Résistance en compression (MPa)	20,4	25,2	31,2	30	50	58,6	>16	>20	>25	>25
Absorption d'eau (%)	1,63	1,19	0,35	0,30	0,29	0,2		< 7		< 6

Selon les normes et en fonction de la sollicitation, le minimum de résistance en compression et en flexion est fixé respectivement à 16 et 4 MPa.

En les comparant aux résultats obtenus, nous pouvons proposer comme application :

- Mab (20 % PEBD) = revêtement de type P2,
- Mab (25 % PEBD) = revêtement de type P3,
- Mbt et Mbtca = revêtement de type P2 à P4S.

Par contre, pour l'esthétique et vue l'aspect brillant et lisse des échantillons Mbt et Mbtca (Figure 89), leur utilisation pour le revêtement des sols serait la plus souhaitée.

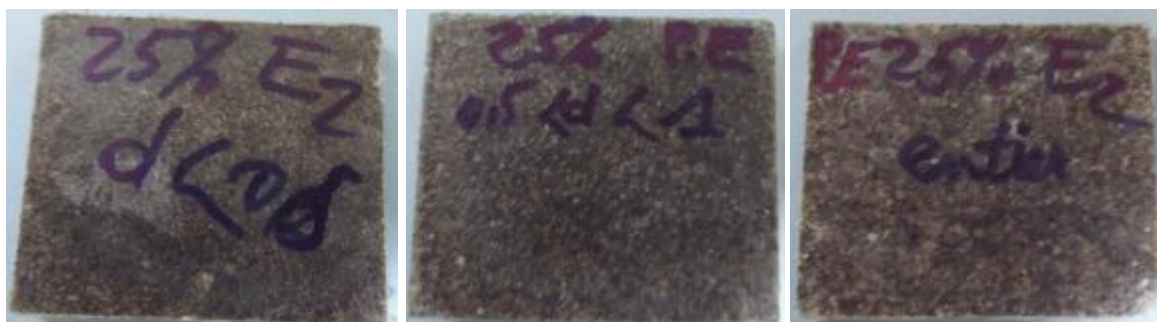


Figure 88 : Image des échantillons Mbt et Mbtca.

Conclusion

Les matériaux obtenus à partir des différentes méthodologies au cours de cette étude ont été proposés à des applications. Il s'agit des pavés pour le revêtement routier et piéton et aussi pour le revêtement intérieur et extérieur des maisons.

Les résistances mécaniques obtenues sont conformes aux exigences des normes concernant ces types de matériaux. Ces différents résultats permettent de dire qu'il serait important de se pencher sur la valorisation des matériaux à base de PEBD.

**CONCLUSION
GENERALE
ET PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le contexte de recyclage des déchets plastiques qui est de nos jours une question préoccupante pour tous. L'objectif était, d'une part, de proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques en l'utilisant comme liant dans un matériau sable-PEBD (déchets plastiques), et d'autre part, d'optimiser leurs teneurs dans les matériaux.

C'est ainsi que l'étude s'est structurée autour de trois méthodes d'élaboration des matériaux :

- méthode par compression manuelle,
- méthode de thermocompression
- méthode de thermocompression avec ajout d'argile.

Les résultats obtenus à partir des essais (destructifs et non destructifs) sur les différents matériaux ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Pour la méthode de compression manuelle, les résistances mécaniques augmentent (de 2,54 à 8,6 MPa pour la flexion et de 10 à 30 MPa pour la compression) avec le taux de PEBD jusqu'à 30 %, avant de baisser. Les résultats des essais non destructifs (scléromètre et ultrason), ont été confirmés par ceux des essais destructifs. Ces deux types d'essais ont permis d'établir des modèles avec de bonnes corrélations ($R^2=0,99$) qui permettent de prédire le comportement mécanique des matériaux.

C'est ainsi qu'une équation permettant de prédire la résistance à la compression d'un matériaux sable-PEBD est obtenue par la relation $E = 286f_c^{0,8}$ où E est le module de Young et f_c est la résistance en compression.

- Pour la méthode de thermocompression, la résistance augmente (de 13 à 28 MPa pour la flexion et de 17 à 36 MPa pour la compression) avec le taux de PEBD jusqu'à 50 %, avant de baisser. Il a été démontré qu'il faut une pression maximale (10 MPa), au-delà de laquelle, la résistance baisse. En effet, le réarrangement des particules de sable sous l'effet de la force de compactage favorise un bon contact entre sable et plastique (PEBD), enduisant ainsi une résistance élevée. Par contre, au delà de 10 MPa de pression, la résistance chute car l'augmentation progressive de la pression réduit l'espace entre grains, de sorte que certains se trouvent superposés les uns sur les autres avec peu ou pas de liant, fragilisant ainsi le matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte.

Il a été aussi démontré que la granulométrie du sable influence la résistance du matériau. Ainsi lorsque les grains sont trop petits ($<355 \mu m$), ils sont complètement noyés dans le plastique.

Sous l'effet de la contrainte aucune résistance n'est opposée par les grains et la fissure se propage directement dans le plastique fondu, induisant une résistance faible car le plastique a une faible résistance mécanique.

Aussi lorsque les grains de sable sont moyens ($< 500 \mu\text{m}$), ils ne sont plus noyés dans le plastique. La contrainte est portée par le plastique, les grains et la plus ou moins forte liaison entre sable et plastique. Les fissures qui naissent contournent les grains ; ce qui ralentit leur propagation dans le matériau, entraînant ainsi une résistance élevée. De même lorsque les grains sont grossiers (entre 1300 et $1575 \mu\text{m}$), sous l'effet de la contrainte, on assiste à la création de contact entre les grains de sable et les fissures qui naissent se propagent facilement entre les grains en contact, fragilisant ainsi le matériau.

- Pour la méthode de thermocompression avec ajout d'argile, les résultats montrent aussi que le taux de charge idéale en argile varie en fonction du taux de PEBD. C'est ainsi que pour les matériaux comportant 20 et 25 % de PEBD, les meilleures résistances sont obtenues respectivement avec 5 et 7 % de charge en argile.

Les grains d'argile insérés entre les grains de sable permet d'accroître les forces qui s'opposent à la contrainte augmentant ainsi la résistance jusqu'au taux idéal d'argile. Par contre la résistance baisse au-delà du taux idéal, car les particules d'argile se trouvent en excès entre les grains de sable, fragilisant ainsi le matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte. Cette baisse de la résistance serait aussi due à l'agglomération des particules d'argile qui sont pulvérulentes. Les particules d'argile agglomérées non liées par le plastique (PEBD) du fait de leur viscosité constitueraient des zones de faiblesse.

Des trois méthodes, l'étude de l'effet de la granulométrie des particules (argile et de sable) a démontré, que plus la granulométrie est fine, et plus la résistance augmente.

De même, l'absorption d'eau des matériaux baisse avec l'augmentation en PEBD du fait du caractère hydrophobe de ce dernier.

En comparant les résistances mécaniques des matériaux obtenus, avec ceux des matériaux de revêtement que sont les pavés et carreaux de revêtement de sol intérieur et extérieur, les résultats montrent qu'ils sont utilisables car ils respectent les normes établies, et même mieux que les prescriptions des normes.

Pour conclure, nous disons alors qu'il est conseillé d'utiliser ces matériaux comme pavés et carreaux de revêtement de sol intérieur ou extérieur.

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus au cours de cette étude, sont intéressants et encourageant. Cependant pour plus d'arguments en faveur de l'utilisation de cette méthode de recyclage des sachets plastiques, il serait intéressant de faire des études complémentaires.

C'est pourquoi il faut étendre cette étude sur :

- le comportement à feu des matériaux,
- la résistance à la glissance, afin d'assurer une sécurité maximale à l'utilisateur,
- la résistance à l'abrasion,
- la résistance aux agressions chimiques et climatique.

Ainsi, ces différentes études viendront conforter les arguments qui nous permettront de convaincre la population et le monde scientifique de l'utilité de cette méthode de recyclage pour assainir notre environnement souillé par ces déchets plastiques.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

AFNOR NP P 94-057(1992) : Sol : reconnaissance et essais Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation, Normalisation Française, Paris 20 p.

AFNOR NP P 94-056(1996) : Sol : reconnaissance et essais Analyse granulométrique des sols-Méthode par tamisage à sec après lavage, Normalisation Française, Paris, 16 p.

AFNOR NF DTU 54.1 P1-1(2008) : Revêtements de sol coulés à base de résine de synthèse. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques. Normes Française. 36 p.

AFNOR NF EN 13451-1 (2008) : Equipements de piscine – Exigences générales de sécurité et méthodes d’essais. Normes Française. 7 p.

AFNOR NF DTU 52.1 P1-2 (2010) : Revêtements de sol scellés. Partie 1-2 : Cahier des critères généraux de choix des matériaux. Normes Françaises. 40 p.

AL Akhrass D. (2014) : Méthodes éléments finis mixtes robustes pour gérer l’incompressibilité en grandes déformations dans un cadre industriel. Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne. 161 p.

A.D.E.M.E. (2001) : L’éco-conception c’est quoi ? Fiche de mémorisation. 12 p.

AMBID M. (2007) : Evaluation de nanocomposites polypropylène/silicate pour l’isolation électrique : Etude des phénomènes de polarisation, de conduction et des propriétés optiques. Thèse de l’Université Toulouse III - Paul Sabatier. 173 p.

ANDRIANATREHINAN. L., SOULI H., FRY J.-J., FLEUREAU J.-M., RECH J. (2015) : Effet des fines sur les paramètres mécaniques consolidés non drainés de matériaux granulaires. 22ème Congrès Français de Mécanique Lyon. 6 p.

ARIOGLU E., ARIOGLU N., GIRGIN C. (2001): Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted by H.Y.Qasrawi. Cement and concrete research. pp.1239-1240.

AUBRY J. (2014) : Les matières plastiques. Document technologie des matériaux.18 p.

BALET J.-M. (2007) : Gestion des déchets. Aide mémoire. 246 p.

BALOU B. (2009). Support de cours de matières plastiques, DEA de Géomateriaux, Université de Cocody-Abidjan, 58 p.

BADEL E., PERRE P. (1999) : Détermination des propriétés élastiques d'éléments individuels du plan ligneux du chêne par des essais de traction sur Micro-éprouvettes. Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences, 56 (6), pp.467-478

BALTHAZARD R. (2015) : La porosité des résines composites utilisées en odontologie : étude de son origine et évaluation de son influence sur différentes propriétés. Thèse de l'Université de Lorraine. 213 p.

BAVELARD G., BEINISH H. (2006) : Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes ; Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton ; 28 p.

BENBAYER C. (2014) : Nanocomposites à base d'argile et de surfactants polymérisables (surfmers): synthèse et propriétés. Thèse de l'Université de Nice-Sophia Antipolis. 195 p.

BENGHAZI Z. (2015) : Technologie des géomateriaux. Chapitre II. Document de cours Université Larbi Tebessi-Tebessa(Algérie). 5 p.

BODARD G. (2016) : Pour une démarche de l'éco-conception. Guide pratique aux TPE et PME. 74 p.

BOUAKKAZ M. E. A. (2012) : Caractérisation du béton par les méthodes non destructives – application de la méthode de fréquence de résonance ; Mémoire de Magister en Génie Civil, université Abou bekrbelkaid – Tlemcen, Algérie. 99 p.

BOUKHELKHAL D., KENAI S. (2015) : Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason). Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. 9 p.

BOURAI K. (2010) : Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application en rotomoulage (Mémoire M.Sc.), Université Laval, Québec, 128 p.

BOURBAN P.-É., CARLSSON L., MERCIER J.P., MANSON, J.-A.E. (2004): Matériaux composites à matrice organique: constituants, procédés, propriétés, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 233 p.

BOTTIN M.-F. (2014) : Les Polyoléfines. Cours Centre de Formation en Plasturgie, Dijon(France). p.22

BRETAGNE E. (2009) : Eco-matériaux : les enjeux et les problématiques pour la mécanique. 19 ème Congres Français de Mécanique, Marseille. p.6

BRUNEAU M. (2015) : Recyclage des déchets plastiques dans la gestion des déchets en Afrique et dans les caraïbes. Présentation synthétique de l'état des lieux et des retours d'expériences. Plateforme-Re-Sources.6 p.

BUCUR V., PERRIN A. (1981) : Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 38 (2), pp.283-298.

CASCADE F. (2011) : Expérience de l'unité de fabrication de pavés plastiques par Cascade Fonderie à travers le PSRDO/CER. Séminaire CIFAL. 15 p.

CÉLINI N. (2004) : Traitement des argiles par plasma froid pour leur utilisation comme charges de nanocomposites argile-polymère. Thèse de l'Université du Maine (France).212 p.

CERIB (2009) : Voirie et aménagements public. Guide de confection des ouvrages réalisés à partir des pavés, dalles, bordures et caniveaux préfabriqués en béton. 92 p.

CERVALD (2003) : Tri sélectif et valorisation des déchets urbains de la Ville de N'Djamena. Rapport final. 70 p.

CHAMARANDE L.; JOLIVET S. (2015) : Le recyclage aujourd'hui. Document .10 p.

CHARMET J.-C. (2015) : Mécanique du solide et des matériaux : Elasticité-Plasticité-Rupture. Support de cours de l'enseignant de l'ESPCI Paris-Tech. 163 p.

CHARRADI K. (2010) : Contribution des argiles ferrifères à l'élaboration de biocapteurs ampérométriques : Etude de l'interaction de l'Hémoglobine avec des Argiles et des Hydroxydes Doubles Lamellaires. Thèse Université de Grenoble.156 p.

CHATEIGNER D. (2012) : Résistance des Matériaux. Cours de l'IUT Mesures Physiques, Université de Caen Basse-Normandie, Laboratoire CRISMAT-ENSICAEN, 39 p.

CLYNE T.W., HULL D. (1996): An Introduction to Composite Materials, 2e Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 58 p.

CONTROLS (2013) : PULSONIC, Appareil d'auscultation 58-E4900.Manuel d'utilisation ; 51 p.

COULIBALY M. (2008) : Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastovisco-plastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés. Thèse Université Paul Verlaine de Metz. 269 p.

CREABETON (2016) : Revêtements en béton. Données technique de CreaBeton Matériaux. 52 p.

CSEMP (2004) : Conception et fabrication des emballages en matières plastiques pour une valorisation optimiste. Guide pratique. 33 p.

CYR D. (2002) : Comparaisons d'échelles et classifications granulométriques.2 p.

DALLSHAD K.H. B., MUHAMMED A. I. (2013): Estimating Strength of SCC Using Non-Destructive Combined Method. Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. 8 p.

DEGOUTTE G., ROYET P. (2009): Aide mémoire de mécanique des sols. Document de cours ENGREF, Paris VI. 96 p.

DO T. V.V. (2011): Matériaux composites à fibres naturelles / polymères biodégradables ou non. Thèse de l'Université de Grenoble. 188 p.

DOUBLIER G. (2008). Dossier « les plastiques », 13 p.

DOUBLIER G. (2012) : Fiche valorisation des sachets plastiques. 3 p.

DUNKY M. (1998): Urea-formaldehyde, adhesive resins for wood, Int. J. Adhesion and Adhesives, 18, pp.95-107.

DURANEL L. (2011) : Les plastiques: défis et opportunités. Colloque « Activités Humaines et Pollutions. Académie de Versailles. pp.10-11

DURIER A.-L., DERRIEN K., GILORMINI P. (2007) : Contraintes et saturation en eau dans un composite à matrice polymère. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007. 6 p.

DYSLI M. (1997) : Géologie appliquée à l'ingénieur et à l'environnement. Document de cours. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 79 p.

ELBAZ M. (2005) : Les nanocomposites à matrice organique. Master de L'Université Claude Bernard de Lyon 1. 15 p.

ELIAS F. (2014) : Elasticité, Notes de cours M2 Fluides Complexes et Milieux Divisés ; Université Paris-Diderot, 66 p.

ENONGO B., DONGO E. (2009). Le sable : Un géomatériau complexe aux multiples applications ; Materials Solutions, vol.1-number1 published by MIPROMALO/MINRESI-Cameroon, pp. 22-23

ESSAIDI N., SAMET B., BAKLOUTI S., ROSSIGNOL S. (2014) : Effet de la granulométrie sur des matériaux consolidés à base d'argiles tunisiennes en présence d'une source alcaline. Verres, Céramiques & Composites, Vol. 3, N°2, pp.23-31

FOND C. (2015) : Les polymères. Support de cours. Université de Strasbourg - IUT Génie Civil. 17 p.

GALEZ P. (2011) : Structure et propriétés des matériaux : polymères et composites Support de cours IUT Annecy. 48 p.

GANIRON T. U. Jr (2014): Effect of Thermoplastic as Fine Aggregate to Concrete Mixture. International Journal of Advanced Science and Technology Vol.62, pp.31-42

GATINE(2011) : Les matériaux de revêtement : les pavés et les dalles. Guides des matériaux de revêtement et du petit mobilier urbain relatifs à l'espace public. 12 p.

GERVAIS H. (2010) : Les plastiques. Fiches informatives RECYC-QUEBEC. 9 p.

GHERNOUTI Y., RABEHI B. (2011) : Béton à base des granulats de déchets des sacs en plastique renforcé de fibres métalliques. **INVACO2** : Séminaire international, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction. 7 p.

GHOMARI F., BENDI-OUIS A. (2007) : Science des matériaux de construction. Document de Travaux pratiques. 16 p.

GILLESPIE R.H. (1984) : Adhesives for wood, research, applications and needs, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 15 p.

GUENDOUZ M. DEBIEB F., BOUKENDAKDJI O., KADRI E.H., BENTCHIKOU M., SOUALHI H. (2016): Use of plastic waste in sand concrete. J. Mater. Environ. Sci.7. pp.382-389.

HALADA K. (2003): Progress of ecomaterials toward a sustainable society. Current Opinion in Solid State and Materials Science 7.pp. 209–216

HANNACHI S., GUETTACHE M.N. (2011) : Le contrôle non destructif des ouvrages en béton. « Evaluation de la résistance du béton a la compression sur site : application de la méthode combinée ». Sciences &Technologie B – N°34, pp 9-14.

HANNEQUART J.-P. (2004) : Guide de bonne pratique pour le recyclage des déchets plastiques .99 p.

HELSON O., BEAUCOUR A. L., ESLAMI J., NOUMOW A. (2015) : Caractérisation du comportement mécanique des bétons de sol, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Angleterre, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167735>, 8 p.

KARRAY M. (2015) : Mise en place des matériaux. Cours GCI 345-ouvrage en terre. Université de Sherbrooke. 37 p.

KAWAI S., SASAKI H (1986) : Production technology for low-density particleboard I-Forming a density gradient and its effect on board properties, Mokuzai Gakkaishi Journal of the Japan Wood Research Society, 32, pp.324-330.

KHODJA A. B., GHRICI M., KENAI S. (2010) : Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique. XXVIIIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. La Bourboule, 11.p.

KONAN K. L. (2006) : Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse de l'Université de limoges. 142 p.

KOUADIO K.C. (2010) : Elaboration et caractérisation de blocs d'argile stabilisée au ciment (cimarg) : influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Thèse Université de Cocody- Abidjan. 188 p.

KOUAKOU C. H. (2000). Valorisation des argiles de Cote d'Ivoire : étude de la stabilisation à froid de l'argile de Dabou à l'aide de liants hydrauliques. DEA Sciences de la Terre, option Géomateriaux, Université de Cocody, Abidjan, 77 p.

LANDSCAPE F. (2010) : Polyéthylène. Fiche technique. 2 p.

LARRAD D. F. (1999) : Structures granulaires et formulation des bétons. Collection études et recherches des laboratoires ponts et chaussées. 414 p.

LECOMTE-BECKERS J. (2009a) : Physique des matériaux: partie polymères. Chapitre 2 : Distinction des polymères. 24 p.

LECOMTE-BECKERS J. (2009b) : Physique des matériaux: partie polymères. Chapitre 8 : Propriétés mécaniques. 53 p.

LE CORRE V. (2007) : Etude de la compétition déchirure ductile / rupture fragile : Application à la tenue mécanique des tubes en acier C-Mn et de leurs joints soudés. Thèse de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille. 350 p.

LEDRU Y. (2009) : Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés Aéronautiques. Thèse de l'université de Toulouse. 242 p.

MAHFOUDH A. (2013) : Etude de la production et de la caractérisation de composites bois-plastiques. Mémoire de maîtrise de l'Université de Laval, Québec, Canada. 101 p.

MARC F. (2016) : Les plastiques. Cours du Module M227 Matériaux non métalliques. IUT de Cachan, Université de Paris Sud 11. 123 p.

MARQUIS D. (2010) : Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement au feu d'un composite pour son utilisation en construction navale. Thèse de l'Université de Nantes et Ecole des mines de Nantes. 309 p.

MARTIAS C. (2011) : Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destiné à la protection incendie. Thèse de l'Université du Sud Toulon Var. 279 p.

MBEY J. A. (2013) : Films composites amidon de manioc-kaolinite : Influence de la dispersion de l'argile et des interactions argile-amidon sur les propriétés des films. Thèse de l'Université de Lorraine. 137 p.

MEDJNOUN A. (2014) : Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. Thèse Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie). 172 p.

MESTA Ph., REIFFSTECK Ph. (2002) : Modules de déformation en mécanique des sols : définitions, détermination à partir des essais triaxiaux et incertitude. Paramètres de calcul géotechnique. Magnan (éd.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, 8 p.

MICHEL-PONNELLE S. (2014) : Code Aster : Eléments finis traitant la quasi-incompressibilité. Manuelle de référence : fascicule r3.06. 20 p..

MICROSOFT, Encarta (2009) : «Le sable», Microsoft corporation, 2008

MOLIMARD J. (2011) : Cours de Mécanique Expérimentale. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. 99 p.

MULTON S. (2012) : Béton Armé : Eurocode 2, INSA-université Paul Sabatier-Toulouse (France), 154 p.

NAUDIN C.-A. , CLOZZA C. (1987) : Charges. Technique de l'ingénieur. 11 p.

NOBILE L., BONAGURA M. (2013): Accuracy of non-destructive evaluation of concrete compression strength. The 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing.8p.

ODDES O., VERGNES B., BURR A. (2008) : Nanocomposites à base de sépiolite : Influence des conditions de mélange et de l'agent compatibilisant sur la dispersion et les propriétés (mécaniques et résistance au feu).Projet NanoStructures. CEMEF, Ecole des Mines de Paris, UMR CNRS 7635.32 p.

PEURTON F. (2008) : Nanocomposites à matrice thermoplastique et renfort plaquettaires : relations élaboration-structure-propriétés. Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille. 200 p.

PLOYAERT I. C. (2009) : Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau. Bulletin de la Fédération Cimentière Belges. 16 p.

PRAVEEN M., SHIBI V., THOMAS P., ELDHO V. (2013): Recycled Plastics as Coarse Aggregate for Structural Concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 3, pp.684-690

RAGOUBI M. (2010) : Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne. Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy 1.186 p.

RAGOUILLIAUX A. (2007) : Etude rhéophysique de systèmes émulsions inverses / argile organophile. Applications aux boues de forage pétrolier. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie. 166 p.

RAKOTOSAONA R., RAMAROSON J.D., MANDIMBISOA M., ANDRIANAIVORAVELONA J. O., ANDRIANARY P., RANDRIANARIVELO F., ANDRIANAIVO L. (2014) : Valorisation à l'échelle pilote des déchets plastiques pour la fabrication de matériaux de construction. Mada-Hary, vol. 2, pp. 54-69

RASKIN A. (2009) : Les résines composites. Support de Cours. Université Médicale Virtuelle Francophone. 37 p.

REIFFSTECK P., NGUYEN P.-T., ARBAUT J. (2007) : Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol. Document de cours,12 p.

SALMAN M. M., AL-AMAWEE A. H. (2006): The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete.Journal of Engineering and Development, Vol. 10, No. 2. pp.163-174.

SEYNI A. (2008) : Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage. Thèse de l'université de Toulouse. 164 p.

TAIN F. (2010) : Mise en place d'une unité de transformation de sacs plastiques en pavés.Rapport de stage de l'association PAE Togo. 59 p.

TARSEM L., SANJAY S., SANJEEV N. (2013): Reliability Of Non-Destructive Tests For Hardened Concrete Strength. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 3, 7 p.

TCHARKHTCHI A., BRIOT J., CRAWFORD R.G., ROBERT A., KEARN M. (2001) : Rotomoulage du polyéthylène chargé de mica. Matériaux et technique N°9.7 p.

THIESSON J. (2014) : Classification et identification des sols. Document de cours. Université Pierre et Marie Curie. 13 p.

THIRIEZ A., IBO J., BUTIN V. (2011) : Etude stratégique pour la gestion des déchets solides dans le district d'Abidjan. Rapport final définitif. 176 p.

VIVIER F. (2006) : Les Polymères. Travaux Pratiques IUT Créteil-Vitry. Mesures Physiques (1ère année). 30 p.

WALLONIE(2015) : Modification des prescriptions du chapitre C.29 : PAVES. Groupe de travail n° 05, pavage, dallage et éléments linéaires.14 p.

WEGHE P.V. (2011) : Cours polymères L3.Université de Rennes 1. 29 p.

WEISS P. (2009) : La chimie des polymères. Support de Cours, Université Médicale Virtuelle Francophone. 17 p.

WIBOON L. (2006) : Réalisation de nanocomposites polypropylène / argile par extrusion bivis. Thèse de l'école des Mines de Paris .Spécialité «Sciences et Génie des Matériaux». 245 p.

YAGOUBI M. E. (2016) : Étude de caractérisation et corrélation aux moyens des essais non-destructifs (NDT) et essai direct d'un béton à haute performance (BHP) à base de matériaux locaux. Mémoire de master de l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila(Algérie).143 p.

ZHUANG J.M., STEINER P.R. (1993) : Thermal Reactions of Diisocyanate (MDI) with Phenols and Benzylalcohols: DSC Study and Synthesis of MDI adducts, *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 47(5), pp.425-434.

ZIGANI G. (2010) : Etude socio-économique sur la valorisation du plastique souple en pavés .Rapport final. 33 p.

ZOMBRE C. G.M. M. (1997) : Production domestique, récupération et recyclage des déchets plastiques : cas des sachets plastiques à Dakar. Thèse de l'Université Cheikh Anta Diop Dakar. 141 p.

REFERENCES WEB

Charte de la terre sur l'environnement (1992) : <http://w.w.w.un.org/french/>

Consulté le 15/05/2013

Eco-3e(2013) : Le guide Eco-conception des éco-organismes DEEE Français.

www.eco3e.eu

InfoCiment(2015) : Les constituants. Chapitre 4. www.infociments.fr/telecharger/.44-73.pdf

Matra Plast (2004) : Propriétés des matériaux polypropylènes/ polyéthylènes,

W.w.w.matraplast.com/french/twinwall/specs/pepp_properties.html

R.E.S.E.D.A(2014) : Les pavés. Répertoire de fiches techniques

www.reseda-niger.net

Society of Plastic Engineers (SPE) (2008): Recycling of plastics.

www.plasticsengineering.org

ANNEXES

1. Résultats globaux des tests mécaniques

1.1 Méthode de confection par compactage manuelle

Les Tableaux 1 et 2 présentent les résultats des tests de flexion trois points et le module de Young effectués sur les différentes formulations par la méthode de compactage manuelle.

Tableau 1 : Valeurs des résistances en flexion 3 points et modules de Young du sable A

Taux de PEBD (%)	N° essai	Sable A (granulometrie ≤ 1 mm)					
		Résistance en flexion 3 points			Module de Young en flexion		
		Valeurs individuelles	Moyenne	Ecart-type	Valeurs individuelles	Moyenne	Ecart-type
15	1	2,45			144,7		
	2	2,98			144,6		
	3	2,2	2,53	0,23	144	144,38	2,57
	4	2,5			145		
	5	2,56			148		
	6	2,62			140		
20	1	6,97			324,7		
	2	7,02			324,4		
	3	6,9	6,96	0,12	324,2	324,41	0,42
	4	7,15			325,1		
	5	6,8			323,9		
	6	6,9			324,2		
25	1	8,26			559		
	2	8,3			554,7		
	3	8,25	8,26	0,2	554,9	555,73	1,67
	4	8,24			555		
	5	8,28			554,8		
	6	8,26			556		
30	1	8,6			611		
	2	8,3			609		
	3	8,9			610	610	1,41
	4	8,5	8,6	0,2	608		
	5	8,7			612		
	6	8,6			610		
35	1	7,9			497,3		
	2	7,96			499		
	3	8,09	7,98	0,12	499,5	498,65	1,08
	4	8,5			500		
	5	7,8			498,6		
	6	8,1			497,5		
40	1	7,26			374,2		
	2	7,28			377		
	3	6,96	7,15	0,17	379	377,37	2,09
	4	7,2			376		
	5	6,9			378		
	6	7,3			380		

Tableau 2 : Valeurs des résistances en flexion 3 points et modules de Young du sable B

Taux de PEBD (%)	N° essai	Sable B (granulometrie ≥ 1 mm)					
		Résistance en flexion 3 points			Module de Young en flexion		
		Valeurs individuelles	Moyenne	Ecart-type	Valeurs individuelles	Moyenne	Ecart-type
15	1	1,22			99,2		
	2	1,6			95,4		
	3	1,17	1,32	0,15	94,9	96,5	1,53
	4	1,28			97		
	5	1,34			96,7		
	6	1,35			95,8		
20	1	4,5			145		
	2	4,56			148,2		
	3	4,39	4,58	0,22	143,9	145,5	1,89
	4	5			147,5		
	5	4,6			144,6		
	6	4,45			143,8		
25	1	6,12			327		
	2	6,09			331,4		
	3	5,89	6,03	0,11	329,6	329,33	1,61
	4	5,9			330,8		
	5	6,08			328,5		
	6	6,12			328,7		
30	1	7,21			546		
	2	6,87			539,		
	3	7,24	7,10	0,17	541,8	542,53	2,15
	4	7,1			543,8		
	5	6,93			541,3		
	6	7,3			542,5		
35	1	7,98			587		
	2	8,18			597,5		
	3	8,14	8,08	0,12	595,7	593,4	3,57
	4	8,17			593,2		
	5	8,15			594		
	6	7,9			593		
40	1	7,8			405,2		
	2	7,87			406,1		
	3	7,68	7,77	0,10	403,9	405,06	0,94
	4	7,9			404		
	5	7,66			405,2		
	6	7,78			406		

Le Tableau 3 présente les résultats des tests de compression et le module de Young effectués sur les différentes formulations par la méthode de compactage manuelle

Tableau 3 : Valeurs des résistances en compression et du module de Young du sable A

Taux de PEBD (%)	N° essai	Résistance en compression			Module de Young en compression		
		Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type	Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type
15	1	9,73	9,90	0,33	2336	2338	9,84
	2	10,08			2320		
	3	10,5			2339		
	4	9,63			2341		
	5	9,7			2343		
	6	9,8			2349		
20	1	21,93	20,4	1	3451	3451	4,9
	2	18,9			3449		
	3	20,54			3452		
	4	19,8			3460		
	5	20,5			3446		
	6	20,7			3448		
25	1	25,53	25,08	0,37	4390	4393	3,85
	2	25,18			4397		
	3	25,2			4395		
	4	25,12			4393		
	5	25,02			4396		
	6	24,4			4387		
30	1	28,93	29,81	0,94	3743	3742	4,09
	2	30,79			3747		
	3	29,6			3738		
	4	31,12			3737		
	5	28,9			3746		
	6	29,52			3741		
35	1	21,61	21,42	0,24	2773	2775	4
	2	21,47			2779		
	3	20,97			2776		
	4	21,65			2780		
	5	21,38			2772		
	6	21,45			2770		
40	1	11,96	12,47	0,45	1263	1265	3,35
	2	12,92			1260		
	3	13			1266		
	4	12,4			1269		
	5	11,98			1264		
	6	12,58			1268		

Tableau 4: Valeurs des résistances et module E

Taux de plastique (%)	Résistance (MPa)	Module d'élasticité E (MPa)
15	9,90	2338
20	20,4	3451
25	25,07	4393
30	29,81	3742
35	21,42	2775
40	12,47	1265

1.2 Méthode de confection par thermocompression

Tableau 5 : Valeurs des résistances en compression et du module de Young

Taux de PEBD (%)	N° essai	Résistance en compression(MPa)			Module de Young en compression		
		Valeur individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type	Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type
15	1	17,01	17,96	0,69	376	376	3,16
	2	17,71			380		
	3	18,93			378		
	4	18,04			374		
	5	18,10			372		
20	1	30,73	30,09	0,92	5031	5031	2
	2	28,64			5028		
	3	29,74			5032		
	4	30,86			5030		
	5	30,53			5033		
25	1	32,57	31,20	0,81	5313	5313	1,58
	2	31,20			5315		
	3	30,35			5314		
	4	31,15			5312		
	5	30,95			5311		
30	1	34,95	33,48	0,47	4346	4346	2,07
	2	33,34			4348		
	3	34,07			4344		
	4	31,57			4347		
	5	33,47			4343		
35	1	34,66	34,56	0,87	3657	3657	2,74
	2	33,58			3654		
	3	35,8			3655		
	4	33,87			3661		
	5	34,87			3656		
40	1	36,06	35,72	0,37	3325	3325	2,35
	2	35,65			3327		
	3	35,94			3324		
	4	35,23			3323		
	5	35,72			3328		
50	1	36,46	36,65	0,43	2689	2689	2,45
	2	36,16			2691		
	3	37,17			2688		
	4	36,80			2686		
	5	36,64			22		
		26,88			2051		

Suite tableau 5: Valeurs des résistances en compression et du module de Young

Taux de PEBD (%)	N° essai	Résistance en compression			Module de Young en compression		
		Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type	Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type
60	1	28,22			2050		
	2	21,52			2047		
	3	27,54	26,88	1,13	2038	2046,8	5,17
	4	30,27			2048		
	5	26,88			2051		
70	1	24			1700		
	2	23,17			1697		
	3	23,19	23,42	0,46	1698	1694,4	9,24
	4	23,8			1699		
	5	22,89			1678		
80	1	21,66			1345		
	2	21,66			1339		
	3	19,60	21,01	1,08	1347	1339,6	7,40
	4	21,78			1328		
	5	21,94			1339		
90	1	19,29			886		
	2	17,74			875		
	3	19,65	18,89	0,77	856	870,6	17,3
	4	18,45			887		
	5	19,25			849		

Tableau 6 : Valeurs des résistances en flexion et du module de Young

Taux de PEBD (%)	N° essai	Résistance en flexion			Module de Young en flexion		
		Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type	Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type
15	1	13,69	13,69	0,25	470,4	470	1,7
	2	13,50			468		
	3	13,51			471		
	4	14,04			472		
	5	13,7			470		
20	1	19,35	17,37	1,45	702	702,2	2,94
	2	17,56			705		
	3	16,07			703		
	4	16,50			698		
	5	17,4			702		
25	1	22,20	22,65	0,6	853	853,6	1,29
	2	22,09			854		
	3	22,97			852		
	4	23,33			855		
	5	22,6			853		
30	1	24,65	23,93	0,66	835	837,1	1,83
	2	23,07			839		
	3	24,16			838		
	4	23,86			836		
	5	23,93			837		
35	1	25,29	25,6	0,33	718	718,7	1,29
	2	25,81			720		
	3	25,96			719		
	4	25,36			717		
	5	25,60			718		
40	1	27,94	27,53	0,4	671	671,8	1,29
	2	27,57			672		
	3	27,00			670		
	4	27,63			673		
	5	27,84			671		
50	1	28,55	28,94	0,36	574,5	575,5	1,6
	2	28,71			577		
	3	29,27			574		
	4	29,23			577		
	5	28,55			575		
60	1	26,19	26,97	1,12	568,6	568,6	1,5
	2	26,47			570		
	3	21,47			567		
	4	26,98			568		
	5	26,97			568		

Suite tableau 6 : Valeurs des résistances en flexion et du module de Young

Taux de PEBD (%)	N° essai	Résistance en flexion			Module de Young en flexion		
		Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type	Valeurs individuelles (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart-type
70	1	26,07			551		
	2	25,16			549		
	3	24,82	24,87	1,35	553	551	2
	4	24,7			552		
	5	24,9			550		
80	1	23,19			485,9		
	2	23,94			486		
	3	22,44	23,19	0,75	487	486,9	0,61
	4	23,25			488		
	5	23,13			484		
90	1	15,2			400		
	2	14,7			398		
	3	14,3	14,73	0,34	397	401,6	4,72
	4	14,5			405		
	5	14,9			408		

1.3 Matériaux composites avec charge d'argile

Tableau 7 : Valeurs des résistances en compression en fonction du taux d'argile pour le composite contenant 20 % PEBD

Taux d'argile (%)	N° d'essai	Résistance en compression(MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart-type
0	1	28,64	29,74	0,87
	2	29,74		
	3	30,86		
	4	29,2		
	5	30,27		
2	1	42,31	42,31	0,65
	2	42,56		
	3	41,2		
	4	42,6		
	5	42,9		
4	1	54,20	53,12	1,5
	2	54,81		
	3	51,46		
	4	52,83		
	5	53		
5	1	54,60	55,28	1,31
	2	56,81		
	3	53,83		
	4	55,83		
	5	55,28		
6	1	54,01	54,13	0,56
	2	53,8		
	3	54,15		
	4	55		
	5	53,7		

Tableau 8 : Valeurs des résistances en compression en fonction du taux d'argile pour le composite contenant 25 % PEBD

Taux d'argile (%)	N° d'essai	Résistance en compression(MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart-type
0	1	32,57	32,46	0,55
	2	31,65		
	3	32,47		
	4	33,2		
	5	32,5		
5	1	50	49,91	0,71
	2	50,86		
	3	48,88		
	4	50,12		
	5	49,7		
6	1	57,19	57,19	0,3
	2	56,9		
	3	57,4		
	4	56,9		
	5	57,6		
7	1	58,64	58,6	0,44
	2	59,1		
	3	58,8		
	4	58,6		
	5	57,9		
8	1	56,92	56,92	0,35
	2	57,1		
	3	56,7		
	4	57,4		
	5	56,5		

Tableau 9 : Valeurs des résistances en compression en fonction du taux d'argile pour le composite contenant 30 % PEBD

Taux d'argile (%)	N° d'essai	Résistance en compression(MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart-type
0	1	33,48	33,48	0,77
	2	32,2		
	3	34		
	4	33,56		
	5	34,15		
7	1	48,92	48,02	0,79
	2	50		
	3	47,9		
	4	49,5		
	5	48,8		
9	1	55,5	55,44	0,48
	2	54,7		
	3	55,6		
	4	56		
	5	55,38		
10	1	59,4	59,4	0,60
	2	58,9		
	3	60,15		
	4	58,7		
	5	59,8		
11	1	58,12	58,02	0,14
	2	57,9		
	3	57,9		
	4	58		
	5	58,2		

Tableau 10 : Valeurs des résistances en compression en fonction du taux d'argile pour le composite contenant 35 % PEBD

Taux d'argile (%)	N° d'essai	Résistance en compression(MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart-type
0	1	34,56	34,6	0,38
	2	35,15		
	3	34,7		
	4	34,6		
	5	34,12		
10	1	49,32	49,3	0,54
	2	48,9		
	3	50,12		
	4	49,3		
	5	48,7		
12	1	53,7	53,7	0,66
	2	53,5		
	3	54,7		
	4	53,45		
	5	52,9		
14	1	61,2	61,2	0,54
	2	60,8		
	3	61,2		
	4	60,6		
	5	62		
15	1	60,6	60,6	0,3
	2	60,4		
	3	61		
	4	60,8		
	5	60,3		

Tableau 11 : Valeurs des résistances en compression en fonction du taux d'argile pour le composite contenant 40 % PEBD

Taux d'argile (%)	N° d'essai	Résistance en compression(MPa)	Moyenne(MPa)	Ecart-type
0	1	35,72	35,6	0,44
	2	35,5		
	3	36,1		
	4	34,9		
	5	35,7		
15	1	52,63	52,6	0,45
	2	51,9		
	3	52,5		
	4	53,12		
	5	52,8		
17	1	57,27	57,34	0,44
	2	56,8		
	3	57,15		
	4	57,5		
	5	58		
20	1	62,5	62,5	0,32
	2	63		
	3	62,7		
	4	62,4		
	5	62,15		
21	1	61,2	61,2	0,3
	2	60,9		
	3	61		
	4	61,5		
	5	61,5		

2. Résultats globaux des essais non destructifs (scléromètre et ultrason)

Tableau 12 : Valeurs des indices sclérométriques et des vitesses d'ultrason des différentes formulations

Taux PEBD (%)	N° essai	Indice sclérométrique				Vitesse d'ultrason		
		Valeurs	Moyenne	Ecart-type	Resistance estimée (MPa)	Vitesse (km/s)	Moyenne (km/s)	Ecart-type
20	1	27,8				17,9		
	2	28				17,7		
	3	27,8				17,8		
	4	28	27,9	0,15	25,2	17,6	17,6	0,4
	5	27,9				17,9		
	6	27,6				16,7		
	7	27,8				17,6		
	8	28				17,3		
	9	28,1				17,8		
25	1	29,1				17,7		
	2	29,3				18,9		
	3	29,4				18,4		
	4	29,4	23,3	0,4	28,33	17,9	18,3	0,4
	5	29,2				18,4		
	6	28,9				18,53		
	7	28,6				18,6		
	8	29,5				17,8		
	9	30				18,7		
30	1	29,8				19,3		
	2	30,1				20,2		
	3	30,4				19		
	4	29,9	30,08	0,4	29,13	19,8	19,5	0,5
	5	30,2				20,1		
	6	30,6				18,9		
	7	29,7				19,2		
	8	30,5				19,6		
	9	29,6				19,7		
35	1	26,7				19,7		
	2	26				18,7		
	3	26,7				18,8		
	4	27	26,5	0,37	22,3	16,9	18,5	0,9
	5	26,4				18,6		
	6	26,2				18,7		
	7	26,6				17,5		
	8	26,2				19,3		
	9	27,1				18,5		

Suite Tableau 12 : Valeurs des indices sclérométriques et des vitesses d’ultrason des différentes formulations

Taux PEBD (%)	N° essai	Indice sclérométrique			Resistance estimée (MPa)	Vitesse d’ultrason		
		Valeurs	Moyenne	Ecart-type		Vitesse (km/s)	Moyenne (km/s)	Ecart-type
40	1	22,9	20,02	0,82	12,3	15,3	14,4	1
	2	23				14,9		
	3	20,2				13,5		
	4	22				12,9		
	5	21,8				13,7		
	6	22,2				14,7		
	7	21,9				15,1		
	8	21,8				13,9		
	9	22,4				16		

3. Résultats globaux des tests d'absorption d'eau

3.1 Matériaux issus de la méthode par compactage manuelle

Tableau 13 : Valeurs des coefficients d'absorption d'eau et Ecart-type

Taux PEBD (%)	N° essai	Sable A			Sable B		
		Coefficient d'absorption (%)	Moyenne (%)	Ecart-type	Coefficient d'absorption (%)	Moyenne (%)	Ecart-type
15	1	4,56	4 ,96	0 ,31	7,6	7,52	0,46
	2	5,39			7,5		
	3	4,9			6,8		
	4	5,12			8,1		
	5	4,82			7,6		
20	1	1,54	1,62	0,11	2,2	2,14	0,29
	2	1,64			2,3		
	3	1,52			1,8		
	4	1,6			2,5		
	5	1,8			1,9		
25	1	1,16	1,2	0,06	1,53	1,52	0,05
	2	1,15			1,45		
	3	1,3			1,5		
	4	1,2			1,59		
	5	1,17			1,55		
30	1	0,8	0,82	0,17	1,12	1,12	0,05
	2	0,79			1,2		
	3	1,1			1,14		
	4	0,75			1,1		
	5	0,64			1,06		
35	1	0,68	0,68	0,02	0,8	0,76	0,21
	2	0,67			1,1		
	3	0,69			0,7		
	4	0,71			0,56		
	5	0,66			0,65		
40	1	0,37	0,37	0,02	0,42	,42	0,07
	2	0,36			0,54		
	3	0,38			0,39		
	4	0,35			0,35		
	5	0,41			0,4		

3.2 Matériau issus de la méthode de thermocompression

Tableau 14 : Valeurs des coefficients d'absorption et Ecart-type

Taux PEBD (%)	N° essai	Coefficient d'absorption (%)	Moyenne (%)	Ecart-type
15	1	0,34	0,62	0,22
	2	0,85		
	3	0,46		
	4	0,85		
	5	0,63		
20	1	0,85	0,32	0,01
	2	0,30		
	3	0,32		
	4	0,30		
	5	0,32		
25	1	0,23	0,26	0,02
	2	0,27		
	3	0,26		
	4	0,27		
	5	0,27		
30	1	0,21	0,24	0,02
	2	0,25		
	3	0,26		
	4	0,23		
	5	0,26		
35	1	0,18	0,20	0,03
	2	0,21		
	3	0,23		
	4	0,17		
	5	0,21		
40	1	0,17	0,13	0,03
	2	0,14		
	3	0,15		
	4	0,12		
	5	0,07		
50	1	0,08	0,08	0,01
	2	0,07		
	3	0,08		
	4	0,08		
	5	0,11		

3.3 Matériau issus de la méthode de thermocompression avec une charge en argile

Tableau 15 : Valeurs des coefficients d'absorption et Ecart-type des matériaux contenant 20 % PEBD

Taux d'argile (%)	N ° essai	Coefficient d'absorption (%)	Moyenne (%)	Ecart-type
0	1	0,35	0,35	0,04
	2	0,42		
	3	0,31		
	4	0,34		
	5	0,32		
5	1	0,29	0,29	0,02
	2	0,27		
	3	0,31		
	4	0,28		
	5	0,3		
7	1	0,31	0,3	0,02
	2	0,28		
	3	0,32		
	4	0,33		
	5	0,29		
10	1	0,49	0,51	0,04
	2	0,51		
	3	0,57		
	4	0,48		
	5	0,5		
15	1	0,90	0,89	0,1
	2	0,911		
	3	0,98		
	4	0,72		
	5	0,98		

Tableau 16 : Valeurs des coefficients d'absorption et Ecart-type des matériaux contenant 25 % PEBD

Taux d'argile (%)	N ° essai	Coefficient d'absorption (%)	Moyenne (%)	Ecart-type
0	1	0,30	0,29	0,03
	2	0,28		
	3	0,32		
	4	0,25		
	5	0,34		
5	1	0,22	0,22	0,04
	2	0,17		
	3	0,25		
	4	0,2		
	5	0,27		
7	1	0,2	0,20	0,01
	2	0,18		
	3	0,21		
	4	0,2		
	5	0,22		
10	1	0,37	0,37	0,04
	2	0,41		
	3	0,34		
	4	0,32		
	5	0,4		
15	1	0,62	0,56	0,05
	2	0,56		
	3	0,5		
	4	0,52		
	5	0,58		

PUBLICATIONS

1. ARTICLES

1.1 Elaboration and Characterization of Composite Materials made of Plastic Waste and Sand: Influence of Clay Load.

Article in International Journal of Scientific Engineering and Technology, Volume No. 6, Issue No. 7, pp : 220-223. July 2017.

1.2 Experimental Determination of the Poisson's Ratio and the Elastic Modulus of a Sand-Plastic Composite Material.

Article in International Journal of Engineering Research, Volume No.6, Issue No.6, pp : 292-297. Jun 2017.

2. COMMUNICATIONS

Proposition d'une technique de recyclage des dechets plastiques.

IX^{èmes} Journées d'Etudes Techniques – JET, Mai 2016.

Elaboration and Characterization of Composite Materials made of Plastic Waste and Sand: Influence of Clay Load

TRAORE Brahiman^{1,2}, ATCHOLI Kokou Easo¹, BOFFOUE Moro Olivier², LACHAT Remy¹, EMERUWA Edjikémé²

¹Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne(ICB), Université de Technologie Belfort-Montbéliard, Rue de Leuue, 90400 Sevenans, cedex France.

²Laboratoire de géomatériaux et technologie du bâtiment (LGTB), UFR des sciences de la terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouet Boigny de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Corresponding Email:traorebrahiman@yahoo.fr

Abstract: In the field of the construction, the trend since few years is to gradually replace of conventional materials by polymer matrix composite materials. It is in this context that this study proposes a technique of making composite materials with a polymer matrix, using plastic waste. During this study of mechanical tests (flexural and compressive strength), will be carried out on the samples in order to check the resistances. To expand the field of use, we added clay as a load to improve the resistances of the composite. The results obtained are satisfactory from the point of view of mechanical strength. It also appears that these resistances improve when clay is added as a load

Keywords: Composite; Plastic waste; Low Density Polyethylene (LDPE); Load, Modulus of elasticity

I. Introduction

To set up an environmental protection policy, the fight against pollution is necessary; especially with regard to plastic waste. It is in this context that reflection begins on the research of new materials, able to solve economic, technical and environmental problems in our African countries.

The reuse of the plastics wastes, which constitute an environmental discomfort, is currently the subject of much work. Among these works are the mostly incorporated plastic wastes in cementitious matrices (Guendouz et al, 2016; Kumaran, 2015).Some authors (Panyakapo et al in Guendouz et al, 2015), use low density polyethylene (LDPE) as a binder for the production of composite materials and this by converting the LDPE into resin in the presence of glycols.

This work aims to study the possibility of proposing an alternative method of using plastic waste (LDPE: low density polyethylene) for the conception of a new material.

In this study we will analyze and explain the influence of the proportion of LDPE and the incorporation of clay load on the mechanical properties of the new material.

II. Materials and methods

II.1 Raw materials

II.1.1 Sand

Sand is the main component of our material. The sand is extracted in the river which crosses the town of Belfort (France), named Savoureuse. We obtained the sand thanks to

the BELFORT BETON company which extracts and uses it for its works.

The absolute density of the sand is 2.60 and the granulometry of the portion used is shown in fig. 1.

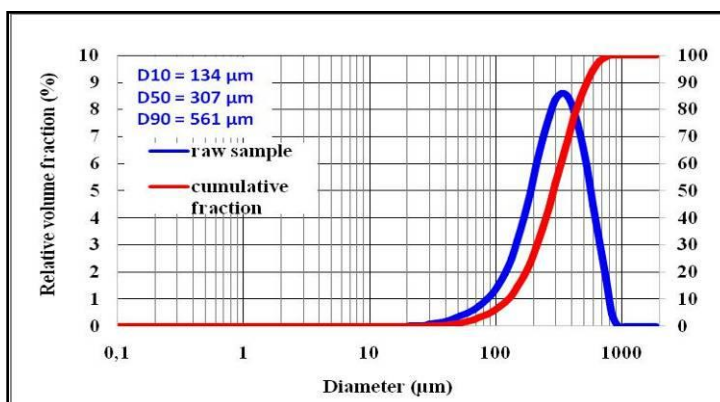


Fig. 1: Granulometric curve of sand

II.1.2 Low density polyethylene (LDPE)

The density of the low density polyethylene (LDPE) used is 0.93 and the results of its analysis at the DSC (Differential Scanning Calorimetry) are shown in fig. 2.

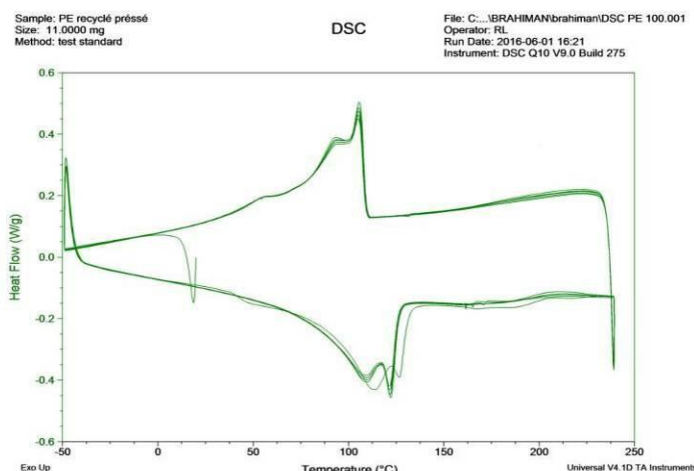


Fig. 2: DSC analysis of low density polyethylene (LDPE)

II.1.3 Clay

The clay used as a load is obtained by grinding in the laboratory of Geomateriaux in Abidjan (Côte d'Ivoire). It is a clay extracted on the site of Dabou (Côte d'Ivoire), with a density of 2.61 and its specific surface area is 3286 cm²/g. It is a clay constituted of clay minerals (Kaolinite and illite) which are associated with quartz and anatase (Kouadio, 2010). The granulometric analysis of the portion used is shown in fig.3.

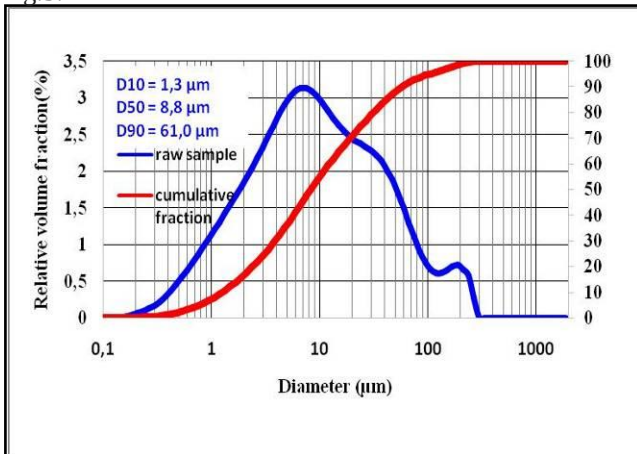


Fig. 3: Granulometric Curve of the clay

II.2 Equipments

For mixing sand and plastic we have developed a mold (Figure 4-a). We also use a thermopress (Figure 4-b) to melt plastic and compress our material. Mixing is done with a drill (figure 4-b).

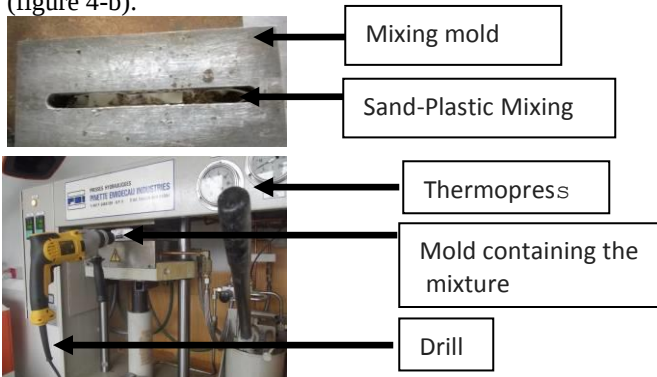


Fig. 4: Thermopress and mold

II.3 Methods

After mixing, the sand-plastic or sand-plastic-clay assembly is heated by the thermopress at 170 °C for five (5) minutes. During heating the mixture is made simultaneously, by the drill.

The material thus obtained is named PASTIB (Plastic Clay Sand Traore brahman). After this step the PASTIB material is placed in a mold, followed by a thermocompression at 170 °C with a pressure of 10 MPa for five (5) minutes. Then the cooling takes place under the same pressure up to 30 °C. The diagram in figure 5 shows the methodology used for making

samples made of plastic, clay and sand. When the addition of clay is removed, the diagram of samples made of plastic and sand is obtained.

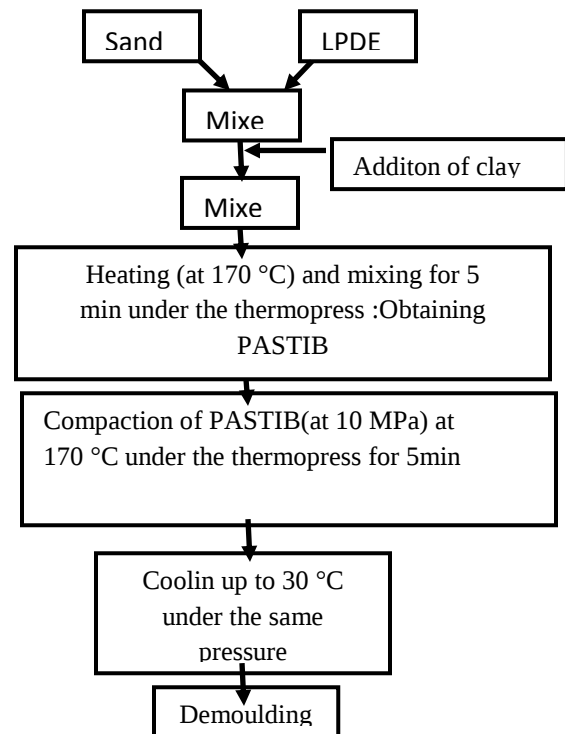


Fig. 5: Sample preparation methodology

After demoulding we obtain samples of dimensions 160 X 15 X 3.5 mm³ (Figure 6). For the compression test we make samples of dimensions 20X10X10 mm³ corresponding to a slenderness two (2) according to standard 13225 (Bavelard and Beinisch, 2006) and for the three-point flexural test, we prepare samples of dimensions 80 X 10 X 3.5 mm³ according to ASTM D790.



Fig. 6: Image of samples

III. Results and discussion

Flexural and compression tests are made with the device Universal testing Analyser (TA-XT2i).

III.1 Flexural strength and modulus of elasticity

The results obtained are shown in figs. 7 and 8.

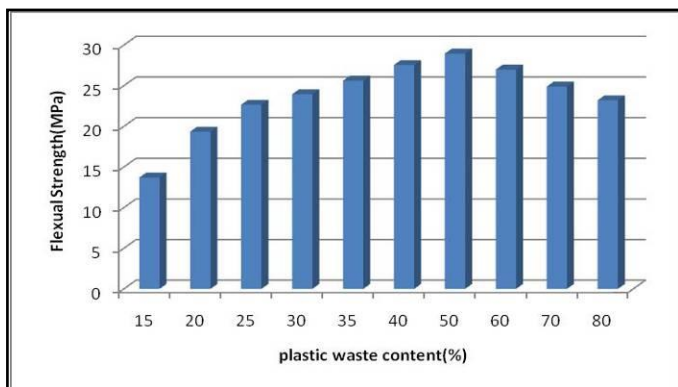


Fig. 7: flexural strength as function of the plastic content

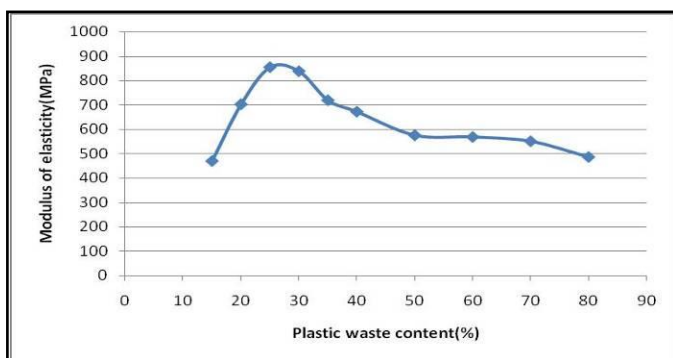


Fig. 8: Variation of modulus E as function of the plastic content

The flexural strength increases (13 to 28 MPa) from 15 to 50% plastic (LDPE). Then decreases (26 to 23 MPa) when one passes from 60 to 80% of LDPE.

When the plastic content increases, we are increasingly getting a mixture containing an amount sufficient to bind the grains of sand.

Above 50% LDPE, the resistance drops because the mixture contains too much plastic, causing defects in the material. These results are agreement with the results of Rakotosaona et al, 2014. On the other hand; we obtain superior results which are due to the applied pressure (10 MPa) in our methodology. This pressure will strengthen the cohesion between the plastic and the sand particles.

Some authors (Praveen al, 2013; Guendouz et al, 2016; Ganiron Jr, 2014 ; Ghernouti et al, 2011) which use plastic waste as coarse aggregates and in the form of fibers (Balaji et al, 2016), in cementitious matrices also get results where the resistance increases to the ideal proportion before falling.

The results we have obtained are always higher compared to these authors because, they use plastic in the form of aggregates. We will then have the shape of the grains which will increase the rate of vacuum which will reduce the compactness and the strength of the material (Ghernouti, 2011).

Modulus of elasticity E in flexion increases up to 25% of LDPE before falling. This is because from this level of plastic, we obtain a material containing enough LDPE. The material will then have a modulus E which holds out towards that of the LDPE which is weak.

III.2 Compressive strength

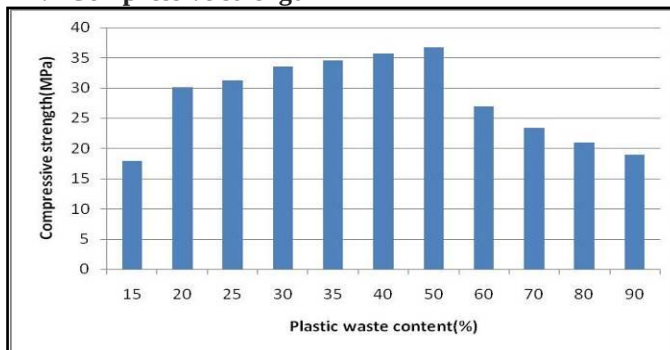


Fig. 9: compressive strength as function of the plastic content

The compressive strength also increases to the maximum rate (50%) before decreasing. As in flexion the resistance is going to grow with the proportion of the plastic because, more there is plastic, more grains of sand are coated or bound. After the ideal proportion (50%), the resistance will decrease to tend towards the resistance of the plastic.

Ohemeng(2014), Batayneh et al. (2006) which introduced plastic in granulated form into concrete with cementitious matrix, obtained a decrease in strength when the plastic content increases. This is because the increase of the plastic in the mixture will decrease the plastic adhesion with the cementitious paste thus inducing the reduction of the resistance

III.3 Effect of clay as load on flexural and compressive strength

We present the results of the effect of clay loading on the flexural strength (Figure 10) and compression strength (Figure 11) of the material.

It should be noted that we present the effect of the load on samples containing 20% LDPE.

The ideal load for samples containing 20% LDPE that we have determined in other studies is 5%.

On the graphs we also present the equations of the slopes of the different curves with the correlation.

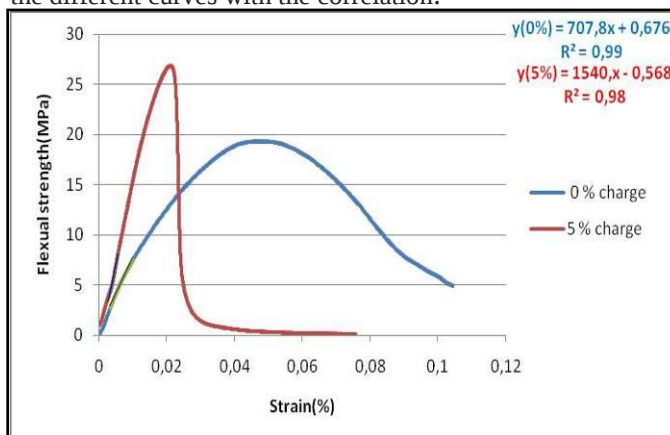


Fig. 10: Stress-strain curve of sample containing 20% LDPE

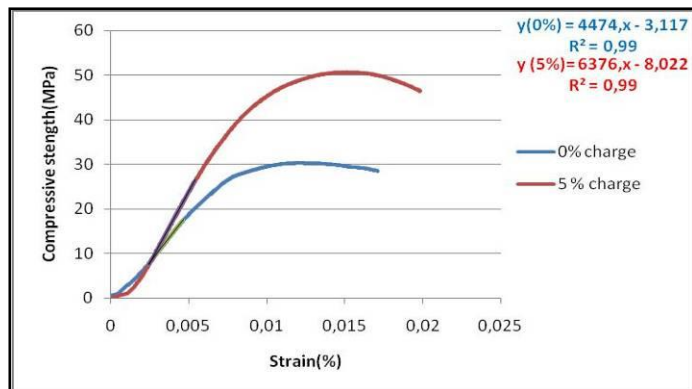


Fig. 11: Stress-strain curve of sample containing 20% LDPE

The 5% clay load brings in increased flexural strength and compressive strength. The resistances increase from 19.34 to 26.87 MPa for the flexural and from 30.39 to 50.70 MPa for the compression. This increase is explained by the fact that the clay particles will be charge carriers.

Stress forces will be distributed between grains of sand, clay and molten LDPE. There will then be a need for more force to break such a material relative to a material where forces are distributed only on sand grains and LDPE.

On the stress-strain curve (in flexion), we notice a decrease in the plastic deformation domain when adding clay. The slope of the flexural elastic domain (Modulus E) of this curve changes from 707.8 for a material no-loaded to 1540 for a material loaded with clay. Similarly, that of the compression goes from 4474 for a material without load to 6376 for a material loaded with clay.

With this result, we can then say that the load makes it possible to make the material rigid because according to Chateigner(2012), a high modulus value indicates high stiffness of material.

These results are according with those obtained by Tcharkhtchi et al(2001), Benbayer(2014), Dupuis et al (2007), Oddes et al (2008).

These authors obtained higher results because they use modified clays and compatibilizers to improve clay-plastic bonds.

IV .Conclusion and perspectives

The objective of this study is to valorize plastic waste and to study the effect of the clay load on the mechanical behavior of the materials obtained.

With the results obtained we can conclude that this method of valorization of waste is to be adopted. The addition of clay as load improves the mechanical strength of the material.

In order to widen the scope of application of materials obtain, of the studies complementary like the tests to fire, wear, thermal conductivity ... must be carried out.

Acknowledgement

The authors would like to thank all persons who helped them throughout the research, particularly the French Republic and

the Republic of Côte d'Ivoire for their support through the AMRUGE-CI project

References

- i. Batayneh M., Marie I. and Asi I.. *Use of Selected Waste Materials in Concrete Mixes*, Waste Management (2006) 27(12), 1870 – 1876.
- ii. Bavelard G. and Beinish H., *Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes*. Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, (2006). p. 28.
- iii. Benbayer C. *Nanocomposites à base d'argile et de surfactants polymérisables (surfmers) : synthèses et propriétés*. Thèse Université d'Oran Es-Senia (Algérie) (2014), p.195
- iv. Chateigner D. *Résistance des Matériaux. Cours de l'IUT Mesures Physiques*, Université de Caen Basse-Normandie, Laboratoire CRISMAT-ENSICAEN, (2012), p.39.
- v. Dupuis D., Mathieu O., Boucard S., Jeol S. and Duchet-Rumeau J. *Nanocomposites à nanocharges lamellaires*. Article *Technique de l'ingénieur* (2007) N 2 610, p.15.
- vi. Ganiron T. U. Jr., *Effet of Thermoplastic as Fine Aggregate to Concrete Mixture*. *International Journal of Advanced Science and Technology* (2014) Vol.62, p.31-42.
- vii. Ghernouti Y. and Rabehi B. *Béton à base des granulats de déchets des sacs en plastique renforcé de fibres métalliques*. INVACO2 : Séminaire international, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, (2011), p.7.
- viii. Guendouz M., Debieb F., Boukendakdji O., Kadri E.H., Bentchikou M. and Soualhi H. *Use of plastic waste in sand concrete*. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2). (2016) ,p. 382-389.
- ix. Guendouz M., Debieb F. and Kadri E.H.. *Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques*. 33èmes *Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UppA, Anglet*, 27 au 29 mai 2015 Bayonne, France, (2015), p 1-8.
- x. Kouadio K.C. *Elaboration et caractérisation de blocs d'argile stabilisée au ciment (cimarg) : influence de l'apport de dégraissant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs*. Thèse Université de Cocody- Abidjan, (2010), p.188.
- xi. Kumaran M., Nidhi M. and Bini P. R. *Evaluation of Strength and Durability of Waste Plastic Mix Concrete*. *International Journal of Research in Advent Technology* (E-ISSN: 2321-9637) Special Issue, (2015), p.34-40.
- xii. Ohemeng E. A., Yalley P. P.-K., Dadzie J. and Djokoto S. D. *Utilization of Waste Low Density Polyethylene in High Strengths Concrete Pavement Blocks Production*. *Civil and Environmental Research*. (2014) Vol.6, No.5, p.126-135.
- xiii. Oddes O., Vergnes B. and Burr A. *Nanocomposites à base de sépiolite : Influence des conditions de mélange et de l'agent compatibilisant sur la dispersion et les propriétés (mécaniques et résistance au feu)*. *Projet Nanostructures*. CEMEF, Ecole des Mines de Paris, UMR CNRS 7635, France, (2008), p.32.
- xiv. Praveen M., Shibi V., Thomas P. and Eldho V. *Recycled Plastics as Coarse Aggregate for Structural Concrete*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. (2013) Vol. 2, Issue 3, p.684-690.
- xv. Rajakumar P. T. I., Senthilkumar G., Kumar A.M., Balaji R. and Yuvaraju N. *Non destructive analysis on fiber reinforced concrete using waste plastic fiber*. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, (2016) Vol. 5, No. 1, 9.
- xvi. Rakotosaona R., Ramaroson J. D., Mandimbisoa M., Andrianavoravelona J. O., Andrianary P., Randrianarivelo F. and Andrianavo L. *Valorisation à l'échelle pilote des déchets plastiques pour la fabrication de matériaux de construction*. *Mada-Hary*, (2014) vol. 2, p.54-69.
- xvii. Tcharkhtchi A., Briot J., Crawford R.G., Robert A. and Kearn M. *Rotomoulage du polyéthylène chargé de mica*. *Matériaux et techniques* N° 9, (2001) , p.37-43.

Experimental Determination of the Poisson's Ratio and the Elastic Modulus of a Sand-Plastic Composite Material

Moro Olivier BOFFOUE¹, Brahiman TRAORE^{1,2,*}, Conand Honoré KOUAKOU¹, Kokou Esso ATCHOLI², Remy LACHAT², Souleymane OUATTARA¹, Edjikémé EMERUWA¹

¹ Laboratoire de géomatériaux et technologie du bâtiment (LGTB), UFR des sciences de la terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), Université Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM), France
Corresponding Email: traorebrahiman@yahoo.fr

Abstract : *The purpose of this article is to determine a standard value of poisson's ratio which allows, from the ultrasonic test, to calculate the Young's modulus and to predict the compressive strength of the plastic (Low density polyethylene: LDPE) sand mixture. Thus, using two test methods (Direct compression and ultrasound), carried out on samples with variable LDPE contents, the poisson ratio and Young's modulus were determined. The analysis of the results made it possible to fix a standard value of the poisson's ratio usable for the sand-LDPE material. This value has been validated by the results of the dynamic Young's modulus calculation. It also makes it possible, from the non-destructive ultrasound testing on this type of material, to quickly determine the Young's modulus, and to predict the compressive strength.*

Keywords: Poisson's ratio; Young's modulus; dynamic modulus of elastic; static modulus of elastic; sand-LDPE material.

I. Introduction

The mastery of the materials deformation is today an important stake for the civil engineering, because the prediction of the structures behavior was made possible when the structures were subjected to various loads. This mastery requires knowledge of the modulus of elasticity.

Thus, in the case of concrete, many works have been carried out in order to reliably determine the modulus of elasticity. This facilitates modeling and predictions of the material behavior and is the basis for new developments that are made on concrete.

All these years of experiments acquired on concrete allowed adopting a simple method measuring this modulus. This method requires knowledge the poisson's ratio of concrete. Standard values of ratio are well defined according to the different types of concrete: 0.15 for high performance concrete and 0.3 for low performance concrete (Controls, 2013; Toukal, 2010). This poisson's ratio does not change with the increase in the curing period of the sample (Bouakkaz, 2012). However, beyond the 28-day curing period, the variations in poisson's ratio are very small, ranging from 0.19 to 0.21.

In recent years with global warming and taking sustainable development into account all research is carried out on materials less energy-consuming compared to cement, essential product in the formulation of concretes.

In this context of research of substituting concrete and mastering the behavior of materials, a sand-plastic (LDPE) material was developed.

However, using the poisson's ratio of 0.15 or 0.3 is unreliable to determine its modulus of elasticity. Therefore to determine the poisson's ratio of the sand-plastic material has been necessary and desirable, in order to know its real modulus of elasticity.

Two methods were proposed in the literature: (i) the static method, which is a destructive method and uses specific apparatus made of load and displacement sensors. Those must be positioned judiciously in order to obtain reliable and significant results; (ii) the dynamic method which is non-destructive and very quick to implement.

Thus, the purpose of this article is to find the standard value of the Poisson ratio which will allow very quickly, from the dynamic method, to determine the elastic modulus and to consider different simulations with this new material.

II. Materials and methods

The raw materials used to make the samples consist of sand and low density polyethylene (LDPE). The crumbled plastic was first mixed with the sand. Then, the assembly was heated and mixture simultaneously and finally shaped into molds of dimensions $8 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ corresponding to a slenderness two (2) according to standard EN 3225 (Bavelard et al, 2006).

The manufacturing methodology of sample is summarized in fig. 1.

The different samples produced have plastic contents varying from 15 to 40% with an increment of 5%. These samples were subjected to non-destructive ultrasonic testing and direct compression testing.

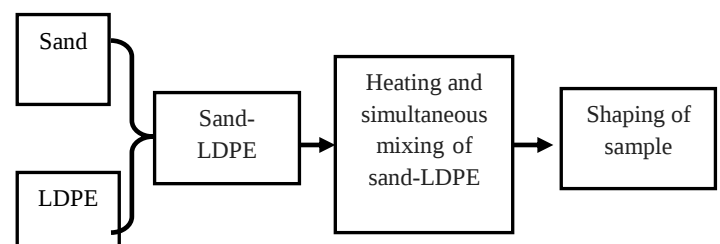


Fig. 1: Diagram of the manufacturing methodology

II.1. Ultrasonic testing

Ultrasonic testing was done with the CONTROLS 58-E4900 sonic auscultation. During the test, the transmitter and the receiver were placed in opposition (direct method) on either side of the sample. The unit displays the time taken by the wave to cross the material from the transmitter to the receiver. In addition, the dimensions (length, width and thickness) of the sample were measured with sliding calipers precision 0.02 mm.

II.2. Compression test

The compression test was carried out using a hydraulic press of 500 KN. During this test, the displacement sensors precision 0.01 mm and measuring range of 10 mm were connected to the sample to measure transversals and longitudinal deformation. Likewise, a load sensor allows measuring simultaneously the corresponding load. For the results to be exploitable, the surfaces of the samples in contact with the press platens must be flat and horizontal. These surfaces were induced grease to limit the adhesion between sample surface and the press plate. The data obtained were recorded continuously in a spreadsheet (Excel). The tests were performed on a series of five (5) samples for each plastic level. All data collected from these different trials will be used to calculate Poisson's ratio and determine Young's modulus.

II.3. Calculation of the Poisson's ratio and modulus of elasticity E (Young's modulus)

The Poisson's ratio and the Young's modulus can be calculated from two types of results: static mechanical test result (static method) and dynamic mechanical test result (dynamic method) performed on the samples.

II.3.1. Calculation by the static method

The experimental data were used to calculate the longitudinal (ϵ_{yy}), transversal (ϵ_{xx}) and strains (σ) using the respective Eq. (1,2, 3).

$$\epsilon_{yy} = \frac{\Delta y}{y_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

Then the longitudinal strain curve is plotted. Finally, the elastic modulus is given by the slope of the straight line tangent to this curve passing through the origin of the reference frame. For the determination of the Poisson's ratio, **Badel, (1999)** proposes two techniques:

- Use the opposite of the ratio of the slopes calculated on the two experimental curves, $\epsilon_{yy} = f_1(\sigma_{xx})$ and $\epsilon_{xx} = f_2(\sigma_{yy})$. Using this technique, two curves are drawn: A curve of compressive strength function to the longitudinal strain ($\epsilon_{yy} = f_1(\sigma_{xx})$) and a

compressive strength curve function to the transversal strain ($\epsilon_{xx} = f_2(\sigma_{yy})$). The slope of each curve is then determined. The ratio is then obtained by making the ratio of the two slopes according to Eq. (4).

$$\nu = \frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} \quad (4)$$

- Calculate the slope of the curve $\epsilon_{yy} = f(\epsilon_{xx})$: for this second technique, the longitudinal strain curve function to the transversal strain ($\epsilon_{yy} = f(\epsilon_{xx})$) is plotted. The Poisson's ratio equals the slope of the curve.

This technique was preferred to the first technique for the calculation of Poisson's ratio, because it is simple, fast and the uncertainties are less than 5% of the determined values.

II.3.2. Dynamic method calculation

The experimental data (duration of ultrasound transmission and sample size), collected are used first to calculate the propagation velocity of sound in the sample using the Eq. (5).

$$\nu = \frac{L}{T} \quad (5)$$

Where: V= is the conventional propagation velocity (km /

s); L = is the travel distance, (mm);

T = is the propagation time (μ s).

Then, the dynamic elastic modulus ED is calculated from the

Eq. (6) below (**Badel et al, 1999; Demon et al, 2007;**

Orlowicz et al, 2010):

$$E_D = \nu^2 \varphi \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (6)$$

Where: V = speed of sound (km / s);

φ = density of the material (kg / m³);

ν = Poisson's ratio;

E_D = dynamic elastic modulus (MPa).

III. Results and discussion

III.1 Static properties

III.1.1 Strain stress curves function of the LDPE content

Fig. 2 shows stress-strain curves at different rate of plastic. The curves have a very flat bell-like shape at the top. They can be divided into two areas: a domain of reduced elastic behavior and a very extensive field of plastic behavior. The magnitude of this plastic field increases with the rate of plastic in the samples. The behavior of the material is similar to that of the rubber.

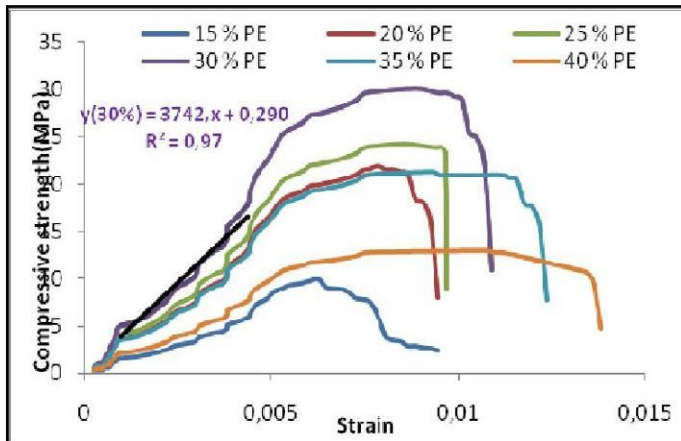


Fig.2 : Stress-strain curve

III.1.2 Static elastic module

The slopes of the curves in the elastic range are given in Table 1. Each of the values is an average calculated on 3 samples and corresponds to the modulus of elasticity E of the material (Mesta et al, 2002).

Table 1: Values of strength and module E.

Rate of plastic (%)	Strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
15	9,90	2338
20	20,4	3451
25	25,07	4393
30	29,81	3742
35	21,42	2775
40	12,47	1265

The modulus of elasticity increases up to 25% of LDPE before falling. Thus, between 15 and 25% of plastic the material becomes stiff because of the high sand content (between 85 and 75%). The stress exerted on the sample is carried by both the plastic and the grains of sand. On the other hand, above 25% of plastic, the stiffness of the material drops with the increase of the LDPE content. The solicitation is mainly supported by LDPE. Thus, the plastic strain becomes much larger than the elastic strain. The material finds itself in an almost incompressible situation (Michel-Ponnelle 2013; Al Akhrass 2014). The resistance of the sample is then low. This is why, starting with 35% of plastic, the compressive strengths of the samples drop while the LDPE content increases. However, the highest strength is obtained at 30% LDPE, although its modulus of elasticity value is less than that of the 25% LDPE samples.

III.1.3 Evaluation of the Poisson's ratio

Using the technique proposed by Badel (1999), the curves $\epsilon_{yy} = f(\epsilon_{xx})$ were plotted and the Poisson's ratio determined for different rate of LDPE (fig. 4).

The Poisson's ratio increases (from 0.19 to 0.39) when the plastic content increases from 15 to 40%. When the sample contains more plastic, it resembles rubber (fig.3), which has a value of $\nu \approx 0.5$ (Lecomte-Beckers, 2009). This evolution of the Poisson's ratio is explained by the considerable capacity of the material to deform in the direction perpendicular to the stress.

However, in its direction of stress, it becomes incompressible with the increase in the LDPE content. These results are according with Elias (2014).

The variation interval of the poisson's ratio of the LDPE sand mixture overlaps that of the concrete. However, the poisson ratio of very high performance concretes is the smallest 0.15 while the most resistant sand-LDPE mixtures have a Poisson ratio of about 0.3.



Fig. 3: Material containing 40% plastic

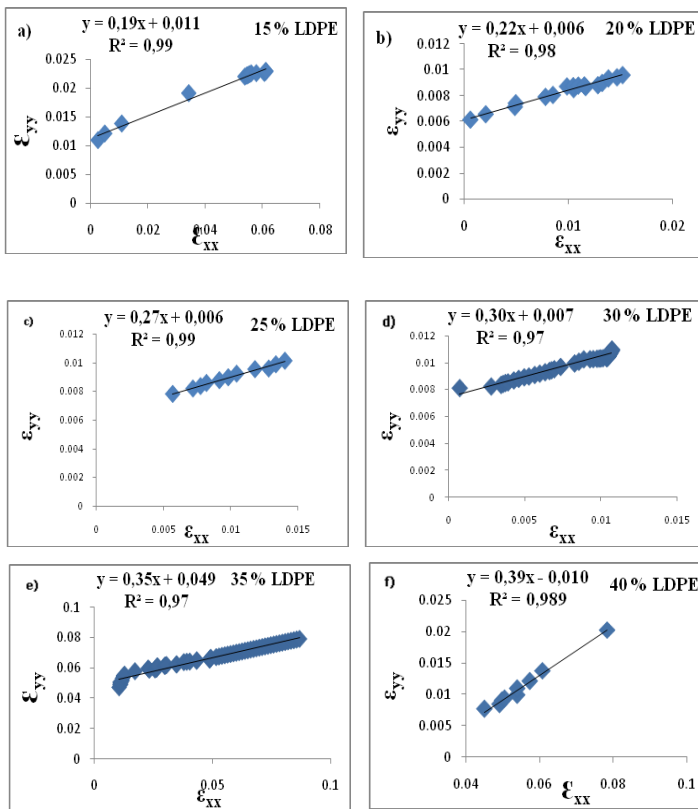


Fig. 4: Curve $E_{xx}=f(E_{yy})$ and value of Poisson's ratio [a) 15% LDPE; b) 20 % LDPE; c) 25 % LDPE; d) 30 % LDPE; e) 35 % LDPE; f) 40 % LDPE].

III.2 Dynamic Properties

III.2.1 Modulus of dynamic elasticity

The different Poisson's ratio obtained were used to calculate the dynamic Young's modulus with the Eq. (6) for different rate of plastic. The results obtained are shown in fig. 5.

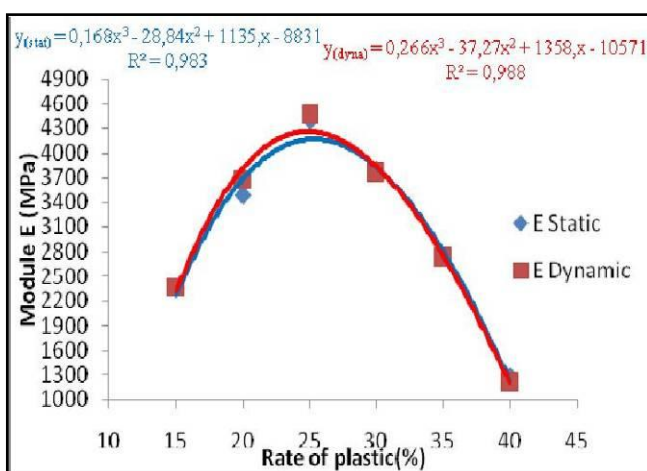


Fig. 5: Variation of the modulus as a function of the plastic content

The shape of the curves of the dynamic modulus calculated with the different Poisson's ratio obtained for the LDPE contents of between 15 and 40% is the same as that of the static modulus. They follow a polynomial law and the highest value of dynamic and static E is obtained at 25% of LDPE. Moreover, the values of the dynamic modulus are very near to the values of the static modulus. The Poisson's ratio determined by the static method make it possible to calculate by the ultrasonic method the exact value of the elastic modulus. The ultrasound test can therefore be used to determine elastic modulus of sand-plastic mixtures.

In general, in the literature, the dynamic elastic modulus is superior to static elastic modulus (Bouakkaz, 2012; Bucur et al, 1981; Salman et al, 2006). This difference is due to the nature of the solicitation. The static test induces changes in rheological properties in specimen, while the dynamic test does not determine structural changes.

For the calculation of the dynamic modulus, a standard value of the Poisson ratio is used.

For example, low strength and very high strength concrete standard Poisson ratio are 0.30 and 0.15 respectively (Controls, 2013).

III.2.2 Standard value of the Poisson ratio for sand-LDPE mixture.

Fig. 6 shows the envelope of the dynamic modulus (theoretical) for the interval of Poisson ratio (n) between 0.19 and 0.39 and experimental dynamic modulus values calculated for the different rate of plastic. All the theoretical values of modulus E vary around the values obtained experimentally.

When n is small (0.19), the theoretical E values deviate from the experimental values with errors ranging from 54 to 81%. On the other hand, when n is high (0.39), the experimental values deviate very little from the theoretical E values. Errors varying between 0 and 56 % of the experimental value. These extreme values of the Poisson ratio therefore do not allow a significant dynamic modulus value to be obtained.

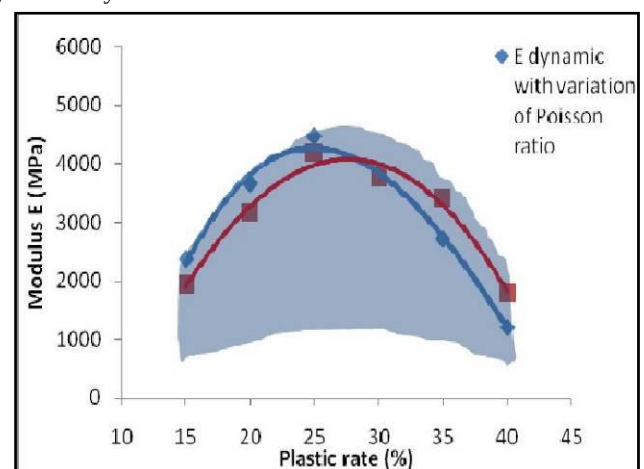


Fig. 6: Estimation of Young's modulus for $0.19 \leq \nu \leq 0.39$

In this same figure, the theoretical E values calculated with $n=0.30$ are shown. This curve has the same shape as that obtained experimentally. However, when the LDPE content increases from 15 to 30%, the curve with the standard Poisson ratio of 0.30 is below the experimental with an error of 6 to 22% of the experimental value. Moreover, when the LDPE content increases from 30 to 40%, the curve with the standard Poisson ratio is above the experimental with an error of 24 to 48% of the experimental value.

The standard value of the Poisson ratio of 0.30 seems to be the best approximation, because it allows dynamic E underestimation when in the range of low plastic contents and to minimize errors on the experimental value of dynamic E.

III.3 Validation of the standard value of the Poisson's ratio

III.3.1 Comparison of estimated elastic modulus, static and dynamic modulus

Fig. 7 shows a comparison between the values of the elastic modulus estimated from the value of the Poisson's ratio of 0.30 and the dynamic and static modulus determined experimentally on the different samples. The comparison between the estimated elastic modulus and the dynamic elastic modulus is virtually identical to that between the estimated elastic modulus and the static modulus. The estimated elastic modulus can be used to calculate dynamic and static elastic modulus. The ratio between the different modulus is about 1 because all the values are near to the equality curve ($y=x$).

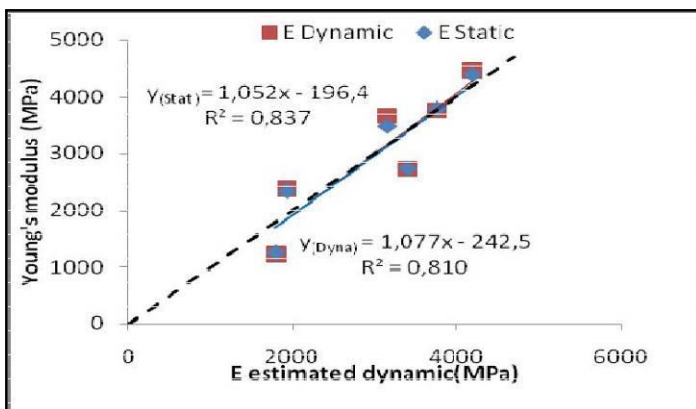


Fig. 7: Curve of the experimental dynamic and static modulus as a function of the estimated dynamic modulus.

III.3.2 Relation between compressive strength and elastic modulus dynamic estimated, elastic static and elastic dynamic experimental

The relationships between the compressive strength and the different modulus are virtually identical (Fig. 8). For the same value of the elastic modulus, the relationship obtained with the estimated dynamic modulus, underestimate the value of the resistance, while the relations with the dynamic elastic modulus experimental and static are higher. This estimate of the dynamic

elastic modulus from the Poisson's ratio of 0.3 is therefore a good estimate.

A similar relationship is proposed by Multon (2012) in Eurocode 2 ($E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0.3}$), to calculate the instantaneous static elastic modulus of quartz aggregate concretes.

The values of the static elastic modulus deduced from this formula are reduced by 10 % for limestone aggregate, of 30 % for sandstone aggregates and increased by 20 % for basalt aggregates. Similarly, according to Helson et al (2015), this relationship appears to be unsuitable for earth concrete because of the role of density.

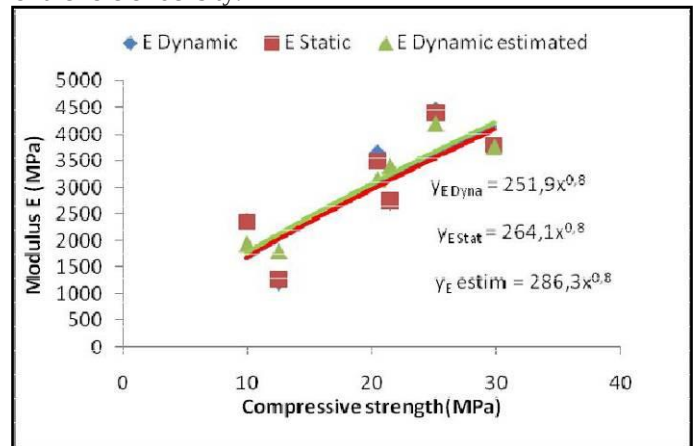


Fig. 8: Elastic modulus curve as a function of the compressive strength

IV. Conclusion

The Poisson's ratio and Young's modulus, key parameters for modeling of behavioral and prediction of the mechanical performance of a material were measured.

The measurements were made experimentally from the compressive and ultrasound test on a sand-plastic composite material.

It emerges from these experiments that the incorporation of plastic waste (low density polyethylene) melted in the sand confer a plastic deformation at mixture, whose magnitude increases with the rate of plastic. The Poisson's ratio determined by the static method increases with the LDPE content.

It makes it possible to calculate by the dynamic method a Young's modulus which is very near to the same modulus determined by the static method with an error rate of between 0.4 and 1.8%. The highest value of this modulus is obtained at 25% of LDPE.

For the theoretical work the standard value of the Poisson ratio of 0.3 was allowed.

This value permit, from of the ultrasonic test, very quickly determination of the Young's modulus with an error of 22 % compared to the experimental value for LDPE contents varying between 15 and 40 %. It makes it possible on the one hand to underestimate the Young's modulus when the LDPE content is less than 30% and on the other hand to calculate the compressive strength from the formula: $E = 286fc^{0.8}$.

Acknowledgement

The authors would like to thank all persons who helped them throughout the research, particularly the PASRES (Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique) in Ivory Coast.

References

- i.AL Akhrass Dina. *méthodes éléments finis mixtes robustes pour gérer l'incompressibilité en grandes déformations dans un cadre industriel*.Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, (2014), pp. 161
- ii.BADEL Eric. *Détermination des propriétés élastiques du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation* ; Thèse à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy ; (1999), p 181
- iii.BADEL Eric, PERRE Patrick. *Détermination des propriétés élastiques d'éléments individuels du plan ligneux du chêne par des essais de traction sur Micro-éprouvettes*. Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences, (1999) ,56 (6), pp.467-478.
- iv.BAVELARD Guislaine, BEINISH Hervé. *Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes*; Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, (2006); p.28.
- v.BOUAKKAZ Mohammed El Amin. *Caractérisation du béton par les méthodes non destructives – application de la méthode de fréquence de résonance* ; Mémoire de Magister en Génie Civil, université Abou bekrbelkaid – Tlemcen, Algérie, (2012) ,p. 99.
- vi.BUCUR Voichita, PERRIN A. *Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage*. Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, (1981)., pp.283-298.
- vii.CONTROLS. *Manuel d'utilisation de PULSONIC : appareil d'auscultation sonore* 58-E4900, (2013), p. 51
- viii.DEMON Christopher, DARIGNY Kévin. *Rapport de projet : Métrologie et CND par ultrasons*, Licence Professionnelle Gestion de la Production Industrielle Option Métrologie ; Lycée Jean Mermoz France ; (2007), p. 56
- ix.ELIAS Florence. *Elasticité, Notes de cours M2 Fluides Complexes et Milieux Divisés* ; Université Paris-Diderot, (2014), p. 66.
- x.HELSON O., Anne-Lise Beaucour A. L., Eslami J., Noumow A.. *Caractérisation du comportement mécanique des échantillons de sol*, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Angleterre, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167735>, (2015) ,p. 8
- xi.LECOMTE-BECKERS Jacqueline. *Physique des matériaux: partie polymères*. Chapitre 6.Notes de cours. (2009), p.114
- xii.MESTA Ph., REIFFSTECK Ph. *Modules de déformation en mécanique des sols : définitions, détermination à partir des essais triaxiaux et incertitude*. Paramètres de calcul géotechnique. Magnan (éd.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, (2002), p. 8.
- xiii.MICHEL-PONNELLE S. *Code Aster : Éléments finis traitant la quasi-incompressibilité*. Manuelle de référence: fascicule r3.06. , (2014), p.20.
- xiv.MULTON S. *Béton armé, Eurocode 2*, INSA-université Paul Sabatier-Toulouse (France), (2012), p. 154
- xv.Orlowicz W., Tupaj M., Mroz M., Guzik E., *Evaluation of ductile iron casting material quality using ultrasonic testing*. Journal of materials processing technology, (2010), pp.1493-1500
- xvi.SALMAN Mohammed M., AL-AMAWEE Ali H.. *The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete*. Journal of Engineering and Development, (2006), Vol. 10, No. 2. pp.163-174
- xvii.TOUKAL Abdenour. *Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons*. Mémoire de



" PROPOSITION D'UNE TECHNIQUE DE RECYCLAGE DES DECHETS PLASTIQUES"

**TRAORE B.^{1,2}, ATCHOLI K.E.¹, SAMAH O.D.³, KOUAKOU C. H.², EMERUWA E.², LACHAT R.¹,
GOMES S.¹,**

1. Univ. Bourgogne Franche-Comté, IRTES EA7274, F-90010 Belfort Cedex, France

brahiman.traore@utbm.fr, koku-esso.atcholi@utbm.fr, remy.lachat@utbm.fr, samuel.gomes@utbm.fr.

2. Université Felix Houphouet Boigny Cocody Abidjan, Laboratoire Géomateriaux ; 01 BP V 34 Abidjan 01

Honore_kouakou2@yahoo.fr, edjiksmat@yahoo.com,

3. Unité de Recherche sur les Agroressources et la Santé Environnementale (URASE),

Université de Lomé, BP 1515 Lomé, Togo; odsamah@yahoo.fr

RESUME

Afin de mettre en place une politique de protection de l'environnement, la lutte contre la pollution s'avère nécessaire ; surtout en ce qui concerne les déchets plastiques. C'est ainsi que cette recherche a été initiée. Cette recherche nous permet de proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques, facile à mettre en œuvre. Les essais effectués sur les échantillons obtenus par cette méthode de recyclage sont satisfaisants.

Les résultats des essais de flexion montrent que notre nouveau matériau est de bonne qualité. Ce matériau résiste plus longtemps sous une charge à cause de la propriété d'élongation maximale (800 %) et de la limite de rupture élevée (28 MPa) du polyéthylène basse densité (PEBD).

Mots clés : environnement, polyéthylène éthylène basse densité(PEBD), déchets plastiques, méthode de recyclage.

Introduction

L'accroissement démographique et la forte demande en infrastructure (logements, routes, nourritures...) s'accompagnent d'une dégradation de l'environnement de façon alarmante. Une dégradation qui est incompatible avec la mise en place d'un développement durable et l'éradication de la pauvreté auxquels l'humanité toute entière a fondamentalement droit.

L'une des causes de cette dégradation est la prolifération des sachets plastiques d'emballage, rejetés dans la nature par leurs utilisateurs.

On estime la quantité de sachets plastiques rejetés à quelques 2 kg au minimum par an et par habitant (**Doublier, 2008**); ce qui est énorme quand on sait qu'il faut au moins 300 ans à un sachet pour être dégradé entièrement dans la nature.

Pour réduire les déchets plastiques et être en phase avec les objectifs et les grandes lignes qui devraient être le monde futur autour des axes de l'élimination de la pauvreté, de la protection de l'environnement et du développement durable (**Charte de la terre sur l'environnement, 1992**), notre étude va proposer une méthode de recyclage.

Techniques expérimentales

2.1 Matière première

2.1.1 Le sable

Le sable (**Figure 1**) est extrait dans le fleuve qui traverse la ville de Belfort et qui se nomme la Savoureuse. Nous avons obtenu le sable grâce à la société **BELFORT BETON** qui l'extrait et l'utilise pour ses travaux.



Figure 1 : Le sable

Le sable brut a été tamisé de sorte à obtenir trois types de sable :

- Sable I dont le diamètre des grains est compris entre $0,5 < d < 1$
- Sable II dont le diamètre des grains est $d < 0,5$
- Sable III constitué du sable en **entier**.

Les échantillons ont été confectionnés avec ces trois types de sable.

2.1.2. Les déchets plastiques



Figure 2 : le Polyéthylène Basse Densité (PEBD)

Le plastique utilisé (figure 2) est issu des déchets d'emballage de matériel livré au laboratoire IRTES- M3M. Ces plastiques sont essentiellement du Polyéthylène Basse Densité (PEBD).

Nous vous donnons quelques caractéristiques des PEBD.

Tableau : Différentes propriétés du polyéthylène basse densité. (Matra Plast Industries Inc. Canada, 2004)

PROPRIÉTÉ	NORME	Unités SI
Indice de fluidité	ASTM D1238	3 à 10 dg/mn à 190°C
Poids volumique	ASTM D1505	0,915 à 0,945 kg/m ³
Limite de rupture	ASTM D638	28 MPa
Élongation maximale	ASTM D638	800%
Module de flexion	ASTM D790	300 à 900 MPa
Température de ramollissement		80 °C - 100 °C
Température de fusion		100 °C - 170 °C
Absorption d'eau		Néant

2.2 Methodes

Nous avons expérimenté deux méthodes de confection.

2.2.1 Première méthode

Dans cette méthode nous faisons le mélange sable plastique dans un moule, suivi d'une thermo-compression.

2.2.2 Deuxième méthode

Nous avons utilisé un dispositif particulier (**Figure 3**) pour l'élaboration des échantillons.

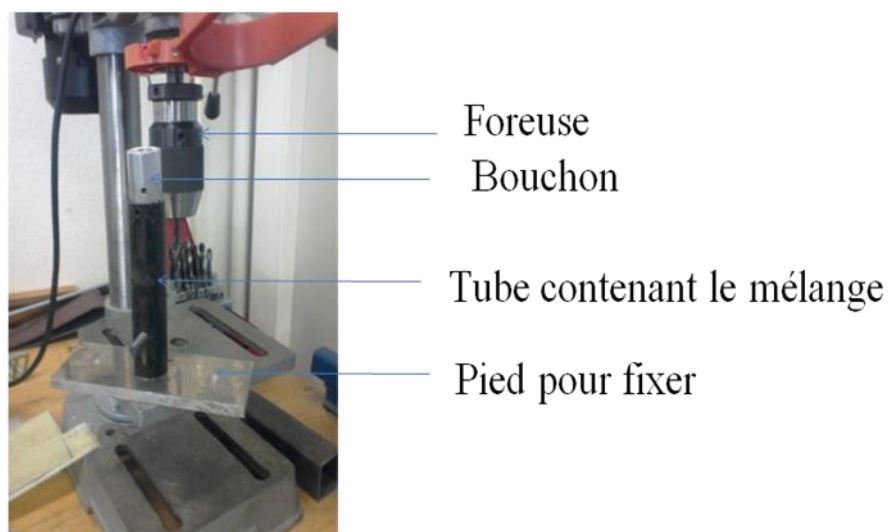


Figure 3 : Dispositif de mélange

Le mélange sable plastique est mis dans un tube (**Figure 3**). Ce tube est ensuite chauffé par un pistolet à air chaud (**Figure 4-A**) jusqu'à 170° C. L'ensemble sable plastique, contenu dans le tube est mélangé progressivement grâce à une foreuse. Le plastique représente 25% en masse du mélange total.

Lorsque le plastique est bien fondu et le sable bien mélangé avec le plastique, nous le mettons dans un moule. Le moule est ensuite porté sous une thermopresse (**Figure 4-B**) préchauffé à 170°C, pendant 20 minutes.

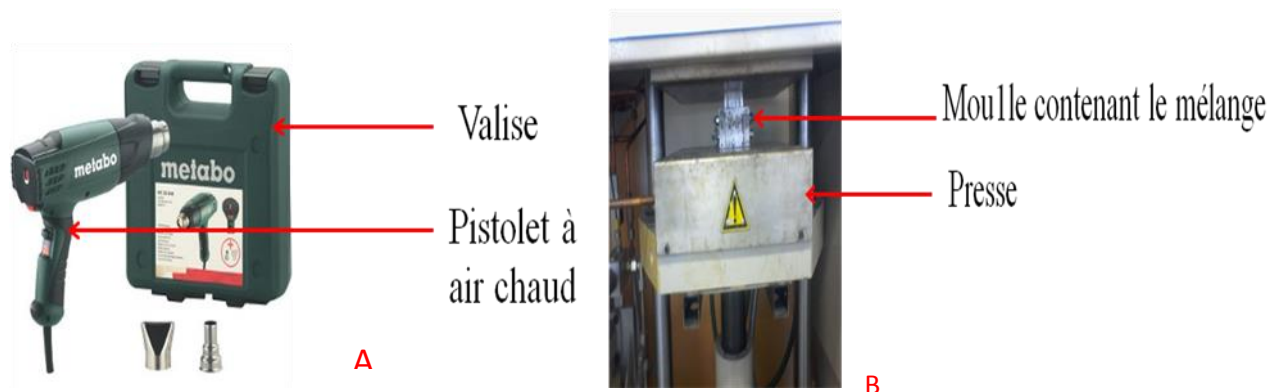


Figure 4 : A) pistolet à air chaud ; B) Thermopresse

3. Resultats

Nous avons obtenus différents types d'échantillons selon la méthode.

3.1 Première méthode

Nous obtenons un mélange non homogène (**Figure 5**).



Figure 5 : Echantillons non homogènes

Il est donc impossible de sortir des échantillons avec cette méthode. Dans cette méthode l'absence de malaxage justifie l'état des échantillons. On observe une ségrégation du plastique et du sable.

3.2 Deuxième méthode

Nous obtenons des échantillons bien homogènes (**Figure 6**).



Figure 6 : Echantillons homogènes

Le malaxage a permis d'obtenir un bon mélange.

La taille des grains du sable se remarque sur la surface lisse des échantillons.

Cette méthode a donc été adoptée pour l'élaboration des échantillons sur lesquels nous avons faits des essais de flexion.

3.3 Résultats de l'essai de flexion

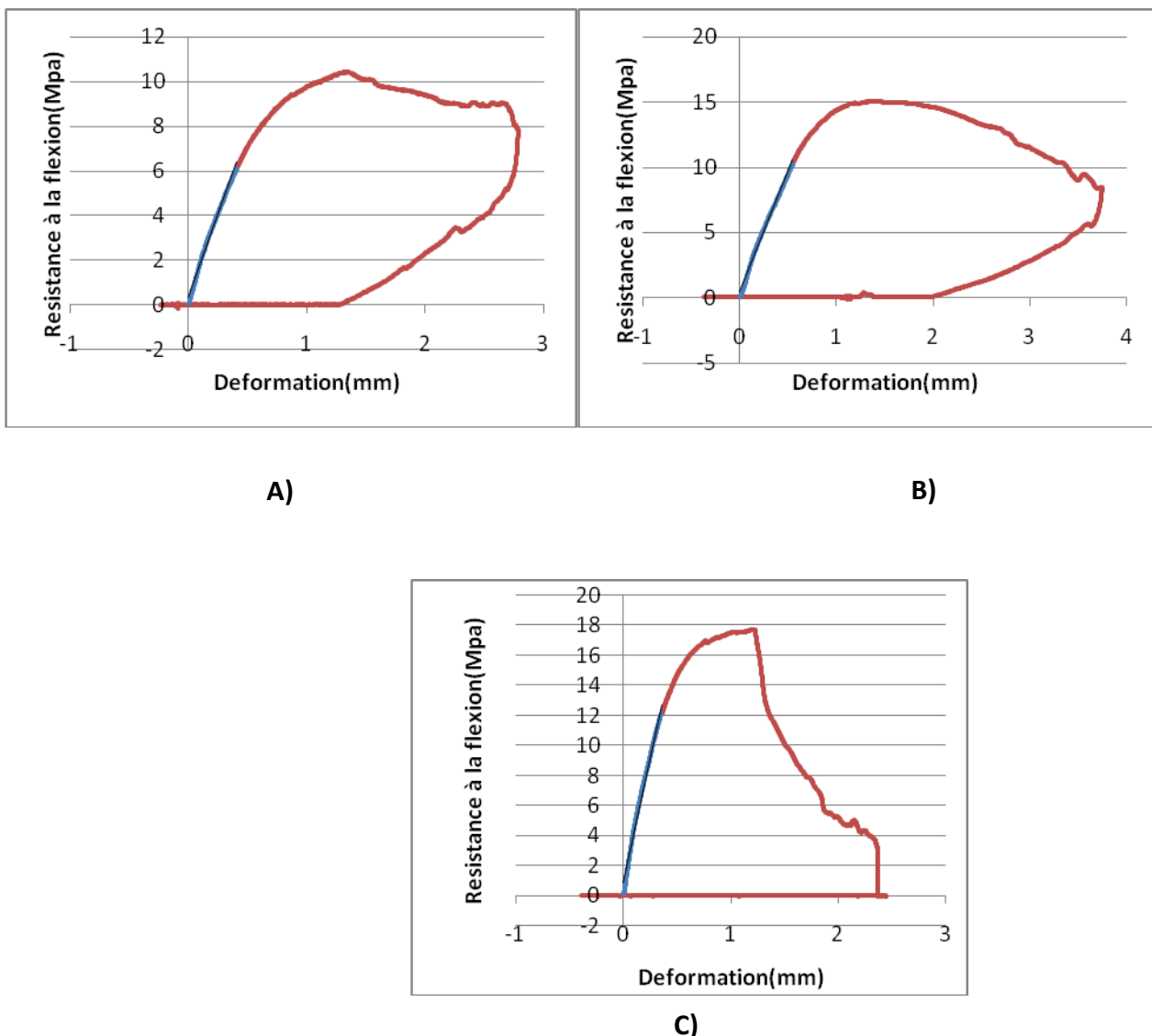


Figure 7 : Courbe de résistance à la flexion 3 points : A (sable avec $0,5 < d < 1$) ; B (sable entier) ; C (sable avec $d < 0,5$)

Nous remarquons en analysant ces courbes que les résistances évoluent en fonction de la granulométrie. Plus la granulométrie est fine plus la résistance à la flexion augmente.

Nous obtenons respectivement 10 ; 15 et 18 MPa pour le sable avec $0,5 < d < 1$, le sable entier et le sable avec $d < 0,5$. (d étant le diamètre des grains du sable).

Cette évolution de résistance à la flexion s'explique par le fait que les grains grossier dans un mélange favorisent les contacts entre grains créant ainsi des zones de faiblesse dans le matériau.

Ces valeurs sont au-delà des valeurs de la norme NBN EN 1339 (BNOR, 2004) qui exige une résistance à la flexion supérieure ou égale à 3,5. Ce matériau peut être alors conseillé dans la construction. Elle a même une résistance à la flexion supérieure à la résistance à la compression obtenue par le projet PRSDO-CER (CIFAL 2011) sur un matériau à base de sable et plastique.

4. Conclusion

Cette méthode de recyclage est à adopter, car elle nous permet d'obtenir un matériau bien homogène.

L'essai de flexion trois points, effectué sur les échantillons donne des résultats satisfaisants.

Afin d'élargir le domaine d'application des matériaux obtenus, d'autres travaux doivent être menés. L'incorporation de charge doit être envisagée.

Bibliographie

[1] Cascade fonderie, CEFREPAD et 2IE(2011) : Expérience de l'unité de fabrication de pavés plastiques par Cascade Fonderie à travers le PSRDO/CER, Séminaire CIFAL, du 21 au 25 février 2011, 15 p.

[2] Charte de la terre sur l'environnement (1992), <http://w.w.w.un.org/french/>

[3] DOUBLIER G. (2008). Dossier « les plastiques », 13 p.

[4] Le marquage CE et BENOR NORME(2004) : les contrôles et leurs significations ; 2p.

[5] Matra Plast (2004), propriétés des matériaux polypropylènes/ polyéthylènes,

W.w.w.matraplast.com/french/twinwall/specs/pepp_properties.html.

Résumé

Notre étude consiste à proposer une méthode de recyclage des déchets plastiques en confectionnant des matériaux utilisables dans le revêtement routier et de sol intérieur ou extérieur. Pour ce faire deux techniques ont été adoptées : la technique par compactage manuelle et la technique par thermocompression. Dans les deux cas, le sable est mélangé avec du plastique fondu. Dans l'optique d'améliorer les résistances mécaniques afin d'élargir le domaine d'utilisation des matériaux, un apport en charge d'argile a été fait dans la méthode de thermocompression. Les résultats obtenus ont permis de faire des observations. Ainsi, on observe que les résistances mécaniques augmentent avec le taux de déchets plastiques jusqu'à un taux optimal avant de baisser. Pour la technique de compression manuelle ce taux idéal est de 30 % et pour celle de la thermocompression le taux est de 50 %. Dans les deux cas, plus la granulométrie du sable est fine, plus la résistance augmente. Les essais non destructifs (scléromètre et ultrason) ont été faits et comparés avec ceux des essais destructifs. Les résultats ont permis d'établir des modèles prédisant le comportement des matériaux. Les résistances mécaniques de la thermocompression sont plus élevées que celles de la compression manuelle à cause la pression exercée qui renforce la cohésion entre sable et déchets plastiques. L'ajout de l'argile comme charge permet d'augmenter la résistance mécanique et la rigidité du matériau. Cette résistance est élevée quand les particules d'argiles sont plus fines. Le taux de charge idéal est fonction du taux de déchets plastiques. C'est ainsi que pour 20 et 25 % de déchets plastiques, le taux de charge idéal en argile est respectivement de 5 et 7 %. Les différents résultats obtenus ont été aussi comparés avec les exigences des normes concernant les matériaux de revêtement routiers (pavés) et de sol. Il en ressort que les matériaux peuvent être utilisés comme pavés et carreaux de sol.

Mots clés : Déchets plastiques, recyclage, charge, composite, thermocompression, résistance.

Abstract

Our study consists of proposing a method for recycling plastic waste by making materials that can be used in road and interior or exterior flooring. To do this, two techniques have been adopted: the technique by manual compaction and by thermocompression. In both methods, the sand is mixed with molten plastic.

In order to improve the mechanical strength, and to widen the field of use of the materials, a load of clay was made in the thermocompression method. The results obtained made it possible to make observations. Thus, it is observed that the mechanical strength increase with the plastic waste rate to an ideal rate before falling. For the manual compression technique this ideal rate is 30 % and for the thermocompression the rate is of 50 %. In both cases, when the particle size of the sand is fine, the strength increases. The non-destructive tests (sclerometer and ultrasound) were made and compared with the destructive tests. The results allowed establishing models predicting the behavior of materials. The mechanical strengths of the thermocompression are higher than those of the manual compression because of the pressure exerted which reinforces the cohesion between sand and plastic waste. The addition of clay as filler increases the mechanical strength and stiffness of the material. This strength is high when the clay particles are finer. The ideal load rate is a function of the plastic waste level. Thus, for 20 and 25 % plastic waste, the ideal clay loading rate is 5 % and 7 %, respectively. The various results obtained have also been compared with the requirements of the standards for road surfacing materials (paving) and flooring. It emerges that the materials can be used as pavers and floor tiles.

Key words: Plastic waste, recycling, load, composite, thermocompression, strength.