

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2020

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

Caractérisation et modélisation d'un mortier léger à base des granulats des déchets plastiques

Nom et Prénom de l'étudiant :
CHENCHOUNA Hadjer

Encadreur : Prof: ZEGHICHI Leila

Année universitaire : 2019 - 2020

Dédicaces

Avec l'aide du tout Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

*A mon très cher **père**,*

Je voudrais partager ce succès avec lui, Que dieu le protège et le garde.

*A ma très chère **maman**,*

Que dieu la protège pour moi, je ne pourrai jamais la remercier assez

Pour ce qu'elle fait pour moi.

*A mon chers frère **Abd Allah**, mes chère sœur **Iman** et **Chaïma***

Qui sont très présents pour me soutenir

*Aussi je dédie ce travail à mes grande mère **Aïcha** et **Massouda**, mes oncle **Kamel** et **Mourad***

*Un grand merci à mon encadreur **Pr : ZEGHICHI** Leila pour son encadrement, sa ma compréhension et sa gentillesse durant tout le long de mon mémoire*

A mes chers amies et amis

CHENCHOUNA Hadjer

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Université de Mohamed khider BISKRA au sein du laboratoire Matériaux de construction de département de génie civil. C'est pourquoi je remercie les responsables qui m'ont accueilli dans le laboratoire.

Je voudrais particulièrement remercier mon encadreur, Madame **ZEGHICHI Leila**, Professeur à l'Université de Biskra, pour m'avoir suivi au cours du semestre deux. Je tiens à souligner sa disponibilité, le soutien qu'elle m'a apporté dans les moments les plus difficiles de ce mémoire, ses idées, ses expériences et la confiance qu'elle m'a accordée..

Je tiens à remercier les membres du jury qui nous font l'honneur d'examiner mon travail

J'adresse mes remerciements et ma sympathie à nos chers enseignants de l'université de Biskra pour toutes les connaissances acquises au cours de notre formation.

Notre gratitude la plus profonde à tous nos amis de la promotion ainsi qu'à tous le personnel du laboratoire de Structures du département de Génie Civil de l'université de Biskra.

Un grand merci à ma chère famille.

Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
Liste de matières	
Liste de tableaux	
Liste de figure	
Abréviation.....	
Résumé	
Abstract.....	
الملخص.....	
Introduction générale :	1
A- Premières partie : Etude Bibliographique	
Chapitre I : Généralités sur les bétons légers	
I.1. Introduction	3
I.2. définition du béton léger	3
I.3. Types des bétons légers.....	3
I.3.1. Béton de granulats légers.....	4
I.3.1.1. Type et nature des granulats légers	4
I.3.1.2. Caractéristiques des granulats légers.....	5
A. Granulats légers naturels	5
A.1 Granulats minéraux	5
A.1.1 Pierre ponce.....	5
A.1.2 Pouzzolane	6
A.2 Granulats végétaux	6
A.2.1 Granulat de Liège	6
B. Granulats obtenus par traitement	6
B.1. Perlite	6

C. Granulats spéciaux	6
C.1. Schiste expansés	6
I.3.2. béton caverneux.....	8
I.3.3. Béton cellulaire	8
I.4. Les propriété des bétons légers	8
I.4.1. La masse volumique.....	8
I.4.2. La porosité	9
I.4. 3. La légèreté.....	9
I.4. 4. Propriétés mécaniques	9
I.4. 5. Conductivité thermique	9
I.4. 6. Rhéologie à l'état frais	9
I.5 Classification des bétons légers	10
I.6. caractéristiques principales des bétons légers.....	10
I.7. Différence entre le béton léger et le béton classique.	10
I.8. Domaine d'utilisation des bétons légers.....	11
I.9. Avantages du béton léger	11
I.10. Désavantages du béton léger	12
I.11. Conclusion.....	12

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

II.1 Introduction.....	13
II.2 Définition	13
II.3 Historique	13
II.4 Propriétés du PEBD.....	14
II.4.1 propriétés rhéologiques	14
II.4.2 Propriétés physico-chimiques	14
II.4.3 Propriétés mécaniques.....	14
II.5 Types de plastiques et ses déchets recyclés.....	15
II.6 Avantages des matières plastiques	16
II.7 Inconvénients des matières plastiques.....	17
II.8 Utilisation de déchets plastiques recyclés	17
II.9 Classification des plastiques réutilisés et revalorisés dans le béton et mortiers.....	17
a). Polypropylène Vierge.....	18

b). Le plastique recyclé des résidus d'automobiles broyés	18
c). Plastique recyclé (décheté)	18
II.10 Valorisation des déchets plastiques et les utilisations dans le béton et mortier	19
II.11 Types et quantités de substitutions des agrégats naturels par des agrégats légers dans le mortier / béton	19
II.12 Evolution des propriétés des mortiers/ bétons à base des granulats légers.....	20
II.12.1. Maniabilité (Affaissement).....	20
II.12. 2 La masse volumique.....	21
II.12.3. Propriétés mécaniques.....	21
II.12.3.1 Résistance à la compression.....	21
II.12.3.2 Résistance à la flexion	21
II.12.4. Performance de durabilité	22
II.12.4.1 pénétration des ions chlorure	22
II.12.4.2 L'absorption d'eau.....	22
II.13 Conclusion.....	23

Chapitre III : Généralités sur le plan d'expérience.

III.1 Introduction	24
III.2 Démarche méthodologique.....	24
III.3 Contexte et objectif des plans d'expériences	25
III.4 Terminologies.....	26
III.5 Type des plans d'expériences	29
III.5.1. Plan factoriels complets :.....	29
III.5.2. Plan à deux facteurs.....	29
III.5.3. Les plans composites centrés	30
III.5.4. Plans de mélange	31
III.6 types des logiciels.,.....	32
III.7 Conclusion	32

B- Deuxième partie : Etude Expérimentale

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

IV.1 Introduction.....	33
------------------------	----

IV.2 Objectif du travail	33
IV.3. Méthodologie du travail pratique.....	33
IV.4 Matériaux utilisés et leurs caractérisations.....	34
IV.4.1 Ciment	34
IV.4.2 Sable.....	35
IV.4.2.1 Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1.....	35
IV.4.2.2 Module de finesse	36
IV.5. Les granulats des déchets (sacs plastiques).....	37
IV.6. Elaboration des mortiers composites légers.....	42
IV.7 procédures expérimentales	43
IV 7.1. A l'état frais	43
IV 7.1.1 Ouvrabilité	43
IV.7.2 A l'état durci	43
VI.7.2 .1 Essais de caractérisation mécanique	43
IV.7.2 .1.1 Mesure des résistances mécaniques (EN 196-1).....	43
IV.8. Essais de caractérisation physique	45
IV.8.1. Retrait et gonflement (NF P 15- 433)	45
IV.8.2 La masse volumique	45
IV.8.3. Porosité accessible à l'eau (ASTM C 642-06)	46
IV.8.4. Absorption capillaire (Absorptivité).....	46
IV 8.5. Absorption par immersion.....	48
IV .9 Conclusion	48

Chapitre V : Résultats et Analyses

V.1 Introduction	49
V.2 Etude à l'état frais.....	49
Maniabilité	49
V.3 Etude à l'état durci	50
V.3.1 Masse volumique.....	50
V.3.2 Caractérisations physico- mécaniques des mortiers de PEBD.....	51
(a) Résistance à compression.....	51
(b) Résistance à la flexion	52
V.3.3 Retrait du mortier	52
V.3.4Gonflement du mortier	55

V.3.5 Porosité accessible à l'eau	55
V.3.6. Absorption par immersion	56
V.3.7. Absorption par capillaire.....	57
V.4 Conclusion	58

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

VI.1 Introduction.....	59
VI.2 : Réalisation du plan d'expérience au laboratoire.....	59
VI.3 : Modélisation du plan d'expérience	59
VI.3.1 : Facteurs	59
VI.3.2 : Niveaux des facteurs.....	59
VI.3.3 : Réponses.....	60
VI.3.4 : Choix du plan d'expérience.....	60
VI.3.5 : Interactions.....	60
VI.4 : Formulation du mortier léger	61
VI.5 : Résultats des essais.....	61
VI.5.1 : Analyse des résultats	62
VI.5.2 : Modélisation	63
VI.6 Conclusion.....	82
Conclusion général et perspective.....	83

Listes de références

Annexes

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers

Tableau I.1 : caractéristique de béton de granulats légers	4
Tableau 1. 2 : Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée	7
Tableau I.3 : caractéristiques du béton léger caverneux	8
Tableau I.4 : Conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons légers à base d'argile expansé et un béton courant.....	9
Tableau I.5 : la classification du béton léger selon la masse volumique et la résistance à la compression.....	10

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Tableau II.1 : Diverses utilisations des matières plastiques vierges et recyclé	14
Tableau II.2 : Propriétés de certains types de déchets légers utilisés comme agrégat.....	18
Tableau II.3 : l'effet de remplacement des déchets plastiques sur la maniabilité.....	19
Tableau II.4 : l'effet de remplacement des déchets plastique sur la masse volumique	20
Tableau II.5 : l'effet de remplacement des granulats naturels par des déchets plastique sur résistance à la compression	20
Tableau II.6 : l'effet de remplacement des déchets plastique sur résistance à la flexion	21
Tableau II.7 : l'effet de remplacement granulats naturels par des déchets plastiques sur la profondeur de la pénétration des ions chlorure	21
Tableau II.8 : l'effet de remplacement sur l'absorption d'eau	22

Chapitre III : Généralités sur le plan d'expérience.

Tableau III.1 : deux facteurs à deux niveaux.....	25
--	----

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Tableau IV.1 : caractéristique physiques du ciment employé.....	33
Tableau IV.2 : composition chimique du ciment employé.....	33
Tableau IV.3 : composition minéralogique du ciment employé.....	33

Tableau IV.4 : caractéristiques physiques des sables (0/5) mm	34
Tableau IV.5 : analyse granulométrique de sable d’oued selon la norme NF EN 933-1.....	35
Tableau IV.6 : analyse granulométrique de sable concassé selon la norme NF EN 933-1.....	36
Tableau IV.7 : caractéristiques physiques des granulats plastiques (0/4) mm selon la norme NF EN 933-1	37
Tableau IV.8 : analyse granulométrique de plastique selon la norme NF EN 933-1.....	37
Tableau IV. 9 : analyse granulométrique de mélange de 10% du plastique selon la norme NF EN 933-1.....	38
Tableau IV.11 : analyse granulométrique de mélange de 30% du plastique.....	39
Tableau IV.10 : analyse granulométrique de mélange de 20% du plastique.....	39
Tableau IV.12 : analyse granulométrique de mélange de 40% du plastique.....	39
Tableau IV.13 Composition des mortiers légers.....	41

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

Tableau VI.1 : Synthèse de plan d’expérience.....	58
Tableau VI.2: Les niveaux des facteurs.....	58
Tableau VI.3 : La matrice des effets.....	59
Tableau VI.4 : Matrice générale des effets et leur interaction.....	60
Tableau VI.5 : Formulation du mortier léger	60
Tableau VI.6 : Résultats d’essai (maniabilité).....	60
Tableau VI.7 : Résultats (la masse volumique) à l’état durci à 7 et 28j)	61
Tableau VI.8 : Résultats (la résistance à la compression à 7 et 28j)	61

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers

Figure I.1 : représentation schématique des différents types de béton légers.....	4
Figure 1.2 : Pierre De Ponce.....	5
Figure 1.3 : Granulats De Pouzzolane	6
Figure 1.4 : Variation de la résistance à la compression du béton confectionné à partir d'argile expansées en fonction de sa masse volumique (dans des conditions normales de conservation : 20°C, 65% d'humidité relative)	7

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Figure II.1 : Schéma représentatif du polyéthylène.....	13
Figure II.2 : Polymérisation du polyéthylène	13
Figure II.3 : Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier. (a) Polyéthylène à haute densité (PEHD) [44], (b) Ethylène acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm) [43], (c) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm) [43], (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm) [15], (f) Polycarbonate (PC) (<5mm) [37], (g) Caoutchouc pneumatique	17

Chapitre III : Généralités sur le plan d'expérience.

Figure III.1 : organigramme générale de traitement des plans d'expériences	24
Figure III.2 : système de boîte noire	25
Figure III.3 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude formant la surface de réponse.	27
Figure III.4 : Illustration de l'effet global et de l'effet moyen.....	29
Figure III.5 : Courbes d'interactions.	29
Figure III.6 : Disposition des points expérimentaux d'un plan ²	30
Figure III.7 : Plan composite à deux facteurs (k = 2).....	31
Figure III.8 : triangle de Féret, 1892	31

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Figure IV.1: Sable d'oued	35
Figure IV.2: Sable concassé.....	35
Figure IV.3 : courbe granulométrique de sable d'oued (0/5) mm.....	36
Figure IV.4 : courbe granulométrique de sable concassé (0/5) mm.....	37
Figure IV.5 : Etapes de l'obtention des granulats plastiques	38
Figure IV.6. Granulats plastiques utilisés	38
Figure IV. 7 : courbe granulométrique du plastique (0/5) mm.	39
Figure IV.9 : table à choc	42
Figure IV.10: conservation des éprouvettes	42
Figure IV .11 : Table à secousses.....	43
Figure IV .12: essai d'étalement	43
Figure IV.13 : Presse de compression	44
Figure IV.14 : appareil de flexion	44
Figure IV. 15. Appareil de retrait et gonflement.....	45
Figure IV.16 : Appareil hydrostatique.....	47
Figure IV. 17. Absorption capillaire	47
Figure VI.18. Absorption par immersion	48

Chapitre V : Résultats et Analyses

Figure V.1 : Maniabilité des différents mortiers.....	49
Figure V.2 : La masse volumique à l'état durci des mortiers légers PEBD à 7, 28 et 90 jours.....	50
Figure V.3 : Variation de la résistance à la compression des mortiers légers PEBD.....	51
Figure V.4 : Variation de la résistance à la flexion des mortiers légers à base PEBD.....	52
Figure V.5 : variation dimensionnelle (retrait) des mortiers composites conservés à l'air libre.....	53
Figure V.6 : variation de la masse en fonction du temps des différents mélanges.....	54

Figure V.7 : variation dimensionnelle (gonflement) des mortiers composites conservés à l'eau	55
Figure V.8: variation de la masse en fonction du temps.....	56
Figure V.9 : porosité du mortier (%).	56
Figure V.10 : absorption par immersion	56

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

Figure VI.1: Estimation des coefficients.....	63
Figure VI.2 : Diagramme de chaque facteur	63
Figure VI.3 : Profil d'interaction de réponse d'étalement en fonction des facteurs (C, P, S).....	63
Figure VI.4 : diagramme des résidus en observé en fonction de valeurs prévues.....	64
Figure VI.5 : Graphique des valeurs observé fonction des valeurs prévues.....	64
Figure VI.6 : Diagramme de Pareto	65
Figure VI.7: Profileur d'isoréponses de l'étalement en fonction de ciment et plastique	66
Figure VI.8: Profileur d'isoréponses d'étalement en fonction de déchet de ciment et sable.....	66
Figure VI.9 : Profileur d'isoréponses d'étalement en fonction de déchet de plastique et sable.....	67
Figure VI.10: Estimation des coefficients.....	67
Figure VI.11: Diagramme de profil de prévision pour chaque facteur	68
Figure VI.12 : Profil d'interaction de réponse de la masse volumique en fonction des facteurs (C, P, S).....	69
Figure VI.13 : diagramme des résidus en observé en fonction de valeurs prévues.....	69
Figure VI.14 : Graphique des valeurs observé fonction des valeurs prévues	69
Figure VI.15 : Diagramme de Pareto d'estimation	69
Figure VI. 16 : Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de ciment et déchet plastique.....	70

Figure VI. 17 : Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de ciment et du sable	70
Figure VI.18 : Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de plastique et du sable	71
Figure VI.19: Estimation des coefficients.....	71
Figure VI.20 : Diagramme de prévision de chaque facteur	72
Figure VI.21 : profile d'interaction des facteurs	72
Figure VI .23: diagramme des résidus en	73
Figure VI.24: Graphique des valeurs observé fonction des valeurs prévues	73
Figure VI. 25 : Diagramme de Pareto d'estimation	74
Figure VI. 26 : Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de ciment et de déchet plastique.....	74
Figure VI. 27 : Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de ciment et de sable	75
Figure VI. 28: Profileur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de plastique et de sable	75
Figure VI.29: Estimation des coefficients.....	76
Figure VI.30: Estimation des coefficients.....	76
Figure VI. 31 : Diagramme de chaque facteur à 7jours.....	76
Figure VI. 32 : Diagramme de chaque facteur à 28 jours.....	77
Figure VI.33 : Profil d'interaction de réponse de la résistance R_{C7} en fonction facteurs (C*P*S)	77
Figure VI.34: réponse de la résistance R_{C28} en fonction des facteurs(C*P*S)	77
Figure VI.35: Graphique des valeurs observé fonction des valeurs prévues à 7j.....	77
Figure VI. 36: Graphique des valeurs observé en fonction de valeurs à 28j.....	78
Figure VI.37: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus 7j.....	78
Figure VI.38: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus 28j.....	78
Figure VI. 39 : Diagramme de Pareto d'estimation R_{C7}	78

Figure VI. 40 : Diagramme de Pareto d'estimation R_{c28}	79
Figure VI.41 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de ciment et déchet de plastique.....	79
Figure VI.42 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de sable et déchet de plastique.....	80
Figure VI.43 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 28j en fonction de ciment et déchet de plastique.....	80
Figure VI.44 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 28j en fonction de ciment et sable.....	81
Figure VI.45 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de sable et déchet de plastique.....	81

Abréviation

BGL : Béton de granulat léger

PEBD : Polyéthylène à base densité

MPEBD : Mortier de Polyéthylène à base densité

R_c : résistance mécanique à la compression

ρ : masse volumique

E : Etalement

PEHD : Polyéthylène à Haut densité

PC : Polycarbonate

PVC : Polychlorure de vinyle

C : Ciment

S : Sable

SD : Sable d'oued

SC : Sable concassé

Résumé :

Ce travail vise l'étude, la Caractérisation et la modélisation d'un mortier léger à base des granulats issus du recyclage des sacs plastiques. L'objectif de notre étude est la valorisation des déchets plastiques PEBD comme un granulat fin pour la confection des mortiers composites légers par suite l'évaluation (expérimentalement) des caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers.

Le travail consiste à remplacer (en volume) le sable naturel dans le mortier par un pourcentage croissant du déchet plastique (10%, 20%, 30%, 40%), en fixant le rapport E / C à 0.5 et d'étudier l'influence de cette substitution sur le comportement du mortier composite à l'état frais et durci.

Les résultats obtenus montrent une amélioration de la maniabilité des mortiers composites, une diminution de la masse volumique, une diminution de la résistance au fur et à mesure qu'on augmente le taux des granulats plastiques.

Le plan factoriel complet 2^3 est satisfaisant, les réponses prévues générées par le modèle linéaire sont en accord avec celles mesurées ($R^2=99.99$ % pour l'étalement, $R^2=99$ % pour la masse volumique et $R^2=99$ % pour la résistance en compression).

Mots clés : valorisation, mortier légers, déchet plastique, la masse volumique, résistance mécanique. Modélisation

Abstract:

In this work, we study the characterization and model a light mortar based on aggregates from the recycling of plastic bags. The aim of our study is the valorization of plastic waste LDPE as a fine aggregate for the preparation of light composite mortars following the (experimental) evaluation of the physical and mechanical characteristics of the mortars.

The work consists of replacing (by volume) the natural sand in the mortar with an increasing percentage of plastic waste (10%, 20%, 30%, 40%), fixing the E / C at 0.5 and studying the influence of this substitution on the behavior of the composite mortar in the fresh and hardened state.

The results obtained show an improvement in the workability of composite mortars, a decrease density, a decrease in strength as the level of plastic aggregates is increased.

The complete factorial plan 2^3 is satisfactory, the expected responses generated by the linear model are in agreement with those measured ($R^2=99.99$ % for the workability, $R^2=99$ % for the density, $R^2=99$ % for the compressive strength).

Keywords: valorization, light mortar, plastic waste, density, mechanical resistance, modelization

الملخص:

في هذا العمل ندرس خصائص وتصميم الملاط الخفيف الذي اساسه ركام أكياس البلاستيك الذي تم اعادة تدويرها. هدفنا في هذه الدراسة هو اعادة تثمين و تدوير نفايات أكياس البلاستيك مثل ركام خفيف من أجل صنع ملاط مركب خفيف الوزن لمتابعة التقييم التجريبي للخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للملاط.

هذا العمل يعتمد على استبدال الرمل الناعم بنسب متفاوتة (0.10 .20 .30 .40 %) من ركام البلاستيك مع تثبيت $E/C = 0.5$ و دراسة تأثير هذا

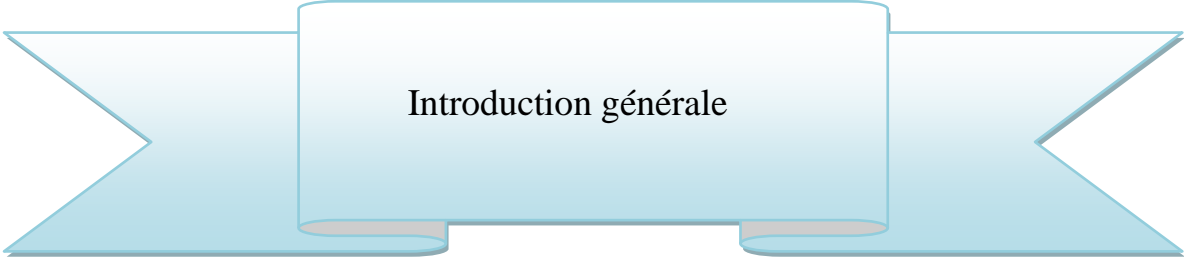
الاستبدال على سلوك الملاط المركب في الحالة اللينة و الصلبة

النتائج المتحصل عليها تبين تحسن في ليونة الملاط المركب . نقصان في الكتلة الحجمية و المقاومة بزيادة نسبة البلاستيك.

المخطط العوامل الكاملة 2^3 مرضية الاستجابة المتوقعة الناتجة عن النموذج الخطي تتفق مع تلك المقاسة (لقوة الضغط $R^2=99.99\%$ للامتداد $R^2=99\%$ للكثافة $R^2=99\%$)

الكلمات المفتاحية

استرجاع, ملاط خفيف, نفايات بلاستيكية, مقاومة ميكانيكية, كثافة, تصميم.



Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de ces dernières années, il y a une croissance remarquable de la consommation des sacs plastiques en Algérie. Les déchets de différentes sources sont à l'origine de divers problèmes environnementaux liés à leurs stockages et leurs quantités croissantes. Le plastique est l'une des innovations les plus importantes du 20^{ème} siècle, c'est un matériau omniprésent.

En raison de ses avantages liés à son cout, sa légèreté, la facilité de son utilisation sa force et sa longue durée de vie sont les facteurs qui font qu'une croissance, substantielle de la consommation de plastique partout dans le monde ces dernières années.

Le plastique est un matériau composé de plusieurs produits toxiques polluants pour le sol, l'air et l'eau en plus c'est un matériau à long durée de vie.

La gestion de déchets plastiques est l'une des principaux soucis environnementaux dans le monde. Avec le rétrécissement des espaces pour la mise en décharge et en raison de son coût toujours croissant, l'utilisation de déchets est devenue une alternative attrayante mise à disposition pour diverses applications.

Au cours des dix dernières années, la consommation par personne du plastique en Algérie a augmenté d'environ 9 % par an passant de 10 kg en 2007 à 23.1 kg en 2017, elle devra atteindre 25.8 kg en 2020 ; donc l'Algérie serait le cinquième consommateur des sacs plastiques dans le monde avec près de 7 milliards de sacs utilisés annuellement, dont 60 à 80 % des déchets plastiques ne sont pas recyclés mais restant dans la nature ou en mer.

Pourtant plusieurs procédés simples tels que le broyage, la fonte ou l'extrusion permettent de recycler ces produits pour obtenir de nouveaux matériaux (isolants, briques de construction, tuiles,).

L'étude suivante rentre dans ce contexte, elle vise la valorisation des déchets plastiques issus du recyclage des sacs plastiques comme granulats fins pour la confection des mortiers composites légers.

La substitution partielle des granulats fins naturels par des granulats plastiques est faite avec un pas de 10 %, allant de 10 % à 40 % du volume du sable dans le mortier.

Les propriétés des mortiers composites sont déterminées à l'état frais et durci, quelques indices de durabilité du mortier élaboré sont évalués.

Le contenu de ce travail de recherche est scindé en trois parties chaque partie contient deux chapitres, des conclusions, des perspectives et une liste bibliographique.

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique relative aux bétons légers, types des granulats légers et les principaux propriétés et caractéristiques des bétons légers.

Dans le deuxième chapitre, on dresse une revue bibliographique brève sur les recherches relatives à la caractérisation de divers composites légers. Toute une partie est consacrée aux recherches et le développement dans la conception et l'application des agrégats légers

revalorisés dans le béton et/ou mortier jusqu'aux ultimes résultats recueillis par différents chercheurs nationaux et internationaux qui ont marqués ce secteur de recherches.

Le troisième chapitre, on dresse une revue bibliographique sur la modélisation par le JMP

Le quatrième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et la description des modes opératoires employés.

Le cinquième chapitre, présente les résultats des essais expérimentaux et leurs analyses. D'abord, ceux concernant l'influence de granulat léger PEBD sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers MPEBD.

Le sixième chapitre, présente les résultats des essais expérimentaux par le logiciel de JMP

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale en soulignant les principaux résultats obtenus, ainsi que les perspectives.



Chapitre I

Revue bibliographique : généralités sur
les bétons légers

Chapitre 1 : Généralités sur les bétons légers

I.1. Introduction :

Les bétons légers offrent comme avantage sa faible densité et son pouvoir isolant élevé et comme inconvénient sa plus faible résistance. Grâce au développement de la production industrielle des granulats légers, on a pu améliorer ces propriétés fondamentales. Ainsi aujourd'hui, les bétons légers conservent un très bon pouvoir isolant en ayant malgré cela des résistances appréciables.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au béton léger.

I.2. définition du béton léger :

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction fabriqué à partir de granulats (sable, gravillon) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles applications ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 1850 et 1850 Kg/m³. [1]

Ces bétons ont des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois, ils peuvent également être utilisés pour des éléments porteurs à la condition que l'on possède les granulats légers permettant d'atteindre les résistances voulues les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et leurs résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructifs et économiques ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. [2]

En fin, le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences, par son excellent rapport poids/résistance et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. [2]

I.3. Types des bétons légers :

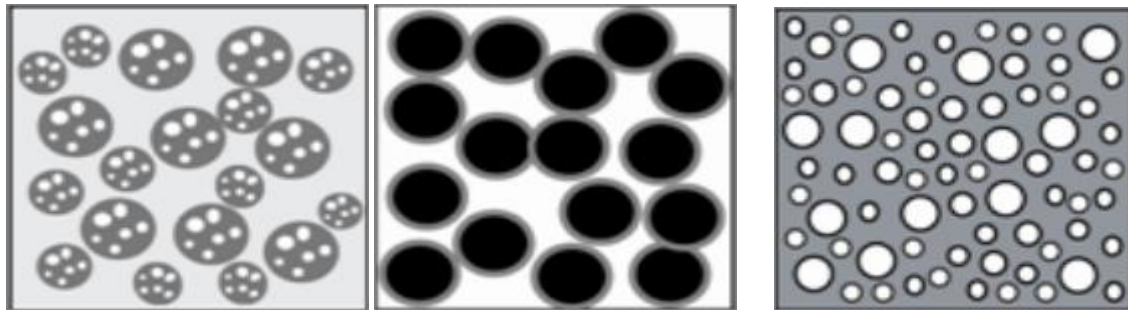
Pour obtenir un béton léger, on prend en considération deux aspects :

- Les particularités en matière de formulation des bétons légers.
- La source des constituants spécifiques à la confection des bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont liés à la faible masse volumique des bétons légers, qui provient de leur porosité élevée. Cette porosité peut être localisée dans trois endroits :

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

- ❖ Au sein des granulats : C'est le cas des bétons de granulats légers
- ❖ Entre les gros granulats par suppression des granulats fins. C'est le cas des bétons caverneux
- ❖ Dans la pâte de ciment : C'est le cas des bétons cellulaires. [4.2]



Béton de granulat léger

Béton caverneux

Béton cellulaire

Figure I.1 : représentation schématique des différents types de béton légers [4.2]

I.3.1 Béton de granulats légers :

Le béton de granulats légers, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de référence en liaison avec l'utilisation BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, etc. [4]

Les bétons de granulats légers trouvent de nombreuses applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les structures telles que les poutres, les poteaux, les planchers etc. Les bétons légers connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustique protégeant les riverains des nuisances sonores. Dans l'industrie du béton, cette famille de béton est utilisée pour les produits de structure destinés aux bâtiments ou aux ouvrages de génie civil qu'ils soient en béton armé ou précontrainte. Les bétons légers pour les produits de structure présentent une masse volumique réelle sèche comprise entre 1200 et 2000 Kg/m³ et des résistances à la compression entre 25 et 80 MPa. [2]

Tableau I.1 : caractéristique de béton de granulats légers [6,2]

Types de bétons spéciaux	Propriétés, caractéristiques particulières	Utilisation, domaines d'application privilégiés
Béton de granulat léger	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Masse volumique réduite (1000 et 1800 Kg/m³) ➤ bonne résistance mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ allègement des produits et des ouvrages ➤ isolation thermique et phonique

I.3.1.1. Type et nature des granulats légers :

Comme pour tout béton, les granulats sont également un élément-clé dans la composition du BL. Il est possible d'utiliser des granulats naturels pour confectionner un BL. Comme, on peut utiliser des granulats recyclés utilisés comme remplacement partiel ou totale des granulats naturels dans BL. Les granulats influencent de manière significative les propriétés du BL à savoir la fluidité, la résistance mécanique du béton et la durabilité. Le schéma suivant cite les différents nature des granulats légers :

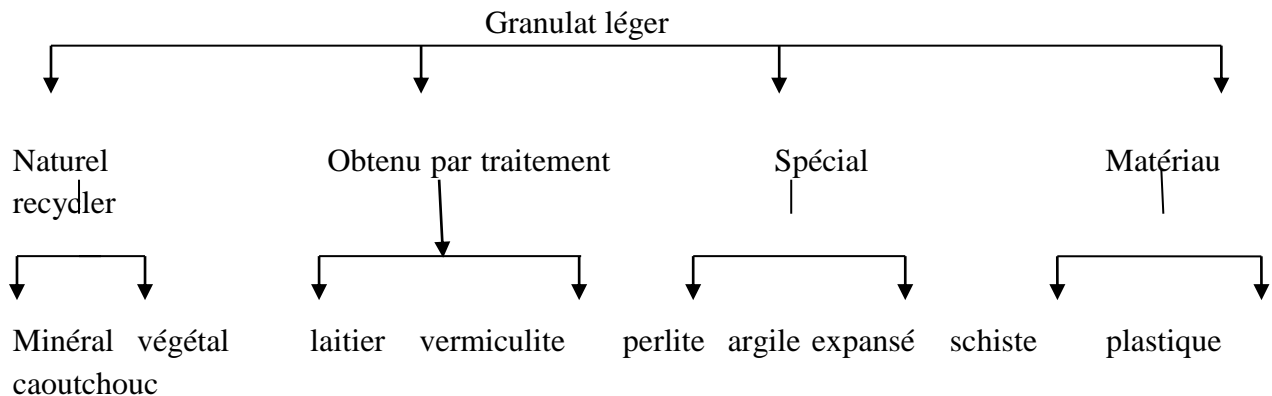


Schéma 1.1 : type de granulat léger dans l'environnement [6]

1.3.1.2. Caractéristiques des granulats légers :

La caractéristique essentielle d'un granulat léger est sa porosité élevée, ce qui se traduit par une faible densité apparente. [1]

A. Les granulats légers naturels :

Il s'agit là, de granulats naturels par définition, mais légers ; c'est-à-dire présentant une structure alvéolée.

Les granulats légers naturels sont issus en général de roches d'origine volcanique ou sédimentaire subissant diverses transformations mécaniques.

Au terme de ces transformations (criblage et concassage) des gros blocs de roche (issus du dynamitage de la roche), on obtient des grains de différentes tailles. [5]

A.1 Granulats minéraux

A.1.1 Pierre ponce :

La pierre ponce est un matériau naturel d'origine volcanique, elle se forme un refroidissement brusque de roche en fusion, elle se présente sous l'aspect de grains assez arrondis dont le diamètre maximale de 10 à 20 mm d'une densité sèche et faible [2]

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

La ponce est assez friable et employée pour des bétons légers de structure et d'isolation ayant des résistances modestes ainsi que dans le cas d'enduit légers. [2]



Figure 1.2 : Pierre De Ponce

A.1.2 Pouzzolane :

La pouzzolane provient de la cristallisation du magma volcanique refroidi assez lentement (lave mousseuse) silicoalumineuse. Sa densité est un peu plus élevée que celle de la ponce, variée de 700 à 900 Kg/m³. [2]



Figure 1.3: Granulats De Pouzzolane

A.2 Granulats végétaux :

A.2.1 Granulat de Liège :

Ce type de granulat est obtenu à partir des chaînes de liège en passant par le concassement de celle-ci et puis le liège est torréfié dans des autos claves vers 350°C sa densité sèche varie entre 65 et 120 Kg/m³. Le domaine d'utilisation des granulats de liège est bien la confection de la chape et de plancher. [2]

B. Granulats obtenus par traitement :

B.1. Perlite :

C'est un granulat ultra léger d'origine volcanique avec une masse volumique comprise entre 300 et 180 Kg/m³.

La perlite est obtenue par chauffage rapide à 100° C puis refroidissement brusque d'une roche volcanique riche en silice. [5]

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

La perlite riche est riche en silice (70%), mais, elle est aussi constituée d'aluminium (15%). [5]

Les mélanges de béton contenant seulement de la perlite ont des masses volumiques comprises entre 330 et 560 Kg/m³. Et avec des résistances à la compression qui varient de 0.7 à 3.1 MPa. En y ajoutant du sable, on peut obtenir des masses volumiques qui peuvent aller au-delà de 1000 Kg/m³ et accroître ainsi les résistances à la compression de 6.2 et 17.3 MPa

C. Granulats spéciaux :

C.1. Schiste expansés :

- ❖ **Composition et origine :** Les argiles ne sont pas toutes susceptibles de gonfler sous l'effet de la chaleur. En effet, seules les argiles contenant de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie sont réactives. A la fin du processus d'expansion, on obtient des particules de forme généralement arrondie, présentant une peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre.
- ❖ **Méthode de fabrication** - Certaines argiles ont la propriété de gonfler sous l'action de fortes températures de l'ordre de 1000 °C. Ce gonflement est associé à un dégagement de gaz lié au ramollissement de la matière. Lors de la cuisson, une peau se forme par vitrification à la surface du matériau. A la suite du refroidissement, on obtient un granulats léger, dur, à texture cellulaire. Par concassage, on obtient des granulats de tailles variées et dont la masse volumique apparente varie entre 300 et 1000 kg/m³.
- ❖ **Propriétés du béton:** La figure 1.4 montre la relation entre la résistance à la compression de bétons confectionnés à partir d'argiles expansées et leur masse volumique. Les résultats montrent que l'on peut obtenir des bétons de résistance tout à fait acceptable, de l'ordre de 30 à 35 MPa. Pour ce qui est des masses volumiques, elles se situent autour de 1650 kg/m³ pour les bétons légers structuraux comparativement à 1200 kg/m³ pour les bétons légers isolants. Les autres propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée sont présentées dans le tableau 1.2. [4]

Tableau 1. 2 : Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée [4]

	P kg/m ³	fc (Mpa)	Traction (Mpa) (Rc/R _τ)	E (5GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m)	Λ (kcal/mh°C)
Argile expansée	600 à 1800	5 à 35	4 à 8	6 à 20	0.3 à 0.6	6 à 7 x 10 -6	0.20 à 0.75

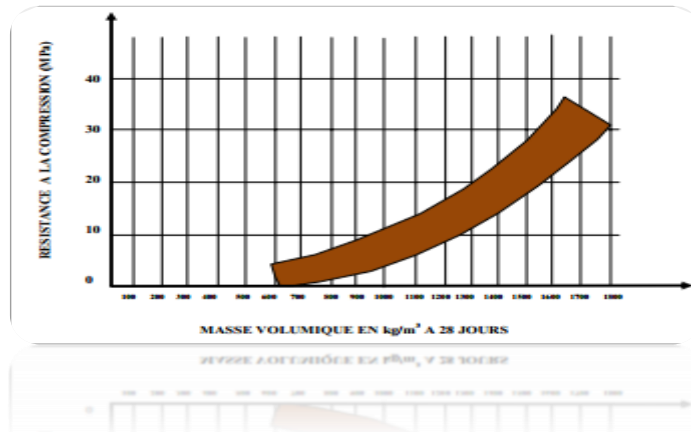


Figure 1.4 : Variation de la résistance à la compression du béton confectionné à partir d’argile expansées en fonction de sa masse volumique (dans des conditions normales de conservation : 20°C, 65% d’humidité relative) [4]

I.3.2. béton caverneux :

Ce sont des bétons obtenus par mélange de ciment et des granulats (courants ou légers) avec élimination totale, ou partiel des granulats fins (sable), avec une quantité d’eau de gâchage minimale juste nécessaire pour assurer l’enrobage des graviers. [3]

Donc le béton léger caverneux est très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l’absence de sable (granulats fins). Ce type de bétons sont utilisés dans le cas de résistance n’est pas recherchée, c’est le cas :

- ❖ des murs banché ;
- ❖ des bétons de remplissage. [4]

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa. On note une augmentation de la résistance avec l’âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale 30% de la résistance à la compression, c’est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire [4]. Le retrait de ce type de béton est plus faible par rapport un béton normale avec un très résistant au gel. [1]

Tableau I.3: caractéristiques du béton léger caverneux [6.2]

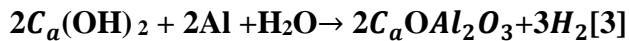
Types de bétons spéciaux	Propriétés, caractéristiques particulières	Utilisation, domaines d'application privilégiés
Bétons légers caverneux - béton caverneux de granulas légers - bétons de bois - bétons de liège	- Masse volumique réduite - Perméabilité à l'eau et l'air - Absorption acoustique	- Allègement et drainage - Absorption des bruits, réduction des bruits d'impact (écran acoustique, etc.)

I.3.3. Béton cellulaire

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

Il s'agit de mortier : le mortier général constitué d'un mélange de ciment et d'un granulat fin (sable naturel ou artificiel, de granulat léger), on additionne à ce mortier gâché fluide :

- soit une matière génératrice de gaz en présence de ciment (l'hydrogène) comme la poudre d'aluminium ce qui donne un béton de gaz



- soit par un produit moussant à base de certains savons, en cours de malaxage une infinité de petites bulles apparaisse, ce qui donne un béton –mousse. [4]

Les bétons cellulaires ont généralement une résistance à la compression et une masse volumique extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planché ou comme matériaux de remblai [4]

I.4. Les propriétés des bétons légers :

I.4.1. La masse volumique :

La masse volumique c'est une caractéristique physique plus importante dans le cadre de la présente recherche. La diminution de la masse volumique est représentée possible en changeant le type de granula et en faisant varier les proportions des différents constituants. [4], [2].

I.4.2. La porosité :

La présence de granulat possédant une porosité intrinsèque due à la présence de l'air intra-particule ; Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), d'où la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. [4]

I.4.3. La légèreté :

L'emploi de granulat léger a pour une diminution de 20 à 30% de la masse volumique de béton. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite de fondation moins importante lors de la construction. [4]

I.4.4. Les propriétés mécaniques

Parmi les propriétés mécaniques, on retrouve la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. Ces propriétés sont des paramètres secondaires dans la conception d'un béton ultra- léger puisque leur importance est relativement mineure pour ce type de béton. Toutefois, on ne peut les négliger puisque tous les bétons, peu importe l'application, nécessitent un minimum de résistance mécanique [4]

I.4.5. Conductivité thermique

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

La norme SIA 381/1 (norme suisse) donne pour les bétons légers à base d'argile expansée des valeurs de dimensionnement du coefficient de conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve. [4]

Tableau I.4: Conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons légers à base d'argile expansé et un béton courant []

Masse volumique sèche ρ du béton léger [Kg/m ³]	Conductibilité thermique A [W/mk]
1000	0.30
1250	0.50
1500	0.70
1700	1.00
2400(béton armé)	1.80

I.4. 6. La rhéologie à l'état frais :

La rhéologie du béton à l'état frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité et de viscosité.

On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [4]

I.5 Classification des bétons légers :

La masse volumique du béton peut être diminuée en remplaçant certaine partie des matériaux. Donc une classification basée sur la masse volumique et la résistance à la compression. [1]

Tableau I.5: la classification du béton léger selon la masse volumique et la résistance à la compression [1]

Classification	ρ (kg/m ³)	R_c (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	<7

I.6. caractéristiques principales des bétons légers :

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité et dont la masse volumique se situe dans les limites de 500 à 1800 Kg/m³.

Les bétons légers se subdivisent en trois groupes :

Chapitre I : Généralité sur les bétons légers

- a. Béton d'isolation thermique (calorifuge) dont la masse volumique est 500 Kg/ m^3 et la résistance mécanique à la compression est variée entre 10 et 35 Kgf/ cm^2 .
- b. Béton calorifuge et porteur dont la masse volumique variée entre 500 et 1400 Kg/ m^3 et la résistance mécanique à la compression entre 35 et 100 Kgf/ cm^2 .
- c. Béton porteur (de Construction) dont la masse volumique est variable entre 1400 et 1800 Kg/ m^3 et la résistance à la compression entre 150 et 400 Kgf/ cm^2 . [6]

I.7. Différence entre le béton léger et le béton classique :

Malgré la bonne qualité, les bétons classiques présentent toujours des inconvénients à savoir :

- Le poids propre des éléments de béton très élevé qui peut présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité portante.
- Mise en œuvre assez délicate
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocre.

En revanche l'utilisation d'un béton de faible masse volumique peut être bénéfique en terme :

- D'éléments porteurs de faible section.
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité portante
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique. [6]

I.8. Domaine d'utilisation des bétons légers :

Selon leur résistance, les bétons légers sont utilisés soit comme :

- ❖ **Béton de structure** : C'est le cas des bétons légers de haute performance, les bétons au laitier expansé, à l'argile frittée expansée...etc.
- ❖ **Isolant porteur** : C'est le cas des bétons à la pierre ponce, béton à l'argile expansé...etc.
- ❖ **Isolants** : leur résistance est faible, dans cette catégorie on peut citer : Les bétons cellulaires

I.9. Avantages du béton léger :

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, tel que :

- ✓ L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique
- ✓ Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.
- ✓ Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger à une densité de 0.4 à 1.2 en comparaison de 2.2 à 2.5 pour un béton classique.
- ✓ Non inflammable
- ✓ Economie sur le ferrailage des éléments.
- ✓ Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations. [1,2]

I.10. Désavantages du béton léger :

- ✓ Le prix est plus élevé à cause du dosage en ciments plus important.
- ✓ La mise en place est délicate car le béton est plus sensible.
- ✓ Consommation d'eau plus importante, granulats à porosité importante.
- ✓ Il est difficile de le mettre en place avec une pompe à béton. [2]

I.11. Conclusion :

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie. D'abord des problèmes liés aux choix du matériau utilisés et aux méthodes d'allégier le béton. Nous précisons que :

- Le béton léger est réalisé par la réduction de la masse volumique par le remplacement d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces porosités peuvent être incorporées :
 - Au sein de granulat
 - Dans la pâte de ciment
 - Entre les gros granulats par suppression des granulats fins.

Le béton léger est utilisé dans plusieurs domaines : l'isolation thermique, phonique et acoustique, et la résistance à la compression est faible par rapport au béton ordinaire



Chapitre II :

Valorisation des déchets plastiques dans
le génie civil

Chapitre 2 : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

II.1 Introduction

Cette partie est consacrée aux recherches et au développement dans la conception et l'application des granulats composites à base de plastique revalorisé dans le béton ou mortier jusqu'aux ultimes résultats recueillis par différents chercheurs nationaux et internationaux qui ont marqués ce secteur de recherches.

II.2 Définition

Les polymères, appelés communément « matières plastiques », sont inséparables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils sont imposés dans tous les domaines de nos activités : des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leurs utilisations dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

Le polyéthylène est l'un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique. Son nom vient du fait qu'il est le polymère obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) en une structure complexe de formule générique : [7]

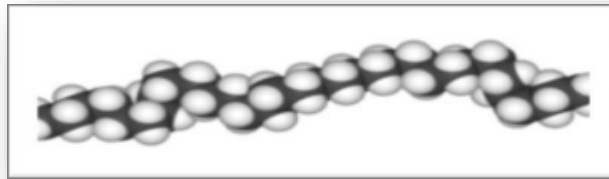
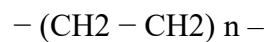


Figure II.1 : Schéma représentatif du polyéthylène [7]

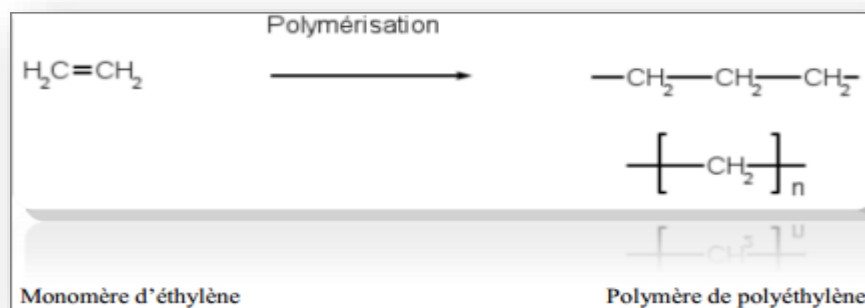


Figure II.2 : Polymérisation du polyéthylène [7]

II.3 Historique :

Le polyéthylène de basse densité a été inventé en 1933 par E.W Fawcett et R.O. Gibson.

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Le polyéthylène haut densité est synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler.

Le polyéthylène de basse densité linéaire a été inventé en 1970.

On distingue deux familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- ❖ Le polyéthylène de basse densité ou PEBD : $0.86 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0.92 \text{ g/cm}^3$
- ❖ Le polyéthylène haute densité ou PEHD : $0.95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0.97 \text{ g/cm}^3$.

Le PEBD est plus ramifié que le PEHD, ce qui signifie que les chaînes ne s'assemblent pas bien entre elles. Les forces intermoléculaires de type force de Van der Waals sont donc plus faibles. Il en résulte une plus faible densité, une plus grande malléabilité et une biodégradabilité plus rapide [14,7].

Il est utilisé dans les domaines les plus divers. Sa densité est inférieure à celle de l'eau. Il présente une bonne résistance chimique, il est chimiquement neutre pour les denrées alimentaires. Il est transparent et peut être facilement transformé car il se prête très bien au soudage. Sa durée de vie est très longue à cause de sa grande stabilité mais il se recycle bien. Sa perméabilité relative est de 2,25 [14,7].

II.4 Propriétés du PEBD :

II.4.1 propriétés rhéologiques

A l'état fondu, les PEBD sont des liquides viscoélastiques non linéaires, leur viscosité dynamique varie en fonction du gradient de vitesse. [18,7]

A indice de fluidité identique, les polyéthylènes linéaires (PE-BDL, mPE-BDL) sont plus visqueux pour des gradients de vitesses élevés que les produits radicalaires (PE-BDR).

II.4.2 Propriétés physico-chimiques

Le PEBD est un polymère semi-cristallin, de densité située entre 0.86 et 0.92. Son taux de cristallinité est d'environ 43% à 50% et sa température de fusion cristalline est située entre 105°C et 115°C [16].

En général, le PEBD présente une bonne résistance chimique, il est [16,7] :

- Très résistant aux acides faibles.
- Résistant aux acides forts non oxydants.
- Très résistant aux bases faibles et fortes.

II.4.3 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer entre autres [16,7] :

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa.
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000%.

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500MPa.

II.5 Types de plastiques et ses déchets recyclés :

Les quantités des plastiques consommés annuellement partout dans le monde ont connu un développement phénoménal. Ses caractéristiques particulièrement faciles à utiliser, flexibilité unique, facilité de fabrication ajoutée à son immense efficacité et longévité sont les raisons principales d'une telle croissance astronomique. Au très large utilisation dans les emballages, les applications industrielles, les matières plastiques sont également largement utilisés dans les systèmes de livraison médicaux, implants artificiels et des applications de soins sanitaire, préservation et distribution alimentaire, application dans le bâtiment, la communication et l'industrie électronique,...etc. [8]

Le Tableau 11 détaille les utilisations des matières plastiques et les plastiques recyclés

Tableau II.1 : Diverses utilisations des matières plastiques vierges et recyclées. [8]

Nom du plastique	Description	Certaines utilisations du plastique vierge	Certaines utilisations des plastiques fabriqués à
Poly téréphtalate d'éthylène (PET)	Plastique claire et dure, peut réutiliser pour faire des fibres	Bouteilles pour boissons gazeuses et eaux minérales, rembourrage pour sacs de couchage et oreillers, fibres textiles	Bouteilles de boissons gazeuses, bouteilles de détergent (multicouches), film transparent pour emballage, fibres de tapis, vestes laineuses
Polyéthylène Haute Densité(PEHD)	Plastique très fréquent, habituellement blanc ou coloré	Sacs à provisions, sacs de congélation ondulée, bouteilles de lait et de crème, bouteilles de shampoing et produits de nettoyage, caisses de lait	Bacs à compost, bouteilles de détergent, caisses mobiles, poubelles, tuyaux agricoles, palettes, caisses de recyclage aux bords des trottoirs
Polychlorure de vinyle non plastifié(UPVC)	Plastique dure et rigide peut être clair	Bouteille de jus, douilles d'ampoules, tubes et raccords de plomberie	Bouteilles de détergent, tuiles, tuyaux et raccords de plomberie
Polychlorure de vinyle plastifié	Plastique Souple, clair et élastique	Tuyaux d'arrosage, semelles de chaussures, sacs et tubes pour prélèvement de sang	Tuyaux flexibles d'intérieur, sols industriels

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Polyéthylène A basse densité(PEBD)	Plastique mou et flexible	Couvercles des pots de crème glacée, sacs à ordures, poubelles, feuilles de plastique	Film pour l'industrie du bâtiment, les pépinières, l'industrie de l'emballage, sacs
Polypropylène (PP)	Plastique dur, mais souple – de nombreuses utilisations	Pots pour crème glacées, Sacs de chips, paillettes pour boissons, boîtes et emballage alimentaire	Bacs de compost, caisses aux bords des trottoirs de récupération pour le recyclage, usinage sans fins
Polystyrène (PS)	Plastique rigide et fragile, peut être clair et vitreux	Pots de Yaourt, couvercles en plastique, imitation de cristal «verrière»	Pinces à linge, cintres, accessoires de bureau, bobines, règles,
Polystyrène Expansé(PSE)	Mousseux, léger, absorbant l'énergie, isolant thermique	Gobelet pour boissons chaudes, plats à emporter et récipients de nourritures,	

II.6 Avantages des matières plastiques :

La croissance de l'utilisation du plastique est due à ses propriétés bénéfiques, qui comprennent:

- ❖ Polyvalence extrême et sa capacité d'adaptation pour répondre aux besoins techniques spécifiques.
- ❖ Un poids plus léger que les matériaux concurrents réduisant ainsi la consommation de carburant pendant le transport.
- ❖ Bonne sécurité d'hygiène pour les emballages alimentaire.
- ❖ Longévité et durabilité.
- ❖ Résistance aux produits chimiques, à l'eau et à l'impact.
- ❖ Excellentes propriétés d'isolation thermique et électrique.
- ❖ Coût de production relativement bas.
- ❖ la capacité de combiner avec d'autres matériaux comme l'aluminium, du papier, adhésifs.

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

- ❖ Matériau de choix pour l'utilisation de tous les jours, style de vie humain et matière plastiques on actuellement inséparables [8 et 9].

II.7 Inconvénients des matières plastiques :

La production du plastique comprend également l'utilisation des produits chimiques potentiellement nocifs, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants. Beaucoup d'entre eux n'ont pas subi une évaluation des risques environnementaux et leur impact sur la santé humaine et l'environnement, sont actuellement certains, à titre d'exemple les phtalates, qui sont employés dans la fabrication de PVC.

Des évaluations des risques sur les effets des phtalates sur l'environnement sont actuellement menées. L'élimination des produits plastiques contribue également de manière significative sur leur impact environnemental, Parce que la plupart des plastiques prennent beaucoup de temps pour se décomposer, probablement pouvant aller jusqu'à des centaines d'années, bien que personne ne sache avec certitude que les plastiques ne durent pas long temps quand ils sont mis en décharge [8].

II.8 Utilisation de déchets plastiques recyclés :

Les applications et l'utilisation des plastiques sont étendues. Certains articles en plastique tels que les emballages alimentaires deviennent des déchets juste après leurs achats. D'autres articles en plastique peuvent être réutilisés plusieurs fois. La Réutilisation des plastiques est préférable au recyclage car elle consomme des quantités moindres d'énergie et des ressources.

En plus de la nécessité de réduire les quantités des déchets en plastique par élimination, la réutilisation et la revalorisation du plastique peut avoir plusieurs autres avantages:

- ❖ Conservation des énergies fossiles non-renouvelables, la production en plastique utilise 8% de la production mondiale du pétrole dont 4% comme matière première et 4% au cours de la fabrication.
- ❖ Réduction de la consommation énergétique.
- ❖ Réduction des déchets solides mis en décharges.
- ❖ Réduction des émissions du dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (NO) et du dioxyde de soufre (SO₂) [8].

II.9 Classification des plastiques réutilisés et revalorisés dans le béton et mortiers:

a). Polypropylène Vierge:

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Les fibres de polypropylène vierge de 19 mm ,12 et 6mm de longueur .

b). Le plastique recyclé des résidus d'automobiles broyés

Résidus broyés d'automobiles composés essentiellement du plastiques mixtes et certains en caoutchouc, avec une dimension maximale des particules de 19 mm ils sont sous forme de flocons.

c). Plastique recyclé (déchiqueté)

La matière plastique recyclée (déchiquetée) est produite par broyage du plastique obtenu à partir de la récupération des plastiques mélangés, le processus donnant des flocons plans de plastique avec une dimension maximale de 25 mm (1pouce). [8 et 9]

La figure II.3 présente certains types des agrégats en plastique.

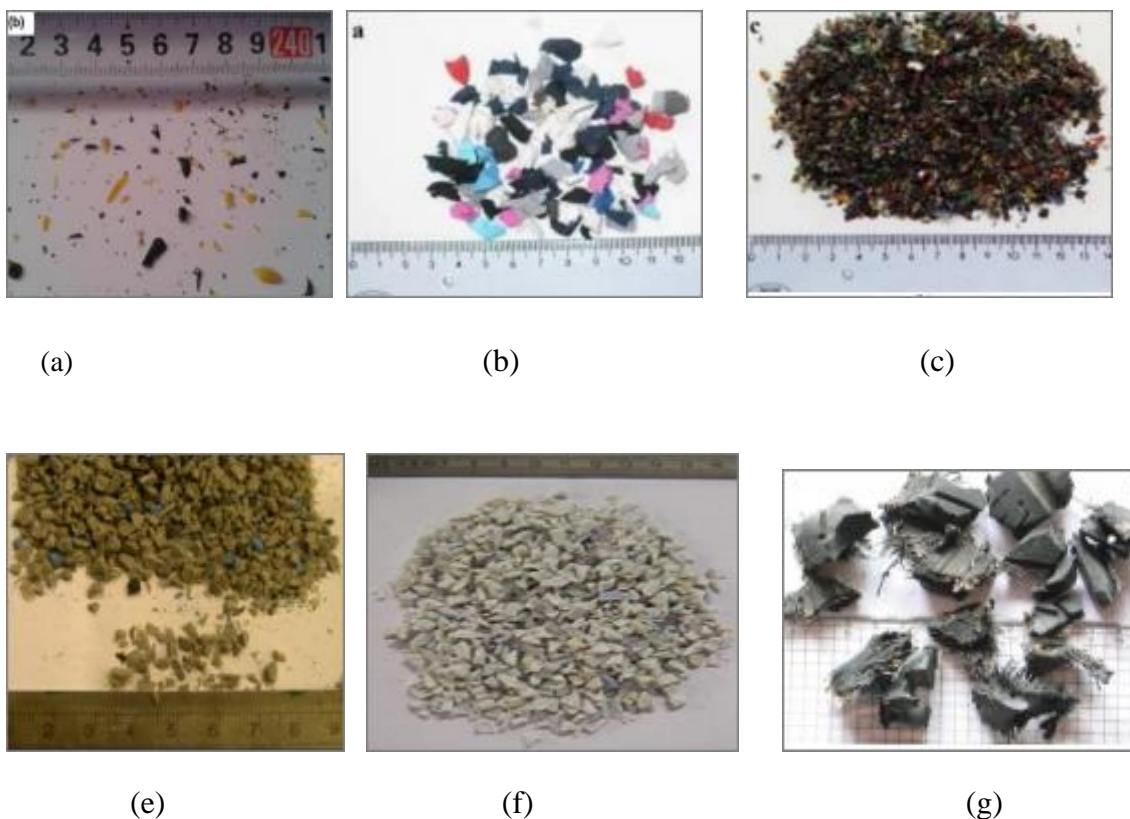


Figure II.3 : Types des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier. (a) Polyéthylène à haute densité (PEHD) [44], (b) Ethylène acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm) [43], (c) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4 mm) [43], (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm) [15], (f) Polycarbonate (PC) (<5mm) [37], (g) Caoutchouc pneumatique [10]

II.10 Valorisation des déchets plastiques et les utilisations dans le béton et mortier :

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Une croissance substantielle de la consommation de plastique a été observée dans le monde entier ces dernières années, ce qui a entraîné d'énormes quantités de déchets liés aux plastiques. Le recyclage des déchets plastiques pour produire de nouveaux matériaux comme le béton ou le mortier apparaît comme l'une des meilleures solutions pour éliminer les déchets plastiques, en raison de ses avantages économiques et écologiques. [8]

Plusieurs travaux ont été effectués ou sont en cours pour évaluer les propriétés des matériaux de

Ciment contenant divers types de déchets plastiques en tant qu'agrégés, charges ou fibres. [8]

II.11 Types et quantités de substitutions des agrégats naturels par des agrégats légers dans le mortier / béton

Les agrégats légers sont généralement produits à partir de grandes quantités de déchets des matières à basse densité. Les substitutions partielles et totales des granulats naturels par des granulats légers ont été signalées dans différentes références. Le Tableau II.2 met en évidence les types et les quantités de substitution de granulats naturels par les agrégats légers dans la préparation de mortier et du béton.

Tableau II.2 : Propriétés de certains types de déchets légers utilisés comme agrégat.

Référence	Type de granulats	Taille de la particule	Origine du granulat	Densité	Composite	Type et taux de la substitution
Ghenouti et al. [11]	PBW (PEBD)	$0.1 \leq d \leq 5$ mm	Sacs plastique	0.87	Béton	Granulats fins, 10%, 20%, 30%, 40 %
Abdelhak Badache et al. [12]	PEHD	≤ 3.15 mm	Tuyaux (PEHD)	0.922	Mortier	Granulats, 15%, 30%, 45%, 60%
Saikai et al [8]	PET	$4 \text{ mm} \leq d \leq 11.2$ mm	Bouteille en PET	1.34	Béton	Granulat 5%, 10%, 15% du volume
Nahla Hilal [13]	PEBD	/	/	0.94	Béton Mortier	Agrégat fin 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%
Ghenouti et al. [14]	SCC	D= 30 μ m L= 12 mm	/	0.9	Béton de fibre	Varie la longueur de fibre entre 2 cm, 4cm et 6 cm

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Ghenouti et al. [15]	MPBW	$0.1 \leq d \leq 5 \text{ mm}$	Sacs plastique	0.87	Mortier	Granulats fins, 10%, 20%, 30%, 40 %
Abhishek Jain et al [17]	PBW (PEBD)	$3 \leq d \leq 5 \text{ mm}$ $15 \leq L \leq 30 \text{ mm}$	Sacs plastique	0.3 9	Béton	Agrégat fin, 0%, 5%, 10%, 15%, 20%
Mohamed Ghendouz et al [16]	PEBD et PET	D=0.35mm pour PEBD D= 50mm pour PET	Bouteille Enceinte d'emballage	0.87 et 1.23 respectivement	Béton de sable	Par rapport la masse des granulats fins, 10%, 20%, 30%, 40 % de poudre et 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% de fibre par rapport volume du béton
Latrouch Noureddine[10]	PVC				Mortier	Granulats fins, 15%, 25%, 50%, 75 %

II.12 Evolution des propriétés des mortiers/ bétons à base des granulats légers :

Les propriétés des déchets plastiques, pour être utilisé comme un agrégat dans les préparations des bétons et mortiers telles que la distribution granulométrique, la densité apparente, et l'absorption de l'eau ont été généralement évaluée dans la majorité des études publiées. L'évaluation de la distribution granulométrique des agrégats en plastique a été faite en général par des méthodes classiques de tamisage

I.12.1. Maniabilité (Affaissement) :

La maniabilité est une propriété intrinsèque du matériau frais. Elle détermine la facilité de sa mise en œuvre. Cette propriété peut affecter les caractéristiques mécaniques du matériau à l'état durci.

La maniabilité du béton et de mortier contenant un agrégat de plastique a été étudiée de façon approfondie, quelques résultats trouvés dans diverses études sont représentés dans le tableau II. 3.

Tableau II.3 : l'effet de remplacement des déchets plastiques sur la maniabilité

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Ghernouti et al. [14]	SCC	Béton de fibre	Augmente par 13%

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Ghernouti et al. [11]	PBW (PEBD)	Béton	Augmente par 82%
Mohamed Ghendouz et al [16]	PEBD et PET	Béton de sable	Pour la poudre plastique (PEBD) le temps d'écoulement est diminué par 50% et pour les fibres de PET il y a une augmentation dans temps d'écoulement par 66%

II.12. 2 La masse volumique :

Le plastique a une densité inférieure à celle des agrégats naturels et on s'attend donc à ce que leur incorporation dans les mélanges cimentaires conduit à une diminution de cette propriété. Les résultats montrent que l'incorporation de plastique comme agrégat diminue généralement la densité du béton ou mortier résultant du fait la légèreté de l'agrégat en plastique. Certains résultats sont présentés dans le tableau II.4

Tableau II.4 : l'effet de remplacement des déchets plastique sur la masse volumique

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Nahla Hilal[13]	PEBD	Mortier et béton	Réduit par 12% et 8% respectivement
Ghernouti et al. [11]	PBW (PEBD)	Béton	Réduit
Abdelhak Badache et al. [12]	PEHD	Mortier	Diminuée par 25%

II.12.3. Propriétés mécaniques

II.12.3. 1. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton et du mortier est une propriété de base qui a été étudiée en détails dans presque tous les travaux de recherche concernant les agrégats en plastique. Il a été constaté que l'incorporation des agrégats plastique a diminué la résistance à la compression du béton ou du mortier.

Le tableau II.5 montre quelques résultats de la résistance à la compression à 28 jours de durcissement du béton ou du mortier qui contiennent des agrégats en plastique.

Tableau II.5 : l'effet de remplacement des granulats naturels par des déchets plastiques sur la résistance à la compression

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Nahla Hilal[13]	PEBD	Mortier et béton	Réduit par 42% pour le mortier et par 8%

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

			pour le béton
Ghernouti et al. . [14]	SCC	Béton de fibre	Presque similaire
Manish Chaudhry et al. [18]	PEBD	Béton	Diminuée par 12%
Latrouch Noureddine. [10]	PVC	Mortier	Réduite à 28 jours par 66%

II.12.3.2. Résistance à la flexion

De manière similaire au comportement de la résistance à la compression. Le tableau suivant montre les résultats trouvés par certaines recherches sur le béton ou mortier.

Tableau II.6 : l'effet de remplacement des déchets plastique sur résistance à la flexion

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Ghernouti et al. [14]	SCC	Béton de fibre	Augmente avec l'augmentation de la longueur de la fibre par 13%
Abdelhak Badache et al. [12]	PEHD	Mortier	La valeur optimale à 28j est 4Mpa. La résistance à la flexion est réduit par 37%
Latrouch Noureddine. [10]	PVC	Mortier	Réduit à 28 jours par 39%

II.12.4. Performance de durabilité :

Plusieurs recherches ont été menées sur l'évaluation des facteurs de la durabilité pour le béton / mortier contenant des agrégats plastiques. Il s'agit notamment de la porosité, l'absorption d'eau et la pénétration des ions chlorure.

II.12.4.1 pénétration des ions chlorure :

L'attaque par les chlorures se distingue par fait qu'elle entraîne la corrosion des armatures et qu'ensuite, comme conséquence de ce phénomène, le béton armé est dégradé. La résistance à la pénétration d'ions chlore dans le mortier et le béton est l'une des questions plus importantes au sujet la durabilité des structures en béton.

Le tableau II.7 présente certains résultats des chercheurs qui ont utilisé différents types des agrégats en plastique.

Tableau II.7 : l'effet de remplacement granulats naturels par des déchets plastiques sur la profondeur de la pénétration des ions chlorure

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Ghernouti et al. [11]	PEBD	Mortier	chute de la profondeur des ions chlores

Chapitre II : Valorisation des déchets plastiques dans le génie civil

Gouasmi et al [8]	WPLA(waste PET lightweighth aggregates)	Mortier	La perméabilité aux ions chlorure contenant 100% de WPLA est inférieur 90% que mortier témoins
-------------------	---	---------	--

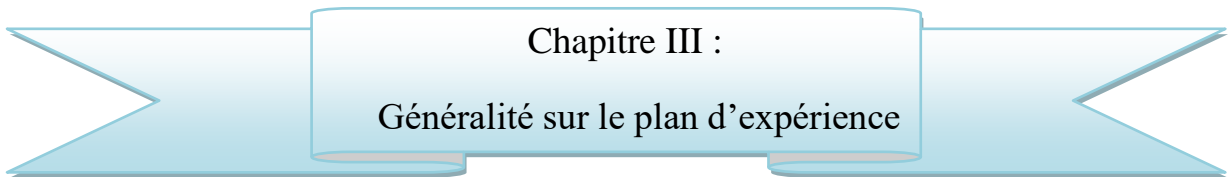
II.12.4.2 L'absorption d'eau :

Tableau II.8 : l'effet de remplacement sur l'absorption d'eau

Chercheur	Type de granulat	Composite	Résultats
Beniman Samir et al[19]	PET	Béton	La diminution de l'absorption d'eau du béton environ 9%
Tittarelli et Shah	GFRP	Mortier	L'incorporation de 5% et 10% de poussière de GFRP diminue l'absorption capillaire d'eau respectivement 60% et 40%

II.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les différents types des déchets plastiques et les résultats trouvés à partir des études réalisées par des chercheurs nationaux et internationaux



Chapitre III :
Généralité sur le plan d'expérience

Chapitre 3 : généralités sur le plan d'expérience

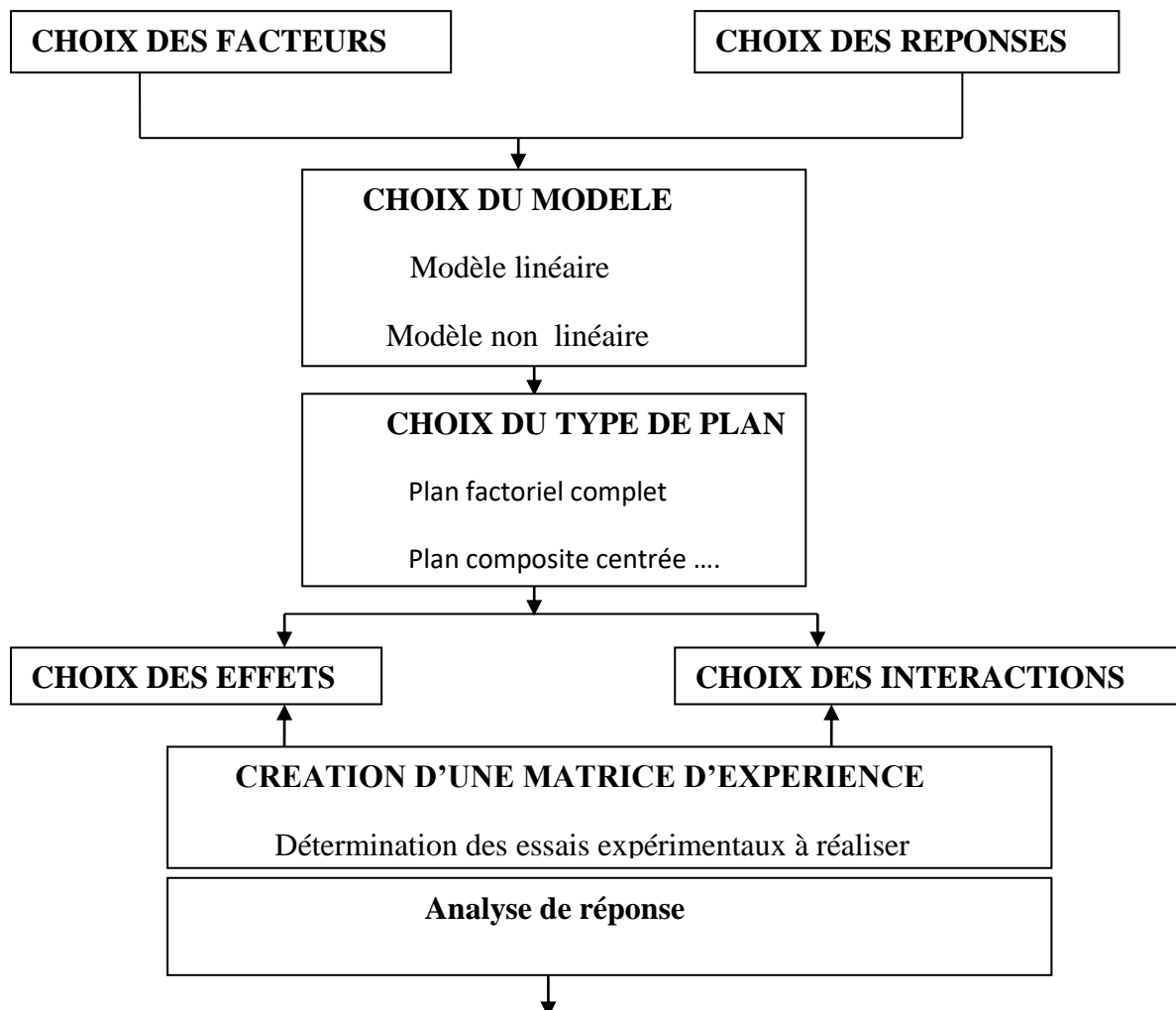
III.1. Introduction :

La plupart des ingénieurs et techniciens améliorent leurs produits ou leurs processus de production à partir des expériences. Malheureusement, les stratégies couramment utilisées pour mener ces expériences sont souvent coûteuses et peu performantes et elles conduisent à de nombreuses expériences difficiles exploitables. Pour toutes ces raisons, de nombreux ingénieurs et techniciens font appel à la planification des expériences. [23]

La technique des plans d'expérience consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs à chaque essai. Ceci permet de réduire fortement le nombre d'expérience à réaliser tout en augmentant le nombre des facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse. Donc, l'utilisation des plans d'expériences minimisera le plus possible le nombre d'expériences. [24]

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthodologie, les différents types de plans d'expérience et les logiciels utilisés.

III.2 Démarche méthodologique :



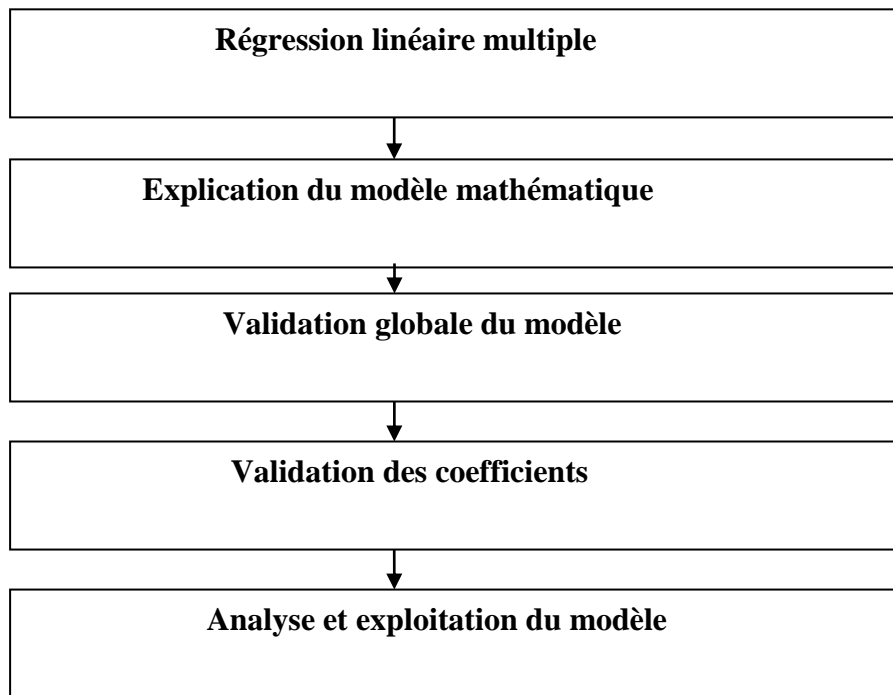


Figure III.1 : organigramme générale de traitement des plans d'expériences [25]

III.3 Contexte et objectif des plans d'expériences

Le contexte de l'utilisation des plans d'expériences recouvre des phénomènes de type « boîte noire » (Figure V.2), que l'on cherche à éclaircir pour mieux comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances. La démarche est expérimentale : l'information sur le phénomène est acquise à partir des essais. Cela impose une connaissance minimale du phénomène étudié avant d'entreprendre les essais.

Le but principal de plan d'expérience est la réduction de l'expérimentation qui coûte cher, il faut avoir pour objectif d'obtenir les informations les plus fiables et les plus efficaces possibles en minimum d'essais.

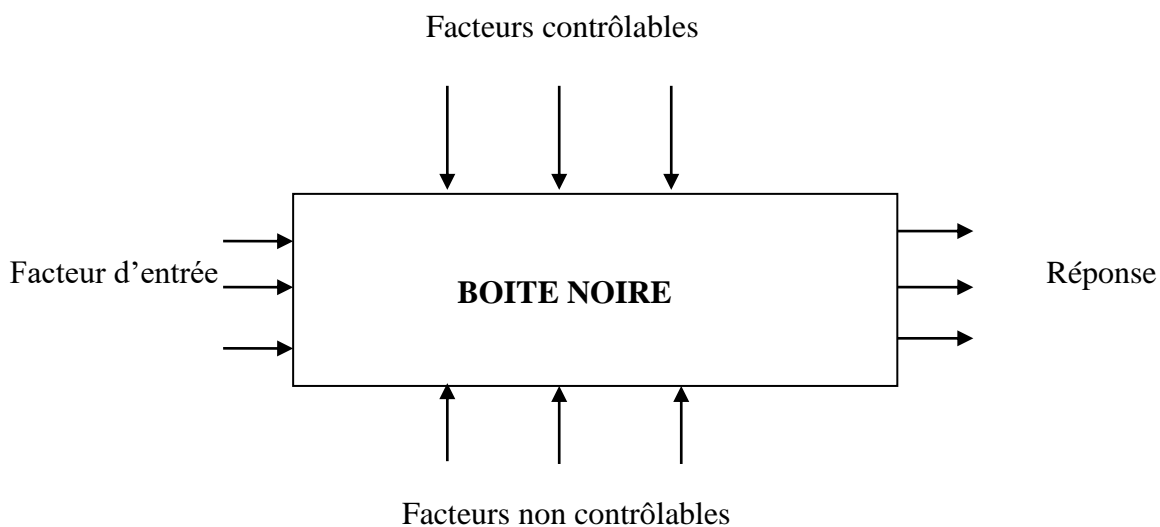


Figure III.2 : système de boîte noire [23]

Parmi les facteurs on distinguera:

Chapitre III : Généralité sur le plan d'expérience

- **Les facteurs contrôlables** : qui dépendent directement du choix (pression, température, matériau ...)
- **Les facteurs non contrôlables** : qui varient indépendamment du choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- **Les facteurs d'entrée** : dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température,...)

III.4 Terminologies:

Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. Ils existent deux types :

❖ Facteurs quantitatifs

Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue par exemple le dosage en ciment, pourcentage d'adjuvant, masse de sable etc. Et rarement à variation discontinue ex: classe de ciment qui est fixée par le cimentier

❖ Facteurs qualitatifs :

Facteurs dont la valeur est non mesurable, comme la qualité, le type, la marque, le procédé ou d'autre caractéristique qu'on ne peut quantifier par exemple le type de ciment (CPA, CPJ, CLK...), le procédé de vibration du béton (table vibrante ou aiguille).

• Niveau d'un facteur :

Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur et un niveau inférieur. Pour les facteurs quantitatifs la valeur est algébrique, donc classé numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables, alors peu importe leur classement L'important est de mettre une borne inférieure et une borne supérieure (+1 et -1). Les niveaux extrêmes de chaque facteur délimitent le domaine de l'étude [25]

• Valeurs centrées réduites ou codées :

L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quel que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1). [25]

Par exemple :

Tableau III.1 : deux facteurs à deux niveaux

Facteur	Niveau (-1)	Niveau (+1)
Dosage en ciment (kg/m ³)	300	400

Chapitre III : Généralité sur le plan d'expérience

Masse du sable (kg/m ³)	600	700
-------------------------------------	-----	-----

Pour le passage des valeurs réelles aux valeurs centrées réduites (codées) dans le cas de facteurs ayant plus deux niveaux nous avons appliqués la relation suivante :

$$a = \frac{[2 \times B - (B^+ + B^-)]}{B^+ - B^-}$$

a : niveau du facteur en valeur centrée réduite.

B : niveau du facteur en valeur réelle

B⁺ : niveau supérieur du facteur en valeur réelle

B⁻ : niveau inférieur du facteur en valeur réelle. [25]

- **La réponse :**

La réponse du système correspond au paramètre mesuré ou observé pour connaître l'effet des facteurs étudiés sur le système (ex : la résistance à la compression...). [24]

- **Les surfaces de réponse :**

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse figure III.3

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse. [25]

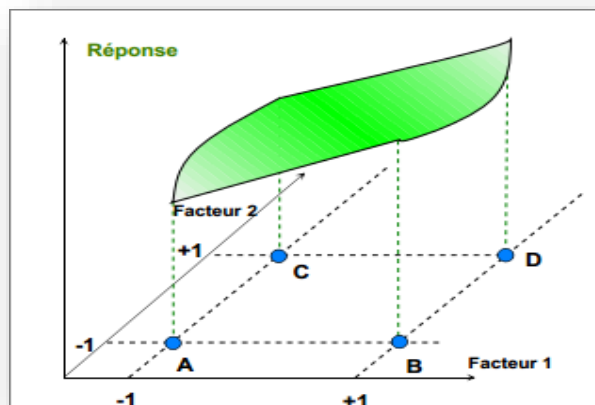


Figure III.3 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude formant la surface de réponse. [26]

- **L'effet d'un facteur**

Chapitre III : Généralité sur le plan d'expérience

L'effet d'un facteur « A » sur la réponse « y » s'obtient en comparant les valeurs prises par « y » quand A passe du niveau (-1) au niveau (+1). Soient y_1 et y_2 ces valeurs (Figure V.4).

Nous distinguons :

- ❖ **L'effet global par $(y_2 - y_1)$** : C'est la variation de réponse y quand le facteur passe du niveau bas (-1) au niveau haut (+1).
- ❖ **L'effet moyen par $(y_2 - y_1)/2$** : C'est la variation du facteur centré réduit de 2 unités (de -1 à +1).

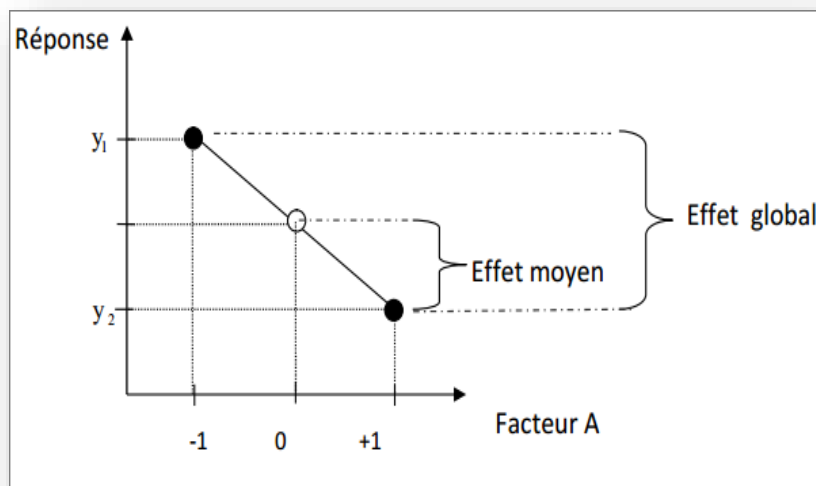
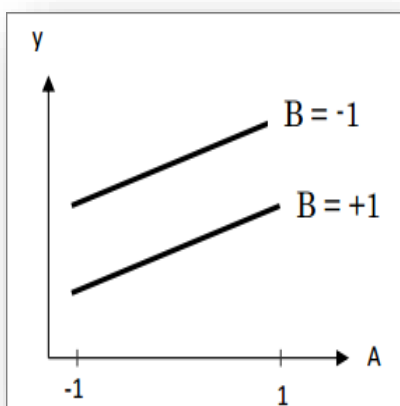


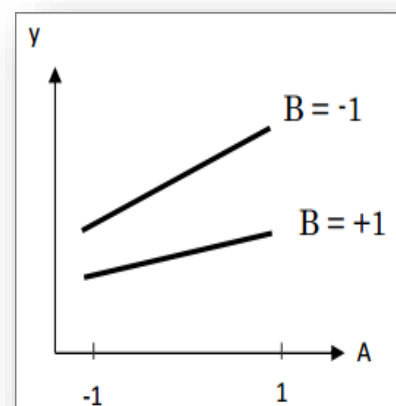
Figure III.4 : Illustration de l'effet global et de l'effet moyen

- **Notion d'interaction**

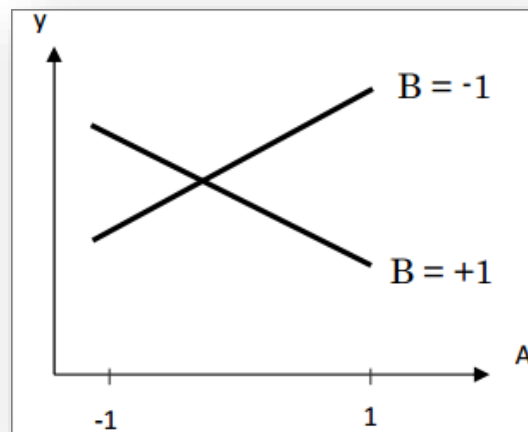
Il y a interaction entre deux facteurs A et B si l'effet de A sur la réponse dépend du niveau de B ou inversement



Pas d'interaction entre A et B



Faible interaction entre A et B



Forte interaction entre A et B

Figure III.5 : Courbes d'interactions. [23]

III.5 Type des plans d'expériences :

Il existe plusieurs types de plan d'expérience, on cite les types suivants :

III.5.1. Plan factoriels complets :

Ce sont les plus utilisés car les plus simples à mettre en œuvre. Ils sont notés 2^k où le 2 correspond maximal et minimal qui délimitent le domaine d'étude d'un facteur et k est le nombre de facteurs étudiés. Pour un plan factoriel complet à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir, de façon optimale, les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs noté 2^2 . [23]

III.5.2. Plan à deux facteurs :

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré Par exemple, la Figure V.6 représente un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_{12} + e$$

- **Y** : est la réponse
- **x_i** : représente le niveau attribué au facteur i.
- **a₀** : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- **a₁** : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.

Chapitre III : Généralité sur le plan d'expérience

- **a₂** : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- **a₁₂** : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- **e** : est l'écart. [18]

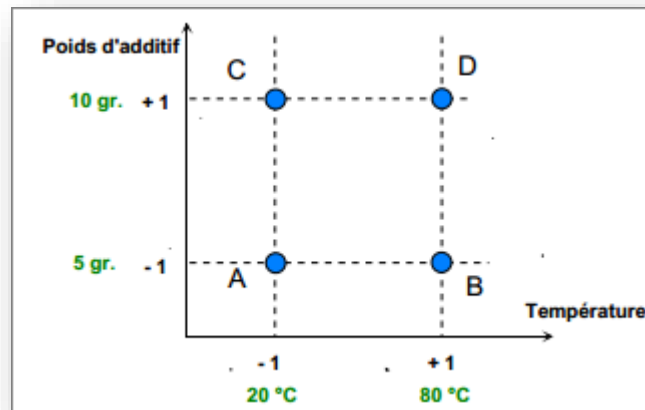


Figure III.6 : Disposition des points expérimentaux d'un plan 2^2 . [26]

III.5.3. Les plans composites centrés

Un plan composite est constitué de trois parties :

1. Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
2. Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
3. Des points axiaux. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs. [26]

Le plan composite centré consiste à réaliser les essais d'un plan factoriel, figure V.7 représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux du plan factoriel $2^{k=2}$. Le point E est le point central. Ce point peut être répété une ou plusieurs fois. Les points axiaux F, G, H et I forment ce que l'on appelle le plan en étoile. Le nombre total d'essais (N) à réaliser est la somme de :

- ❖ nf essais d'un plan factoriel complet ;
- ❖ $2k$ essais en étoile sur les axes à une distance α du centre du domaine ;
- ❖ n_0 essais au centre du domaine. [23]

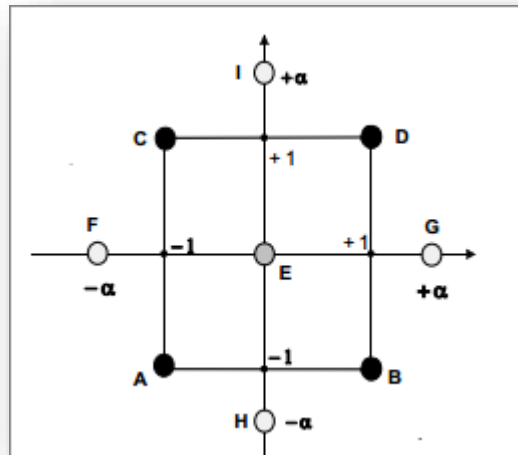


Figure III.7 : Plan composite à deux facteurs ($k = 2$). [26]

III.5.4. Plans de mélange

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. C'est le cas du triangle de Féret (figure V.8) ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

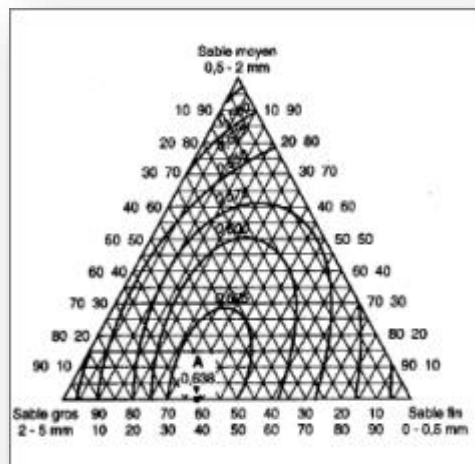


Figure V.8 : Triangle de Féret, 1892 [25]

Les sommets de triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'iso compacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en A.

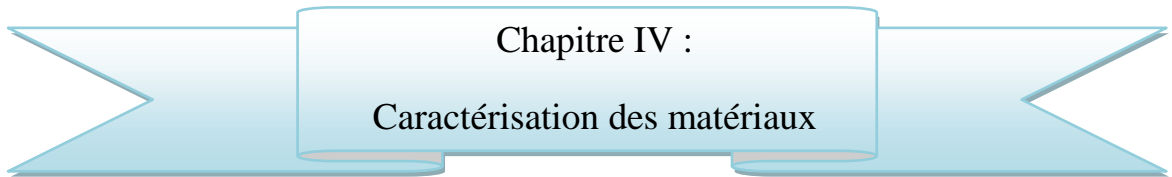
III.6 Les types des logiciels :

Dans le domaine statistique, on trouve plusieurs types de logiciels utilisés pour la modélisation d'un matériau ou un produit fabriqué pour l'amélioration de certaines caractéristiques. On cite les logiciels suivants :

- Minitab
- Le JMP
- Matlab
- Exel

III.7 Conclusion :

Les plans d'expériences sont efficaces, simples à analyser et interpréter. Ils peuvent également réduire le cout. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires.



Chapitre IV :
Caractérisation des matériaux

Chapitre 4 : Caractérisation des matériaux

IV.1 Introduction :

Les matériaux utilisés dans cette étude, ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des mortiers légers à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des constituants rentrant dans la formulation des mortiers car chacun pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude.

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du mortier léger. La méthodologie suivie pour réaliser ce travail sera aussi présentée dans ce chapitre.

IV.2 Objectif du travail :

Notre objectif est la valorisation des déchets des sacs plastiques (après un certain traitement) en guise de granulats fins dans la formulation des mortiers légers.

Notre travail consiste à remplacer un pourcentage de sable naturel par un pourcentage croissant de 10, 20, 30, 40% des granulats du déchet plastique.

IV.3. Méthodologie du travail pratique :

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Le ciment (CPJ CEM II/A-L 42.5) "GICA", de Ain Touta.
- Le sable d'oued (0/5) mm de la région de Biskra.
- Le sable concassé (0/5) mm de la carrière Ain Touta (wilaya de Batna)
- Déchet de plastique (0/4) mm.
- Eau de gâchage (l'eau de robinet).

IV.4 Matériaux utilisés et leurs caractérisations :

IV.4.1 Ciment :

On a choisi d'utiliser des produits d'usage courant, Le ciment utilisé est de type ciment Portland composé CPJ-CEMII/A- L 42.5 provenant de la cimenterie de Ain-Touta, dont les caractéristiques physico-chimiques sont donné sur les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : Caractéristique physiques du ciment employé.

Caractéristique physique	Valeurs
Densité absolue (g/cm ³)	3.15
Densité apparente (g / cm ³)	1.09

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Surface spécifique Blaine [cm ² /g]	3371
Consistance normale [% H ₂ O]	25.6
Début de prise [min]	123
Fin de prise [min]	180
Expansion à chaud [mm]	1.80
Refus au tamis 45 µm [%]	17.40

Tableau IV.2 : Composition chimique du ciment employé.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P.A.F	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Résidu insoluble
Teneur (%)	61.69	20.34	5.37	5.03	3.00	2.20	1.80	1.12

Tableau IV.3 : Composition minéralogique du ciment employé.

Elément	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	58.3	14.6	8.7	11.26

IV.4.2 Sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques et les chaleurs dégagées. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Dans tous les mélanges de notre étude nous allons utiliser deux types de sable (sable d'oued et sable concassé)

- **Sable d'oued :**

Nous avons utilisé un sable d'oued local prélevé de la région de Lioua (Wilaya de Biskra), il s'agit d'un sable fin siliceux de granulométrie $\Phi < 4$ mm, désigné par SD.

- **Sable concassé :**

Nous avons utilisé un sable concassé pour la préparation des mélanges de mortier léger provient de la région d'Ain-Touta (wilaya de Batna), désigné par SC.



Figure IV.1: Sable d'oued



Figure IV.2: Sable concassé

Une série d'essais d'identification a été effectuée sur le matériau granulat utilisé, naturel et recyclé

Les résultats des essais physiques sur le sable d'oued et le sable concassé, qui effectuées sur le deux types du sable sont résumés au tableau suivant :

Tableau IV.4 : caractéristiques physiques des sables (0/5) mm

Caractéristiques	SD	SC
Masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm ³)	2.66	2.6
Masse volumique apparent lâche ρ_{apl} (g/cm ³)	1.39	1.34
Masse volumique apparent compact ρ_{apc} (g/cm ³)	1.63	1.53
Porosité p(%)	48.15	/
Compacité C(%)	51.85	/
Equivalent de sable visuel Esv (%) (avant lavage)	56.23	80
Equivalent de sable piston Esp (%) (avant lavage)	60	84
Equivalent de sable visuel Esv (%) (après lavage)	78	/
Equivalent de sable piston Esp (%) (après lavage)	82	/
Absorption Ab (%)	1.5	/
Teneur en eau W (%)	-	/

IV.4.2.1 Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1

L'analyse granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à maille carrée, de dimensions d'ouverture décroissante et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la courbe granulométrique. Courbe exprimant

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

L'analyse a été effectuée conformément à la norme européenne NF EN 933 -1.

IV.4.2.2 Module de finesse

C'est un facteur très important qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés par les tamis (0.125, 0.315, 0.630, 1.25, 2.5, 5). Il est donné par la relation suivante :

$$M_F = \Sigma R_c(\%) / 100 \quad (\text{Eq. IV.1})$$

Les résultats de l'analyse granulométrique sur le sable de Lioua sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.5 : analyse granulométrique de sable d'oued selon la norme NF EN 933-1

tamis (cm)	refus(g)	refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
2,5	13,03	13,09	1,303	98,96
1,25	96,27	109,3	10,93	89,07
0,63	431,27	540,57	54,57	45,95
0,315	396,09	936,66	93,66	6,34
0,16	59,89	996,55	99,65	0,35
0,08	2	998,55	99,85	0,15
Fond	1,43	999,98	99,99	0,01
Module de finesse		$M_F = 2.60$		

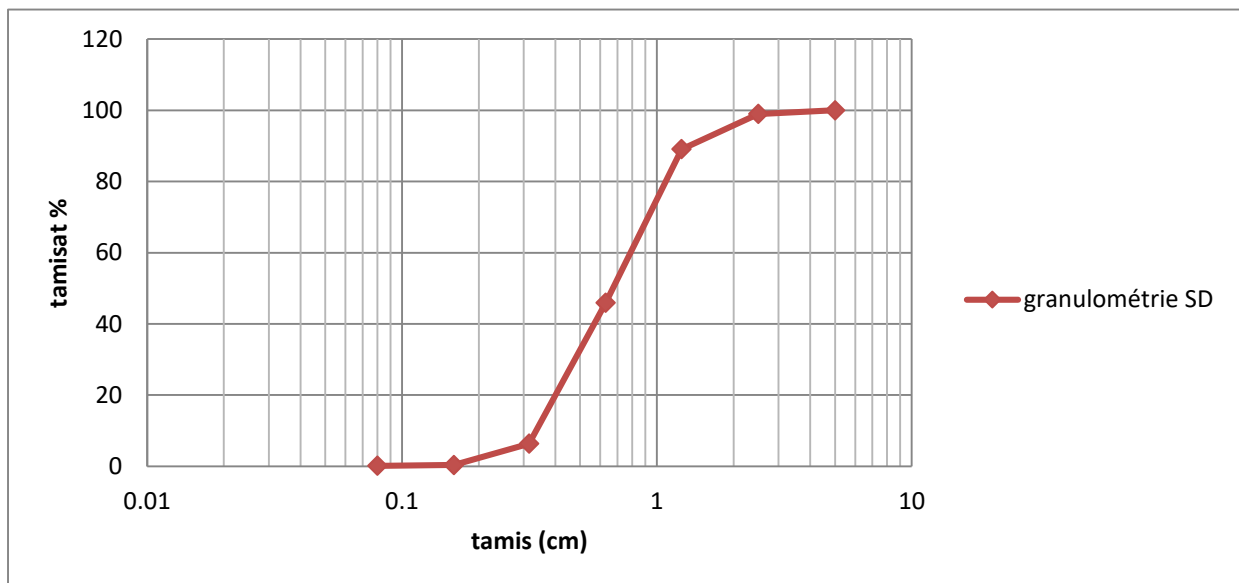


Figure IV.3 : courbe granulométrique de sable d'oued (0/5) mm.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Les résultats de l'analyse granulométrique sur le sable d'Ain- Touta sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.6 : analyse granulométrique de sable concassé selon la norme NF EN 933-1

Tamis (cm)	Refus partielle (g)	Refus cumulé		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
4	65.10	65.10	3.26	96.74
3.15	112.90	178	8.90	91.10
2.5	150.30	328.30	16.42	83.58
1.25	534.40	862.70	43.14	56.86
0.630	419.30	1282	64.10	35.90
0.315	317	1599	79.95	20.05
0.16	249.20	1848.20	92.41	7.59
0.08	123.80	1972	98.60	1.40
Fond	27	1999	99.95	0.05

Moule de finesse : 2.96

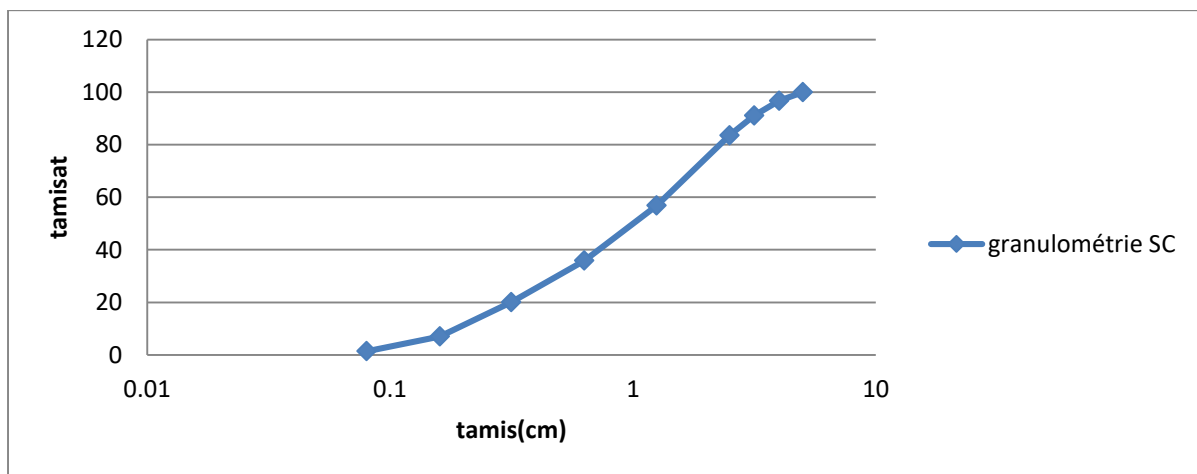


Figure IV.4 : courbe granulométrique de sable concassé (0/5) mm.

IV.5. Les granulats des déchets (sacs plastiques)

Les sacs plastiques sont des polyéthylènes base densité PEBD, ce sont les matières les plus utilisés et les plus rejetées dans la nature. Le seul moyen de leur recyclage est par fusion.

Les granulats fins sont obtenus par la fusion et le broyage des sacs plastiques. Le procédé de leur fabrication est détaillé dans les figures suivantes : [11]

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

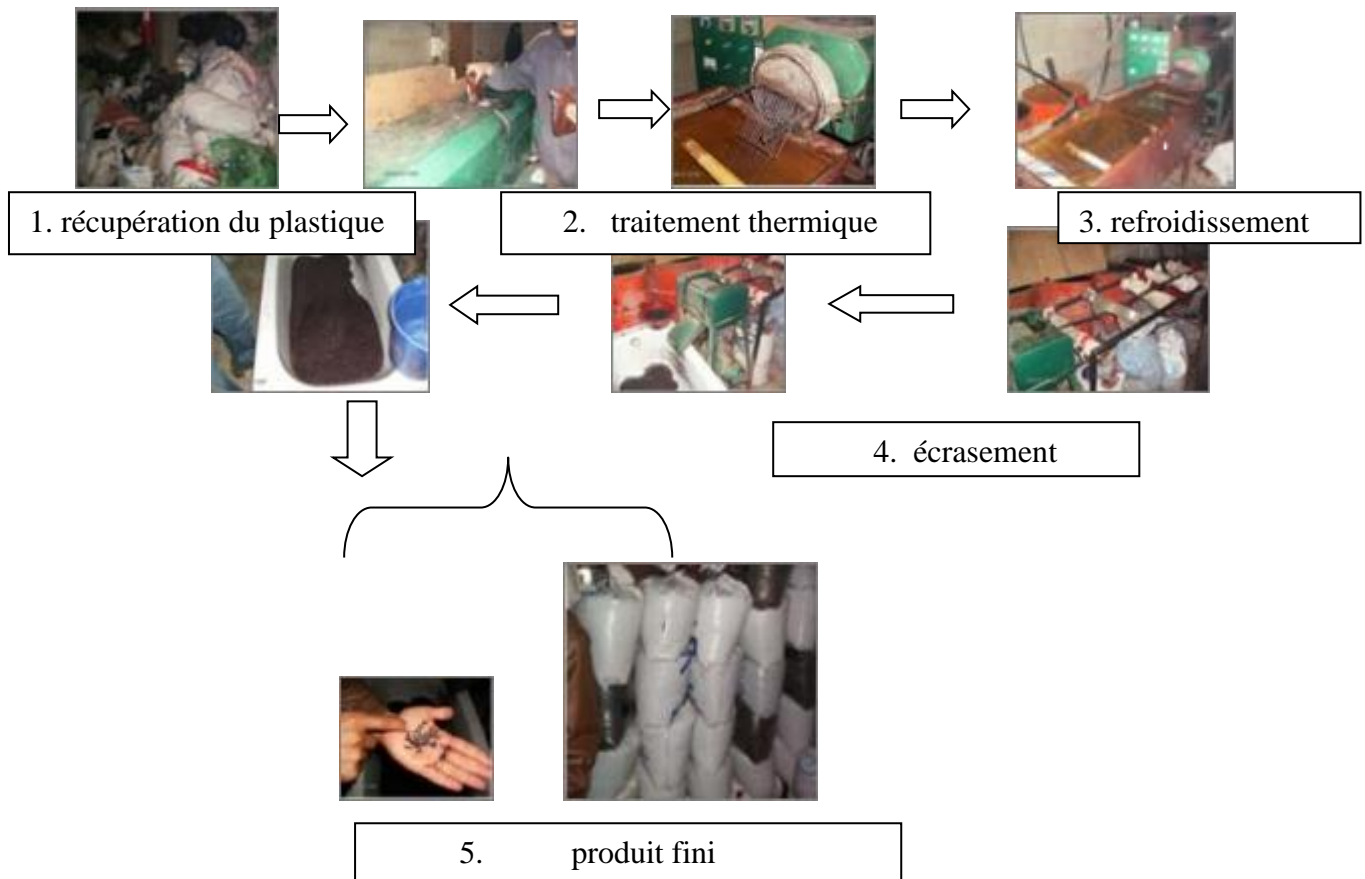


Figure IV.5 : Etapes de l'obtention des granulats plastiques [11]

Les granulats obtenus ont des dimensions de 4 mm, leurs caractéristiques sont illustrées sur le tableau suivant :

Tableau IV.7 : caractéristiques physiques des granulats plastiques (0/4) mm selon la norme NF EN 933-1

Caractéristique	Résultats
Masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm ³)	0.87
Masse volumique apparent lâche ρ_{apl} (g/cm ³)	0.54
Masse volumique apparent compact ρ_{apc} (g/cm ³)	0.6
Porosité p(%)	37.84
Compacité C(%)	62.16

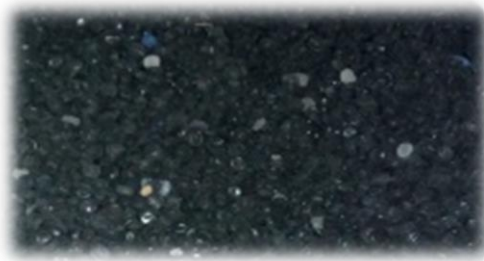


Figure IV.6. Granulats plastiques utilisés

Tableau IV.8 : analyse granulométrique de plastique selon la norme NF EN 933-1

tamis (cm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	tamisât (%)
5	0	0	0	100
4	636,5	636,5	79,56	20,44
2,5	158,4	794,9	99,36	0,64
2	1,88	796,78	99,59	0,41
1,25	1,51	798,29	99,78	0,22
fond	1,62	799,91	99,98	0,02

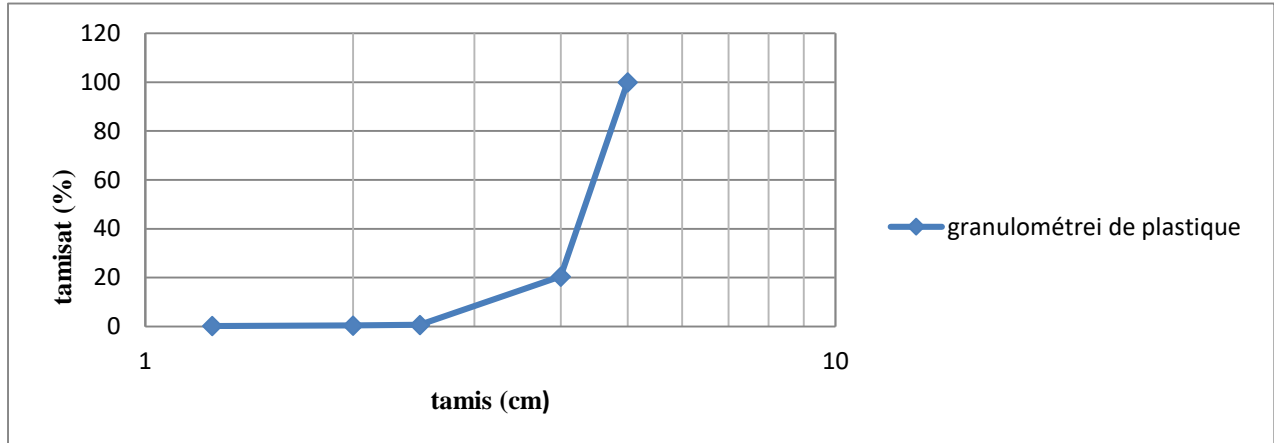


Figure IV. 7 : courbe granulométrique du plastique (0/5) mm.

Caractérisation granulométrique des mélanges

La substitution du sable naturel par les granulats plastiques pour la confection des mortiers est faite à raison de 10%. (10% - 20% - 30 % - 40 %).

L'analyse granulométrique de tous les mélanges réalisés est représentée sur le tableau suivant :

Tableau IV. 9 : analyse granulométrique de mélange de 10% du plastique selon la norme NF EN 933-1

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

tamis (cm)	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
4	36,35	36,35	2.99	97,01
2,5	112,39	148,74	12.24	87,76
2	127,99	276,73	22.77	77,23
1,25	54,43	331,16	27.25	72,75
0,63	202,82	533,98	43.94	56,06
0,315	557,45	1091,43	89.82	10,18
0,16	97,82	1189,25	97.88	2,12
0,08	32.64	1221,89	99.56	0,44
Fond	6.32	1228,97	99.99	0,01
Module de finesse : 2.71				

Tableau IV.10 : analyse granulométrique de mélange de 20% du plastique.

tamis (cm)	Refus partiel (g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât%
5	0,81	0.81	0,069	99.931
4	101,12	101.93	8.75	91.25
2,5	192,96	294.89	25,33	74.67
2	54,68	349.57	30,033	69.97
1,25	72,61	422.18	36,26	63.74
0,63	122,65	544.83	46,80	53.2
0,315	252,66	797.49	68.51	31.49
0,16	270,07	1067.56	91.71	8.29
0,08	59.17	1126.73	96.79	3.21
Fond	5,7	1132.43	97.28	2.72
Module de finesse : 2.68				

Tableau IV.11 : analyse granulométrique de mélange de 30% du plastique.

tamis (cm)	Refus partielle (g)	refus cumulés (g)	refus cumulé	tamisât%
5	0,57	0,57	0,058	99,94
4	178,47	179,04	18,29	81,71
2,5	126,53	305,57	31,22	68,78
2	42,04	347,61	35,52	64,48
1,25	54,79	402,4	41,12	58,88
0,63	230,38	632,78	64,66	35,34
0,315	212,96	845,74	86,43	13,57
0,16	104,79	950,53	97,14	2,86

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

0,08	25,77	976,3	99,77	0,23
Fond	2,02	978,32	99,98	0,02
Module de finesse : 2.77				

Tableau IV.12 : analyse granulométrique de mélange de 40% du plastique.

tamis (cm)	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât%
5	0,54	0.54	0,054	99,94
4	186,21	186.75	17,84	82,16
2,5	122,91	309.66	31,64	68,36
2	35,35	345.01	35,26	64,74
1,25	52,6	397.61	40,63	59,37
0,63	112,12	509.73	52,09	47,91
0,315	302,68	812.41	83,3	16,7
0,16	119,11	931.52	95,2	4,8
0,08	42	973.52	99,49	0,51
Fond	4,23	977.75	99,92	0,08
Module de finesse : 3.09				

❖ Mesure la porosité des mélanges

La porosité P des sables à été mesurée à l'aide d'un récipient de capacité continue. Pour chaque combinaison, les sable sont mélangés manuellement puis par malaxeur durant un seconde avec une vitesse constante afin d'assurer la bonne homogénéisation de mélange suivant est de peser le récipient remplie avec le mélange des sables et plastiques sans aucune vibration ou compactage, la formule suivante (Equation) permet calculer la porosité P. [20]

$$P = 100 \left(1 - \frac{W_{rm} - W_r}{V_r \times \rho_m} \right)$$

IV.6. Elaboration des mortiers composites légers

Les mortiers légers sont réalisés par le remplacement du sable naturel en volume par un pourcentage croissant de (10, 20, 30, 40%) des granulats plastiques.

L'étude se fait sur un mortier selon la proportion suivante (1 part de ciment, 3 parts du sable et E/C= 0.5). Le détail des composites est présenté dans le tableau III.14

Les mortiers réalisés seront désignés en fonction de leurs teneurs en granulats plastiques, ils seront notés : MR X, ou X est la proportion de granulats plastique.

MR : mortier témoin

MR 10: mortier contenant 10% de granulats plastiques.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

MR 20: mortier contenant 20% de granulats plastiques.

MR30: mortier contenant 30% de granulats plastiques.

MR40: mortier contenant 40% de granulats plastiques.

Tableau IV.13 Composition des mortiers légers

Composites	Pourcentage du déchet plastique (%) (PEBD)	Mélange de sable (g)		Ciment (g)	E/C
		PEBD	Sable (SD)		
MR	0	0	1350	450	0.5
MR 10	10	44.15	1215	450	0.5
MR 20	20	88.30	1080	450	0.5
MR 30	30	132.46	945	450	0.5
MR 40	40	176.61	810	450	0.5

Les différents mortiers réalisés ont été coulés dans des moules prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc NF EN 196-1 (présenté en figure III.10) [9]. Les moules ont été couverts par de film plastique. Après 24 h, les échantillons ont été démoulés et conservés jusqu'à l'âge d'essai.



Figure IV.9 : table à choc



Figure IV.10: conservation des éprouvettes à l'eau

IV.7 procédures expérimentales :

IV. 7.1. A l'état frais :

IV.7.1.1 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Le plus connu est :

- **Table à secousses ASTM C 1437.**

Pour chaque type de mortier formulé, on mesure sa maniabilité grâce à la table à secousse (figure III.9) et conformément à la norme ASTM C 1437.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Après le malaxage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de galette ainsi obtenue. L'étalement en cm est donné par la formule : [10]

$$\text{L'étalement} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (\text{Eq. IV.3})$$

Avec D_1 et D_2 en cm L'étalement est arrondi au cm le plus proche.



Figure IV .11 : Table à secousses



Figure IV .12: essai d'étalement

IV.7.2 A l'état durci

Des essais ont été effectués à l'état durci afin de déterminer les performances physicomécaniques de nos mélanges. Il s'agit de mesurer :

IV.7.2 .1 Essais de caractérisation mécanique

IV.7.2 .1.1 Mesure des résistances mécaniques

Des essais mécaniques selon la norme EN 196-1 sont utilisés pour caractériser les mortiers à différentes échéances : 7, 28 et 60j.

➤ Résistance à la flexion (EN 196-1) :

La résistance à la flexion peut être mesurée au moyen d'une machine d'essai de résistance à la flexion ou en utilisant un dispositif approprié dans une machine d'essai de résistance à la compression. Dans les deux cas, l'appareil d'essai pour la détermination de la résistance à la flexion doit permettre d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une précision égale à $\pm 1.0 \%$ de la charge enregistrée, à une vitesse de mise en charge de (50 ± 10) N/s. Pour chaque essai, 2 éprouvettes ont été testées, la valeur retenue présente la moyenne des deux.

L'expression des résultats sera donnée par la relation :

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (\text{Eq. IV.3})$$

➤ Essais de compression (EN 196-1) :

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

- ❖ Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0.5\text{mm}$ après et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.
- ❖ Augmenter la charge avec une vitesse de $2400\text{N/s} \pm 1200\text{ N/s}$ durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).
- ❖ la résistance en compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Eq. III.4})$$

R_c : est la résistance en compression, en newtons par millimètre carré ou en MPa

F_c : est la charge maximale à la rupture, en newtons.



Figure IV.13 : Presse de compression



Figure IV.14 : appareil de flexion

IV.8. Essais de caractérisation physique

IV.8.1. Retrait et gonflement (NF P 15- 433)

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Deux prisme ($4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$) sont préparés pour chaque essai de retrait et gonflement.

Après démoulage des éprouvettes on procède immédiatement à la mesure de sa longueur jusqu'à la constant de la longueur.

➤ Mode opératoire :

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160 mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps différents, la longueur de l'éprouvette est : $L(t) = L_0 + dl(t)$ (Eq. III.5)

La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0) \quad (\text{Eq. IV.6})$$

La variation relative de la longueur est :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [dl(t) - dl(t_0)]/L_0 \quad (\text{Eq. IV.7})$$

[21]

- ✓ Δl est la moyenne des deux éprouvettes issues de la même confection du mortier.
- ✓ Si les éprouvettes sont conservées dans l'air ; $\Delta l(t)$ est **négative** et on parle de retrait.
- ✓ Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau ; $\Delta l(t)$ est **positive** et on parle de gonflement

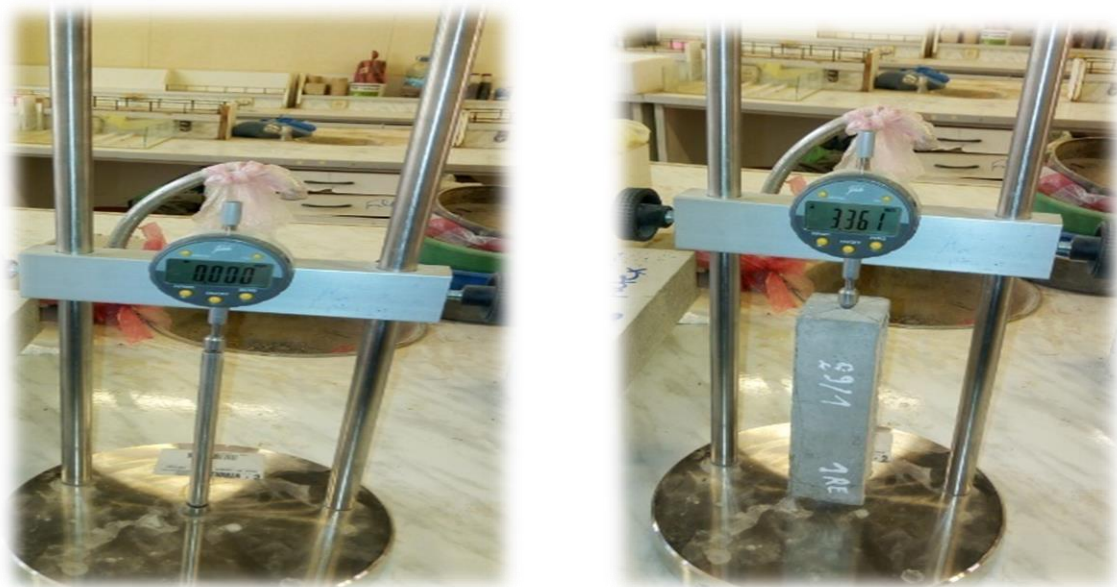


Figure IV. 15. Appareil de retrait et gonflement

IV.8.2 La masse volumique

La masse volumique sèche du composite a été évaluée par pesée, à l'aide d'un appareil hydrostatique. Il s'agit de peser le lot des 3 éprouvettes de mortier dans l'air (m_1) puis dans l'eau (m_2). La différence $m_1 - m_2$ représente la masse du volume d'eau déplacé ϑ ; si ρ_w est la masse volumique de l'eau, la masse volumique des éprouvettes est m_1/ϑ [21]

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 - m_2}$$

IV.8.3. Porosité accessible à l'eau (ASTM C 642-06)

Le principe de la mesure consiste à déterminer la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci. La porosité à l'eau du matériau peut être déterminée par pesée hydrostatique.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux

Les essais de porosité accessible à l'eau sont effectués selon le mode opératoire ASTM C 642-06 (figure III.14) sur des éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$), placées dans un récipient jusqu'à ébullition pendant 5h, ensuite laissées refroidir pendant 14h. Les échantillons sont soumis à une pesée hydrostatique qui permettra d'évaluer leur volume et à une pesée dans l'air



Figure IV.16 : Appareil hydrostatique

Enfin, les échantillons sont placés dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante : la masse finale obtenue (M_{sec}) correspond à un état sec du matériau. La porosité accessible à l'eau est calculée suivant :

$$P\% = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (\text{Eq IV.8})$$

P : porosité accessible à l'eau en %

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche pesée dans l'air.

M_{air} : masse de l'éprouvette après ébullition (5h) à l'air.

M_{eau} : masse de l'éprouvette après ébullition (5h) à l'eau. [22]

IV.8.4. Absorption capillaire (Absorptivité)

L'essai d'absorption capillaire est très intéressant pour caractériser la durabilité du mortier. Ce paramètre est la capacité d'un mortier non saturé à absorber de l'eau dans son réseau capillaire sans pression hydraulique.

L'essai d'absorption est mesuré après 28 jours de la cure des éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$) dans l'eau. Avant de mesurer la porosité, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à environ de 105°C jusqu'à l'atteinte d'une masse constante afin d'éliminer l'eau emprisonnée dans les pores capillaires. [20]

L'essai consiste à mesurer l'augmentation en masse d'une éprouvette en mortier due à l'absorption après avoir immergé partiellement dans un bac d'eau à sa base de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 mm du bas de l'éprouvette. (l'essai présente dans la figure III.16). La face intérieure de l'éprouvette [20]

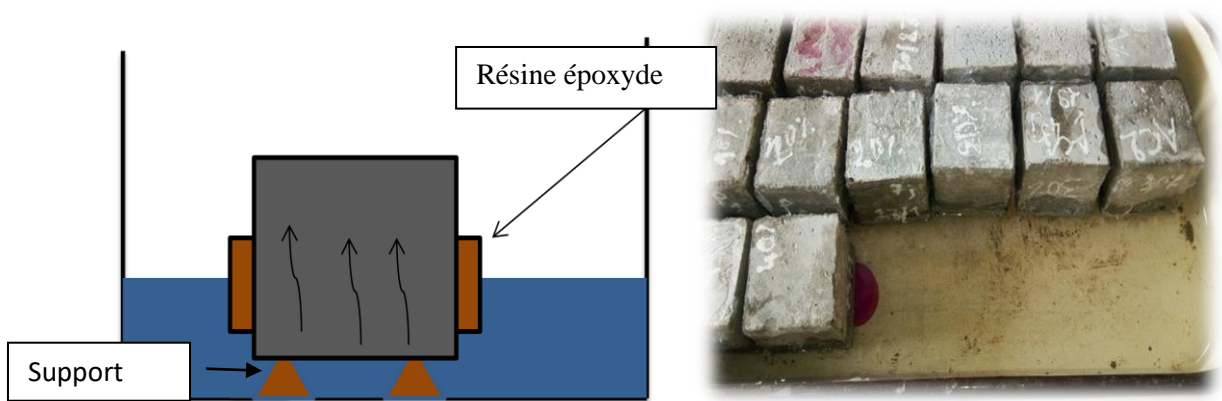


Figure IV. 17. Absorption capillaire

L'équation qui permet de déterminer le coefficient de sportivité est :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}}$$

Avec :

S : le coefficient de sportivité en $(\text{cm}/\text{s}^{0.5})$;

Q : le volume d'eau absorbé en cm^3 ;

A : la surface en contact avec l'eau en cm^2 ;

t : le temps écoulé en seconde ;

La sportivité(S) représente graphiquement la pente de la régression linéaire de (Q/A) en fonction de \sqrt{t} . [20]

IV.8.5. Absorption par immersion

L'essai d'absorption par immersion a été effectué effectivement, en séchant des éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$) du mortier à l'étuve jusqu'à masse constante (pour le mortier témoin dans une température 105°C et pour les mortiers contenant un pourcentage en plastique dans une température 75°C) ensuite en les immergeant totalement dans l'eau pendant 24 h, à la pression atmosphérique

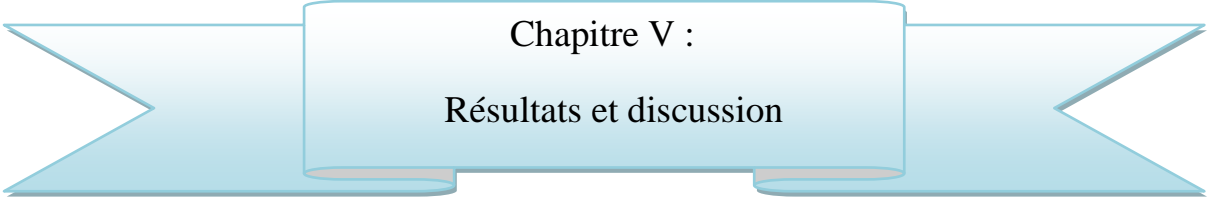


Figure VI.19. Absorption par immersion

V.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés et le détail des différentes formulations élaborées, ainsi que les différentes méthodes d'essais dans le cadre de cette étude.

Dans le chapitre qui suit, on présentera les résultats obtenus du comportement physico-mécanique et thermique des mortiers légers.



Chapitre V :
Résultats et discussion

Chapitre 5 : Résultats et Analyses

V.1 Introduction :

Le but de notre travail est l'étude et la caractérisation d'un mortier léger à base des granulats des déchets plastiques. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'interprétation des différents résultats relatifs, aux caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers composites ou une partie des granulats fins naturels est remplacée par un taux croissant de 10% à 40 % en granulas issus des déchets plastiques.

V.2 Etude à l'état frais :

❖ Maniabilité :

La maniabilité est une propriété intrinsèque du matériau frais. Elle détermine la facilité de sa mise en œuvre. Cette propriété peut affecter les caractéristiques mécaniques du matériau à l'état durci. Le besoin en eau du matériau frais, pour atteindre une maniabilité convenable, est très influencé par la texture superficielle, la porosité et la forme des granulats

la maniabilité des mortiers a été mesurée par l'essai d'étalement.

Les résultats des différents mélanges sont illustrés dans la figure V.1

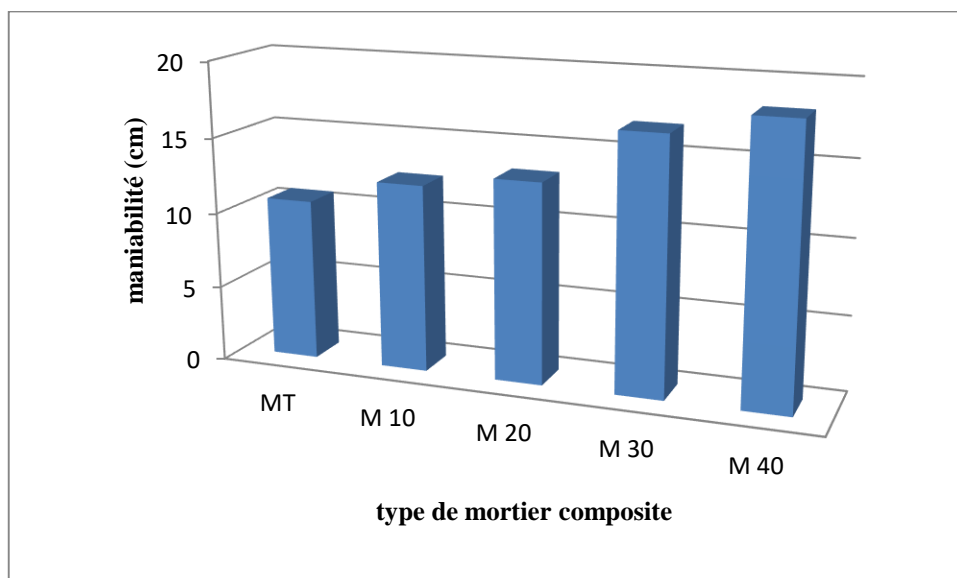


Figure V.1 : Maniabilité des différents mortiers

❖ Analyse et interprétation des résultats :

La figure V.1 montre l'effet significatif du pourcentage croissant des déchets plastiques sur la maniabilité. D'après les résultats recueillis : on constate une augmentation de la maniabilité au fur et à mesure que la teneur du granulat PEBD augmente en comparaison avec le mortier

témoin. Cela est dû à la nature du granulat à base de PEBD non absorbante et à sa surface lisse.

V.3 Etude à l'état durci :

V.3.1 Masse volumique :

Les pesées effectuées sur trois éprouvettes, nous ont permis d'étudier l'évolution de la densité pour toutes les compositions de mortiers testés. La valeur de la densité à l'état sec retenue, correspond à la moyenne des pesées effectuées sur trois échantillons d'une même gâchée .

La variation de la densité à l'état sec des mortiers composites au 7 , 28 et 90 jours en fonction de la teneur en particules de PEBD est illustrée sur la figure suivante

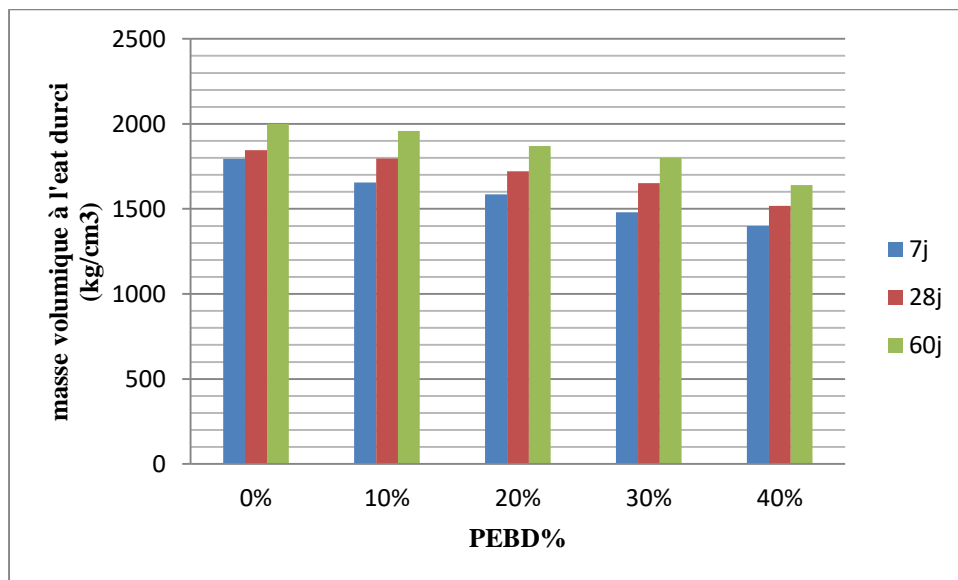


Figure V.2 : La masse volumique à l'état durci des mortiers légers PEBD à 7, 28 et 60 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Pour une substitution du sable naturel par le granulat en PEBD, allant de 10 à 40 %, nous avons un allègement entre 10 et 20% par rapport au mortier témoin MT. Cette propriété est particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et de restauration du vieux bâti et dans l'allègement des structures.

La masse volumique diminue en fonction du rajout de plastique, cette diminution est attribuée à la masse volumique du granulat PEBD qui est très faible en comparaison avec le granulat naturel (0.87 g/cm^3 à 2.6 g/cm^3)

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par la chercheuse Nahla Hilal. [13]

V.3.2 Caractérisations physico- mécaniques des mortiers composites

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du mortier à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à différentes charges de compression ou de traction par flexion. Chaque valeur de la résistance à la traction ou à la compression est égale à la moyenne des mesures sur trois éprouvettes.

(b) Résistance à la compression :

La figure V.3 illustre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en particules de PEBD à 7, 28 et 60 jours.

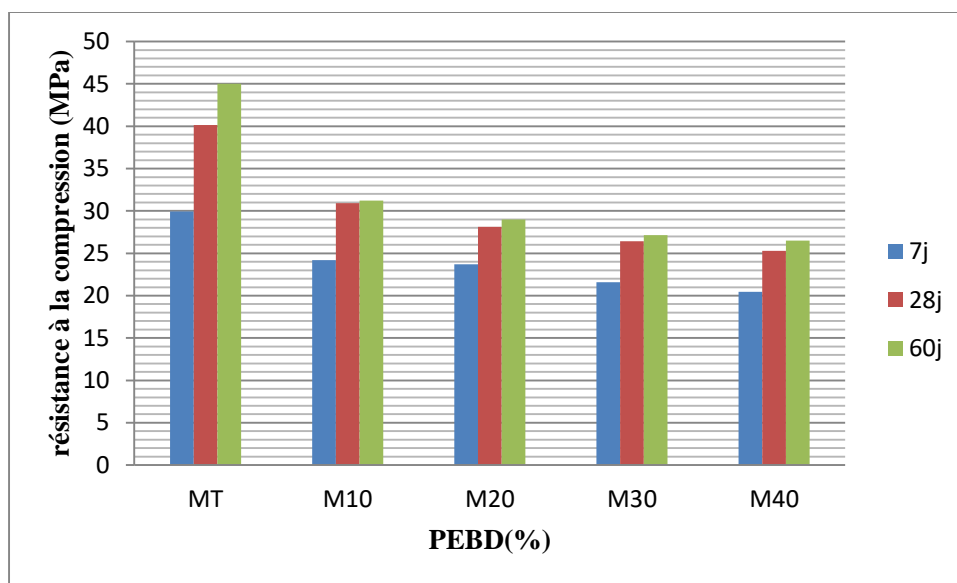


Figure V.3 : Variation de la résistance à la compression des mortiers légers PEBD.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Au-delà du 7^{ème} jour, la figure V.3 montre que les composites à base de granulat PEBD montre une résistance à la compression inférieure à celle du MT. On observe également que la résistance en compression de tous les composites MPEBD augmente avec l'âge de conservation.

A l'âge de 28 jours, le taux d'augmentation de la résistance à la compression du MT10, MT20, MT30 et MT40 sont de 22, 29, 34 et 37% respectivement par rapport au MT.

La résistance à la compression a diminué avec l'augmentation de la teneur en déchets en PEBD et ceci est dû, probablement, à la faible liaison entre l'agrégat du PEBD et la pâte de ciment.

Des résultats similaires ont été rapportés sur les mortiers composites à base des agrégats légers recyclés par Nahla Hilal, Ghernouti et al, Manish Chaudhry et al.

Chapitre V : Résultats et Analyses

Nahla Hilal et al ont rapporté que les résistances à la compression à 28 jours des mortiers composites contenant des agrégats en PEBD pour un remplacement de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% de sable, diminuent lorsque la teneur des agrégats en plastique dans le mortier augmente. Ils ont également constaté une diminution de 42% pour les mélanges avec 25% de granulats en PEBD.

(c) Résistance à traction par flexion

On a mesuré la résistance à la traction des mortiers par l'essai de flexion trois points. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Chaque valeur retenue représente la moyenne de trois mesures relatives à trois échantillons.

Les résultats de la résistance à la flexion des composites PEBD à l'âge de 7, 28, 60 jours sont présentés dans la figure V.4.

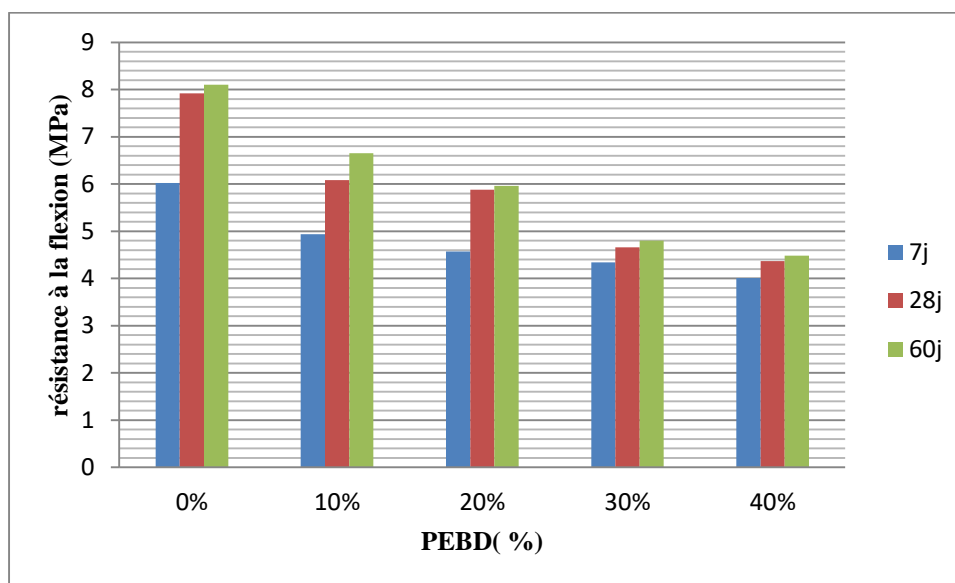


Figure V.4 : Variation de la résistance à la flexion des mortiers légers à base PEBD

❖ Analyse et interprétation des résultats :

On remarque, aussi, comme dans la résistance à la compression une augmentation des résistances à la flexion de tous les mortiers avec l'âge de la conservation des éprouvettes. On observe aussi que les composites exhibent une résistance à la flexion inférieure à celle du mortier témoin MT à tous les âges.

Généralement la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage des agrégats PEBD dans les composites tels que :

A 7 jours, elle passe de 6.02 à 4.01 MPa pour les composites M10 et M40, respectivement.

A 28 jours, elle est de 7.92 à 4.37 MPa pour les composites M10 et M40, respectivement.

À 60 jours, un écart de 3 MPa entre le mortier témoin et le composite M40. La même évolution est observée pour tous ces mortiers. Néanmoins, plus la teneur en PEBD augmente et plus la résistance à la traction par flexion diminue.

Ce résultat est prévisible compte tenu des résultats relatifs à la résistance à la compression. En effet, la résistance à la flexion est généralement tributaire de la résistance à la compression.

V.3.3 Retrait du mortier :

V.3.3.1. variation dimensionnelle

La maturation des matériaux cimentaires s'accompagne d'une réduction dimensionnelle ou retrait au cours de son durcissement, même en l'absence de chargement. Les résultats obtenus en laboratoire sont présentés dans la figure V.5.

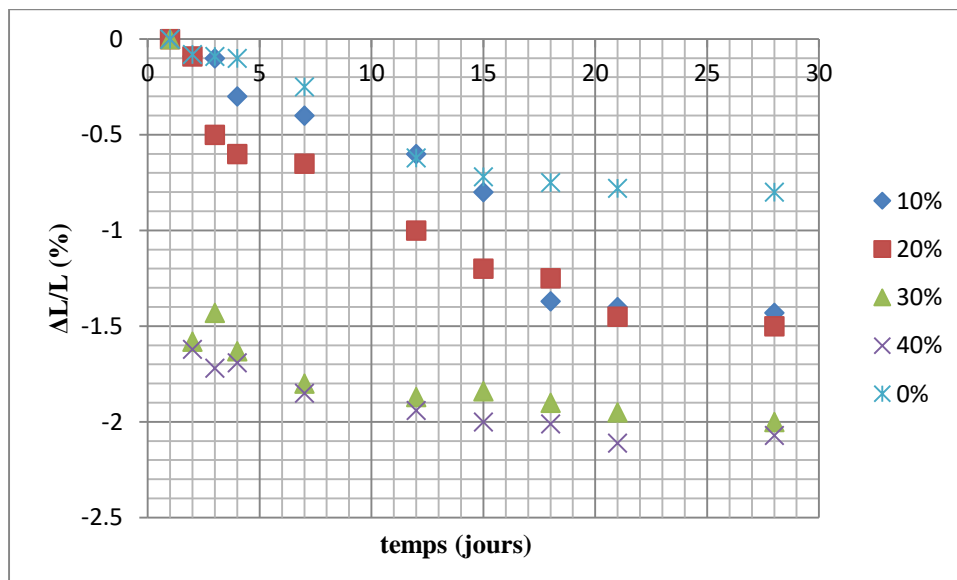


Figure V.5 : variation dimensionnelle (retrait) des mortiers composites conservés à l'air libre

D'après les résultats, nous avons observé que les retraits diminuent avec l'âge de conservation à l'air et l'augmentation de plastique. Cette diminution causée par le départ d'eau vers l'extérieur et le remplacement de sable naturel par les déchets plastiques (un excès d'eau), (donc, plus le pourcentage de plastique augmente plus la diminution de longueur augmente)

La mesure du retrait est suivie par l'estimation de la masse en fonction du temps, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure suivante :

V.3.3.2. variation de la masse :

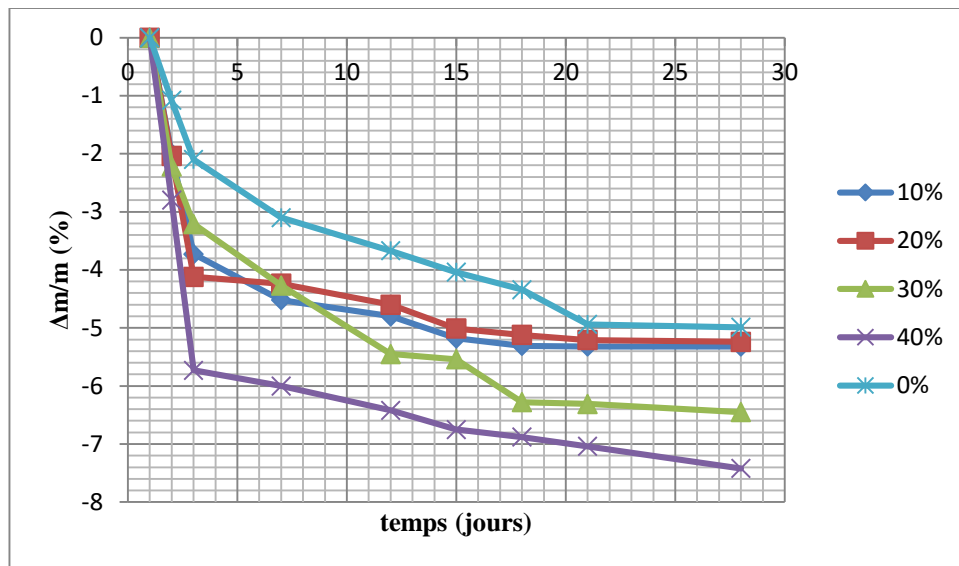


Figure V.6 : variation de la masse en fonction du temps des différents mélanges.

D'après la figure V.6, on remarque que :

- une diminution de la masse pour tous les types des mortiers de l'ordre de (3%, 16 %, 17%, 19%, 20%). avec l'âge de conservation à l'air et l'augmentation de plastique par rapport le mortier témoin. Cette diminution de la masse due à l'évaporation d'eau vers l'extérieur.

V.3.4 Gonflement du mortier :

V.3.4.1.variation dimensionnelle

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.7

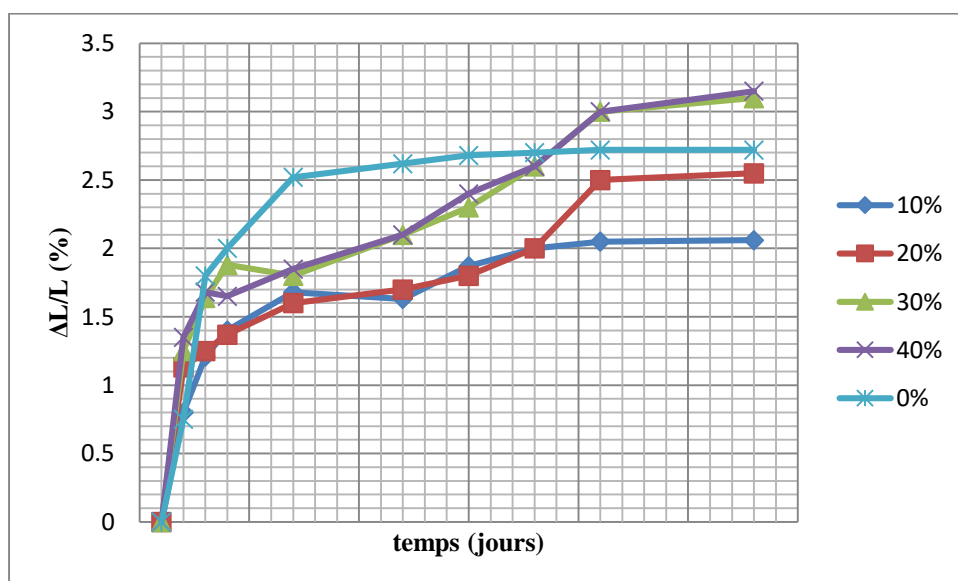


Figure V.7 : variation dimensionnelle (gonflement) des mortiers composites conservés à l'eau

Chapitre V : Résultats et Analyses

Le gonflement augmente avec l'âge de conservation du mortier, les gonflements des éprouvettes contenant de déchets plastiques (PEBD) est supérieur au gonflement du mortier témoin

V.3.4.2. variation de la masse :

La variation de la masse des éprouvettes conservées dans l'eau en fonction du temps est illustrée sur la figure suivante ;

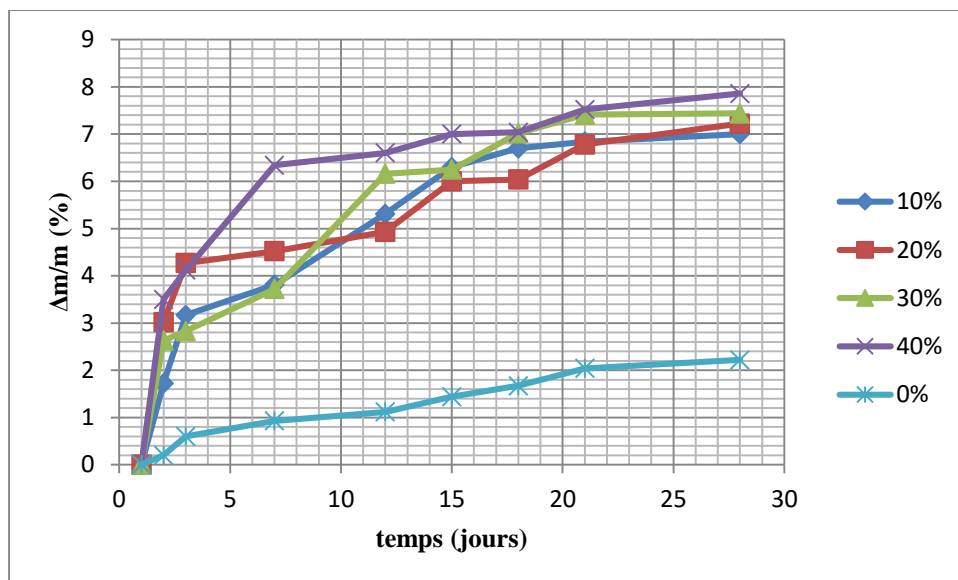


Figure V.8: variation de la masse en fonction du temps.

D'après la figure V.8, on remarque que :

- une augmentation de la masse pour les types des mortiers de l'ordre de (3%, 3.06%, 13%, 18%, 12%). Ce gain est plus élevé dans les mortiers composites en comparaison avec le mortier témoin ce qui est lié à la forte porosité des mortiers composites, et l'eau qui pénètre occupe l'espace créé par la diminution de volume du système eau ciment due à l'hydratation.

V.3.5 Porosité accessible à l'eau :

Les résultats sont présentés dans la figure V.9

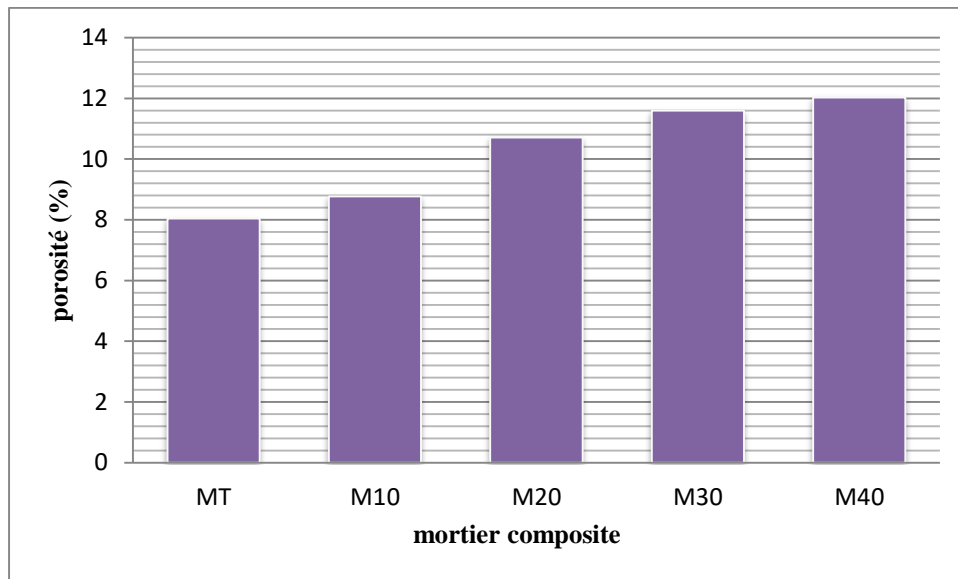


Figure V.9 : porosité du mortier (%)

L'histogramme V.9 présente l'évolution de la porosité d'un mortier formulé avec un sable composé d'un mélange de (sable d'oued et granulats des plastique PEBD) avec des pourcentages différents (10%,20%, 30% et 40% d'ajout de plastique) par rapport au sable témoin. D'après les résultats obtenus, on remarque clairement une augmentation de la porosité des mortiers formulés de granulats légers par rapport au mortier témoin. L'augmentation est de 9.07% pour le mortier de 10% et de 49% pour le mortier de40%.

Cette augmentation est due à la porosité importante de granulats légers incorporés par substitution au sable

V.3.6 Absorption par immersion :

Les résultats sont présentés dans la figure V.10

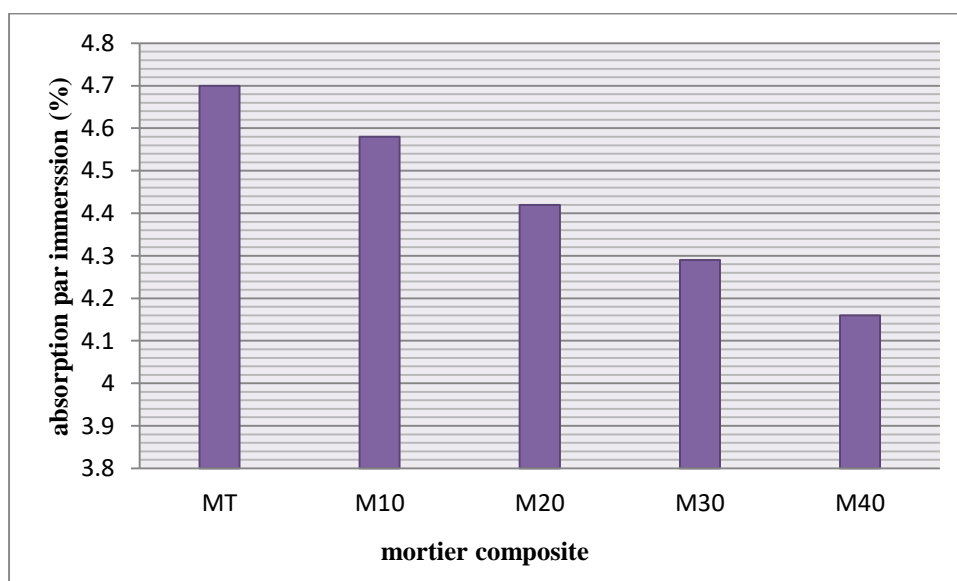


Figure V.10 : absorption par immersion

Chapitre V : Résultats et Analyses

L'histogramme V.10 présente l'évolution de l'absorption par immersion d'un mortier formulé avec un sable composé d'un mélange de (sable d'oued et granulats des plastique PEBD) avec des pourcentages différents (10%,20%, 30% et 40% d'ajout de plastique) par rapport au sable témoin. D'après les résultats recueillis, on remarque une diminution de l'absorption des mortiers formulés de granulats légers par rapport au mortier témoin. La diminution est de 2.55% pour le mortier de 10% et de 11.48% pour le mortier de40%.

Cette diminution est due à l'absorption quasi nulle du plastique, donc automatiquement l'absorption par immersion diminue en fonction du taux de granulats légers incorporés (PEBD). Ces résultats sont similaires à ceux de Tittarelli et Shah.

V.3.7 Absorption par capillaire :

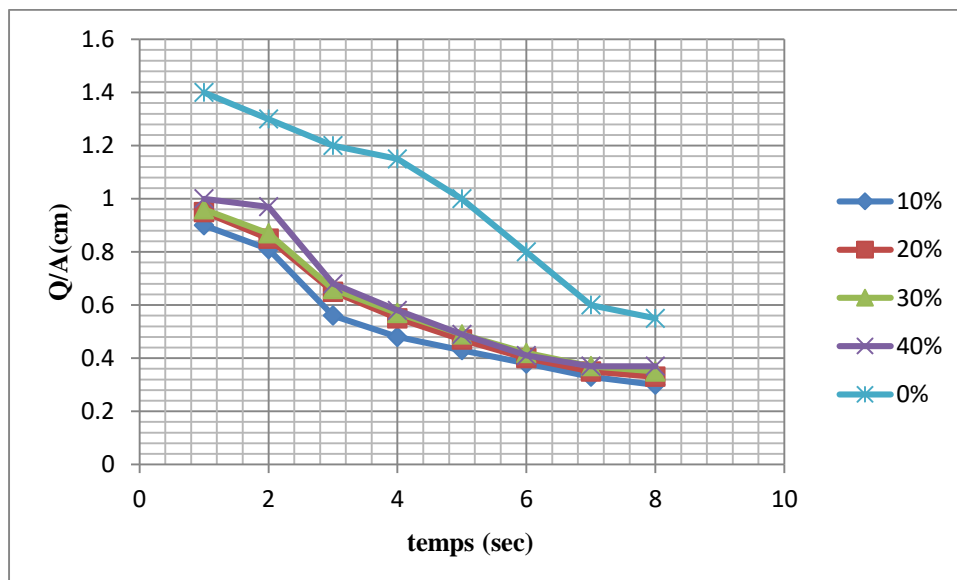


Figure V.11 : absorption capillaire coefficient d'absorptivité

Le terme absorptivité est utilisé pour décrire le mouvement de l'eau du à l'action des capillaires. La mesure d'absorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux.

La figure V.11 représente le coefficient d'absorptivité des mortiers contenant différente proportion de granulat composite PEBD- sable.

La figure montre l'influence de l'addition de granulat PEBD sur l'absorptivité des spécimens des mortiers. L'absorptivité diminue considérablement avec la première substitution de sable par le PEBD soit 66% de réduction pour 10% et 62% pour le 40%.

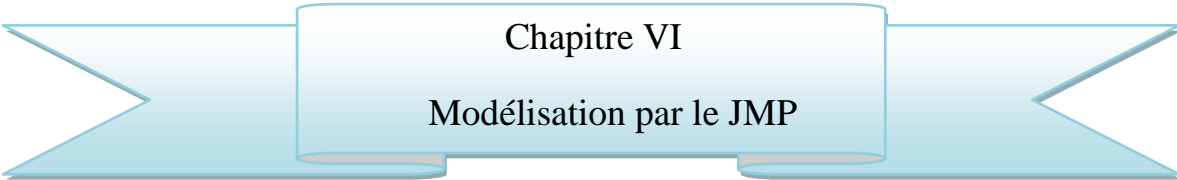
V.4 Conclusion :

Cette étude a permis de mieux comprendre les comportements physiques et mécaniques des matériaux composites mortier-polymère.

L'ajout des granulats de déchets de PEBD comme remplacement partiel en volume du sable contribue à réduire le poids spécifique des composite en comparaison avec le mortier témoin

- ❖ L'augmentation du pourcentage des granulats PEBD a un effet direct sur la résistance à la compression et à la flexion des composites, plus ce pourcentage augmente, plus ces résistances chutent. Les résultats montrent une ductilité augmenter par l'augmentation du pourcentage de substitution et une amélioration de l'aspect extérieur ;

Ce travail de recherche montre qu'il est possible d'utiliser les déchets de PEBD comme granulats de substitution pour la production des matériaux de construction verts .



Chapitre VI
Modélisation par le JMP

Chapitre 6 : Modélisation par JMP

VI.1 Introduction :

Le plan d'expérience est une méthode d'expérimentation particulièrement basée sur le principe suivant : plutôt que de réaliser un nombre considérable d'essais en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois, il fait varier simultanément tous les paramètres.

Le plan d'expérience est utilisable pour mettre au point un service, un produit ou un processus industriel. Il apporte un gain de temps sans entraver la qualité du produit à mettre au point.

Ce chapitre a pour but de déterminer des valeurs optimales de réglage de différents paramètres, réduire et minimiser le nombre d'essais à ce qui est strictement nécessaire et identifier les facteurs influents, les interactions éventuelles entre les facteurs, et le nombre de point de mesure minimum pour obtenir le maximum d'informations.

VI.2 : Réalisation du plan d'expérience au laboratoire :

Dans notre étude on a choisi 3 facteurs :

- le type du sable

- la quantité de ciment

- la teneur en plastique (substitution du sable)

Les réponses étudiées sont :

- la maniabilité

- la masse volumique à 28 jours

- la résistance à la compression à 28 jours.

Tableau VI.1 : Synthèse de plan d'expérience

Facteurs	type du sable	Quantité de ciment	Déchet de plastique
Les niveaux	SD- SC	1/3 – 2/3	10% - 30%
Réponses	La masse volumique à 7 et 28 j (ρ), la maniabilité (E), la résistance à la compression à 7 et 28 j (R_C)		

VI.3 : Modélisation du plan d'expérience :

VI.3.1 : Facteurs :

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants nécessaires à la confection du mortier léger : la quantité du ciment (**C**), le pourcentage de déchet plastique (**P**) et La nature du sable (**S**)

VI.3.2 : Niveaux des facteurs :

Dans cette étude on a choisit pour les facteurs cités deux niveaux le niveau bas et le niveau haut.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

Tableau VI.2: Les niveaux des facteurs

Facteurs	Niveaux	
La quantité de ciment (C)	1/3	-1
	2/3	+1
Le pourcentage de déchet de sac plastique (P)	10%	-1
	30%	+1
La nature du sable (S)	SD	-1
	SC	+1

VI.3.3 : Réponses :

Les réponses sont :

- La maniabilité (l'étalement).
- La masse volumique à 7 et 28j.
- La résistance à la compression à 7 et 28j.

VI.3.4 : Choix du plan d'expérience :

Un plan factoriel complet est le mieux adapté pour cette étude car est plus précis.

Suivant un plan de trois (3) facteurs à deux (2) niveaux, le nombre d'essais à réaliser est : $2^3 = 8$ essais, donc le nombre est acceptable pour un travail de laboratoire.

Plan factoriel complet 2^3 (trois facteurs à deux niveaux), la matrice des effets du plan factoriel choisi est comme suit :

Tableau VI.3 : La matrice des effets

N° d'essai	Ciment (C)	Déchet de plastique (P)	Nature du sable
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

VI.3.5 : Interactions :

Pour le plan factoriel complet de trois facteurs (C, P, A), nous avons quatre interactions sont les suivantes : C*P, P*S, C*S, C*P*S.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

✓ Matrice des effets :

La matrice des effets et leurs interactions est représentée dans le Tableau VI.4 suivant :

Tableau VI.4 : Matrice générale des effets et leur interaction

N°	C	P	S	C*P	P*S	C*S	C*P*S
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

VI.4 : Formulation du mortier léger :

Selon le plan factoriel étudié les formulations du mortier léger dans le domaine d'étude sont établies comme suit :

Tableau VI.5 : Formulation du mortier léger

N essai	A	B	C
1	400	10	SD
2	900	10	SD
3	400	30	SD
4	900	30	SD
5	400	10	SC
6	900	10	SC
7	400	30	SC
8	900	30	SC

VI.5 : Résultats des essais:

❖ La maniabilité :

La maniabilité est une propriété intrinsèque du matériau frais. Elle détermine la facilité de sa mise en œuvre. Cette propriété peut affecter les caractéristiques mécaniques du matériau à l'état durci. Pour chaque formulation nous avons mesuré la maniabilité (Cm). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VI.6 : Résultats d'essai (maniabilité)

N° formulation	La maniabilité (cm)
1	12,4
2	18
3	16,85

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

4	22
5	11,5
6	16
7	13
8	17

❖ La masse volumique :

La masse volumique du mortier léger a une relation inverse avec les facteurs (déchet de plastique), plus le pourcentage du plastique augmente, plus la masse volumique diminue. Les résultats obtenus sont représentés sur le Tableau VI.7

Tableau VI.7 : Résultats (la masse volumique à l'état durci à 7 et 28j)

N° formulation	ρ_{7j} (g/cm ³)	ρ_{28j} (g/cm ³)
1	1.79	1.84
2	1.85	1.91
3	1.48	1.65
4	1.70	1.82
5	2.04	2.15
6	2.23	2.30
7	1.83	1.98
8	1.94	2.00

❖ La résistance à la compression

La résistance à la compression est une caractéristique mécanique la plus importante, qui indique la résistance du matériau, Les résultats sont résumés dans le tableau VI.8 :

Tableau VI.8 : Résultats (la résistance à la compression à 7 et 28j)

N° formulation	R_{c7j} (MPa)	R_{c28j} (MPa)
1	24.2	30.92
2	39.22	40.62
3	21.57	26.43
4	29.55	31.34
5	34.42	36.56
6	40.12	42.65
7	30.22	30.70
8	32.70	36.63

VI.5.1 : Analyse des résultats :

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

Pour l'analyse des résultats nous avons utilisé le logiciel spécialisé en statique et plan d'expérience « JMP 7 » ce logiciel est performant pour les calculs de régression et de validation.

VI.5.2 : Modélisation :

❖ La maniabilité (l'étalement) :

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$Y = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4AB + a_5AC + a_6BC + a_7ABC$$

$$E \text{ (cm)} = 15.84375 + 2.40625 C + 1.36875 P * L + 1.46875 S - 0.11875 C * PL + 0.28125 C * NS + 0.71375 C * PL * S$$
$$R^2 = 99.99$$

Détermination des coefficients du modèle :

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée sur le logiciel d'analyse statistique JMP.

Terme	Estimation	Ecart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	15,84375	0,00625	2535,0	0,0003*
C(450,900)	2,40625	0,00625	385,00	0,0017*
P(10,30)	1,36875	0,00625	219,00	0,0029*
S[SD]	1,46875	0,00625	235,00	0,0027*
C*P	-0,11875	0,00625	-19,00	0,0335*
C*S[SD]	0,28125	0,00625	45,00	0,0141*
P*S[SD]	0,74375	0,00625	119,00	0,0053*

Figure VI.1: Estimation des coefficients

D'après le tableau d'estimation des coefficients, il est clair que le dosage de ciment est le coefficient le plus influent sur la maniabilité de mortiers (présente la plus faible valeur de prob.>|t|).

En effet, le taux de substitution par le de sable ainsi que le dosage en déchet plastique présentent une influence moins importante que le dosage de ciment : En outre, l'interaction (P*S) et (C*S) a un effet non négligeable sur cette réponse ; cela veut dire que le rapport (P*S) et est (C*S) sont des paramètres influents .

Cette importance est confirmée par les coefficients de ces effets dans le modèle mathématique.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

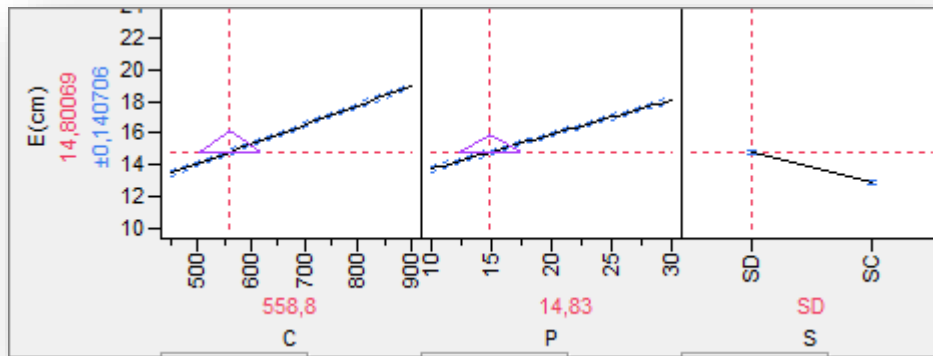


Figure VI.2 : Diagramme de chaque facteur

D'après la figure précédente (VI.2) il est clair que pour augmenter la réponse de maniabilité, il faut augmenter le dosage en ciment (C), le pourcentage de déchet plastique (P) et utiliser le sable d'oued par rapport au sable concassé. Cette interprétation est confirmée par les coefficients positifs de chaque facteur.

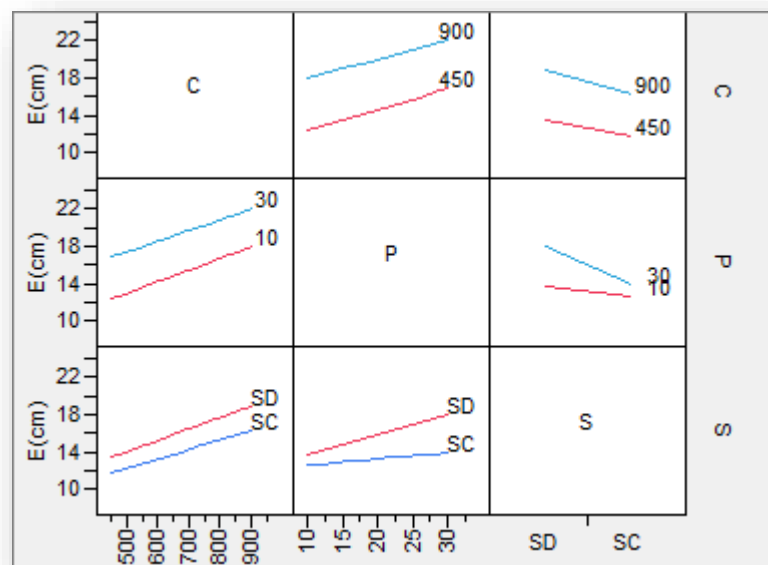


Figure VI.3 : Profil d'interaction de réponse d'étalement en fonction des facteurs (C, P, S).

Le profil d'interaction de la maniabilité en fonction des trois facteurs (figure VI.3), qui permet d'étudier l'influence des différents facteurs et d'établir des courbes d'interactions entre deux facteurs.

On peut constater que la réponse maximale est atteinte lorsque le dosage en ciment et pourcentage en plastique sont à leurs niveaux haut, et avec le niveau du sable bas.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

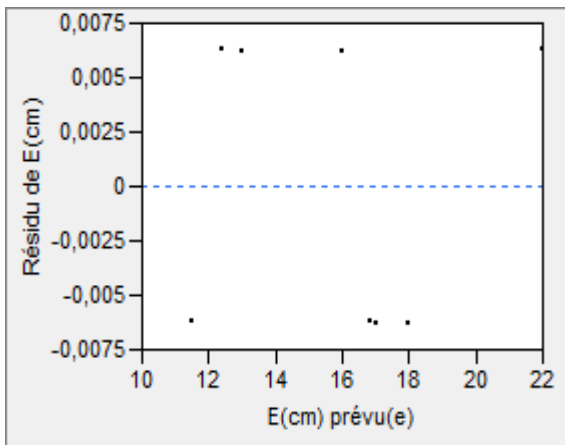


Figure VI.4 : diagramme des résidus en observé fonction des valeurs prévues

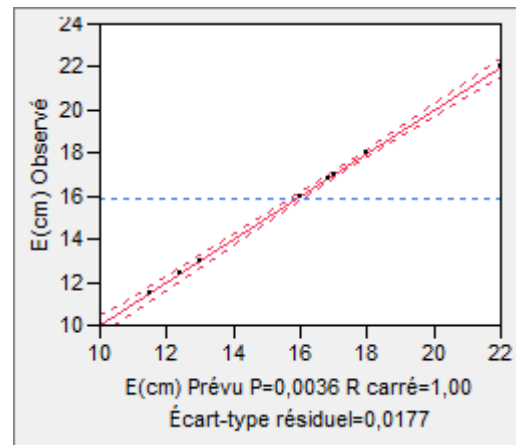


Figure VI.5 : Graphique des valeurs observé en fonction de valeurs prévues

D'après le diagramme, qui présente dans la figure VI.4, nous remarquons que les résidus de l'étalement normalisé supérieurs $+0.0075$ et inférieurs -0.0075 .

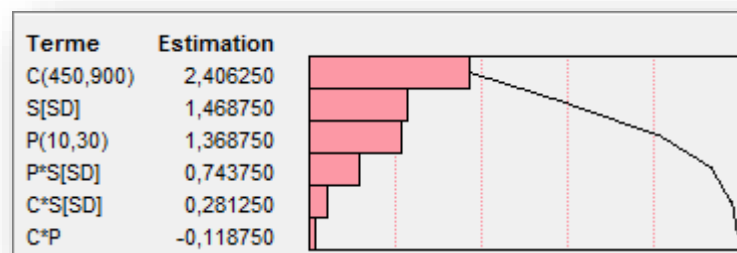


Figure VI.6 : Diagramme de Pareto

A partir du diagramme de Pareto (figure VI.6) et du modèle établi, il est bien clair que l'influence de ciment est le plus important suivi de l'interaction entre le dosage en ciment et le pourcentage en plastique et la nature du sable, et ensuite par l'effet de plastique et le sable respectivement, enfin par divers effets couplés de ces paramètres.

❖ Les courbes des iso réponses :

Les courbes iso réponses sont des courbes où la réponse à la même valeur numérique, en outre à partir de ces réponses, on en déduit l'intervalle de l'étalement souhaité.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

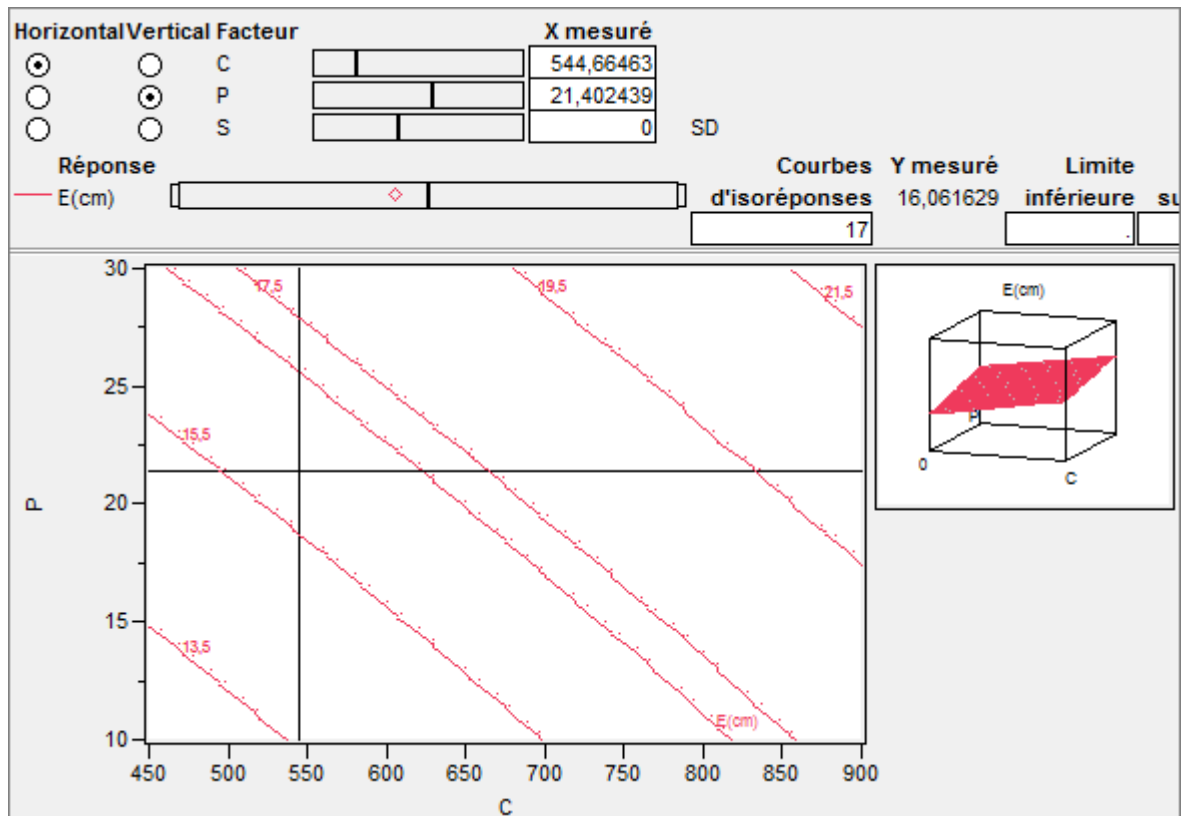


Figure VI.7: Profileur d'isoréponses de l'étalement en fonction de ciment et plastique

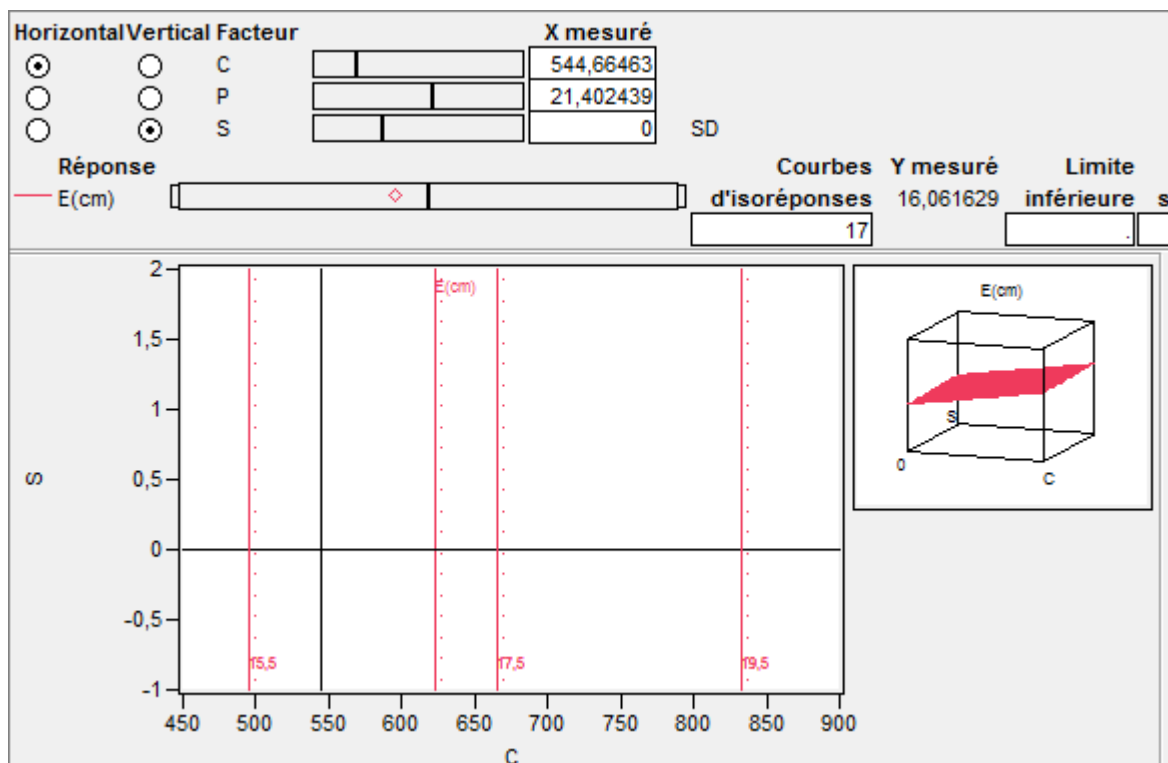


Figure VI.8 : Profileur d'isoréponses d'étalement en fonction de déchet de ciment et sable

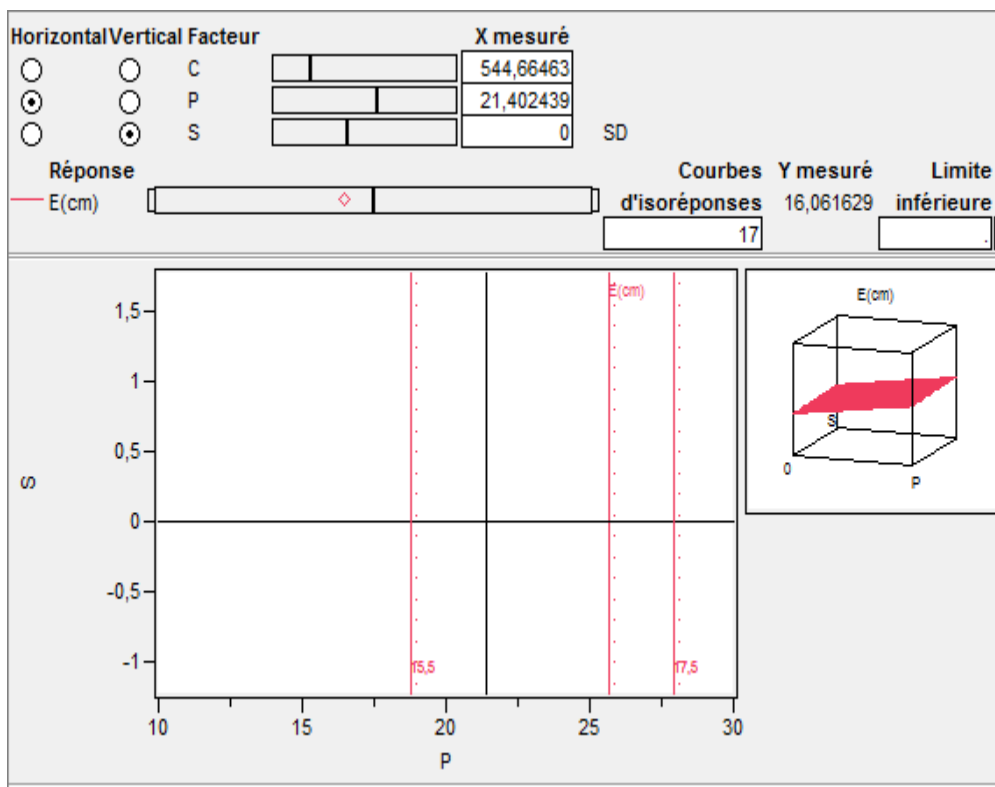


Figure VI.9 : Profileur d'isoresponses d'étalement en fonction de déchet de plastique et sable

Les trois dernières figures, représentent les Profileurs d'isoresponses de maniabilité en fonction les trois facteurs étudié de : dosage en ciment et pourcentage du plastique, pourcentage du plastique et ciment, pourcentage du plastique et sable.

❖ **La masse volumique à 7j:**

Le modèle linéaire de ce paramètre est écrit comme suit :

$$\rho = 1.7025 + 0.004C - 0.01 P - 0.1475 S - 0.0025 C * P - 0.01 C * S + 0P * S$$

$R^2 = 99\%$

Terme	Estimation	Ecart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	1,7025	0,0025	681,00	0,0009*
C(450,900)	0,04	0,0025	16,00	0,0397*
P(10,30)	-0,1	0,0025	-40,00	0,0159*
S[SD]	-0,1475	0,0025	-59,00	0,0108*
C*P	-0,0025	0,0025	-1,00	0,5000
C*S[SD]	-0,01	0,0025	-4,00	0,1560
P*S[SD]	0	0,0025	0,00	1,0000

Figure VI.10: Estimation des coefficients.

Suivant la figure VI.10 qui présente l'estimation des coefficients, on remarque qu le pourcentage du plastique et la nature sable gouverne la masse volumique des mortiers par

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

rapport au dosage en ciment qui présente une influence moins importante par rapport à celle de pourcentage du plastique et le sable. Cette différence est claire dans le modèle mathématique.

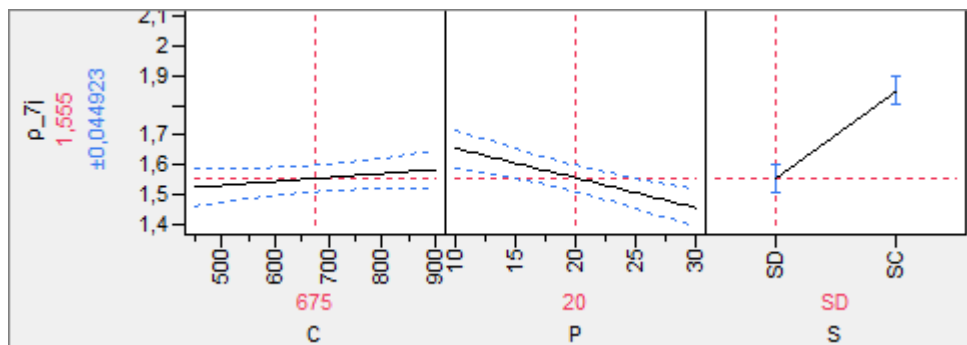


Figure VI.11 : Diagramme de profil de prévision pour chaque facteur

D'après le diagramme présenté dans la figure VI.11, nous constatons, que pour augmenter la masse volumique à l'état durci, on réduit le pourcentage du plastique et utilisé le sable d'oued et augmenté le dosage en ciment.

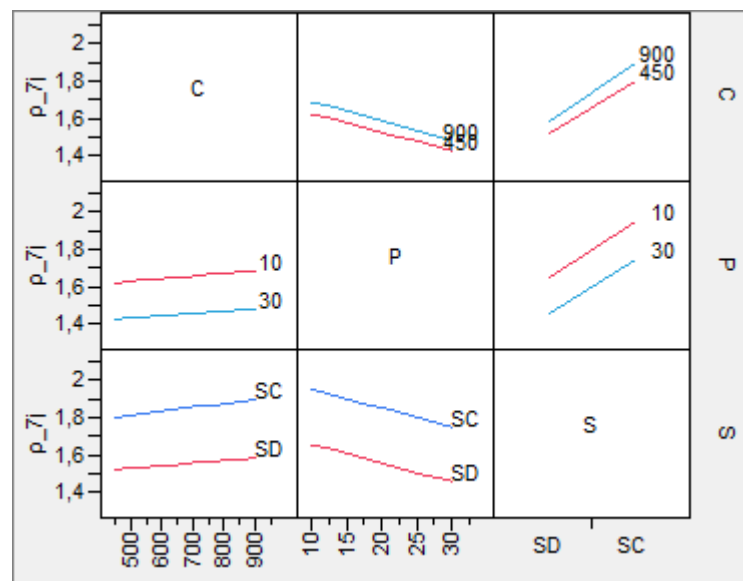


Figure VI.12 : Profil d'interaction de réponse de la masse volumique en fonction des facteurs (C, P, S).

La figure précédente présente un profil d'interaction en fonction des 3 facteurs, cette dernière donne une possibilité de mettre les courbes d'interaction entre 2 facteurs afin de comprendre leurs influences sur la réponse étudiée. On peut constater, que l'effet de plastique et le sable est négatif, ce qui explique que la masse volumique diminue lorsque les facteurs passent de leurs niveau haut vers de leurs niveau bas.

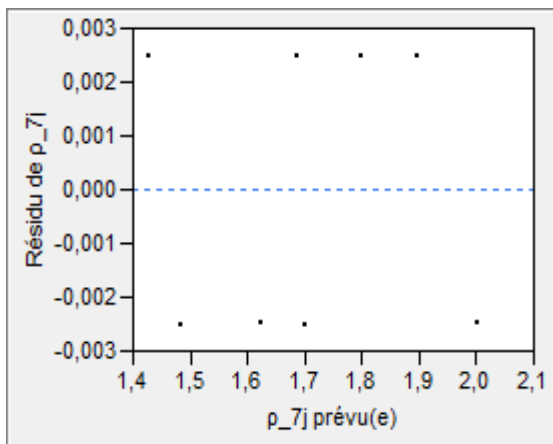


Figure VI .13: diagramme des résidus en observé fonction des valeurs prévues

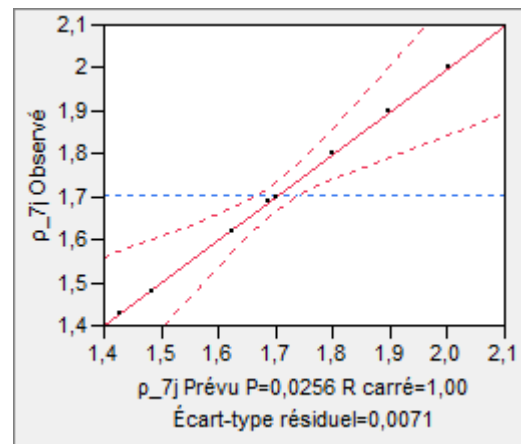


Figure VI.14 : Graphique des valeurs observé en fonction de valeurs prévues

Suivant le diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues (figure VI.13) on observe que les résidus normalisés supérieurs à +0.003 et inférieurs à -0.003 sont généralement considérés comme valeurs aberrantes. Aussi cette figure montre que le manque d'une répartition des valeurs résiduelles dans les parcelles se situe dans ces limites sur les deux côtés de 0 indiquant qu'il y a des valeurs aberrantes dans les données. Ainsi, le modèle prévu spécifiant une significative divergence entre la valeur ajustée et la valeur expérimentale.

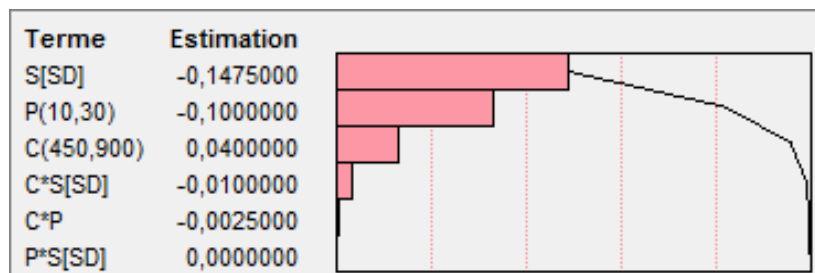


Figure VI.15 : Diagramme de Pareto d'estimation

Suivant le diagramme de Pareto d'estimation (Figure VI.15), on remarque que le sable et le plastique sont les facteurs les plus influents sur la masse volumique.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

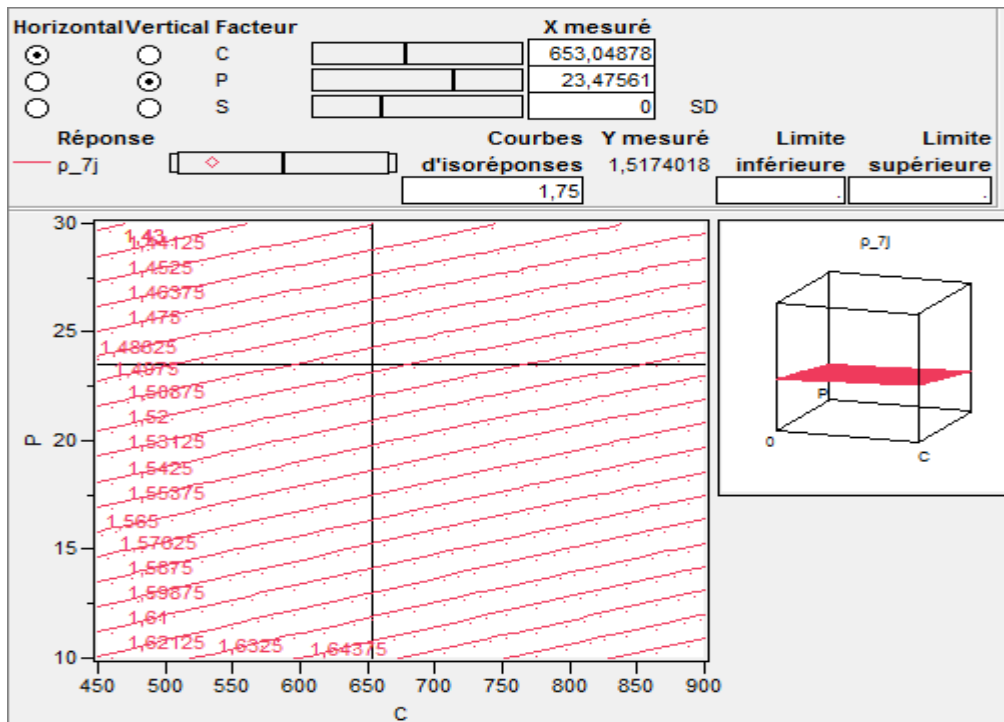


Figure VI. 16 : Profilur d'isorréponses de la masse volumique en fonction de ciment et de déchet plastique.

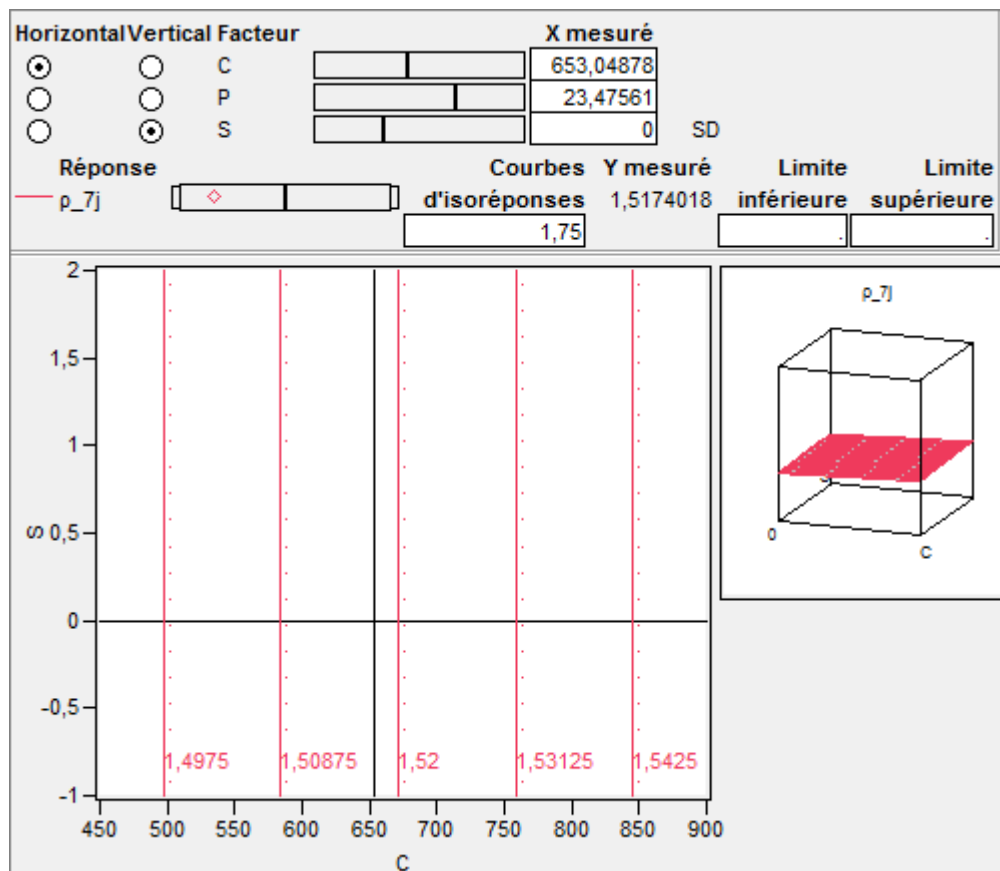


Figure VI. 17 : Profilur d'isorréponses de la masse volumique en fonction de ciment et du sable

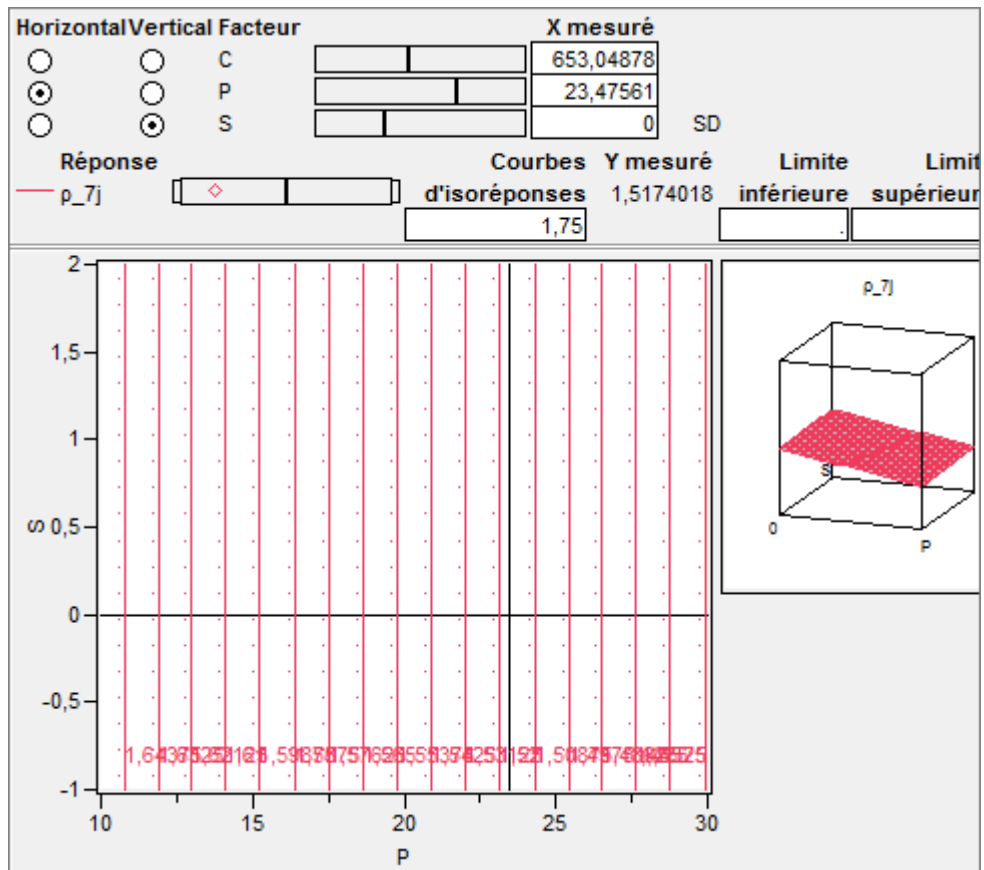


Figure VI.18 : Profilier d'isoreponses de la masse volumique en fonction de plastique et du sable

Les trois dernières figures, représentent les Profileurs d'isoreponses de masse volumique en fonction des trois facteurs étudiés de : dosage en ciment et pourcentage du plastique, pourcentage du plastique et ciment, pourcentage du plastique et sable.

❖ **La masse volumique à 28 j :**

Le modèle linéaire de ce paramètre est écrit comme suit :

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1.935375 + 0.050125 C - 0.079625 P - 0.125875 S + 0.007625 C \cdot P + 0.11375 C \cdot S + 0.009125 P \cdot S$$

$$R^2 = 98\%$$

Terme	Estimation	Ecart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	1,935375	0,018875	102,54	0,0062*
C(450,900)	0,050125	0,018875	2,66	0,2293
P(10,30)	-0,079625	0,018875	-4,22	0,1482
S[SD]	-0,125875	0,018875	-6,67	0,0948
C*P	0,007625	0,018875	0,40	0,7556
C*S[SD]	0,011375	0,018875	0,60	0,6547
P*S[SD]	0,009125	0,018875	0,48	0,7133

Figure VI.19: Estimation des coefficients

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

D'après le diagramme d'estimation des coefficients (figure VI. 19), on remarque que le sable et plastique ont un effet négatif sur la réponse par rapport au dosage en ciment. Cette observation exprime que la diminution de la masse volumique est due à la l'augmentation du pourcentage en plastique et l'utilisation du sable d'oued.

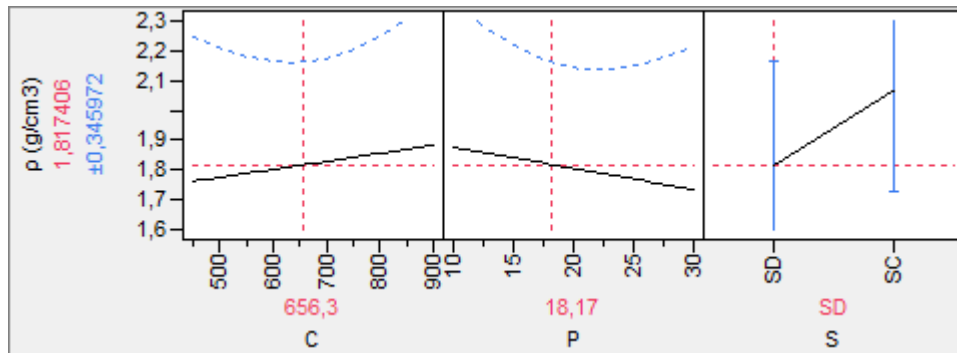


Figure VI.20 : Diagramme de prévision de chaque facteur

A partir des diagrammes de chaque effet on remarque que la masse volumique diminue lorsque les deux facteurs (P et S) augmentent.

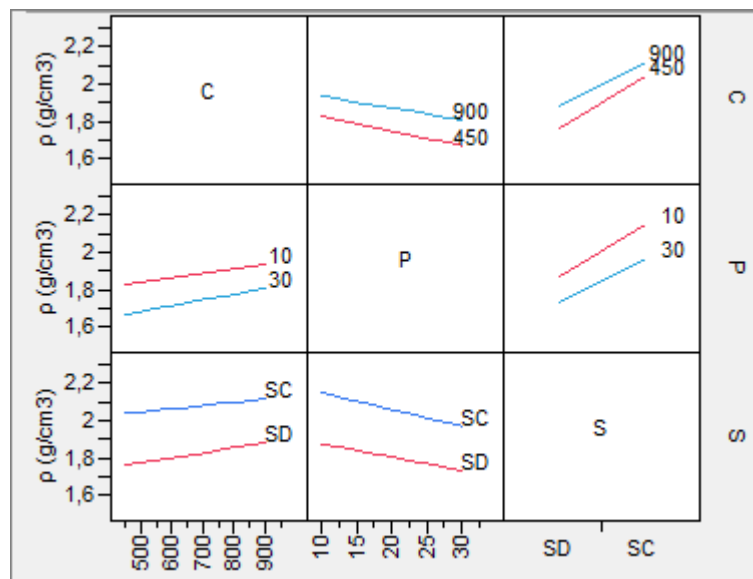


Figure VI.21 : profile d'interaction des facteurs.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

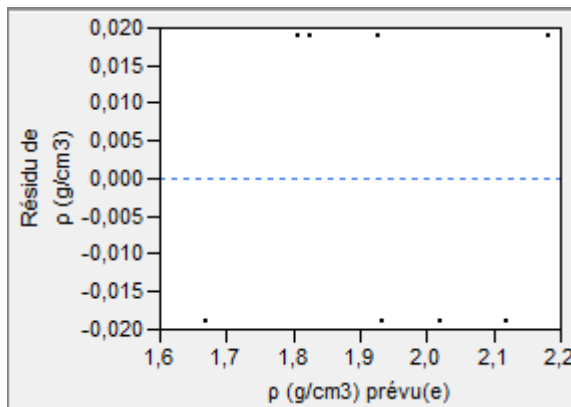


Figure VI .22: diagramme des résidus en observé fonction des valeurs prévues

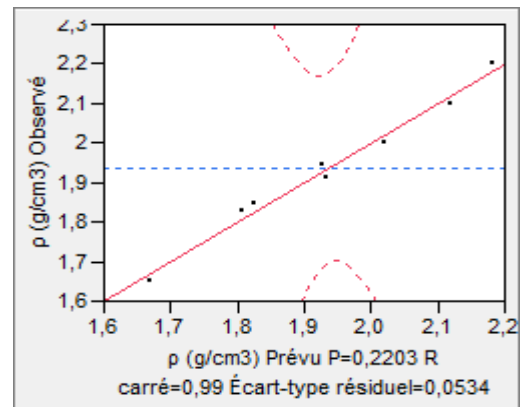


Figure VI.23: Graphique des valeurs observé en fonction de valeurs

Suivant le diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus (figure VI.22) on observant que les résidus normalisés supérieurs à +0.02 et inférieurs à -0.02 sont généralement considérés comme valeurs aberrantes. Aussi cette figure montre que le manque d'une répartition des valeurs résiduelles dans les parcelles se situe dans ces limites sur les deux côtés de 0 indiquant qu'il y a des valeurs aberrantes dans les données. Ainsi, le modèle prévu spécifiant une significative divergence entre la valeur ajustée et la valeur expérimentale.

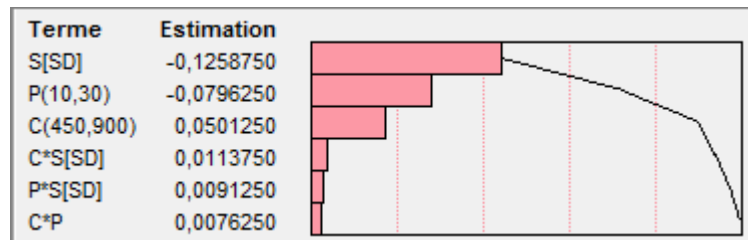


Figure VI. 24 : Diagramme de Pareto d'estimation

Suivant le diagramme de Pareto d'estimation (figure VI.24), on remarque que la nature du sable et le pourcentage de plastique sont les facteurs le plus influents sur la réponse.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

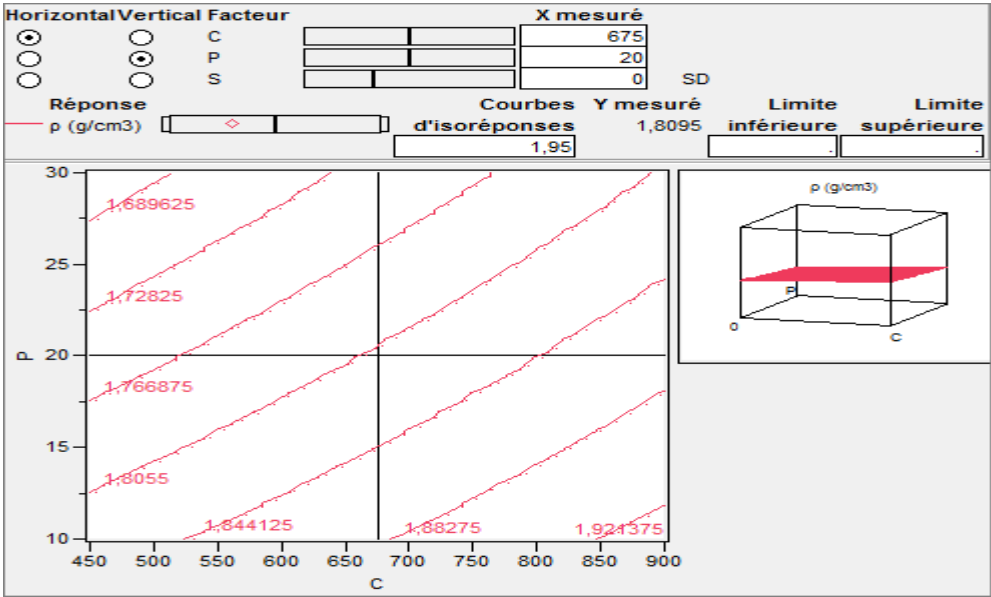


Figure VI. 25 : Profileur d'isorréponses de la masse volumique en fonction de ciment et de déchet plastique.

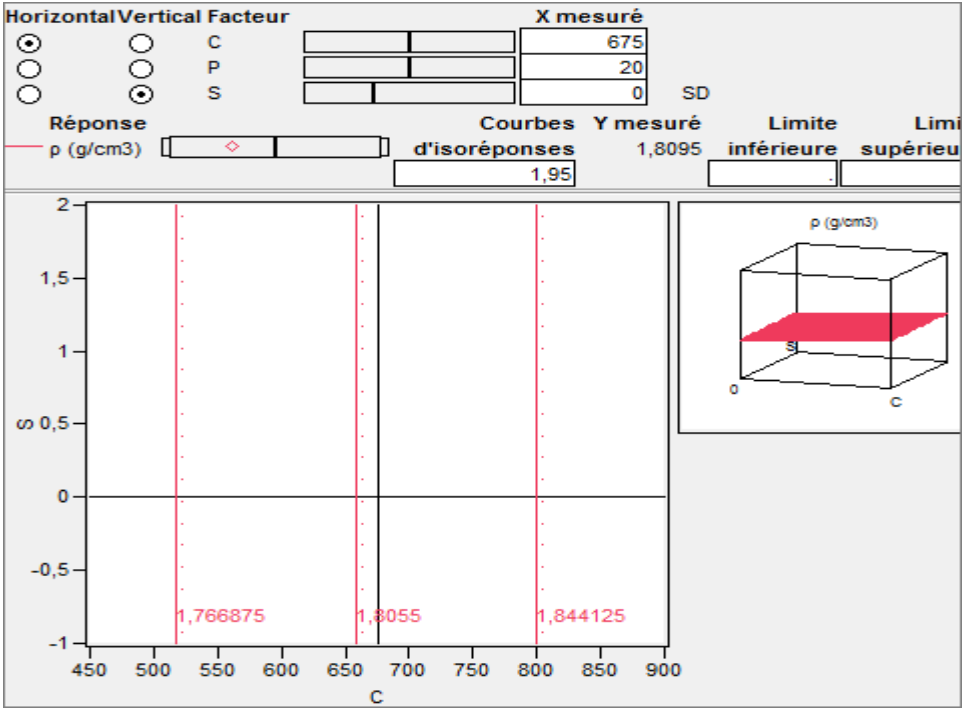


Figure VI. 26 : Profileur d'isorréponses de la masse volumique en fonction de ciment et de sable

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

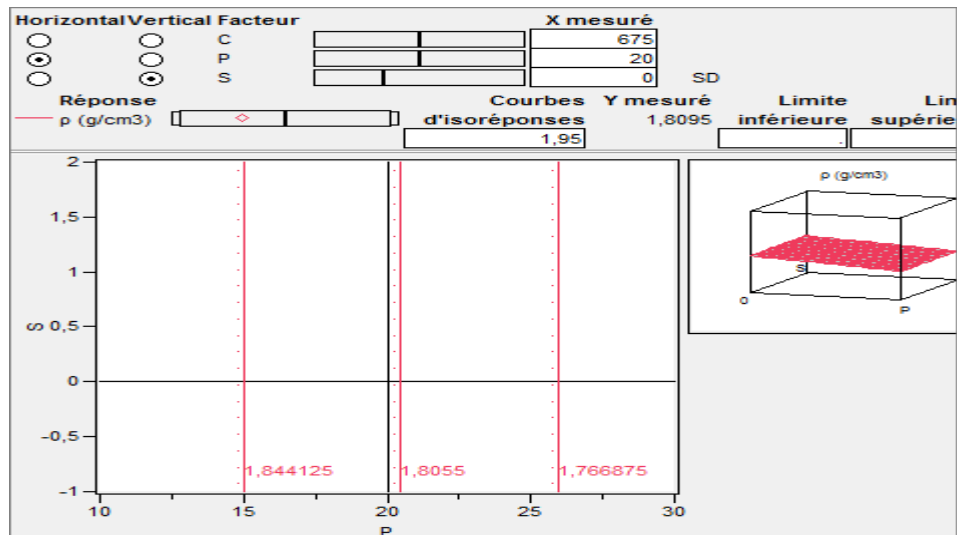


Figure VI. 27 : Profilleur d'isoréponses de la masse volumique en fonction de plastique et de sable

Les figures (VI.25, VI.26 et VI.27) présentent les Profilleurs d'isoréponses de la masse volumique à 28 jours en fonction de : ciment et de déchet plastique ; ciment et sable et plastique et sable respectivement.

❖ La résistance à la compression à 7 et 28 jours :

Le modèle linéaire de ce paramètre est écrit comme suit :

➤ Pour 7 j :

$$R_{C7} = 31.3825 + 3.78 C - 3.0225P - 2.7775S - 1.315C * P + 1.94C * S + 0.0275 P * S$$

$R^2 = 99\%$

Terme	Estimation	Ecart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	31,3825	0,365	85,98	0,0074*
C(450,900)	3,78	0,365	10,36	0,0613
P(10,30)	-3,0225	0,365	-8,28	0,0765
S(SD)	-2,7775	0,365	-7,61	0,0832
C*P	-1,315	0,365	-3,60	0,1724
C*S(SD)	1,94	0,365	5,32	0,1184
P*S(SD)	0,0275	0,365	0,08	0,9521

Figure VI.28: Estimation des coefficients.

Le modèle linéaire de ce paramètre est écrit comme suit :

➤ Pour 28j :

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

$$R_{C28} = 34.74 + 2.835C - 2.9475P - 2.4125S - 1.1125C * P + 0.8175C * S - 0.495P * S$$

$$R^2 = 99\%$$

Terme	Estimation	Ecart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	34,74	0,085	408,71	0,0016*
C(450,900)	2,835	0,085	33,35	0,0191*
P(10,30)	-2,9475	0,085	-34,68	0,0184*
S(SD)	-2,4125	0,085	-28,38	0,0224*
C*P	-1,1125	0,085	-13,09	0,0485*
C*S(SD)	0,8175	0,085	9,62	0,0660
P*S(SD)	-0,495	0,085	-5,82	0,1083

Figure VI.29: Estimation des coefficients

D'après les tableaux d'estimation des coefficients figures (VI.28 et VI.29) on comprend que le dosage en ciment est le facteur le plus influant sur la résistance à la compression des mortiers à 7 et 28 jours (prob.>|t| la faible valeur), le pourcentage de plastique et le sable ont une influence moins importante que le dosage de ciment ce qui bien éclaircie dans le modèle mathématique.

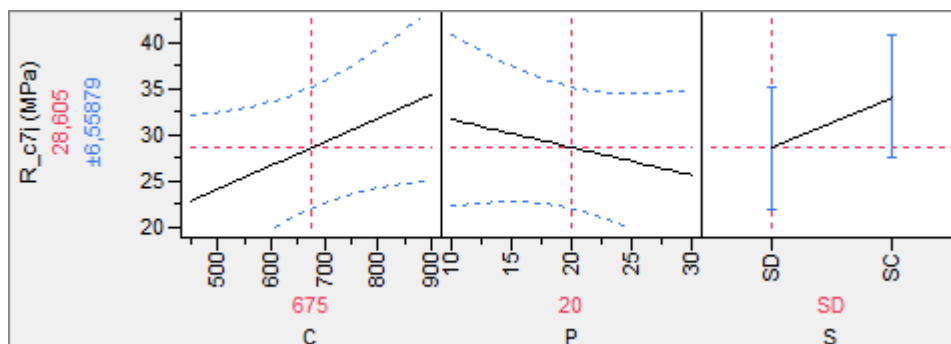


Figure VI. 30 : Diagramme de chaque facteur à 7jours

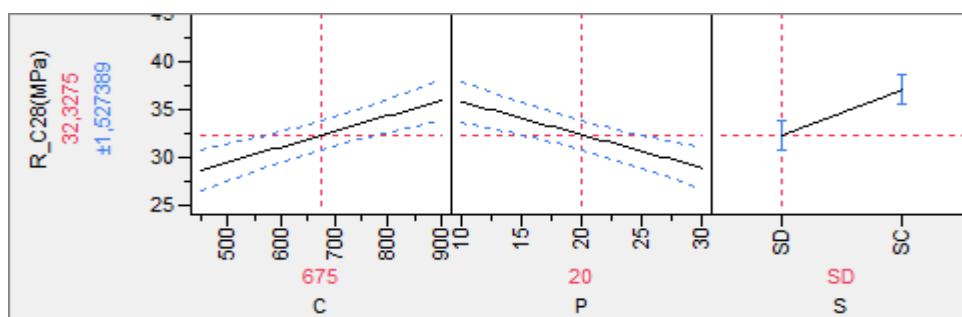


Figure VI. 31 : Diagramme de chaque facteur à 28 jours

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

Les dernières diagrammes (figure VI.30 ET VI .31), montrent que l'augmentation de résistance à la compression à 7 et 28 jours à une relation inverse avec les intrants des formulations des mortiers. Alors, pour augmenter la résistance à la compression il faut augmenter le dosage en ciment et utiliser le sable concassée par contre le sable d'oued et le pourcentage du plastique sont à réduire .

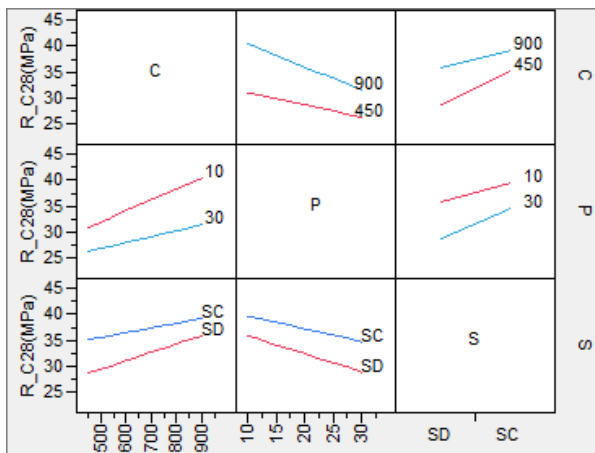


Figure VI.32 : Profil d'interaction de réponse de la résistance R_{C7} en fonction des facteurs (C*P*S)

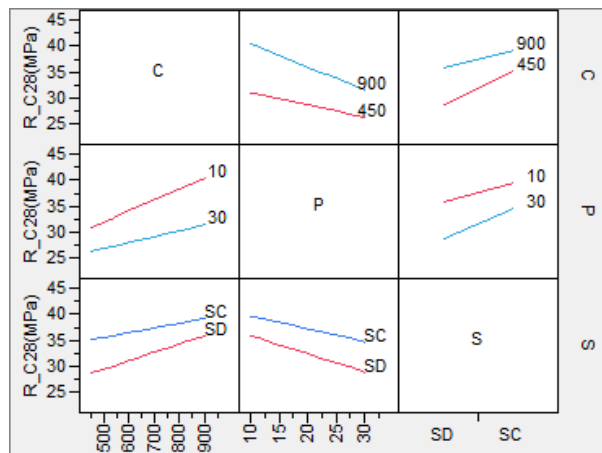


Figure VI.33 : Profil d'interaction de réponse de la résistance R_{C28} en fonction des facteurs (C*P*S)

Les deux figures ci-dessus présentent un profil d'interaction qui exprime la possibilité d'étudier l'interaction entre 2 facteurs pour estimer leur influence sur la réponse. L'effet de pourcentage du plastique est négatif c'est-à-dire la résistance à la compression augmente lorsque le facteur descend de son niveau haut vers l'autre niveau bas. Et pour les 2 facteurs (C et S) à leur niveau haut la réponse étudiée augmente.

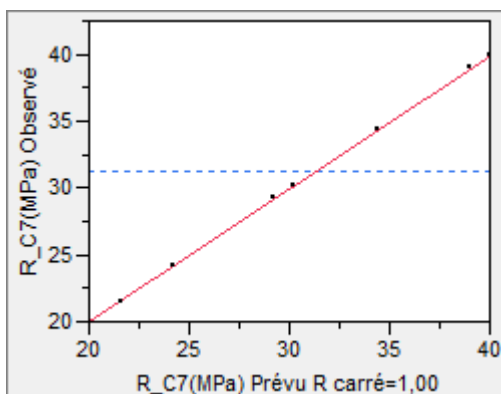


Figure VI.34: Graphique des valeurs observées fonction des valeurs prévues à 7j

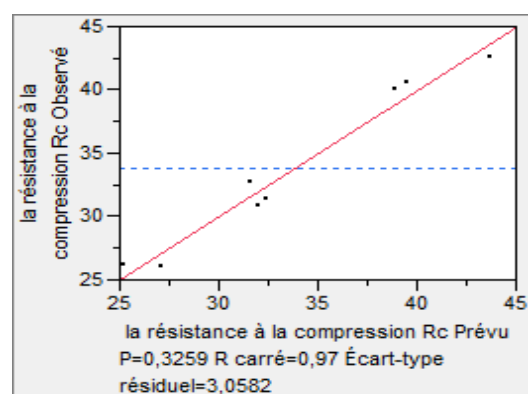


Figure VI. 35: Graphique des valeurs observées en fonction de valeurs à 28j

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

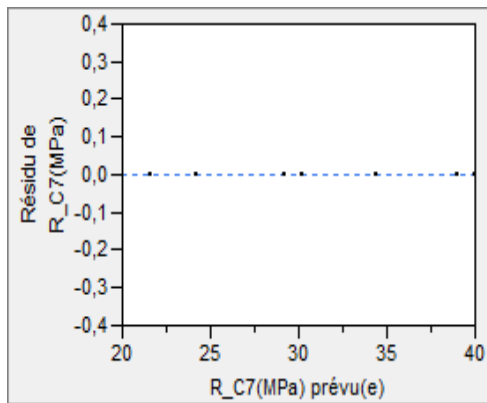


Figure VI.36: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus 7j

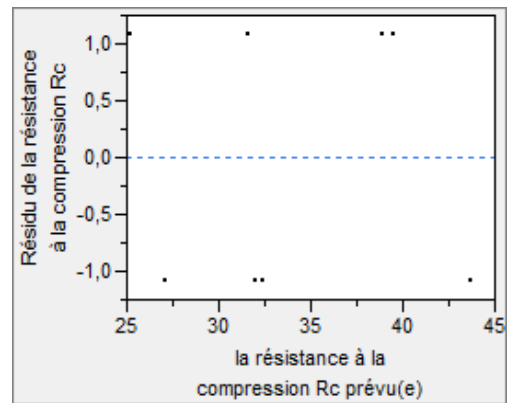


Figure VI.37: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus 28j

A partir de diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus (fig VI.37) il est bien claire que les résidus normalisés supérieurs à $+1$ et inférieurs à -1 . Ainsi, le modèle prévu spécifiant une insignifiante divergence entre la valeur ajustée et la valeur expérimentale.

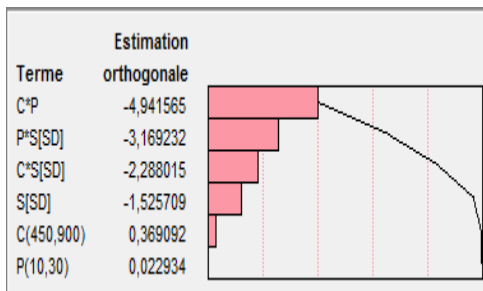


Figure VI. 38 : Diagramme de Pareto d'estimation R_{C7}

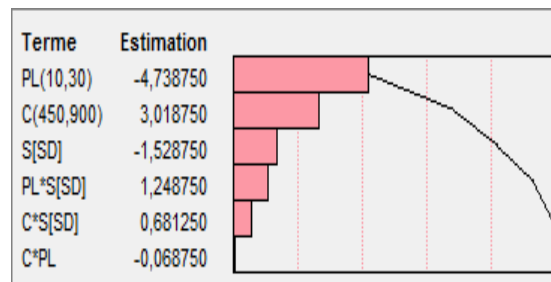


Figure VI. 39 : Diagramme de Pareto d'estimation R_{C28}

D'après le diagramme de Pareto (figure VI. 38), on observe que l'interaction entre le dosage en ciment et le dosage du plastique qui gouverne la réponse étudiée, suivi par les deux facteurs de ciment et plastique respectivement et le facteur qui reste (sable) c'est le dernier influent après les deux interactions (P*S et C*S).

D'après le diagramme de Pareto (figure VI. 39), on observe que le pourcentage du plastique suivi par le dosage en ciment qui gouvernent la réponse étudiée, suivi par les deux facteurs de ciment et le type de sable respectivement (le facteur qui reste (sable) est le dernier influent après les deux facteurs (P et C).

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

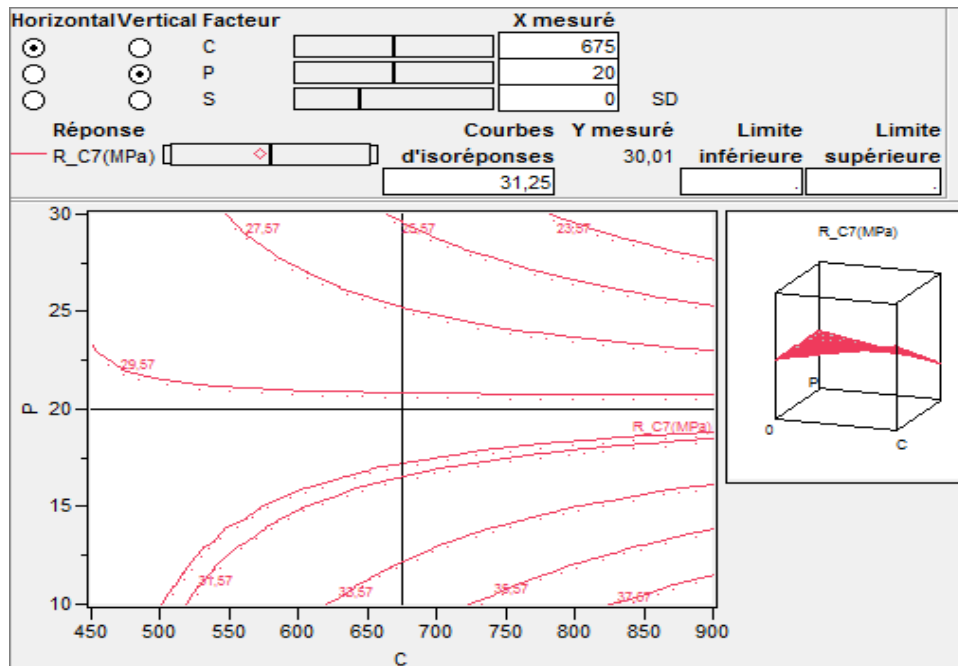


Figure VI.40 : Profileur d'isoresponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de ciment et déchet de plastique.

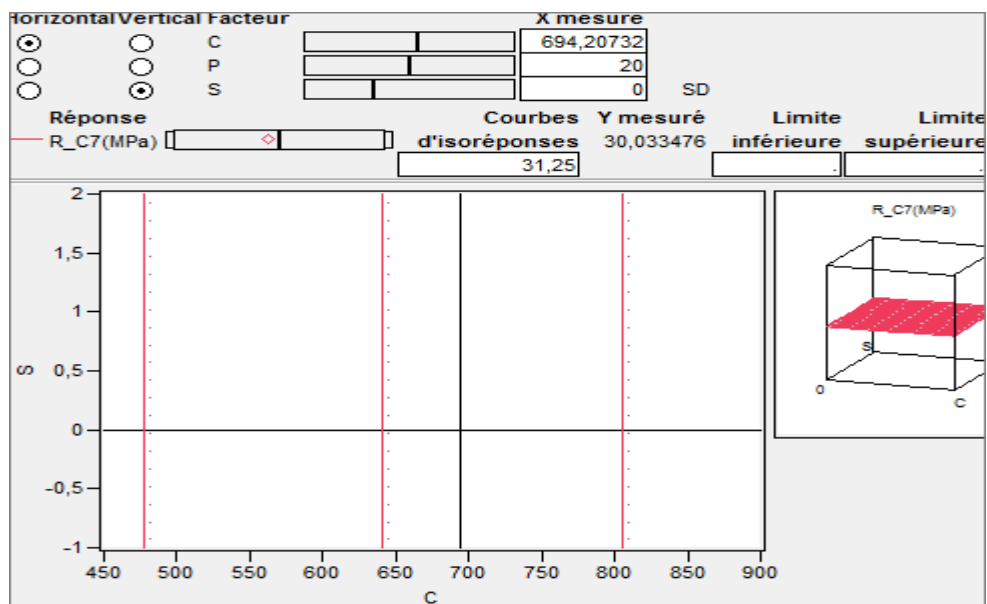


Figure VI.41 : Profileur d'isoresponses de la résistance à la compression à 28j en fonction de ciment et sable.

Chapitre VI : Modélisation par le JMP

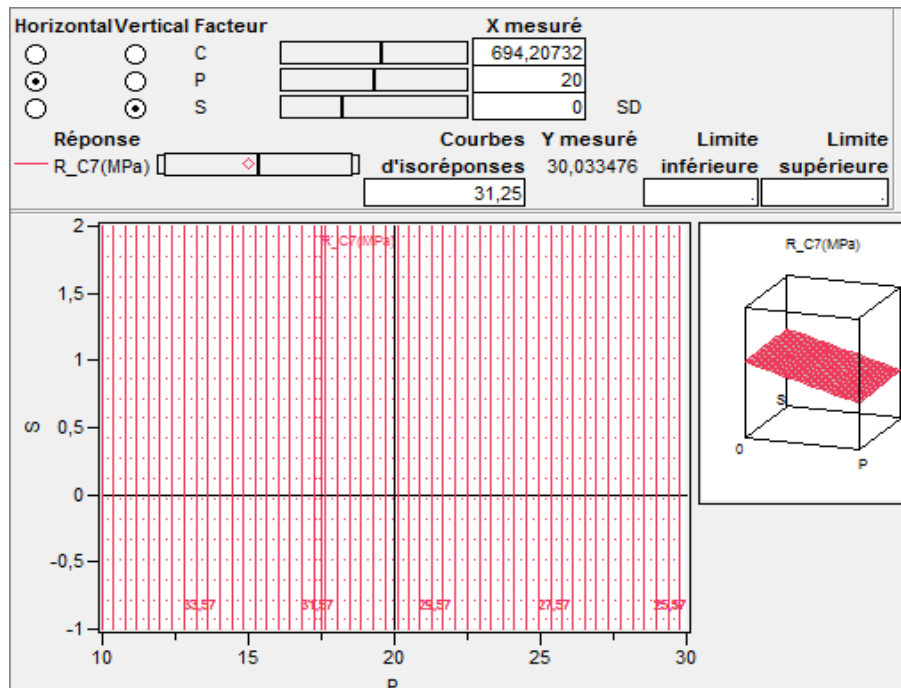


Figure VI.42 : Profilier d'isoresponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de sable et déchet de plastique.

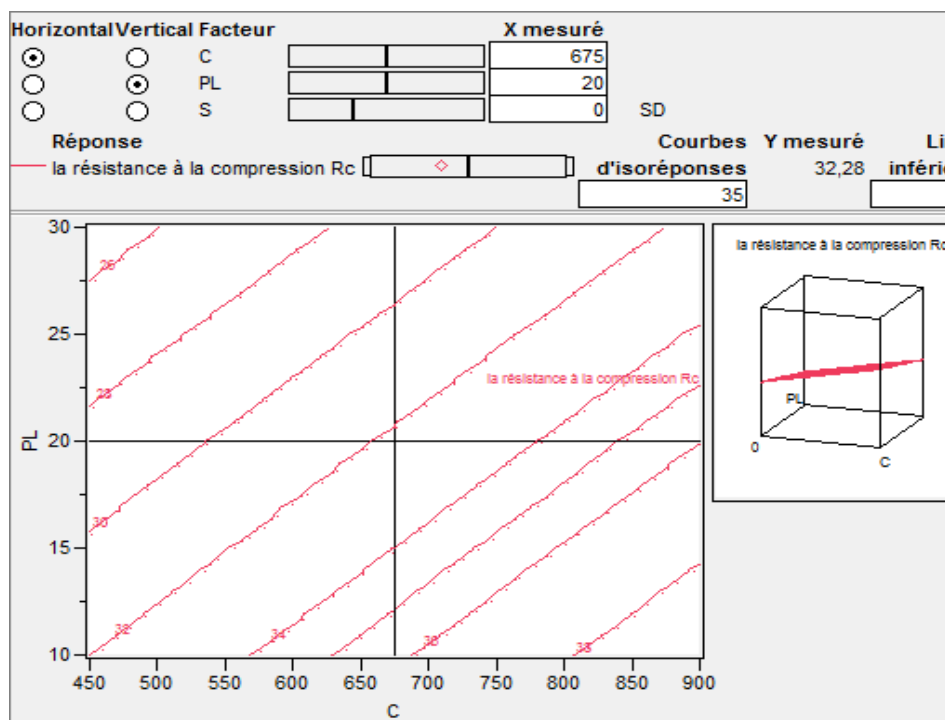


Figure VI.43 : Profilier d'isoresponses de la résistance à la compression à 28j en fonction de ciment et déchet de plastique.

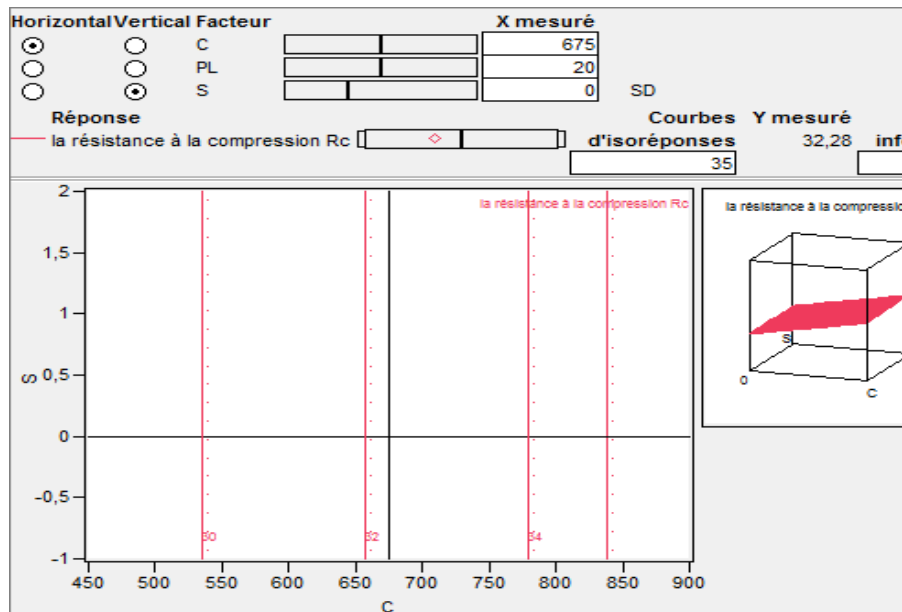


Figure VI.44 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 7j en fonction de ciment et sable.

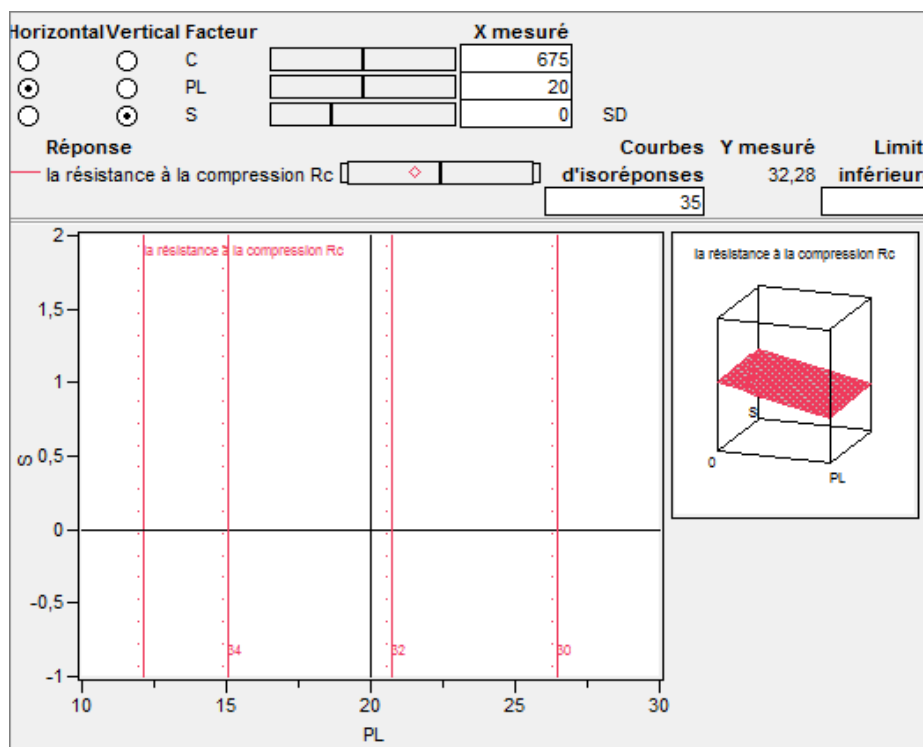


Figure VI.45 : Profileur d'isoreponses de la résistance à la compression à 28j en fonction de sable et déchet de plastique.

Les figures (VI.40, VI.41 , VI. 43, VI.44, VI.45 , VI. 46) présentent les Profileurs d'isoreponses de la résistance à 7 et 28 jours en fonction de : ciment et de déchet plastique ; ciment et sable et plastique et sable respectivement.

VI.6 Conclusion

Le plan factoriel complet est satisfaisant, les réponses prévues générées par le modèle linéaire sont en accord avec les réponses mesurées ($R^2 = 99.99\%$ pour l'étalement, $R^2 = 99\%$ pour la masse volumique et $R^2 = 99\%$ pour la résistance mécanique).

-Pour l'étalement le dosage en ciment est le facteur le plus influent par contre l'effet du type de sable et la teneur en plastique est identique.

- Pour la masse volumique la teneur en plastique est le facteur influent suivie par le type de sable.

- Pour la résistance mécanique l'effet des trois facteurs est identique (vers une augmentation du dosage en ciment, une réduction de la teneur en plastique et l'utilisation d'un sable concassé)



Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective :

Rappelons que l'objet de cette mémoire est la Caractérisation et modélisation d'un mortier léger à base des granulats des déchets plastiques. Cette étude est basée sur le remplacement du sable naturel (oued) par un pourcentage croissant (10%,20%, 30%, 40%) des déchets plastiques.

Les résultats obtenus dans cette investigation expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La substitution de PEBD comme remplacement partiel en volume du sable contribue à augmenter la maniabilité des composites MPEBD par rapport au mortier témoin. Les valeurs d'étalements des composites MPEBD tendent à augmenter de 15.88% et 70% pour les composites MPEBD 10 et MPEBD 40, respectivement. Ceci est utile dans les applications nécessitant des matériaux légers.
- La diminution de masse volumique proportionnellement avec l'augmentation de taux de déchets. Alors on peut dire que l'incorporation de déchets de plastique joue un rôle d'allègement pour les mortiers. Les valeurs de la densité des composites MPEBD tendent à diminuer de 7.45% et 22.8% pour les composites MPEBD 10 et MPEBD 40, respectivement. Ceci est utile dans les applications nécessitant des matériaux légers.
- L'augmentation du pourcentage de PEBD a un effet direct sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers composites ; plus ce pourcentage augmente, plus ces résistances chutent. Les résultats montrent une ductilité amplifiée par l'augmentation du pourcentage de substitution en PEBD, (c'est-à-dire Ain de gérer l'essai de flexion, nous constatons qu'il est difficile de casser en présence de plastique)
- Les valeurs des porosités augmentent avec l'augmentation du pourcentage de la teneur en particules de l'PEBD.
- Le coefficient de sportivité est diminué avec l'augmentation de taux du plastique. Cette diminution due que le plastique n'absorbe pas d'eau.
- Le retrait et le gonflement sont augmentés avec l'augmentation du taux de plastique.
- La perte de masse est diminuée avec l'augmentation du taux de plastique.

Pour les résultats de modélisation pour le JMP on conclut :

- Pour l'étalement le dosage en ciment est le facteur le plus influent par contre l'effet du type du sable et la teneur en plastique est identique.
- Pour la masse volumique la teneur en plastique est le facteur influent suivie par le type de sable.
- Pour la résistance mécanique l'effet des trois facteurs est identique (vers une augmentation du dosage en ciment, une réduction de la teneur en plastique et l'utilisation d'un sable concassé).

Perspective :

Pour de futures travaux de recherche en perspectives, on propose ;

- Une étude microstructurale des mortiers avec sable préparé en utilisant ATD et ATG et DRX.
- Une étude de durabilité pour estimer la résistance dans les milieux agressifs.
- L'effet de l'interface entre les granulats des plastiques (polythène à base densité) et la matrice cimentaire.
- Étude de la résistance au feu pour le MPEBD.

Liste de référence

- [1] : **A. Neville**, «propriété des bétons», Paris, 2000, pp 661
- [2] : **A. Ahmed et O. Bilal**, Mémoire Master« formulation et caractérisation d'un béton léger à de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage» 2016/2017.
- [3] : **L. Zeghichi**, «Cour béton innovant»2019/2020.
- [4] : **H. Ouided**, Mémoire de Magister« formulation et caractérisation des bétons légers» 12/07/2010.
- [5] : **SENE Licka Khadidiatou et DEIYE Khadidiatou**, Mémoire Master « les bétons à granulats légers», 2019.
- [6] : **D. Iman**, Mémoire Master «Elaboration d'un béton léger à partir des matériaux locaux», 2015/2016.
- [7] : **C. Khaoula**, Mémoire Master « Elaboration et caractérisation d'un matériau à base de polyéthylène basse densité recyclé et chargé par le Talc », pp 14-17, 2016
- [8] : **M. Leila**, Mémoire Master « Valorisation des déchets plastique sous forme des fibre dans les mortiers » 2016/2017.
- [9] : **G. Mohamed Touhami**, Mémoire Master « Effets d'agrégats légers à basse de poly téréphtalate d'éthylène sur les propriétés des mortiers »
- [10] : **L. Noureddine**, Mémoire Master « effet des agrégats à base de déchets plastiques sur les propriétés des matériaux composites – polymère »
- [11]: **Y. Ghernouti, B. Rabehi, B. Safi et R. Chaid**,2014, « Use of recycled plastic bag waste in the concrete», « published Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies», pp 483-484
- [12]: **A. Badache, A. S. Benosman, Y. Senhadji, M. Mouli**, «Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based light weight composite mortars with recycled high-density polyethylene(HDPE) », 2018, «published in journal homepage», pp 44
- [13]: **Abdulrahman S. Mohammed, Taghreed Kh. Mohammed Ali, Noor A. Rajab, Nahla Hilal**, janvier 2020, « Mechanical Properties of Concrete and Mortar Containing Low Density Polyethylene Waste Particles as Fine Aggregate», « published in journal of materials and engineering structures», Vol.2, pp 70.
- [14]: **Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, A. Makhloufi**, mai 2015 «Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC) », « published in journal homepage », Vol.82, pp

[15]: **Y. Ghernouti, et B. Rabehi**, September 2012, «Strength and Durability of Mortar Made with Plastics Bag Waste (MPBW) », « published in International Journal of Concrete Structures and Materials», Vol.6, No.3, pp 145–153.

[16]: **M. Ghendouz, F. Debieb, El H. Kadri**, mai 2015, « formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques».

[17]: **A. Jain, S. Siddique, T. Gupta, S. Jain, R. K. Sharma, S. Chaudhry**, 24 September 2018, «fresh, strength, durability and microstructural properties of shredded waste plastic concrete», «published in Iran J Sci Technol Trans Civ Eng ».

[18]: **M .Chaudhary, V. Srivastava, V.C. Agrawal**, 3 august 2014, « Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete », «published by journal of academia and industrial research (JAIR)» Vol.3

[19]: **B. Samir, D. Farid, B. Mohamed et G. Mohamed**, 2014, « valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton » , «published by EDP Science, 2014».

[20]: **Taha Houcine Douara**, thèse de doctorat «Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable», Université Mohamed Khider Biskra, faculté Des Sciences Et De La Technologie, 2019.

[21]: **R. Dupain, J.C.Saint- Ar roman**, «Granulats, Sols, Ciment et Béton», Casteilla -25, rue Monge -75005 Paris, pp

[22]: Norme porosité C642-06 « Standard test method for density, absorption and voids in hardned concrete »

[23]: **YAHIAOUI Idris**, «Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré», Université A. MIRA – Bejaia, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés.

[24]: **Claude Hoinard**, «LES PLANS FACTORIELS COMPLETS», Laboratoire de Biophysique et Mathématiques, Faculté de Pharmacie de Tours

[25]: **AYAD MOHAMED, BARKA YASSINE**, «MODÉLISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES», université Abou bekr belkaid – Tlemcen, faculté de technologie, département de génie civil

[26]: **Jacques GOUPY**, «LES PLANS D'EXPERIENCES»

[27]: **Ben Ammar Benkhada**, thèse de doctorat «traitement naturel des mortiers et bétons destines aux structures en béton préfabriqué» université Mohamed Khider Biskra, faculté Des Sciences Et De La Technologie, 19-06-2006.

Annexe

- **Masses volumiques apparentes**

La masse volumique apparente d'un granulat est le rapport de sa masse par son volume total y compris les vides entre les grains le constituant. On la détermine en calculant le quotient :
 $\rho = M / V$

M étant la masse du granulat remplissant un récipient de volume **V**.

Les masses volumiques apparentes des sables ont été déterminées conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 1097 - 3.

- **Masses volumiques absolues**

les masses volumiques absolues des sables ont été déterminées conformément au mode opératoire de la méthode de l'éprouvette graduée

- **Équivalent de sable**

L'essai d'équivalent de sable a pour objet de contrôler la propreté du sable d'éléments fins et de poussières. Il a été effectué conformément à la norme française P 18 - 598, pour le sable naturel et la norme française P 18 - 597

- **ABSORPTION D'EAU**

Les coefficients d'absorption d'eau « Ab » ont été déterminés conformément à la norme P 18 -555, pour les sables

Les résultats numériques obtenus d'après les essais effectués en laboratoire présenté sur les tableaux suivant :

Tableau1 : résultat de l'étalement (cm)

type de mortiers composite	Maniabilité (cm)
MT	10,7
M 10	12,4
M 20	13,25
M 30	16,85
M 40	18,25

Tableau 2 : résultat de la masse volumique (Kg/m³)

	7j	28j	60j
0%	1794,78	1845	2000
10%	1656	1797	1958,73
20%	1585	1722	1870

30%	1480	1651	1800
40%	1400	1518	1639,44

Tableau 3 : résultat de la résistance à la compression (MPa)

	MT	M10	M20	M30	M40
7j	29,92	24,2	23,72	21,57	20,44
28j	40,14	30,92	28,12	26,43	25,28
60j	45	31,22	29	27,14	26,5

Tableau4 : résultat de la résistance à la flexion (MPa)

	7j	28j	60j
0%	6,02	7,90	8,01
10%	4,94	6,08	6,65
20%	4,57	5,88	5,96
30%	4,34	4,66	4,8
40%	4,01	4,37	4,48

Tableau5 : résultat de la porosité

Composite	porosité (%)
MT	8,04
M10	8,77
M20	10,71
M30	11,6
M40	12,03

Tableau 6 : résultat de l'absorption par immersion

Composite	Ab (%)
MT	4,7
M10	4,58
M20	4,42
M30	4,29
M40	4,16

La figure ci dessous présente l'analyse granulométrique des mélanges.

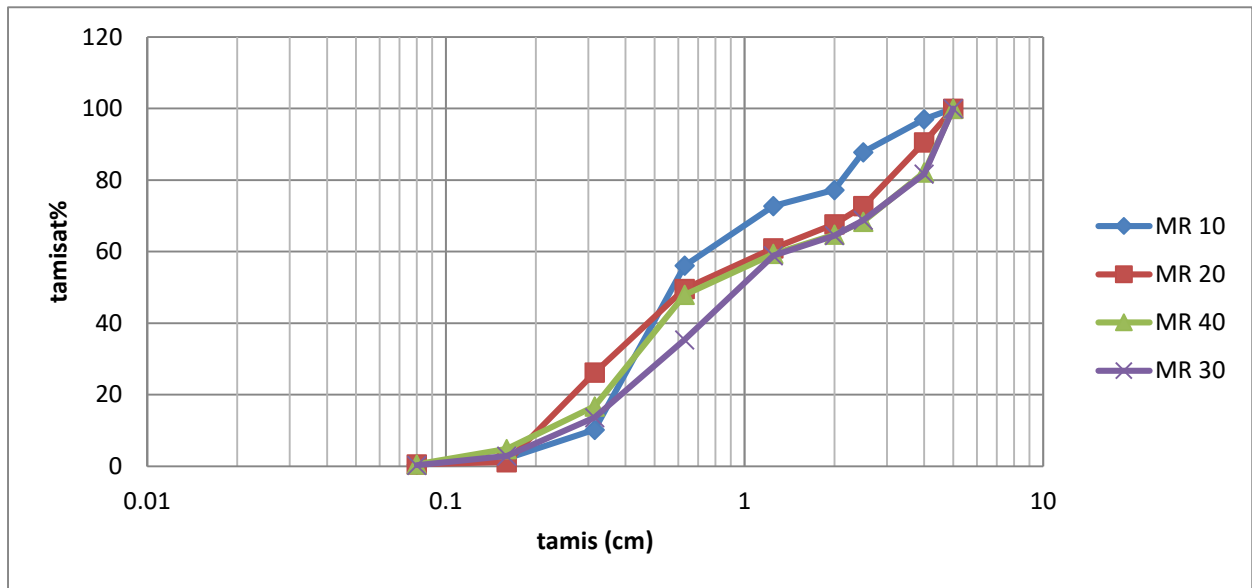


Figure : Courbe granulométrique des mélanges (0/5) mm.