

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 de construction

Thème

**Etude et modélisation de l'effet de la poudre
d'aluminium sur les propriétés des mortiers légers à
base des granulats des déchets plastiques**

Nom et Prénom de l'étudiant:

SOUICI Ikram

Encadreur :

Dr. ZEGHICHI Leila

Année universitaire : 2019 – 2020

" و ما توفيقى الا بالله عليه توكلت و اليه أنيب "

A ma mère: **Fatiha**

" Ma mère, tu es l'étoile de ma vie qui fait briller mes jours les plus sombres, qui réchauffe mon cœur quand il fait froid. Tu es l'amour à l'état brut! Je te serai reconnaissant toute ma vie, qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé!"

A mon père: **Djilani**

"Tout l'amour, l'orgueil de mon cher père, qui a été la bougie de ma vie et la lumière de mon chemin, il sera toujours vivant en moi. J'espère à Dieu qu'il aura pitié de lui et qu'il vivra au paradis!"

A ma grand- mère: **Zohra** et ma tante: **Aldjia**, que dieu les protèges

A mes frères: **Fouzi**, **Okba** et **Samir**, toujours présents et disponibles

A mes sœurs: **Samiha** et **Mebarka**, elles ont été toujours une source de courage et d'amour.

A mes chères amies: **Aya**, **Ikram** et **Hadjer**.

Je dédie ce travail



Remerciements



REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au laboratoire de matériaux de construction MDC du département du génie civil de l'université de Biskra. Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à mener à bien cette étude.

En premier lieu mes remerciements vont au mon encadreur professeur **Zeghichi Leila**, je suis très heureuse de lui adresser ma profonde gratitude pour son soutien, ses conseils judicieux durant l'élaboration de ce projet.

Ainsi je remercie tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

J'adresse aussi mes remerciements à l'ensemble des enseignants du département de génie civil.

Je tiens à remercier toute la promotion 2020.

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude

Résumés



RÉSUMÉ

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact écologique et l'impact économique. Dans plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction et spécialement dans le ciment ou béton comme poudre, fibres ou agrégats.

Ce travail étudie la possibilité d'utiliser les sacs plastiques recyclés (PEBD) dans le mortier en guise de granulats fins et le déchet d'aluminium pour la confection des composites légers destinés à l'isolation et leurs influence sur les caractéristiques des composites élaborés.

D'après les résultats expérimentaux on peut conclure que l'addition des déchets des sacs plastiques et le déchet de poudre d'aluminium présente une nette amélioration de la légèreté de ce composite, une diminution de la résistance à la traction et à la compression et une réduction importante de sa capacité d'absorption d'eau.

Le plan factoriel complet 2^3 est satisfaisant, les réponses prévues générées par le modèle linéaire sont en accord avec celles mesurées ($R^2=99\%$ pour l'étalement, $R^2=98\%$ pour la masse volumique et $R^2=84\%$ pour la résistance en compression).

Mots clés: mortier léger, déchet, sacs plastique, poudre d'aluminium, Plan d'expériences.

ABSTRACT

The recovery of waste in civil engineering is an important sector insofar as the products that we want to obtain are not subject to too strict quality criteria. Waste recycling affects two very important impacts, namely the ecological impact and the economic impact. In several countries of the world, different wastes are used in the construction sector and especially in cement or concrete as powder, fibers or aggregates.

This work studies the possibility of using recycled plastic bags (LDPE) in mortar as fine aggregates and aluminum waste for the manufacture of light composites intended for insulation and their influence on the characteristics of the composites produced.

From the experimental results it can be concluded that the addition of plastic bag waste and aluminum powder waste presents a clear improvement in the lightness of this composite, a decrease in tensile and compressive strength and a significant reduction in its water absorption capacity.

The complete factorial plan 2^3 is satisfactory, the expected responses generated by the linear model are in agreement with those measured ($R^2 = 99\%$ for the spreading, $R^2 = 98\%$ for the density and $R^2 = 84\%$ for the compressive strength).

Key words: light mortar, waste, plastic bags, aluminum powder, Experimental design.

ملخص

يعد تثمين النفايات في الهندسة المدنية قطاعاً مهماً من حيث أن المنتجات التي نريد الحصول عليها لا تخضع لمعايير الجودة الصارمة. تلمس إعادة تدوير النفايات أثريين مهمين للغاية ، وهما الأثر البيئي والأثر الاقتصادي. في العديد من دول العالم، يتم استخدام مختلف النفايات في قطاع البناء وخاصة في الإسمنت أو الخرسانة كمسحوق أو ألياف أو ركام.

يدرس هذا العمل إمكانية استخدام الأكياس البلاستيكية المعاد تدويرها (PEBD) في الملاط كركام ناعم ونفايات من الألمنيوم لتصنيع المركبات الخفيفة المخصصة للعزل كما يدرس كيفية تأثيرها على خصائص هذه الأخيرة.

انطلاقاً من النتائج التجريبية، يمكن الاستنتاج أن نفايات الأكياس البلاستيكية ونفايات مسحوق الألمنيوم المضافة تزيد من خفة هذا المركب، كما تساهم في انخفاض قوة الشدة و قوة الضغط كذلك تراجع كبير في قدرته لامتصاص الماء.

المخطط العملي الكامل 2^3 كاف ، والنتائج المستخرجة من النموذج الخطي تتوافق مع تلك المقاسة ($R^2 = 99\%$ للانتشار، $R^2 = 98\%$ للكتلة الحجمية و $R^2 = 84\%$ لقوة الضغط).

الكلمات المفتاحية: ملاط خفيف ، نفايات ، أكياس بلاستيكية ، مسحوق ألومنيوم ، تصميم تجريبي.

Table des matières



TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumés	iii
Table des matières	vii
Liste des figures	12
Liste des tableaux	16
Introduction générale	18
Première Partie. Synthèse bibliographique	21
Chapitre I. Les bétons légers	22
I.1 Introduction.....	23
I.2 Les bétons légers	23
I.2.1 Définition	23
I.2.2 Classification des bétons légers	23
I.3 Type des bétons légers	24
I.3.1 Le béton cellulaire	25
I.3.2 Béton caverneux	26
I.3.3 Béton à base de granulats légers	26
I.4 Absorption d'eau des granulats légers	27
I.4.1 Adhérence pâte-granulats légers	27
I.5 Propriétés des bétons légers	28
I.5.1 La légèreté	28
I.5.2 La porosité	28
I.5.3 Retrait	29
I.5.4 Isolation	29
I.6 Durcissement des bétons légers	29
I.7 Résistance des bétons légers	30
I.8 Durabilité du béton léger	30
I.9 Les avantages et les inconvénients du béton léger	30
I.9.1 Les avantages des bétons légers par rapport au béton ordinaire	30
I.9.2 Les inconvénients majeurs des bétons légers par rapport au béton ordinaire	31
I.10 Différence entre bétons classiques et béton légers	31
I.11 Domaine d'utilisation des bétons légers	31

Table des matières

I.12 Conclusion	32
Chapitre II. Valorisation des déchets plastiques	33
II.1 Introduction	34
II.2 La chimie du plastique.....	34
II.3 Les types de plastiques	35
II.3.1 Le polyéthylène téréphtalate (PET)	35
II.3.2 Le polychlorure de vinyle (PVC)	35
II.3.3 Le polyéthylène (PE)	36
II.3.4 Le polypropylène (PP)	36
II.3.5 Le polystyrène (PS)	37
II.4 Déchets plastiques	37
II.4.1 Déchets plastiques industriels	37
II.4.2 Les déchets plastiques de post-consommation.....	38
II.5 Impact des déchets plastiques.....	38
II.6 Valorisation des déchets plastiques	39
II.6.1 La valorisation énergétique	39
II.6.2 La valorisation mécanique.....	39
II.6.3 Valorisation chimique	39
II.7 Gestion de déchet plastique	39
II.8 Recyclage des plastiques	40
II.9 Classification des plastiques réutilisés et valorisés dans le béton et mortiers	41
II.9.1 Polypropylène vierge.....	41
II.9.2 Le plastique recyclé des résidus d'automobiles broyé	41
II.9.3 Plastique recyclé (décheté ou rappé).....	41
II.10 Evaluation des propriétés des mortiers / bétons à bases des agrégats plastiques	41
II.11 Conclusion	44
Chapitre III. Plans d'expériences	45
III.1 Introduction	46
III.2 Définition	46
III.3 Principe	46
III.4 Faites des connaissances avec la méthode des plans d'expériences.....	46
III.4.1: Processus d'acquisition des connaissances	46
III.5 Terminologie	48

Table des matières

III.5.1 Les différents types de facteurs	48
III.5.2 Notion d'espace expérimental	48
III.5.3 Notion de modélisation mathématique	50
III.6 Méthodologie des plans d'expériences	50
III.6.1 La recherche des facteurs influents	51
III.6.2 La modélisation	51
III.6.3 L'optimisation.....	51
III.7 Les types de plan d'expérience	51
III.8 Plan factoriel complet	51
III.9 Intérêt des plans d'expériences	52
III.10 Principaux avantages des plans d'expériences	52
III.11 Conclusion	52
Deuxième Partie. Etude expérimentale	53
Chapitre IV. Caractérisation des matériaux	54
IV.1 Introduction	55
IV.2 Caractéristiques des matériaux.....	55
IV.2.1 Ciment.....	55
IV.2.2 Sable	56
IV.2.3 Les déchets de plastique	57
IV.2.4 Les déchets de la poudre d'aluminium	58
IV.2.5 Eau de gâchage	60
IV.3 Procédure expérimentales et méthodes d'essais	60
IV.3.1 Composition du mortier léger	60
IV.3.2 Malaxage du mortier léger	62
IV.3.3 Caractérisation des mortiers légers	62
IV.4 Conclusion	67
Chapitre V. Résultats et discussion	68
V.1 Introduction	69
V.2 À l'état frais	69
V.2.1 Essai de maniabilité	69
V.3 À l'état durci	70
V.3.1 Essai de gonflement	70
V.3.2 Essai de retrait	71

Table des matières

V.3.3 Essai de porosité accessible à l'eau	72
V.3.4 Evaluation de la masse volumique	73
V.3.5 Essai d'absorption	74
V.3.6 Essai d'absorption capillaire	74
V.3.7 Essai de la résistance à la traction par flexion	75
V.3.8 Essai de la résistance à la compression	76
V.4 Conclusion	77
Chapitre VI. Modélisation de plan d'expérience.....	78
VI.1 Introduction	79
VI.2 Réalisation du plan d'expérience au laboratoire	79
VI.3 Modélisation du plan d'expérience	79
VI.3.1 Facteurs	79
VI.3.2 Niveaux des facteurs	79
VI.3.3 Réponses	80
VI.3.4 Choix du plan d'expérience	80
VI.3.5 Interactions	80
VI.4 Formulation du mortier léger	81
VI.5 Résultats des essais	81
VI.5.1 Etalement	81
VI.5.2 La masse volumique à 28 j	81
VI.5.3 La résistance à la compression à 28j	82
VI.5.4 Analyse des résultats.....	82
VI.6 Modélisation.....	82
VI.6.1 Etalement	82
VI.6.2 La masse volumique à 28j	86
VI.6.3 La résistance à la compression à 28j	89
VI.7 Conclusion	92
Conclusion générale	93
Références Bibliographiques.....	96
Annexes. Tableaux des résultats	101

Liste des figures



LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Classification des bétons légers proposés par Lafarge [3] 24

Figure I.2: Représentation schématique de différents types de bétons légers [M. SHINK, 2003] [3] 25

Figure I.3: Composition du béton cellulaire [40] 25

Figure I.4: Structure du béton cellulaire (échelle 1/1) [39] 26

Figure I.5: Structure du béton cellulaire vue au microscope électronique [41] 26

Figure I.6: Interface pâte- granulats et mécanismes d'interaction identifiés [42] 27

Figure I.7: Béton normale à gauche et béton léger adroite ayant le même poids 28

Figure I.8: Porosité de béton 29

Figure II.1: Structure chimique de polymère (d'après Krueger et al., 2015) [14] 34

Figure II.2: Bouteilles en PET 35

Figure II.3: Film en PET 35

Figure II.4: Isolant en PVC 36

Figure II.5: Tuyaux en PVC 36

Figure II.6: Bouteille de lait en PEHD 36

Figure II.7: Sac réutilisable en PEBD 36

Figure II.8: Emballage alimentaire en PP 37

Figure II.9: Parechoc en PP 37

Figure II.10: Goblet (PS) 37

Figure II.11: Emballage (HIPS) 37

Figure II.12: Emballage (PSE) 37

Figure II.13: Processus de gestion des déchets plastiques 40

Figure III.1: Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances 47

Figure III.2: Le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur 49

Figure III.3: Espace expérimental d'un facteur 49

Figure III.4: Les points expérimentaux dans un espace 49

Figure III.5: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude 50

Figure III.6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental [11] .. 52

Figure IV.1: Ciment CPJ 55

Figure IV.2: Sable d'oued 56

Figure IV.3: Courbe granulométrique du sable 57

Figure IV.4: Traitement des sacs plastiques [10] 58

Figure IV.5: Analyse granulométrique de plastique 58

Figure IV.6: La poudre d'aluminium 59

Figure IV.7: Analyses granulométriques du sable, plastique et des mélanges (90%+10%), (70%+30%) 61

Figure IV.8: Malaxeur du mortier 62

Figure IV.9: Table à secousse 63

Figure IV.10: Gonflement des éprouvettes du mortier 63

Figure IV.11: Appareil de pesée hydrostatique 64

Figure IV.12: Essai d'absorption par immersion 65

Liste des figures

Figure IV.13: Essai d'absorption capillaire	65
Figure IV.14: Appareil pour la mesure du retrait et du gonflement	66
Figure IV.15: Essai de la résistance à la flexion	67
Figure IV.16: Essai de résistance a la compression	67
Figure V.1: Variation d'étalement en (cm) en fonction du type des mélanges.....	69
Figure V.2: Variation de masse des éprouvettes conservées dans l'eau en fonction du pourcentage de déchet plastique.....	70
Figure V.3: Variation de longueur des éprouvettes conservées dans l'eau (gonflement) en fonction du taux de plastique et d'aluminium et en fonction du temps	71
Figure V.4: Variation de masse des éprouvettes conservées a l'air en fonction du taux du plastique et d'aluminium et en fonction du temps	71
Figure V.5: Retrait en ($\text{mm/m} \cdot 10^3$) en fonction du taux de plastique et d'aluminium et en fonction du temps	72
Figure V.6 : Porosité en (%) en fonction du type de mortier	73
Figure V.7: La masse volumique a 7j et a 28j (g / Cm^3) en fonction du type de mortier.....	73
Figure V.8: Absorption par immersion a 28j (%) en fonction de type du mortier.....	74
Figure V.9: Coefficients de sorptivite a 28 j des mortiers en fonction de différentes compositions.....	75
Figure V.10: La résistance a la traction par flexion a 7j et a 28j (Mpa) en fonction de type du mortier	75
Figure V.11: La résistance a la compression a 7j et 28j (mpa) en fonction de type du mortier	76
Figure VI.1: Estimation des coefficients	83
Figure VI.2: Diagramme de chaque facteur.....	83
Figure VI.3: Profil d'interaction de réponse d'étalement en fonction des facteurs (C, P, A). 84	
Figure VI.4: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues.....	84
Figure VI.5: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	84
Figure VI.6: Digramme de pareto	85
Figure VI.7: Profileurs d'isoreponses d'étalement en fonction de deux facteurs combines .. 85	
Figure VI.8: Estimation des coefficients	86
Figure VI.9: Diagramme de chaque facteur.....	86
Figure VI.10: Profil d'interaction de réponse de la masse volumique en fonction des facteurs (C, P, A)	87
Figure VI.11: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues.....	87
Figure VI.12: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	87
Figure VI.13: Diagramme de pareto d'estimation	88
Figure VI.14: Profileurs d'isoréponses de la masse volumique en fonction de deux facteurs combinés.....	88
Figure VI.15: Estimation des coefficients	89
Figure VI.16: Diagramme de chaque facteur.....	89
Figure VI.17: Profil d'interaction de réponse de la résistance a la compression en fonction des facteurs (C, P, A)	90
Figure VI.18: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues.....	90
Figure IV.19: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	90

Liste des figures

Figure VI.20: Diagramme de pareto	91
Figure VI.21: Profileur d'isoreponses de la resistance à la compression en fonction de combinaison des deux facteurs.....	91

Liste des tableaux



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Classification des bétons légers selon le guide ACI213R-87[5].....	24
Tableau II.1: Propriétés physiques des déchets du PEBD.....	41
Tableau II.2: Synthèse de revue bibliographique sur l'évaluation des propriétés des composites (beton / mortier) contenant des déchets plastiques valorisés	41
Tableau IV.1: Caractéristiques du ciment	56
Tableau IV.2: Composition chimique (%) de ciment.....	56
Tableau IV.3: Composition minéralogique (%) de ciment.....	56
Tableau IV.4: Propriétés physiques du sable.....	57
Tableau IV.5: Les propriétés physiques de déchets de sacs plastiques	58
Tableau IV.6: Les teneurs des éléments de composition de l'aluminium [3].	59
Tableau IV.7: Propriétés physiques de déchet de la poudre d'aluminium	59
Tableau IV.8: Synthèse de l'étude expérimentale.....	60
Tableau IV.9: Porosité des mélanges.....	62
Tableau IV.10: Methode de malaxage du mortier léger [7].	62
Tableau VI.1: Synthèse de plan d'expérience	79
Tableau VI.2: Les niveaux des facteurs.....	79
Tableau VI.3: La matrice des effets.....	80
Tableau VI.4: Matrice générale des effets et leur interaction.....	80
Tableau VI.5: Formulation du mortier léger.....	81
Tableau VI.6: Résultats d'essai (étalement)	81
Tableau VI.7: Résultats d'essai (la masse volumique a 28j)	82
Tableau VI.8: Résultat d'essai (la résistance a la compression a 28j).....	82

Introduction générale



INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte :

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières plastiques représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie importante induisant par suite une pollution visuelle partout. La gestion des déchets plastiques est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets d'emballages plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage. Les matériaux de construction peuvent représenter un débouché intéressant. En effet, des études antérieures ont montré qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons et mortiers et même d'autres types de déchets comme les granulats recyclés de démolition et / ou de construction [15].

En Algérie, les sacs plastiques sont très prisés à cause de leur cout très bas. Chaque algérien consomme en moyenne 117 sacs par an, ce qui donne un total de 6 milliards de sacs par an. Cette situation provoque un problème environnemental majeur, en raison du caractère non-biodégradable de ces derniers [16].

Le présent sujet de recherche s'inscrit dans ce contexte, il porte sur l'étude du comportement physique et mécanique et quelques aspects de durabilité des mortiers confectionnés à partir des granulats à base de déchets plastiques, notamment le polyéthylène basse densité (PEBD) recyclé, issu des sacs plastiques qui a été utilisé comme granulats fins dans le mortier, en substitution partielle de sable (10% et 30%) pour la production d'un matériau composite léger prenant en compte son utilisation en isolation, on a utilisé un autre déchet qui est la poudre d'aluminium additionné par des faibles quantités (0.5% et 1%) par rapport au poids du ciment afin de créer des vides dans la matrice cimentaire .

L'optimisation et l'influence des paramètres affectant les propriétés principales des mortiers légers (maniabilité, masse volumique et résistance mécanique à 28 jours) est faite en utilisant un plan factoriel complet.

2. Problématique :

La pollution par le plastique ou « pollution plastique » est une pollution engendrée par l'accumulation de déchets en matière plastique dans l'environnement spécialement les sacs plastiques qui sont une source de pollution à cause de leurs consommation fréquente, ces déchets sont emportés par le vent ou par l'eau vers la mer ou enfouit dans le sol. La nocivité des sacs plastiques apparaitre dans sa basse dégradation (100-400 années). Ce qui nécessite des solutions accélérées pour limiter les nuisances liées à ce problème.

3. Objectifs visés :

L'objectif de la présente étude est multiple. Il s'agit d'abord de protéger l'environnement d'une part et exploiter les avantages économiques et techniques des sacs plastiques d'autre

Introduction générale

part, c'est ainsi nous allons les valoriser par le recyclage dans notre domaine d'étude comme granulats fins, légers dans les constituants du mortier.

Et pour élargir le domaine d'application des mortiers élaborés aux matériaux isolants (mortiers isolants) on additionne la poudre d'Aluminium comme agent expansif (dans notre cas on a utilisé un déchet d'aluminium) afin d'augmenter l'efficacité de ces derniers en isolation.

4. Méthodologie de travail :

Afin de répondre aux objectifs visés, le présent mémoire est structuré en six chapitres divisés en deux parties :

La **première partie** est consacrée à une synthèse bibliographique, elle contient trois chapitres :

Chapitre I: consacré à une synthèse bibliographique sur les bétons légers.

Chapitre II: une revue bibliographique sur les différentes études réalisées sur la valorisation des déchets plastiques et leurs utilisation pour la fabrication des différentes composites (béton/ mortiers). Nous présentons également l'effet de divers types des déchets plastiques recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques du (béton/ mortier).

Chapitre III : une recherche bibliographique sur les plans d'expériences et leur importance dans notre domaine d'étude.

La **deuxième partie** : est consacré au programme expérimental élaboré le long de cette étude, elle contient trois chapitres :

Chapitre IV : met en évidence les principales caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi qu'une explication de la procédure expérimentale approuvée, y compris une description des différentes expériences effectuées au cours de ce travail.

Chapitre V : traite l'analyse et l'interprétation des différents résultats obtenus.

Chapitres VI : présente la modélisation par le plan d'expérience (JMP logiciel) afin d'optimiser les effets des principaux paramètres, leurs interactions et la réponse prévue à partir du modèle généré lors de l'utilisation du plan factoriel complet.

Première Partie. Synthèse bibliographique

Chapitre I. Les bétons légers



I.1 Introduction:

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de constructions orienté vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique .En effet, le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport de l'élément manufacturé et à des gains de productivité à la mise en œuvre [1].

I.2 Les bétons légers :

Bien que connus depuis plus d'un demi-siècle, les bétons légers ont été relativement peu employés. Toutefois, la crise du logement liée au manque considérable en matériaux de construction ainsi que la consommation d'énergie de chauffage et de rafraîchissement des locaux qui ne cessent d'augmenter, ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux et déchets industriels. Leur transformation en bétons légers demeure l'une des bétons constitués de granulats de faible densité [38].

La masse volumique apparente des bétons traditionnels fabriqués avec des granulats rigides est comprise entre 2200 et 2600 kg/m^3 . Et la masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800 kg/m^3 [RILEM (1970)] [5]. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'**American Concrete Institute (1970)** [5]. Limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. La norme **DIN 1042 (1972)**, en Allemagne, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg/m^3 [5].

I.2.1 Définition :

Les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique s'échelonne de 400 à 1800 kg/m^3 ; l'allègement peut s'obtenir de différentes façons :

- En utilisant des granulats légers
- En remplaçant les granulats par des bulles d'air
- En utilisant des vides importants entre les granulats denses (légers) collés entre eux sans élément fins (sable) [2].

I.2.2 Classification des bétons légers :

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage** : leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m^3 , leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.
- **Des bétons porteurs isolants** : leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 4000 kg/m^3 , leurs résistances mécaniques sont nettement meilleurs que celles

Chapitre I: Les bétons légers

des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

- **Des bétons de structures** : leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m^3 ils sont destinés à la constitution grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible [38].

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide **ACI213R-87** [5] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci (voir le tableau).

Tableau I.1: Classification des bétons légers selon le guide **ACI213R-87**[5]

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

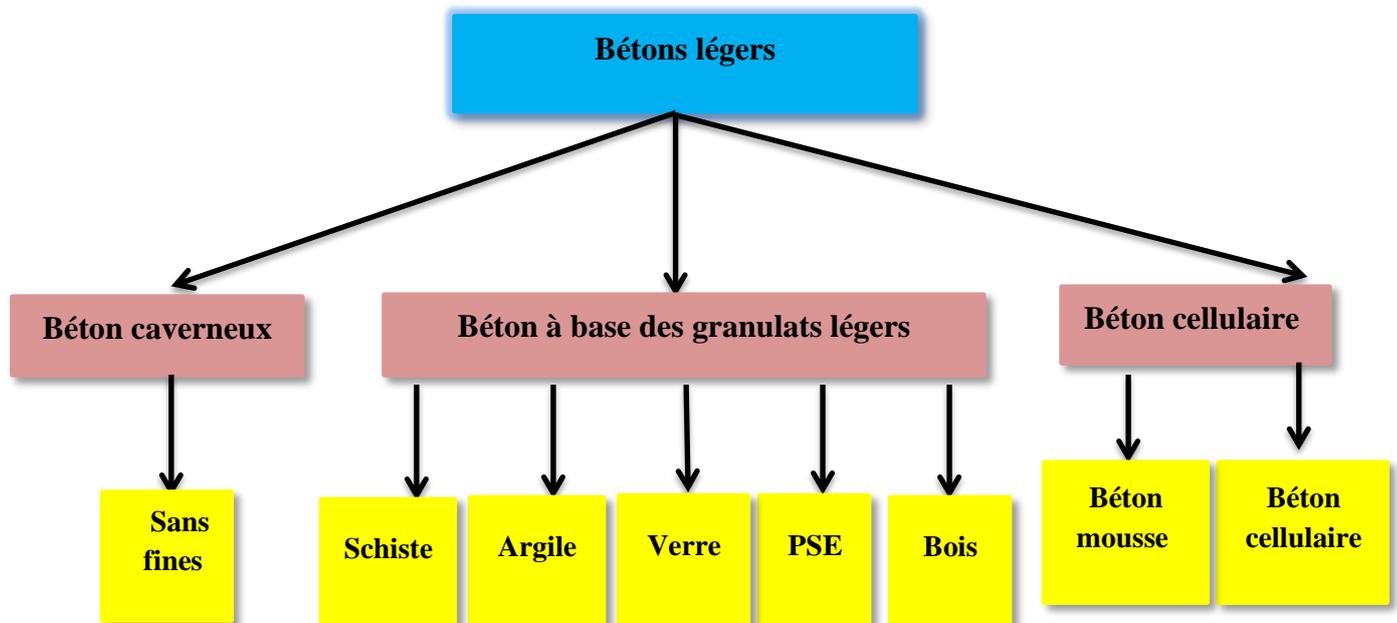


Figure I.1: Classification des bétons légers proposés par Lafarge [3]

I.3 Type des bétons légers :

Il existe les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton :

- **La matrice** : le béton dans ce cas est appelé « béton cellulaire ». Les bulles d'air sont créées lors du malaxage de béton, soit par réaction chimique, soit par action physique.
- **Entre les gros granulats** : le béton dans ce cas est appelé « béton caverneux » (ou sans fines c'est-à-dire sans sable).
- **Dans les granulats** : le béton dans ce cas est appelé « béton de granulats légers ».

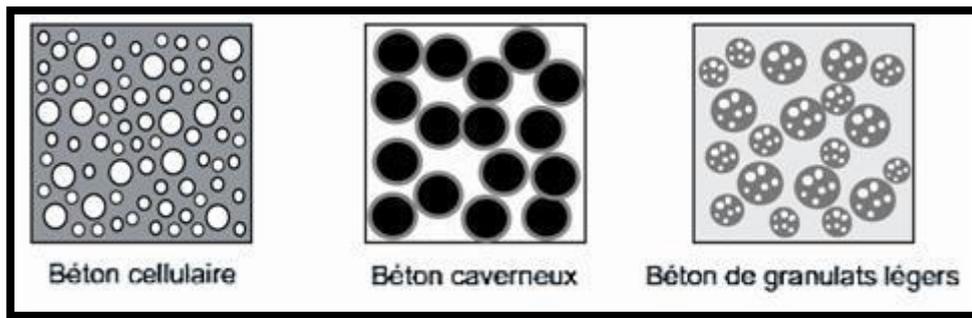


Figure I.2: Représentation schématique de différents types des bétons légers [M.SHINK, 2003] [3]

I.3.1 Le béton cellulaire :

Lors de la classification initiale des bétons légers, on a indiqué que l'incorporation de vides stable à l'intérieur de la pâte de ciment ou du mortier durci constitue une méthode pour réduire la masse volumique du béton. L'incorporation d'un gaz se fait habituellement en utilisant de la poudre d'aluminium finement divisée, dans une proportion d'environ 0.2% de la masse de ciment. La réaction de la poudre avec l'hydroxyde de calcium ou les alcalis du ciment libère des bulles d'hydrogène. Les bulles provoquent l'expansion de la pâte de ciment ou du mortier qui doivent avoir une consistance suffisante pour empêcher qu'elles ne s'échappent [10].

Au milieu alcalin la poudre d'aluminium par exemple réagit comme suit :



Le béton cellulaire est un matériau de construction à base de matières minérales présentes en abondance dans la nature, ses constituants sont : du sable fin, du ciment, de la chaux et d'un agent expansif tel que :

- Poudre d'aluminium
- Agent moussant
- Entraîneur d'air [39].

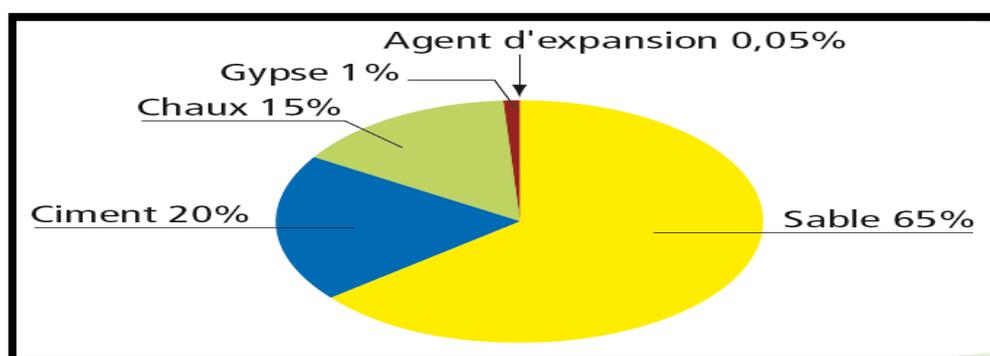


Figure I.3: Composition du béton cellulaire [40]

I.3.1.1 Structure de béton cellulaire :

La structure de béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et microporeuse. Les microsopes sont formés en raison de l'expansion de la masse causée par le dégagement du gaz et les microsopes apparaissent dans les parois entre les microsopes. Les microsopes sont des pores avec un diamètre de plus de 60 μm .

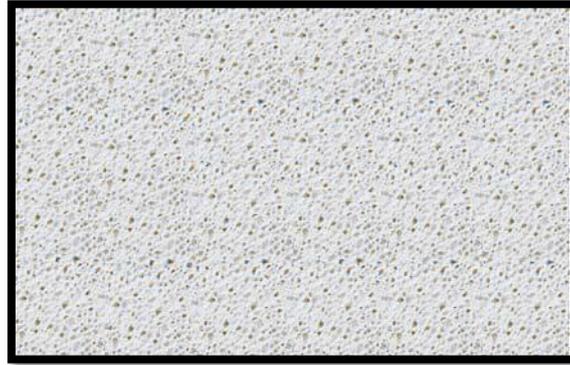


Figure I.4: Structure du béton cellulaire (échelle 1/1) [39]

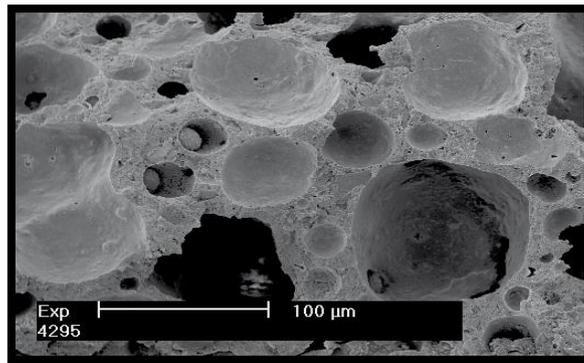


Figure I.5: Structure du béton cellulaire vue au microscope électronique [41]

I.3.2 Béton caverneux:

Ce sont des bétons obtenus par un mélange de ciment et des granulats (courants ou légers) sans sable, ou très peu de sable avec une quantité d'eau de gâchage minimale juste nécessaire pour assurer l'enrobage des graviers.

Ce sont des bétons de densité assez finale (1.6 à 1.8 t/m^3) avec des graviers courantes et de (0.7 à 1 t/m^3) avec de l'argile expansée leur résistance mécanique est médiocre (3 à 7 MPa) [2].

I.3.3 Béton à base de granulats légers :

I.3.3.1 Origine des granulats :

Les granulats légers ont plusieurs origine, ils peuvent être naturels, obtenus par traitements des déchets ou fabriqués spécialement pour bétons légers.

- Les granulats légers naturels d'origine : minérale ou végétale :

Chapitre I: Les bétons légers

Minérale : ponce, pouzzolane.

Végétale : copeaux de bois, granulats de liège.

- **Granulats obtenus par traitements des déchets industriels :**

Laitier expansé, cendres volantes, vermiculite, perlite.

- **Granulats fabriqués spécialement :**

Argile et schiste expansé, verre fritté, polystyrène expansée [2].

I.4 Absorption d'eau des granulats légers :

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75% du volume apparent), la taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats, mais déterminent surtout leurs propriétés d'absorption (taux d'absorption et absorption totale), les données des littératures montrent que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels est très élevé, plus de 50 % de l'absorption des toutes premières minutes. Par ailleurs, la porosité des granulats légers varie proportionnellement à la taille des grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente [1].

I.4.1 Adhérence pâte-granulats légers :

La qualité des interfaces pâte – granulats légers est généralement supérieure à celle des bétons de granulats rigides. Des mécanismes d'interaction physico-chimique et mécanique ont été identifiés par [Zhang et Gjorv] [42], voir la figure I.6 ci-dessous ; la pâte de ciment peut venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers. Cet ancrage qui améliore l'adhérence des granulats à la matrice cimentaire, dépend de la texture des granulats, de la taille des grains et de la viscosité de la matrice.

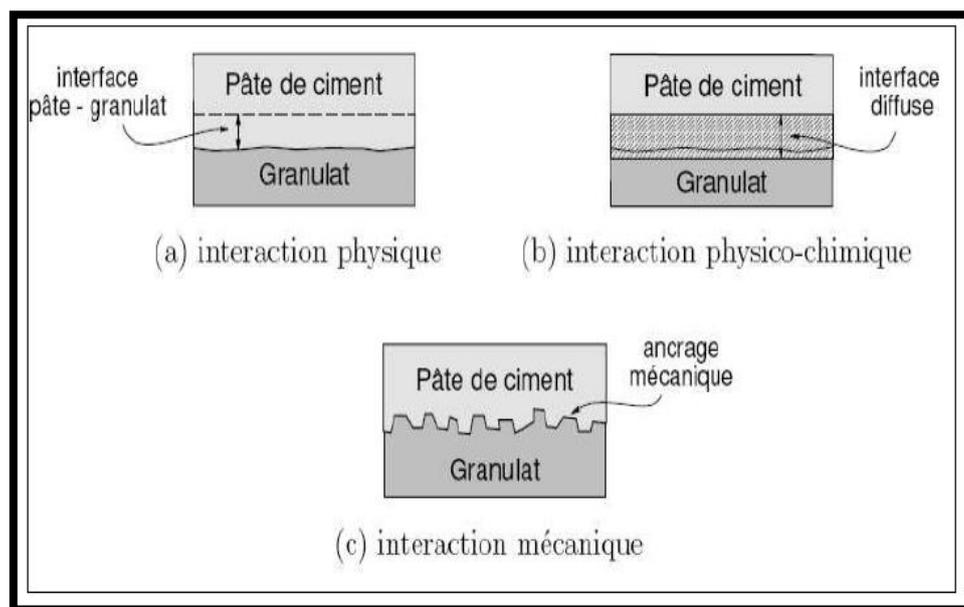


Figure I.6: Interface pâte- granulats et mécanismes d'interaction identifiés [42]

I.5 Propriétés des bétons légers :

I.5.1 La légèreté :

L'emploi des bétons légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30% de la masse volumique des bétons. la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m^3 pour un béton de bois, et elle varie entre de 350 et 650 kg/m^3 pour un béton cellulaire. 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 des fondations moins importantes lors de la construction.

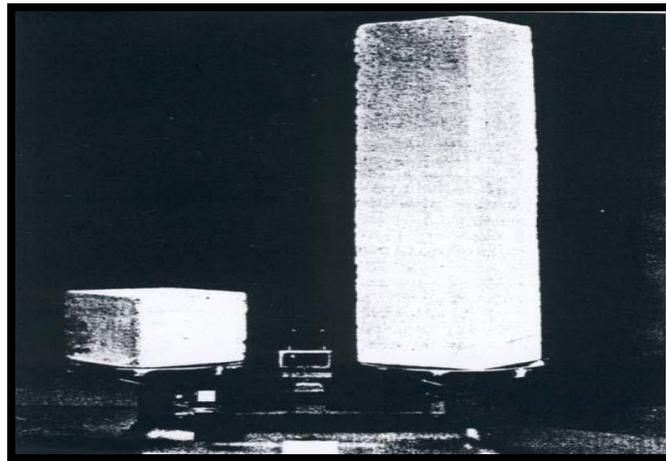


Figure I.7: Béton normale à gauche et béton léger à droite ayant le même poids

I.5.2 La porosité :

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulats, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (\AA) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée ϕ_g , due à la présence de l'air intra-particules, compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de μm), la porosité du granulats sera qualifiée de porosité microscopique.

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant ϕ_1 . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de Ca(OH)_2 ou de C-S-H. varie entre $0.01 \mu\text{m}$ et de $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varient entre $5 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$ l'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\phi_1 = \frac{V_{vide}}{V_{liant}}, \text{ avec;}$$

V_{vide} : Volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3).

V_{liant} : Volume totale occupé par la pâte de liant (m^3).

Chapitre I: Les bétons légers

Enfin, l'arrangement plus au moins compact des différents constituants entre eux (empilement du granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau.

$$\Phi_{mésos} = \frac{V_{vide}}{V_t}, \text{ avec ;}$$

V_{vide} : Volume des vides contenus dans le matériau autre que l'air intra-liant et intra-particules (m^3).

V_t : Volume totale occupé par le matériau (m^3).

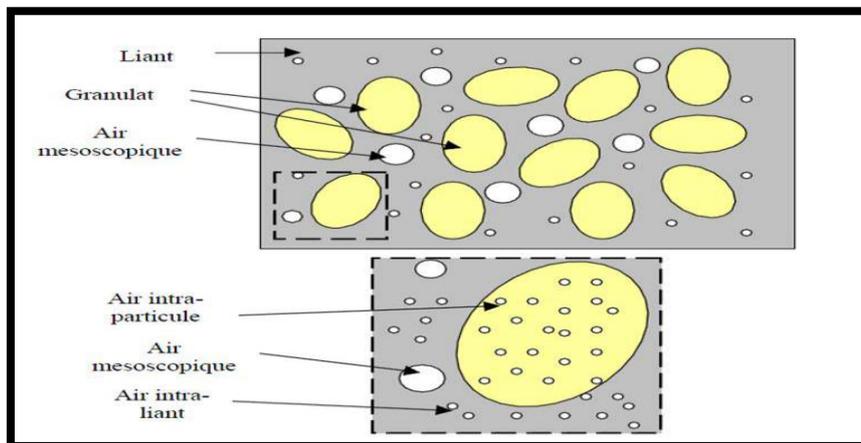


Figure I.8: Porosité de béton

La porosité est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82 % d'un béton cellulaire et 52% d'un béton de bois [3].

I.5.3 Retrait :

Les bétons légers présentent pour la plupart, un retrait plus important que les bétons traditionnels et également plus tardif, car l'eau absorbée par les granules légers se trouve progressivement restituée par la matrice, retardant ainsi la déshydratation du mortier, cause principale du retrait. Le retrait est évalué en valeur finale selon le dosage en ciment, en eau et la nature des granules légers utilisés.

I.5.4 Isolation :

Une des propriétés intéressantes des bétons de granules légers et leur pouvoir d'isolation thermique due aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Le béton parfaitement sec est plus isolant que le béton humide, ces bétons légers constituent aussi de bons isolants phoniques.

I.6 Durcissement des bétons légers :

Lors de durcissement et selon la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment, les bétons légers peuvent être soumis à une plus forte augmentation de température que les bétons de granules rigides, de plus étant donné leur meilleure capacité d'isolation cette élévation peut s'étendre sur une plus longue période et par conséquent favoriser les gradients thermiques [1].

I.7 Résistance des bétons légers :

Il est toujours difficile de déterminer de façon précise la quantité d'eau libre dans les bétons confectionnés avec la plupart des granulats légers. On ne peut donc établir la valeur du rapport eau/ciment sur la base de l'eau libre dans le béton ; le rapport eau/ciment basé sur la quantité totale d'eau n'est pas plus significatif puisque l'eau absorbée par les granulats ne concerne pas la formation des pores capillaires, qui influencent la résistance.

Par ailleurs, pour un granulat donné, il y a une certaine relation entre le dosage en ciment du béton et sa résistance à la compression. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers de l'eau, pour n'importe quel granulat particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique, mais, selon le type de granulat, un béton de 20 MPa peut nécessiter entre 260 et 330 kg de ciment par mètre cube, alors qu'un béton de 40 MPa en exigera de 420 à 500 kg/m³.

I.8 Durabilité du béton léger :

L'utilisation de granulats légers n'entraîne pas d'effet préjudiciable sérieux sur la durabilité, si ce n'est lorsqu'ils sont saturés et soumis à des cycles de gel-dégel, Parce que le réseau poreux d'un granulat léger est généralement discontinu, la porosité des granulats eux- même ne modifie pas la perméabilité du béton, qui est contrôlée par la perméabilité de la pâte de ciment. Néanmoins la perméabilité du béton est diminuée quand on remplace une partie du granulat léger fin par un granulat fin de densité normale, ce qui s'explique sans doute par une plus faible valeur du rapport eau/ciment.

La faible perméabilité du béton léger est le résultat de plusieurs facteurs : le faible rapport eau/ciment de la pâte ; la qualité élevée de l'interface pâte-granulats, ce qui empêche l'écoulement autour des granulats, la compatibilité entre les modules d'élasticité des granulats et de la matrice cimentaire engendre très peu de microfissuration sous l'application d'une charge ou par suite d'une variation de température. De plus, la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité [4].

I.9 Les avantages et les inconvénients du béton léger :

I.9.1 Les avantages des bétons légers par rapport au béton ordinaire :

Selon CIMEbeton (2000) [5], le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids des bâtiments. Les pièces des bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids des fondations (Neville, 2000) [5]. De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau (Neville, 2000) [5]. Etant donné le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

Les autres (Hart 2001, Neville 2000 et Picon 1997) [5] notent les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger, en raison, surtout de sa fabrication en usine. Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (CIMEbeton, 2000) [5].

Chapitre I: Les bétons légers

Le béton léger, par la présence d'un réseau de bulles d'air dans sa formulation, a des propriétés d'isolation thermique et acoustique. Comme dans le cas des autres bétons légers, la conductivité thermique varie en fonction de la masse volumique. Il faut rappeler que la conductivité thermique augmente de façon linéaire avec la teneur en humidité.

I.9.2 Les inconvénients majeurs des bétons légers par rapport au béton ordinaire :

Les auteurs (Neville 2000 et CIMebéton 2000) [5] présentent, dans leurs ouvrages, les inconvénients du béton léger. Le béton léger a des résistances mécaniques inférieures à celles d'un béton ordinaire (Neville, 2000) [5]. Le module élastique est aussi plus faible, donc la résistance à la déformation, la flèche et le point de rupture du matériau sont plus faibles. Il est à noter que pour l'utilisation d'un béton à granulats légers (granulats expansés) le prix des granulats est plus élevé, donc le prix par mètre cube de béton léger est plus élevé que celui des bétons ordinaires. Le béton léger est un matériau fragile. Par ailleurs, la mise en œuvre sur le chantier doit être plus délicate en raison de la fragilité du matériau, surtout pour les pièces de grandes dimensions.

I.10 Différence entre bétons classiques et béton légers :

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir :

- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres.

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 de portance.
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique.

I.11 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 aux laitiers expansés, à l'argile frittée expansée, aux cendres volantes...etc.
- **Isolants 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.

Dans la construction on les utilise comme :

Chapitre I: Les bétons légers

- Bloc de maçonnerie.
- Panneau préfabriqué.
- Mur antibruit.
- Bardage.
- Ouvrage extérieur.
- Élément de cave.
- Les pavés.

On retrouve le béton léger dans divers applications :

- **Fondation** : on peut retrouver du béton léger dans les fondations. En effet, ce dernier étant moins lourd que le béton classique, il peut être placé sur une structure demandant une résistance moins élevée à la charge. Ceci peut être un avantage car la structure est donc plus facile à mettre en place et par conséquent, des économies sont faites.
- **Rénovation** : ce béton étant plus léger que qu'un béton classique, cela permet donc de réaliser des rénovations sans avoir à renforcer au préalable la structure sur laquelle on souhaite l'appliquer.
- **Isolation** : le béton léger a comme particularité d'être à la fois un bon isolant thermique et phonique. De ce fait, il est très utilisé lors de la conception de mur ou de dalle.
- **Chape** : le béton léger peut aussi être utilisé afin de concevoir une chape sèche, qui est d'ailleurs considérée comme un bon isolant phonique et thermique.

Le béton léger est utilisé dans toutes les étapes de la construction, de l'intérieur comme en extérieur (murs, cloisons, plafonds,..), du gros œuvre extérieur aux divers aménagements et finitions intérieurs [5].

I.12 Conclusion :

Le béton léger qui est un matériau ancien et en même temps nouveau, fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ces caractéristiques suggèrent de nouvelles applications.

Ce qui distingue le béton léger du béton ordinaire est sa faible masse volumique. La masse volumique de béton ordinaire varie de 2200 au 2600 kg/ m³ tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850kg/m³. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière, ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante. la technologie de ce béton peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement [3].

Chapitre II. Valorisation des déchets plastiques



II.1 Introduction:

Au cours des dernières années, les déchets de différentes sources sont à l'origine de divers problèmes environnementaux liés à leur stockage et leurs quantités croissantes. Par ailleurs, les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement.

Les plastiques est l'une des innovations les plus importantes de 20^{ème} siècle, c'est un matériau omniprésent, ces dernières années et en raison de ces 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 est observée partout dans le monde ; ce qui augmente la production de ses déchets [8].

II.2 La chimie du plastique :

Les plastiques sont des polymères constitués d'enchainement de groupe identiques d'atomes, les monomères. Ce sont donc des macromolécules qui sont d'ailleurs très grandes comparés à celles constituant les produits organiques courants (Carrera et al., 2012) [14]. Celles-ci sont principalement constituées de carbone, d'hydrogène, de silicium, d'oxygène, de chlore et d'azote (Kale et al., 2015) [14]. Les polymères peuvent aussi comporter des monomères de natures différentes. Ils sont alors appelés copolymères, en opposition avec les homopolymères. Cette chaîne peut aussi comporter des ramifications. La structure chimique de certains polymères est reprise à la figure suivante :

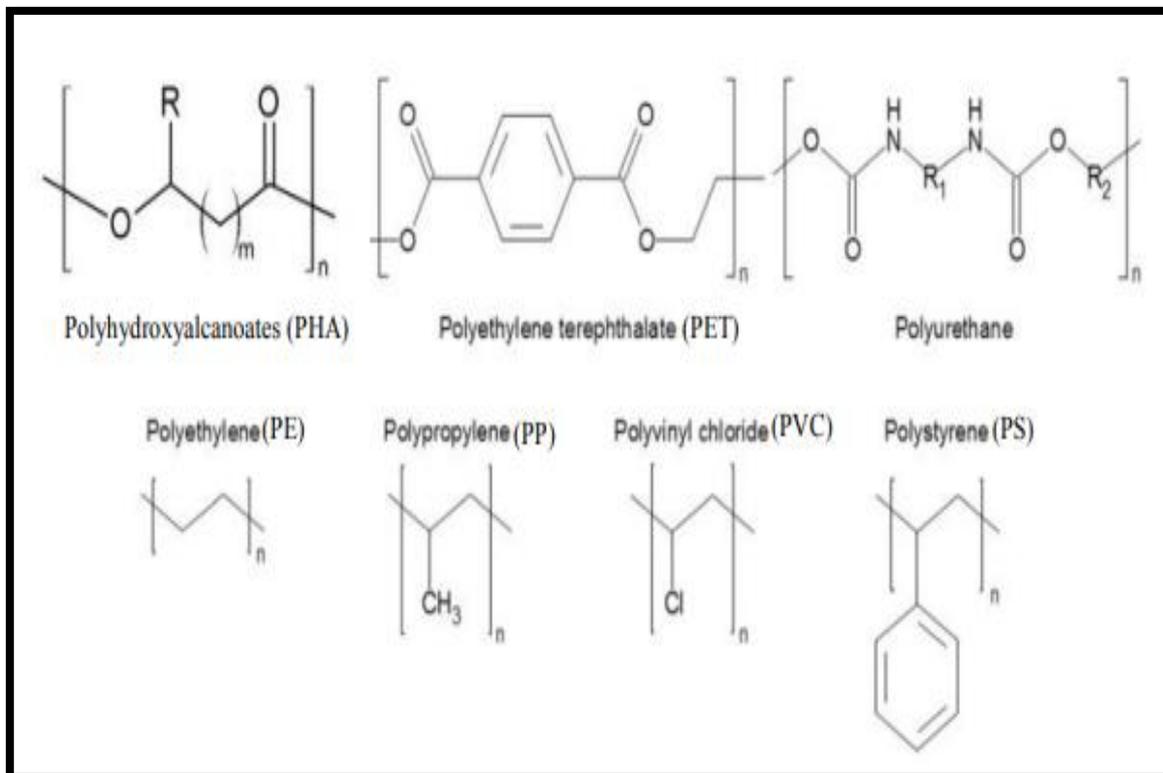


Figure II.1: Structure chimique de polymère (d'après krueger et al., 2015) [14]

II.3 Les types de plastiques :

Deux grandes familles de plastiques peuvent être distinguées :

1. Les thermoplastiques sont des polymères dont les caractéristiques mécaniques varient avec la température. Sous l'effet de la chaleur, les chaînes de ces polymères glissent les unes par rapport aux autres. Cela permet donc de les ramollir un grand nombre de fois, sans quoi le recyclage de ces matières ne serait pas possible (Carrega et al., 2012) [14].
2. Les thermodurcissables sont quant à eux constitués de polymères réticulés ou en réseaux. Contrairement aux thermoplastiques, ils sont rigides et fragiles. Un apport de chaleur ne contribue qu'à figer voire dégrader la matière (Carrega et al., 2012) [14]. Ils ne sont donc pas recyclables et ne feront pas l'objet de ce travail.

Les élastomères (Caoutchoucs), présentant des propriétés élastiques remarquables, pourraient aussi être cités, ils ne font cependant pas strictement partie des matières plastiques.

Les thermoplastiques repris dans la liste ci-dessous englobaient 73.2% de la demande européenne en plastique en 2016. On y retrouve le PET (7.4%), le PVC (10%), les différents PE (29.8%), le PP (19.3%) et les différents types de PS (6.7%) (Plastic Europe, 2017) [14].

II.3.1 Le polyéthylène téréphtalate (PET) :

Le PET est le thermoplastique le plus communément utilisé. C'est un produit de Polycondensation⁵ de l'acide téréphtalique ($C_8H_6O_4$) avec l'éthylène glycol ($C_2H_6O_2$) (INRS, 2017) [14]. C'est un polyester transparent avec une bonne stabilité et de bonnes propriétés mécaniques et chimiques (Sulyman et al. 2016) [14]. léger, il est aussi fortement inerte et permet donc son utilisation en secteur alimentaire (Welle, 2011) [14].



Figure II.2: Bouteilles en PET



Figure II.3: Film en PET

II.3.2 Le polychlorure de vinyle (PVC) :

Polymère du chlorure de vinyle (C_2H_3Cl), ces plastiques amorphes contiennent une grande quantité de chlore (56%) et possèdent une granulométrie variable selon le mode de fabrication. Ils présentent une remarquable résistance à l'abrasion, une bonne résistance à la corrosion, isolent électriquement et possèdent aussi une bonne rigidité à température ambiante.

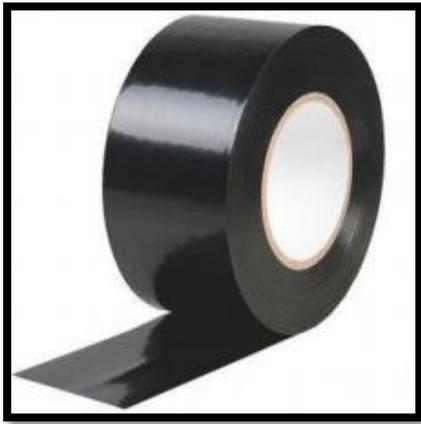


Figure II.4: Isolant en PVC



Figure II.5: Tuyaux en PVC

II.3.3 Le polyéthylène (PE) :

Basé sur le monomère d'éthylène (C_2H_4), le PE constitue une large famille dont les propriétés varient avec le processus de polymérisation. On peut ainsi obtenir du polyéthylène à basse densité (PEBD), du polyéthylène linéaire à basse densité (PEBDL), qui a de meilleures propriétés mécaniques et les polyéthylènes à moyenne ou haute densité (PEMD) ou (PEHD), plus dense, moins flexible mais aussi rugueux et cristallin. Ils peuvent être réticulés ou non et être utilisés ensemble pour combiner leur propriétés. D'une manière générale, ils sont économiques, peu denses (même les PEHD), isolants électriquement, résistants à la corrosion, aux UV et aux impacts (Biron, 2012) [14]. Le PEHD peut être utilisé pour confectionner des jouets, des bouteilles de lait (figure 6) de shampoing ou des tuyaux. Le PEBD se retrouvera par exemple dans les sacs réutilisables (figure 7) ou les fils alimentaires (PEBD) (Plastics Europe, 2017) [14]. Son produit de recyclage donne des granules.



Figure II.6: Bouteille de lait en PEHD



Figure II.7: Sac réutilisable en PEBD

II.3.4 Le polypropylène (PP) :

Polymères du propène (C_3H_6), ces plastiques semi-cristallins existent sous trois formes dépendant de la disposition de leurs groupes méthyles ($-CH_3$) en fonction du plan de la chaîne carbonée principale.



Figure II.8: Emballage alimentaire en PP



Figure II.9: Parechoc en PP

II.3.5 Le polystyrène (PS) :

Ce polymère styrénique (C_8H_8) est divisé en trois classes. Le polystyrène standard, le polystyrène de choc ou « High impact polystyrène » (HIPS) et le polystyrène expansé (PSE) (Mahiout, 2014) [14]. Le polystyrène standard est amorphe, d'origine transparent, rigide et cassant. Le polystyrène choc est aussi amorphe et polymérisé en présence d'un élastomère renforçant. Le polystyrène expansé diffère en fonction de s'il est obtenu par moulage ou extrudage [14].



Figure II.10: Goblet(PS)



Figure II.11: Emballage(HIPS)



Figure II.12: Emballage (PSE)

II.4 Déchets plastiques :

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

II.4.1 Déchets plastiques industriels:

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

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

Quant aux déchets de transformation, elles proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y

Chapitre II: Valorisation des déchets plastiques

retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage de d'arrêt de machine.

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

II.4.2 Les déchets plastiques de post-consommation :

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

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

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

- Les déchets électriques et électroniques issus de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre.
- Les déchets ménagers qui sont essentiellement constitués par les emballages. Pour ce gisement, les matières principales concernées sont : le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales,...), le PEHD (bouteilles de lait, produits lessiviels,...), le PEBD (sacs d'emballage) et le PVC (bouteilles d'eau minérale,...).
- Les déchets du bâtiment et des travaux publics proviennent de l'huissierie, les tuyaux, revêtements de sols, profilés de fenêtre, conduits électriques, câbles, mousses d'isolation. Ces matériaux sont très fortement mélangés et leur degré de pollution est souvent élevé.
- Les déchets de véhicules de transport sont représentés par l'ensemble des plastiques constituant les véhicules hors usage (VHU) (en moyenne 14% en masse du véhicule). Ces déchets constituent une fraction très hétérogène par rapport à la nature et l'âge. On y retrouve des polyoléfines, du PVC, des polycarbonates, ABS et des polyamides, des polyuréthanes, des résines thermodurcissables diverses, sans oublier les élastomères. Cette fraction ne cesse de croître du fait que les véhicules s'allègent de plus en plus et les équipements de sécurité sont en plein développement.

II.5 Impact des déchets plastiques :

Les déchets plastiques sont considérés comme un problème environnemental sérieux universellement. La production du plastique comprend également l'utilisation des produits chimiques potentiellement nocifs, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants. Beaucoup

Chapitre II: Valorisation des déchets plastiques

d'entre eux n'ont pas subi une évaluation des risques environnementaux et leur impact sur la santé humaine et l'environnement, sont actuellement incertain, à titre d'exemple les palatales, qui sont employés dans la fabrication de PVC.

Avec plus en plus des produits plastiques, en particulier les emballages, étant débarrassé peu de temps après leur achat, les espaces d'enfouissement requis pour les déchets plastiques sont une préoccupation croissante.

Le plus composant de ces déchets plastiques est le polyéthylène à basse densité à environ 23% (PEBD), suivi de 17.3% du polyéthylène à haute densité (PEHD), 18.5% de polypropylène (PP), 12.3% de polystyrène (PS), 10.7% du polychlorure de vinyle (PVC), 8.5% de polyéthylène téréphtalate (PET) et 9.7% d'autre types de déchets plastiques [8].

II.6 Valorisation des déchets plastiques :

Il existe en général trois grandes méthodes de valorisation du plastique (Bruneau, 2015) [9]:

II.6.1 La valorisation énergétique :

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

II.6.2 La valorisation mécanique :

Consiste à réutiliser les déchets plastiques avec un minimum de transformation de la matière. Cette technique est utilisée pour le traitement des déchets thermoplastiques. Elle repose avant tout sur une collecte sélective ou un tri des déchets plastiques à partir des ordures ménagères. Il est très souvent nécessaire d'avoir des déchets plastiques triés par type de résine plastique. Plus le tri est efficace, plus le produit obtenu est de bonne qualité.

II.6.3 Valorisation chimique :

Consiste à transformer la matière plastique en molécule de base (polymère, ester...) pouvant servir à la synthèse d'une nouvelle matière plastique, ou pour la pétrochimie. Ces technologies sont encore peu développées ou limitées à certaines natures de résines plastiques. On ne les utilise que dans les pays du nord et les pays émergents [9].

II.7 Gestion de déchet plastique :

Le diagramme d'un système d'exploitation et de gestion des déchets plastiques est représenté schématiquement dans la figure II.13.

Les principales opérations impliquées dans un processus de gestion des déchets comprennent la collecte des déchets plastiques à l'extérieur ou l'intérieur du flux de déchets ménagers, la mise en décharge, sa récupération, le recyclage en produits utiles, et la création de marchés pour les produits recyclés.

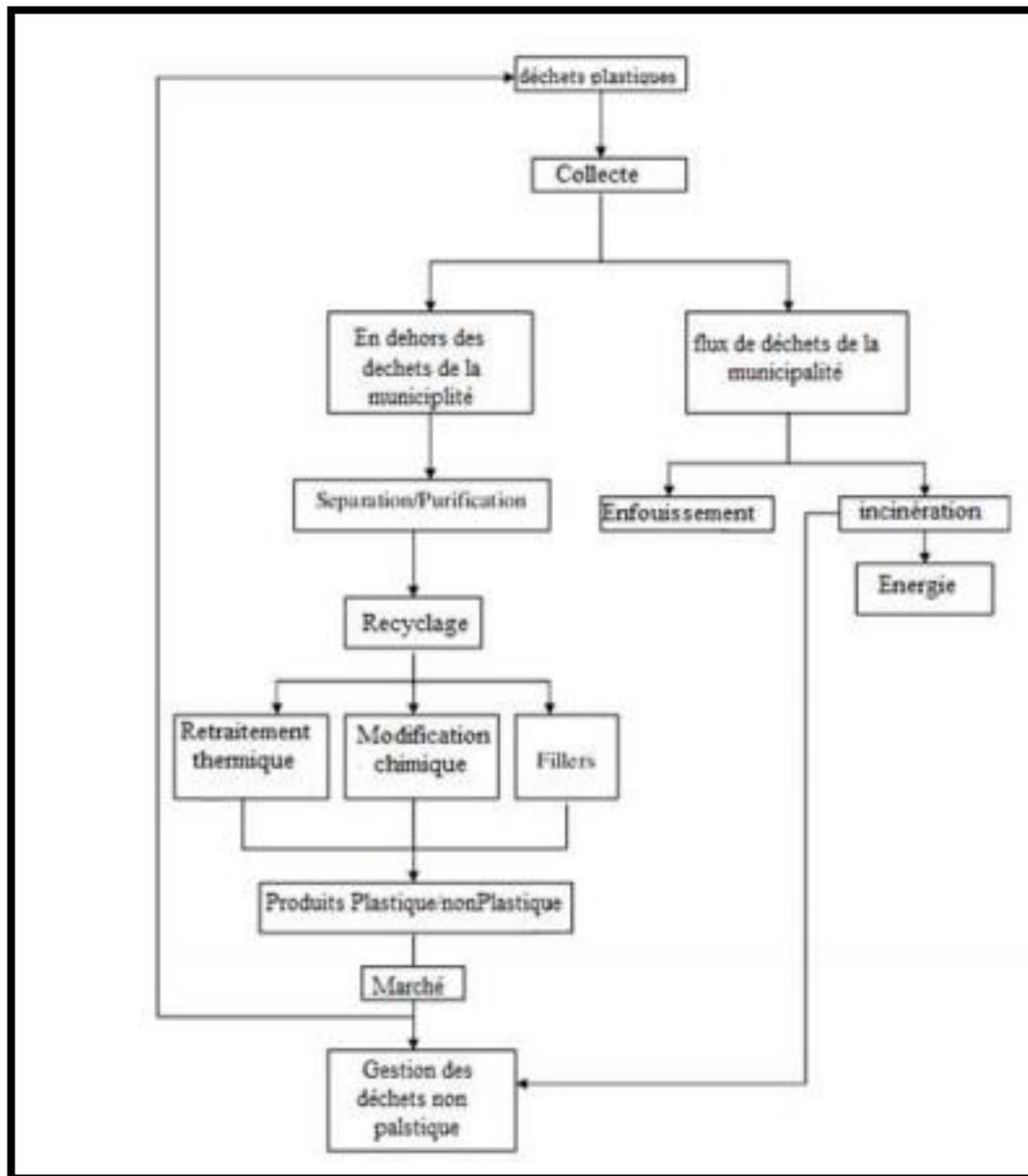


Figure II.13: Processus de gestion des déchets plastiques

II.8 Recyclage des plastiques :

Le recyclage des plastiques doit être pris en considération dans tout programme de gestion des déchets plastiques. En plus de la réduction des quantités des déchets plastiques dans des décharges, il peut aussi contribuer de manière significative à la conservation des matières pétrochimiques et l'économie d'énergie. Rebeiz et Craft [13] ont rapporté qu'il y a quelques contraintes technologiques et économiques qui limitent actuellement le recyclage complet et efficace des déchets plastiques en produits utiles qui sont :

- La contamination des déchets plastiques par d'autres matériaux tels que les déchets organiques et métaux qui peuvent endommager l'équipement utilisé dans le retraitement des déchets.

Chapitre II: Valorisation des déchets plastiques

- Les plastiques ne sont pas des matériaux homogènes tels que l'aluminium ou le papier, mais se composent d'un grand nombre de nuances avec différentes propriétés et structures moléculaires, chaque composant en plastiques dans un déchets mixtes a un comportement de fusion différent, rhéologie et stabilité thermique.
- Les mélanges de matières plastiques sont généralement non miscibles et forment des phases discrètes et insolubles dans une phase contenue.
- Les stocks d'alimentation en déchets plastiques habituellement ne sont pas uniformes tout le temps.
- Les déchets plastiques ont une densité relativement basse. Par conséquent ils sont généralement compactés ou broyés avant le transport pour réduire le cout d'expédition.

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

II.9.1 Polypropylène vierge :

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

II.9.2 Le plastique recyclé des résidus d'automobiles broyé :

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

II.9.3 Plastique recyclé (décheté ou rappé) :

La matière plastique recyclée (décheté) est produite par broyage du plastique obtenu à partir de la récupération des plastiques mélangés, le processus donnant des flocons planes de plastique avec une dimension maximale de 25 mm (1 pouce).

Zoorob et Suparma. [13] ont rapportés sur les propriétés physiques du plastique réutilisé (polyéthylène à basse densité, PEBD, qui sont données des détails du tableau II.1.

Tableau II.1: Propriétés physiques des déchets du PEBD

Propriétés	Polyéthylène à basse densité (PEBD)
Forme de l'agrégat	Granulé
Taille (mm)	2.36 – 5.00
Densité	0.92
Point de ramollissement (°C)	120
Point de fusion (°C)	140

II.10 Evaluation des propriétés des mortiers / bétons à bases des agrégats plastiques :

Les matériaux composites mortiers / bétons à base des agrégats plastiques sont des matières qu'ils ont des propriétés différentes par rapport aux mortiers / bétons ordinaires à cause de l'incorporation des agrégats plastiques [13]. Cette idée est bien définie dans le tableau suivant

Tableau II.2: Synthèse de revue bibliographique sur l'évaluation des propriétés des composites (béton / mortier) contenant des déchets plastiques valorisés.

Chapitre II: Valorisation des déchets plastiques

Chercheurs	Composite	Propriétés	Type de déchet plastique	Pourcentage de déchet plastique	Observation
➤ Choi et al. [24]	Béton	Maniabilité	PET	/	L'affaissement augmente avec la croissance de la teneur de PET
➤ Senthil et al. [25]			E- plastique	10%, 20%, 30% ,40 % et 50%	La maniabilité diminue jusqu'à un rapport d'aspect de 50%
➤ Coppola et al. [26]	Mortier	Densité	PP et PE	25%	Une diminution de densité de près de 20%
➤ Hannawi et al. [27]	Béton		PET et PC	50%	La densité à diminuée
➤ Hannawi et al. [27]	Mortier	Résistance à la Compression	PET et PC	3% ,10%, 20% et 50%	La réduction de R_C du mortier contenant PET est plus important que celle qui contenant PC.
➤ Senthil et al. [25]	Béton		E – plastique	50%	Une perte de R_C environ 47.41%
➤ Hannawi et al. [27]	Mortier	Résistance à la traction par flexion	PET et PC	20% et 50%	une diminution de la résistance de 9.5% et 17.9% des mortiers contenant 20% et 50% de PET et une baisse de 32.8% pour 50% de PC.
➤ Albano et al. [28]	Béton		PET	/	La diminution de la résistance due à la porosité accrue dans le béton à cause de l'incorporation des agrégats de PET.
➤ Badache et al. [29]	Mortier	Module d'élasticité	PEHD	/	Une diminution du module d'élasticité dynamique (Ed).

Chapitre II: Valorisation des déchets plastiques

➤ Choi et al. [30]	Béton		PET	0%,25%,50%,75%	Une diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la matière plastique.
➤ Rahmani et al. [31]	Béton	Vitesse d'implusion Ultrasonique (UPV)	PET	/	Une réduction de UPV à cause de l'augmentation du taux du PET
➤ Benosman et al. [32]	Mortier		PET	0%, 2.5%, 5% et 7.5 %	une baisse d'UPV des mortiers composites par rapport au mortier témoin.
➤ Marzouk et al. [33]	Béton	Microstructure	PET	30%,50% et 100%	Les images au MEB ont une Forte compacité Lorsque PET <50% Et ont un forte Porosité lorsque PET>50%
➤ Bensoman et al. [32]	Mortier	Conductivité thermique	PET	/	Ont constaté des propriétés d'isolation thermique meilleures que ceux des mortiers non modifié par PET
➤ Mounanga et al. [34]	Béton		PUR	/	faible conductivité thermique due à la nature poreuse de mousse de PUR
➤ Marzouk et al. [33]	Mortier	Porosité accessible à l'eau et absorption capillaire.	PET	/	Diminution de la sorptivité de mortier contenant PET par rapport au mortier témoin.
➤ Saika et al. [35]					L'absorption d'eau et la porosité sont plus élevées pour un mortier contenant PET en comparaison avec un mortier témoin.

II.11 Conclusion :

La discussion de ce qui précède prouve que l'incorporation des déchets plastiques comme agrégats dans le béton / mortier peut améliorer les différentes propriétés qui peuvent résoudre une partie du problème concernant l'élimination des déchets plastiques. Certaines de ces propriétés sont mises en évidence ci- dessous :

1. L'incorporation du plastique peut réduire la densité, les propriétés mécaniques, le module d'élasticité dynamique et l'UPV du béton / mortier résultant.
2. L'utilisation de déchets plastiques dans le béton / mortier peut améliorer son comportement de rupture et donc ce type de béton / mortier peut absorber de grandes quantités d'énergie, ce qui a plusieurs implications pratiques.
3. La microstructure de l'agencement ITZ au sein des matériaux composites à base des déchets plastiques reste faible par rapport aux matériaux cimentaires classiques.
4. L'agrégat des déchets plastiques a sensiblement une plus faible conductivité thermique que l'agrégat naturel utilisé dans la préparation des bétons / mortiers. Ainsi, l'ensemble des matériaux cimentaires contenant des agrégats en plastique auront des propriétés d'isolation thermique meilleure que ceux des matériaux classiques, et qui peuvent être utilisés pour contrôler la perte de chaleur des bâtiments pendant l'hiver et refléter la chaleur pendant l'été.
5. L'absorption d'eau et la porosité du béton / mortier contenant des agrégats des déchets plastiques augmentent. Car les agrégats plastiques et naturels ne se mélangent pas suffisamment dans la matrice du béton / mortier, ce qui donne une matrice poreuse.
6. L'utilisation des déchets plastiques conduit à une moindre résistance au feu des matériaux cimentaires composites par rapport aux matériaux classiques.
7. La pénétration des ions chlorures peut augmenter dans les matériaux composites, et diminuer pour autres suivant la nature des déchets plastiques utilisés.

L'amélioration des propriétés due à l'addition des déchets plastiques peuvent avoir d'immenses conséquences pratiques sur l'environnement et l'économie ; et donc les futures études devraient être mis en œuvre pour obtenir des bétons / mortiers produits à base des déchets plastiques durables, de qualité, mais rentables aussi [8].

Chapitre III. Plans d'expériences



Chapitre III: Plans d'expériences

III.1 Introduction:

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [18]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type:

$$y = f(x)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignement avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [36]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celles de **d'espace expérimental** et celle de **modélisation mathématiques** des grandeurs étudiées [18].

III.2 Définition:

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expérience afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie de plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats (Norme ISO 3534-3) [19]

III.3 Principe :

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. [20]

III.4 Faites des connaissances avec la méthode des plans d'expériences:

Nous allons d'abord regarder comment s'intègrent les plans d'expériences dans le processus d'acquisition des connaissances. Puis, nous verrons les concepts de base qui permettent de bien définir une étude et comment l'on interprète les résultats des essais.

III.4.1: Processus d'acquisition des connaissances:

Augmenter ses connaissances, c'est trouver la réponse à une question posée. On commence donc par se poser une ou plusieurs questions (figure III.1).

N'ayant plus que les questions sans réponse immédiate, il faut faire des expériences, Comment peut-on choisir ces expériences pour:

- Arriver rapidement aux meilleurs résultats possibles,

Chapitre III: Plans d'expériences

- Eviter de réaliser des expériences inutiles,
- Obtenir la meilleure précision possible sur les résultats,
- Permettre d'avancer à coup sûr,
- Etablir la modélisation du phénomène étudié,
- Découvrir la solution optimale.

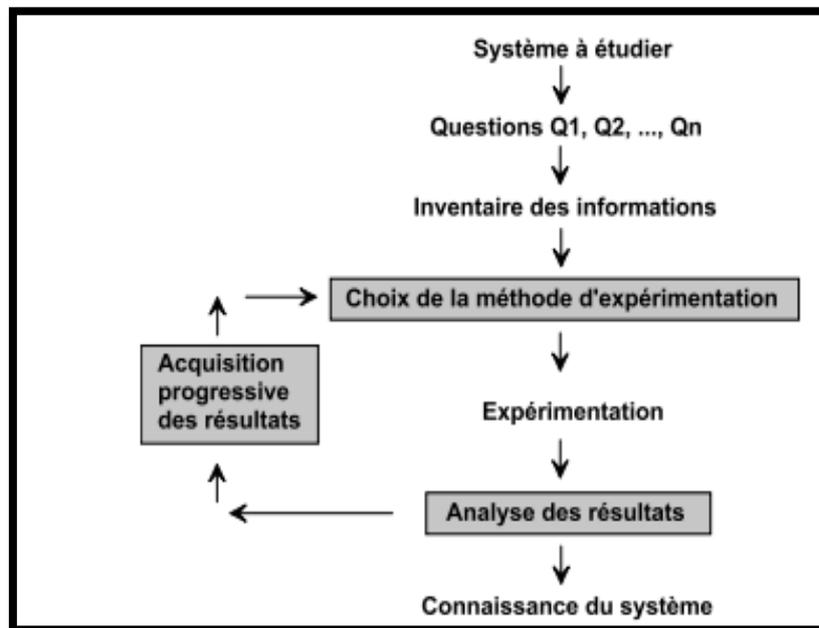


Figure III.1: Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances.

III.4.1.1 Choix de la méthode d'expérimentation:

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

III.4.1.2 Analyse des résultats:

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

III.4.1.3 Acquisition progressive de la connaissance:

L'expérimentateur qui entreprend une étude ne connaît pas les résultats, il est donc sage d'avancer réorienter les essais en fonction des premiers résultats. Une première ébauche permettra de mieux orienter les essais vers les seuls aspects intéressants de l'étude et d'abandonner les voies sans issues.

III.5 Terminologie:

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteurs et réponses sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

III.5.1 Les différents types de facteurs :

La construction des plans d'expériences et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

III.5.1.1 Facteurs continus :

La pression est un exemple de facteurs contenu. Dans un intervalle de pression donnée, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

III.5.1.2 Facteur discrets :

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

III.5.1.3 Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

III.5.1.4 Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : Haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc [21].

III.5.2 Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure 1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelé **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

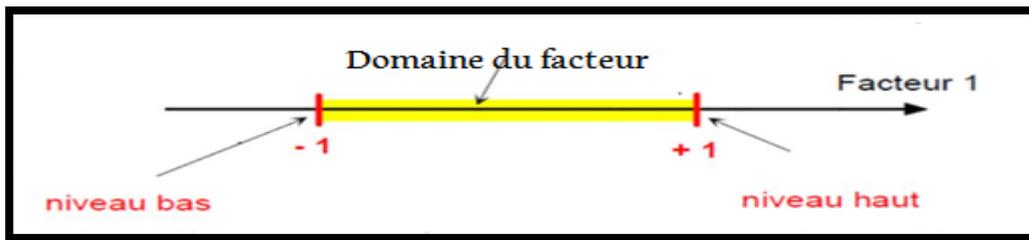


Figure III.2: le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur

Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par $+1$. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental.

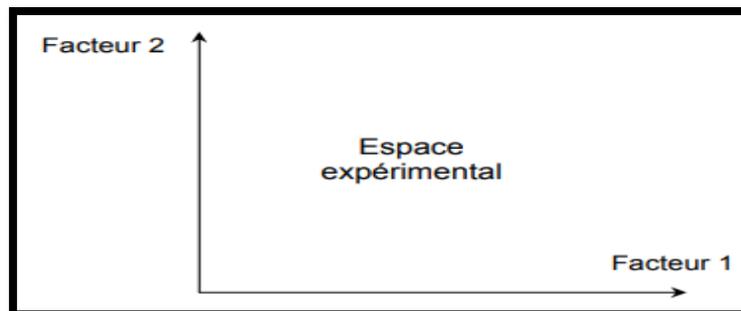


Figure III.3: Espace expérimental d'un facteur

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

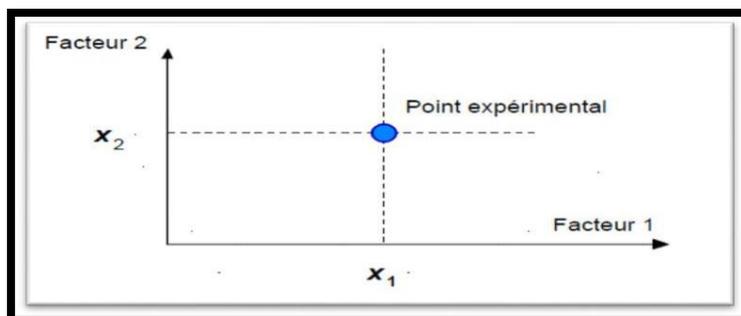


Figure III.4: Les points expérimentaux dans un espace

Chapitre III: Plans d'expériences

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent le « **domaine d'étude** ». Ce domaine d'étude, est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (figure 4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

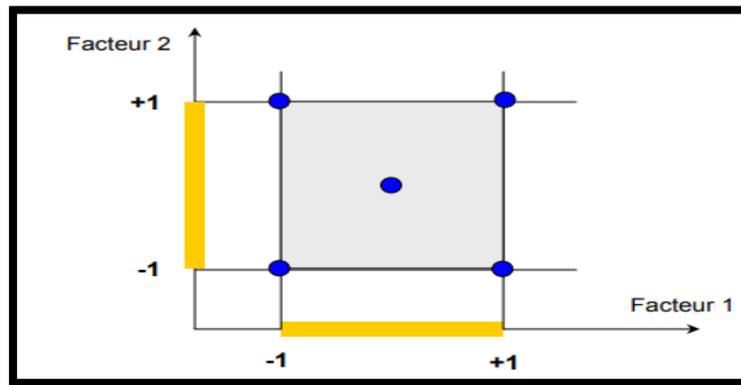


Figure III.5: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude

III.5.3 Notion de modélisation mathématique:

On choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor – Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré ou moins élevé:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij} = x_i x_j \dots x_z$$

Où:

- y : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i : représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé " modèle postulé" ou " modèle a priori" [18].

III.6 Méthodologie des plans d'expériences :

Pour l'élaboration d'un plan d'expérience, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

Chapitre III: Plans d'expériences

III.6.1 La recherche des facteurs influents :

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié ; la question est de savoir quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse

- ❖ Lesquels a une influence significative ?
- ❖ Que vaut cette influence ?
- ❖ Et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe à la seconde étape :

III.6.2 La modélisation :

Dans cette phase, on recherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre et au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre des expériences et k est le nombre des effets.

III.6.3 L'optimisation :

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde de phénomène étudié [23].

III.7 Les types de plan d'expérience :

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : **les plans de mélanges, les plans factoriels, les plans hydrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman [11]**. Pour pouvoir expliquer l'avantage de cette méthode de plans d'expériences nous allons donner comme suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hydrides.

III.8 Plan factoriel complet :

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels, c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets avec deux niveaux et K facteurs, ceux-ci sont notés 2^k . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisé, comme dans la méthodologie standard. Pour un plan factoriel complet optimal 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 facteur noté : 2^2 . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés A, B, C et D sur la figure III.6.

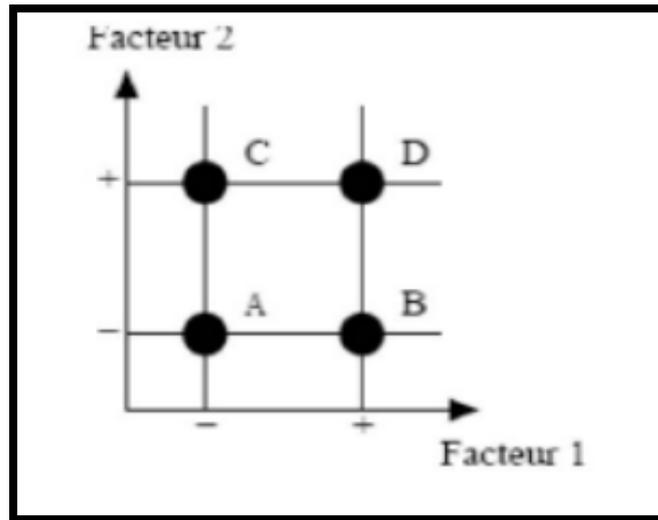


Figure III.6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental [11]

III.9 Intérêt des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans les nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- ❖ Industries des matériaux.
- ❖ Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques.
- ❖ Industries mécaniques et automobiles.
- ❖ Industries métallurgique [22].

III.10 Principaux avantages des plans d'expériences:

- ❖ Diminution du nombre d'essais.
- ❖ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- ❖ Détection des interactions entre facteurs.
- ❖ Modélisation des réponses étudiées.
- ❖ Une précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque on fournissant un modèle expérimental précis du système étudié [18].

III.11 Conclusion :

Les plans d'expériences offrent un simple et efficace de réduire le cout et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la variation d'un produit. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer à priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires [11].

Deuxième Partie. Etude expérimentale

Chapitre IV. Caractérisation des matériaux



Chapitre IV: caractérisation des matériaux

IV.1 Introduction:

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition du mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du mortier sont largement influencées par les caractéristiques de ces constituants.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection du mortier à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

Les matériaux utilisés sont :

- Le ciment **CEM II/A- L 42.5 N (GICA)**
- Le sable d'oued de wilaya du Biskra (Lioua) (fraction 0/5)
- Les déchets de plastique (comme granulats fins)
- Les déchets de la poudre d'aluminium (Msila)
- Eau de gâchage : c'est l'eau potable

IV.2 Caractéristiques des matériaux :

IV.2.1 Ciment :



Figure IV.1: Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [16,5].

Le ciment utilisé lors de notre étude est un ciment portland composé (CEM II/ A-L 42.5 N) ; de classe commerciale 42.5 MPa. Ce ciment est fabriqué par la société des ciments d'Ain – Touta, ses différentes propriétés sont représentées sur les tableaux suivants :

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

Tableau IV.1: Caractéristiques du ciment

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1215
Masse volumique absolue (g/cm^3)	3.150
Surface spécifique (Blaine) (cm^2/g)	4000
Temps de début de prise (heures)	2h :03
Temps de fin de prise (heures)	3h :00
La résistance à la compression à 28 jours (MPa)	47

Tableau IV.2: Composition chimique (%) de ciment

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl	K_2O	Na_2O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
20.34	5.37	3.00	61.69	1.80	2.20	0.027	0.76	0.14	0.97	5.03	1.12

Tableau IV.3: Composition minéralogique (%) de ciment

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
58.3	14.16	8.7	11.26

IV.2.2 Sable :



Figure IV.2: Sable d'oued

Le sable utilisé lors de cette étude expérimentale est un sable d'oued prélevé de notre wilaya, en particulier de la région de Lioua, ce sable est apprécié pour ses caractéristiques physiques sous les normes [NF P 18-598 (équivalent de sable)], [NF P 18-540 (module de finesse)], [NF P 18-554(compacité)]. Les propriétés du sable sont représentées sur le tableau suivant :

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

Tableau IV.4: Propriétés physiques du sable

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente lâche / compacte (kg/m^3)	1394.5 / 1631.5
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.66
Module de finesse	2.59
Equivalent de sable (%) visuel (après lavage)	95.78
Compacité (%)	51.85
Porosité (%)	48.15

La courbe granulométrique du sable utilisé est illustrée sur la figure suivante :

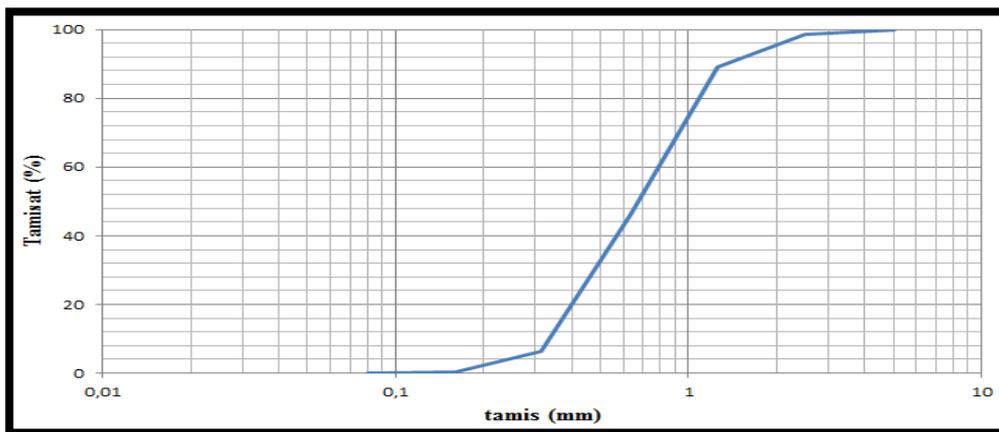


Figure IV.3: Courbe granulométrique du sable

IV.2.3 Les déchets de plastique :

Les déchets plastiques que nous avons utilisés pour notre étude en guise de granulats fins sont des granulats issus du traitement des sacs plastiques rejetés qui sont généralement constitués de PEBD (polyéthylène basse densité) car ce sont les plus utilisés donc les plus rejetés dans la nature.

Le traitement des sacs plastiques (du déchet plastique vers les granulats plastiques) est représenté sur la figure suivante :



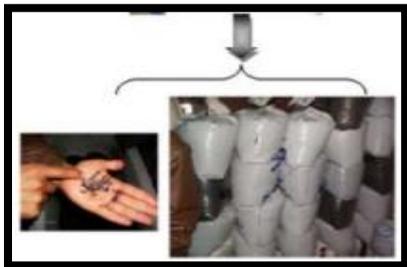
1. Récupération des sacs plastiques

2. traitement thermique

3. Refroidissement



4. Ecrasement



5. Produit fini

Figure IV.4: Traitement des sacs plastiques [10]

Les propriétés physiques des granulats plastiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.5: Les propriétés physiques de déchets de sacs plastiques

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (lâche / compacte (kg/m^3))	547 / 600
Masse volumique absolue (g/cm^3)	0.87
Compacité (%)	62.12
Porosité (%)	37.84

L'analyse granulométrique du plastique est bien éclaircie dans la figure suivante :



Figure IV.5: Analyse granulométrique de plastique

IV.2.4 Les déchets de la poudre d'aluminium :

La poudre d'aluminium utilisé comme agent réactif pour l'expansion du mortier confectionné, est un aluminium pur à 99%, de granulométrie d'environ 100 μm , fabriqué par la société

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

METANOF, notons que la qualité de l'aluminium influe sur la réaction d'expansion (aluminium-chaux) et par conséquent sur la densité du produit fini.



Figure IV.6: La poudre d'aluminium

Fiche technique : la fiche technique de cette poudre est société algérienne d'ALZINC- Spa-Filiale- ALGAL. L'analyse chimique de cette poudre est illustrée dans le tableau 06:

Tableau IV.6: Les teneurs des éléments de composition de l'aluminium [3]

Elément	Teneur (%)
Al	97.66
Zn	1.16
Fe	1.08
Pb	0.066
Cu	0.026
Cd	0.0082
Mn	0.0078

Tableau IV.7: Propriétés physiques de déchet de la poudre d'aluminium

Propriété	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m^3) lâche / compacte	740 /870
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2

La poudre d'aluminium joue un rôle important dans la création des pores dans la masse du mortier, par sa réaction avec l'hydroxyde de calcium.

L'utilisation de la poudre d'aluminium comme agent gonflant dans le mortier peut être comparé à la cuisson d'un pain : la poudre d'aluminium remplit la même fonction que la levure en augmentant le volume du mélange [5].

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

IV.2.5 Eau de gâchage :

L'eau utilisé pour la confection du mortier c'est l'eau potable tiède de robinet de laboratoire ; l'utilisation d'une eau tiède au moment de malaxage est très importante pour accélérer la réaction entre la poudre d'aluminium et l'hydroxyde de calcium.

IV.3 Procédure expérimentales et méthodes d'essais :

IV.3.1 Composition du mortier léger :

Il s'agit d'un mortier normal 1/3 (une partie de ciment avec trois parties de sable et un rapport E/C de 0.50).

L'étude consiste à remplacer une partie du sable naturel par un pourcentage croissant des granulats plastiques de l'ordre de 10% et 30%, en ajoutant une petite quantité de déchet d'aluminium de 0.5% et 1% par rapport au poids du ciment.

Remarque :

Lors de la préparation des mortiers on a utilisé de l'eau tiède, les moules de mortier sont chauffés à l'étuve, pour accélérer la réaction entre la poudre d'aluminium et le ciment dans le mortier.

Les différentes compositions du mortier sont illustrées sur le tableau suivant :

Tableau IV.8: Synthèse de l'étude expérimentale

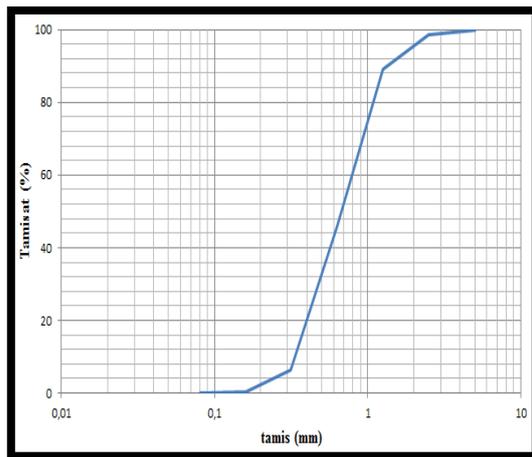
Sable (%)	Plastique (%)	Aluminium (%)	Eau (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Plastique (g)	Aluminium (g)
1	1	1	225	450	1350	0	0
90	10	0.5	225	450	1215	42.12	2.25
90	10	1	225	450	1215	42.12	4.5
70	30	0.5	225	450	945	126.37	2.25
70	30	1	225	450	945	126.37	4.5

IV.3.1.1 Caractérisation des mélanges :

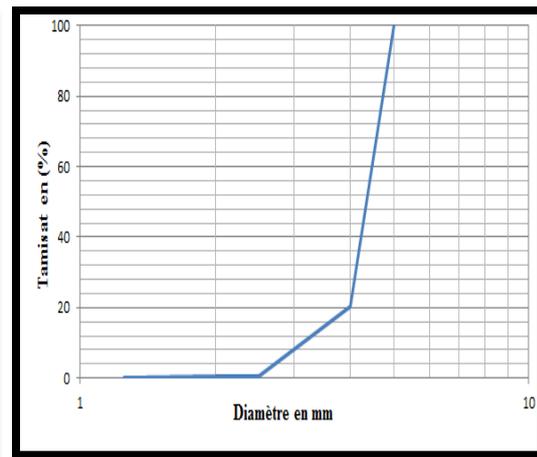
Les mélanges constitués du sable et granulats plastiques (90% sable naturel + 10 % granulats plastiques, 70% sable +30 % granulats plastiques) sont étudiés avant incorporation dans les mortiers.

Analyse granulométrique:

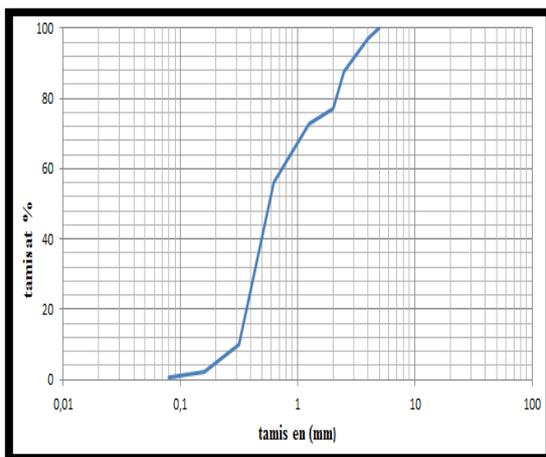
Les courbes granulométriques des mélanges ainsi que le sable naturel et le plastique sont illustrées dans la figure suivant :



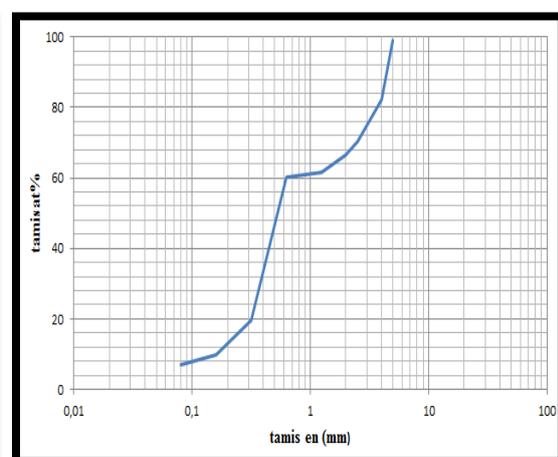
1. Sable naturel



2. Plastique



3. Mélange de 90% + 10%



4. Mélange de 70% + 30%

Figure IV.7: Analyses granulométriques du sable, plastique et des mélanges (90%+10%), (70%+30%)

✚ Porosité des mélanges :

La porosité **P** des mélanges a été mesurée à l'aide d'un récipient connu. Pour chaque combinaison, les sables sont mélangés manuellement puis par malaxeur à mortier durant 30 seconde avec une vitesse constante afin d'assurer la bonne homogénéisation de mélange, l'opération suivante est de peser le récipient rempli avec le mélange des sables sans aucune vibration ou compactage, la formule suivante (équation III.1) permet de calculer la porosité **P**.

$$P = 100 \left(1 - \frac{W_{rm} - W_r}{V_r * \varphi_m} \right) \text{ Equation IV.1}$$

D'où : **P** : est la porosité du mélange (%),

W_{rm} : est le poids se récipient rempli avec le mélange de sable (g),

W_r : est le poids de récipient vide (g),

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

V_r : est le volume de récipient (cm^3)

φ_m : est le poids volumique absolu de mélange (g/cm^3) [6]

Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau suivant :

Tableau IV.9: Porosité des mélanges

Sable / mélange	Porosité (%)
Sable d'oued	51.35
Mélange de 90 % (S) + 10% (P)	48.29
Mélange de 70% (S) + 30% (P)	37.37

IV.3.2 Malaxage du mortier léger :

Suivant la norme (196-1 mortier normal) les opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci- dessous.



Figure IV.8: Malaxeur du mortier

Tableau IV.10: Méthode de malaxage du mortier léger [7]

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	1min et 15 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

IV.3.3 Caractérisation des mortiers légers :

IV.3.3.1 Essais physiques :

✚ Essai de maniabilité :

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

Dans notre étude expérimentale la maniabilité du mortier est mesurée avec la table à secousse qui définit la maniabilité selon la méthode suivante :

- Verser le mélange dans le moule tronconique
- Lisser le mélange avec une règle .
- appliquer 15 chocs pendant 15s
- Mesurer létalement vaertical et Horizontal (d_1 et d_2)

$$E (cm) = \frac{d_1+d_2}{2} \text{ Equation IV.2}$$



Figure IV.9: Table à secousse

***Gonflement du mortier léger :** juste après le moulage des éprouvettes des mortiers le gonflement apparaît dans les premières minutes à cause de l'effet de la poudre d'aluminium qui réagit avec la portlandite libérée pendant les réactions d'hydratation du ciment.



Figure IV.10: Gonflement des éprouvettes du mortier

✚ Essai de porosité accessible à l'eau (NF EN 18-459) :

Cet essai a pour objectif de mesurer le pourcentage de vide connecté à la surface du mortier. La porosité accessible à l'eau (ϵ), exprimée en pourcentage est donnée par l'équation :

$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100 \text{ Equation IV.3}$$

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

Où; M_{eau} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve immergé dans l'eau.

M_{air} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air.

M_{sec} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve sec.

✚ Evaluation de la masse volumique des éprouvettes de mortier par pesée hydrostatique :

Lorsqu'une meilleure précision est nécessaire pour évaluer la masse volumique du mortier, il s'agit de peser le lot des 3 éprouvettes de mortier dans l'air (m_1) puis dans l'eau (m_2), comme indiqué sur la figure suivante. La différence $m_1 - m_2$ représente la masse du volume d'eau déplacé (v) ; si ρ_w est la masse volumique de l'eau, la masse volumique des éprouvettes est m_1/v [7].

$$\rho = \rho_w \frac{m_1}{m_1 - m_2} \text{ Equation IV.4}$$



Figure IV.11: Appareil de pesée hydrostatique

✚ Essai d'absorption d'eau par immersion NF EN 13369 :

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, appelons que l'essai consiste à mettre les éprouvettes des mortiers (5.5.5 cm) dans l'étuve et de les peser jusqu'à un poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h (c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du mortier. Le coefficient d'absorption par immersion A_b est donné par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \text{ Equation IV.5}$$

Où:

M_a : est la masse de l'échantillon à l'eau.

M_s : est la masse de l'échantillon à l'air.



Figure IV.12: Essai d'absorption par immersion

✚ Essai d'absorption capillaire (Sorptivité) :



Figure IV.13: Essai d'absorption capillaire

L'essai de sorptivité 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 de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que dans hauteur de 5 mm. La face inférieure de l'éprouvette est appuyée sur des supports et les faces latérales sont imperméabilisées par une résine époxydique afin d'avoir seulement une surface en contact avec l'eau et d'assurer une absorption unidirectionnelle à travers la face inférieure qui touche l'eau.

L'augmentation en poids de l'éprouvette est mesurée après 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes de l'immersion. Pour chaque temps de mesure, l'éprouvette est retirée du bac d'eau. Essuyée à l'aide d'un chiffon humide et pesée, puis retournée au récipient.

La sorptivité (S) est déterminée à l'aide de la formule :

$$S = \frac{Q/A}{\sqrt{t}} \quad \text{Equation IV.6}$$

Où: S : le coefficient de sorptivité en (cm/sec)

Q : le volume de l'eau absorbée en cm^3

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

Chapitre IV: caractérisation des matériaux

t : le temps écoulé en secondes.

La sorptivité (S) représente graphiquement la pente de la régression linéaire de (Q/A) en fonction de \sqrt{t} [6].

✚ Mesure du retrait (NF P15-433) et du gonflement :

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{Equation IV.7}$$

Où: L : est la longueur de la tige en invar qui égale à 160 mm

$dl(t)$: est la valeur lue sur le comparateur au temps t

$dl(t_0)$: la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi au moment de démoulage soit 24h



Figure IV.14: Appareil pour la mesure du retrait et du gonflement

IV.3.3.2 Essais mécaniques :

✚ Essai de la résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion des mortiers a été évaluée par des essais de flexion 3 points sur des éprouvettes prismatiques $4*4*16cm^3$. La formule de la RDM pour le calcul de contrainte de flexion est utilisée, exprimée comme suit :

$$R_f = \frac{M}{I} y \quad \text{Equation IV.8}$$

Où ; M : moment de flexion, $M = \frac{PL}{4}$ ($L = 3a$)

I : moment d'inertie de la section transversale, $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{a^4}{12}$

Y : distance de la fibre la plus éloignée à l'axe neutre, $y = \frac{a}{2}$



Figure IV.15: Essai de la résistance à la flexion

✚ Essai de la résistance à la compression :

Cet essai a été effectué selon la norme NF EN 196-1, la contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_C = \frac{F_C}{A} \text{ (MPa) Equation IV.9}$$

Où ; F_C : la charge maximale de rupture (N)

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600mm²)



Figure IV.16: Essai de résistance à la compression

IV.4 Conclusion:

Le présent chapitre avait pour le but de répondre aux objectifs de cette mémoire. Les étapes expérimentales ont été étudiées en détail, y compris la caractérisation des différents matériaux utilisés, ainsi que la formulation d'un mortier légers à base des déchets de plastique et d'aluminium. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée de toutes les expériences réalisées. Le chapitre suivant va consister à faire apparaître les résultats obtenus et de présenter une interprétation et une analyse de ces résultats.

Chapitre V. Résultats et discussion



Chapitre V: Résultats et discussion

V.1 Introduction:

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et expliquer les résultats de notre travail effectué au laboratoire d'après le programme expérimental qui nous a aidé à connaître l'influence des déchets de poudre d'aluminium et du plastique par leurs légèreté d'une part et leur efficacité à l'isolation d'autre part.

Le travail consiste à faire une comparaison entre 3 types de mélanges :

- ✓ Le premier : mortier normal (comme un témoin).
- ✓ Le deuxième : mortier confectionné par un mélange de sable naturel et un déchet plastique (10% et 30 %)
- ✓ Le troisième : mortier confectionné par un mélange de sable naturel, déchet plastique (10% et 30%) et un faible pourcentage de déchet de poudre d'aluminium (0.5% et 1%).

Les différents mélanges préparés sont désignés par :

Mortier normal (MN), 10%P (M1), 30%P (M2), 10%P+1%A(M3), 30%P+1%A(M4), 10%P+0.5%A(M5), 30%P+0.5%A(M6).

Les essais effectués sur les différents mélanges sont divisés en deux parties :

- **Essais à l'état frais** : maniabilité
- **Essais à l'état durci** : masse volumique - gonflement - variation de masse - retrait - résistance en traction par flexion - résistance à la compression - absorption - porosité capillaire

V.2 À l'état frais:

V.2.1 Essai de maniabilité :

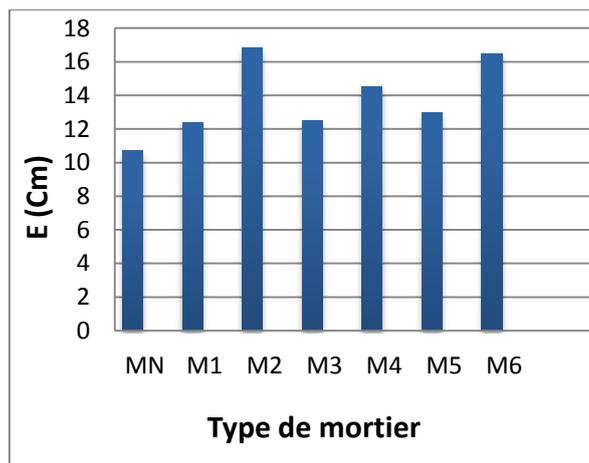


Figure V.1: Variation d'étalement en (Cm) en fonction du type des mélanges

Commentaire:

L'étalement augmente avec l'augmentation du taux du plastique incorporé dans le mortier ce qui est représenté dans les résultats entre (MN), (M1 10%P) et (M2 30%P).

Chapitre V: Résultats et discussion

L'augmentation est due à la présence d'une quantité d'eau libre dans le mélange puisque les agrégats plastiques ne peuvent pas absorber l'eau lors du gâchage, la surface lisse des granulats plastiques en comparaison avec les granulats naturels favorise la présence d'eau libre, ce qui augmente l'étalement. Par contre l'addition de poudre d'aluminium diminue la maniabilité à cause de la réaction entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium qui nécessite une quantité importante d'eau selon l'équation suivante :



Ce qui est confirmé par les valeurs d'étalement de M4 (30% P + 1% A) et M6 (30% P+ 0.5% A).

V.3 À l'état durci :

V.3.1 Essai de gonflement :

✚ Variation de masse :

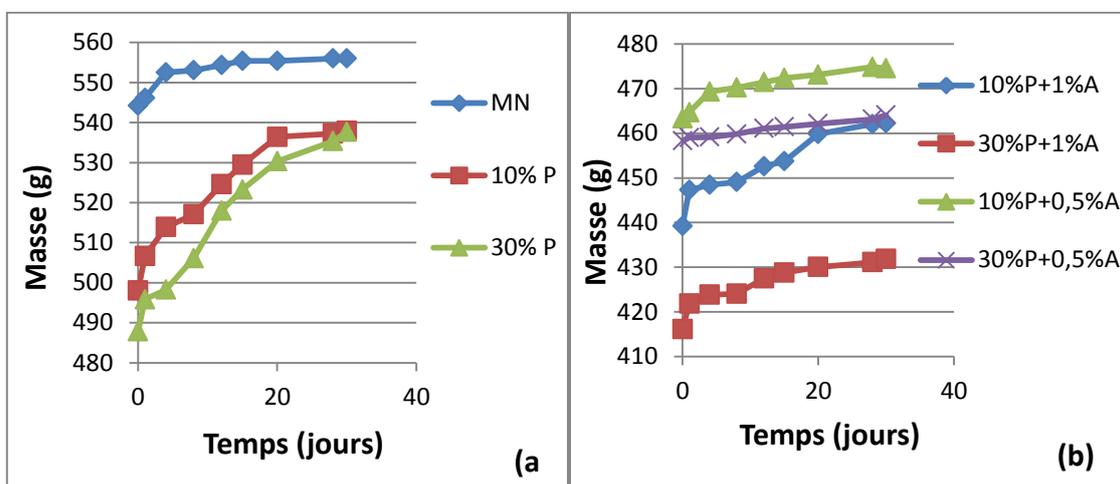


Figure V.2: Variation de masse des éprouvettes conservées dans l'eau en fonction du pourcentage de déchets de plastique et d'aluminium et en fonction du temps

Commentaire:

D'après les deux figures précédentes (V.2 (a) et V.2 (b)) on remarque une augmentation de la masse des éprouvettes conservées dans l'eau, ce qui est lié à l'absorption d'eau en fonction du temps. L'accroissement de la masse des éprouvettes du mortier normal est régulier par rapport aux éprouvettes contenant un pourcentage de plastique où l'augmentation de masse est rapide.

Les mortiers contenant du plastique présentent une absorption faible en comparaison avec le mortier témoin ce qui est confirmé par Marzouk dans son étude portant sur la substitution des granulats fins par des déchets plastiques du type (PET) [17].

L'addition d'aluminium fait diminuer davantage l'absorption (qui reste constante après 5 jours de conservation).

Variation de longueur:

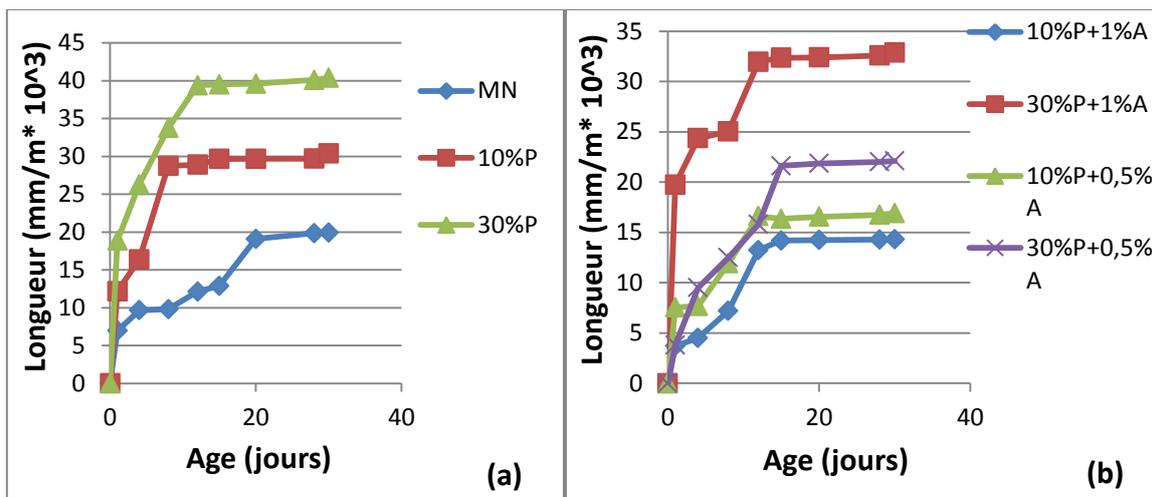


Figure V.3: Variation de longueur des éprouvettes conservées dans l'eau (gonflement) en fonction du taux de plastique et d'aluminium et en fonction du temps

Commentaire:

D'après les figures (V.3 (a) et V.3 (b)) on observe que le déchet de plastique et la poudre d'aluminium ont une relation avec le gonflement des éprouvettes. Dont la longueur augmente avec l'augmentation des déchets du plastique et de la poudre d'aluminium: le déchet de plastique maintient la quantité d'eau en excès résultant des conditions de conservation car il s'agit d'un élément non absorbant, ce qui entraîne une augmentation de la taille de l'échantillon; la poudre d'aluminium fait augmenter les dimensions de l'éprouvette ($L(30\%P+1\%A) > L(30\%P+0,5\%A)$) suite aux réactions chimiques.

V.3.2 Essai de retrait :

Variation de masse :

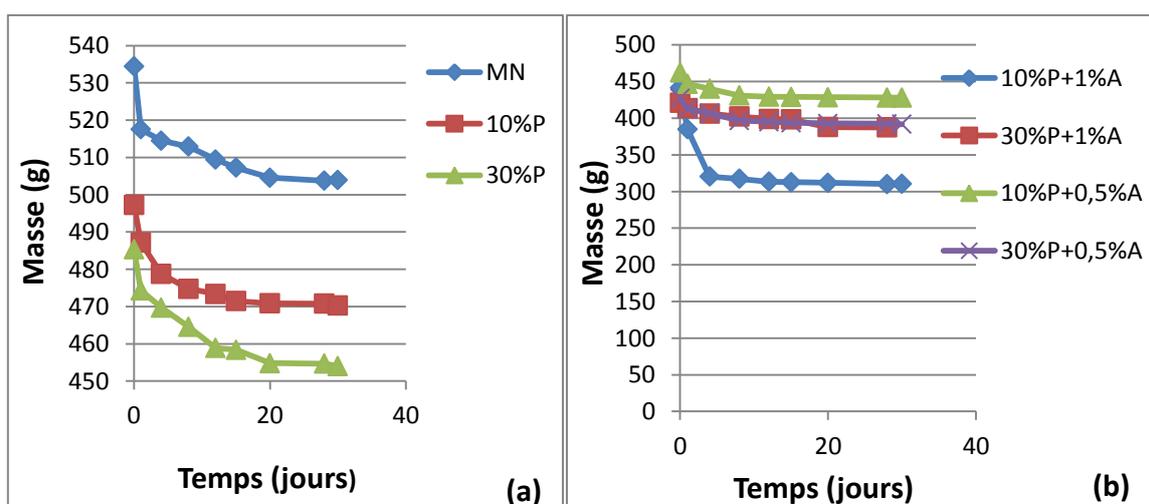


Figure V.4: Variation de masse des éprouvettes conservées à l'air en fonction du taux de plastique et d'aluminium et en fonction du temps

Chapitre V: Résultats et discussion

Commentaire:

On remarque une chute de masse des éprouvettes conservées à l'air à cause de l'évaporation d'eau suite au durcissement à l'air. D'après les deux figures il est bien clair que la diminution de masse évolue avec l'augmentation de la teneur du déchet plastique par contre cette variation de masse se stabilise lors de l'ajout de poudre d'aluminium Parce que l'excès de l'eau de s'évapore tandis que l'autre partie entre en réaction avec l'aluminium et la Portlandite.

✚ Variation de longueur :

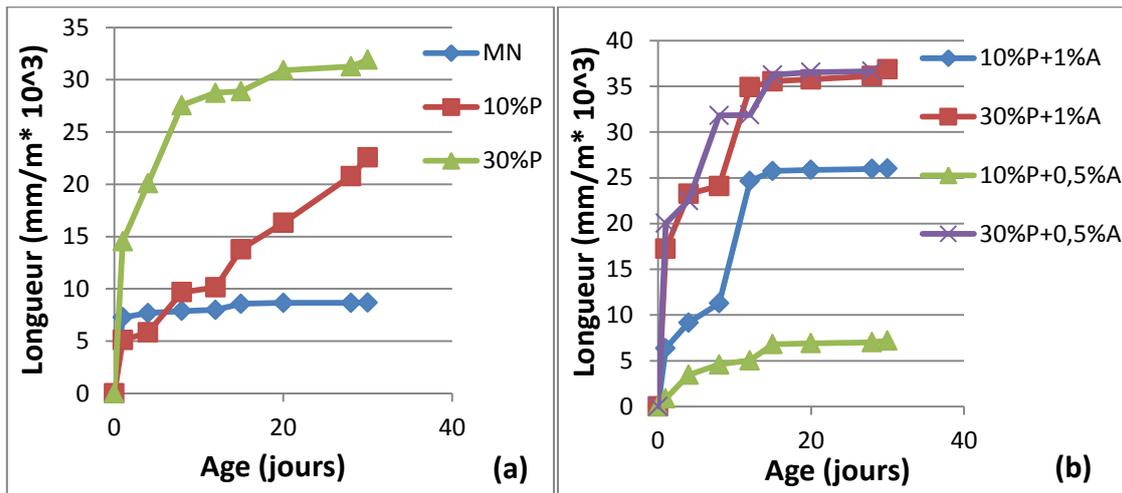


Figure V.5: Retrait en (mm/m * 10³) en fonction du taux de plastique et d'aluminium et en fonction du temps

Commentaire:

D'après les deux figures précédentes (V.5 (a) et V.5 (b)), on remarque que le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage de déchet plastique (figure V.5 (a)) ce qui exprime que la microstructure de mortier contenant un déchet de plastique est plus poreuse qu'un mortier normal. Cette perméabilité facilite l'évaporation d'eau. Concernant la figure V.5 (b) nous concluons que l'influence de la poudre d'aluminium sur le retrait des échantillons est très claire ce qui est lié à la quantité d'eau absorbée dans la réaction entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium.

V.3.3 Essai de porosité accessible à l'eau :

L'essai de porosité accessible à l'eau est mesuré après 28 jours de durcissement dans l'eau. Les résultats sont représentés sur la figure suivante:

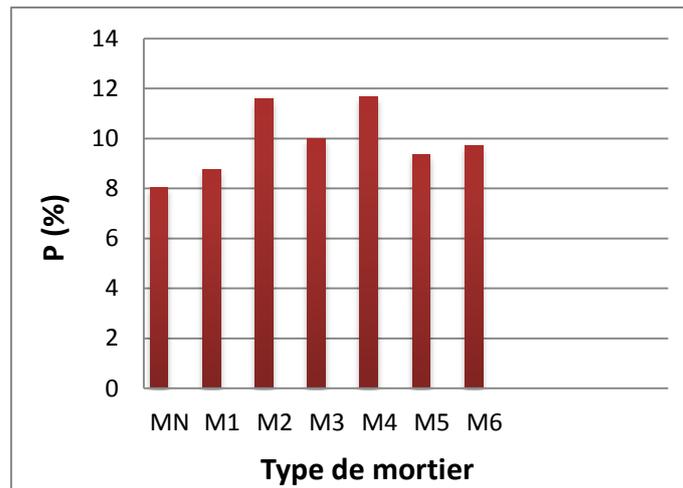


Figure V.6 : Porosité en (%) en fonction du type de mortier

Commentaire:

On remarque que la porosité est plus élevée dans le mortier contenant des granulats de PEBD en comparaison avec un mortier témoin (Saika et al [35]) ce qui bien clair dans notre résultats (MN= 8% , M1= 8.7% et M2= 11.6 %). Pour les mélanges contenant un pourcentage de déchet d'aluminium on observe qu'il y a une croissance de la porosité dans le mélange de M3 (10%P + 1% A) et M4 (30% P + 1%A) par contre un pourcentage 0.5 % n'exerce pas d'influence sur la porosité .

V.3.4 Evaluation de la masse volumique :

La masse volumique est estimée après 7 jours et 28 jours de durcissement en milieu humide par pesée hydrostatique, les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes:

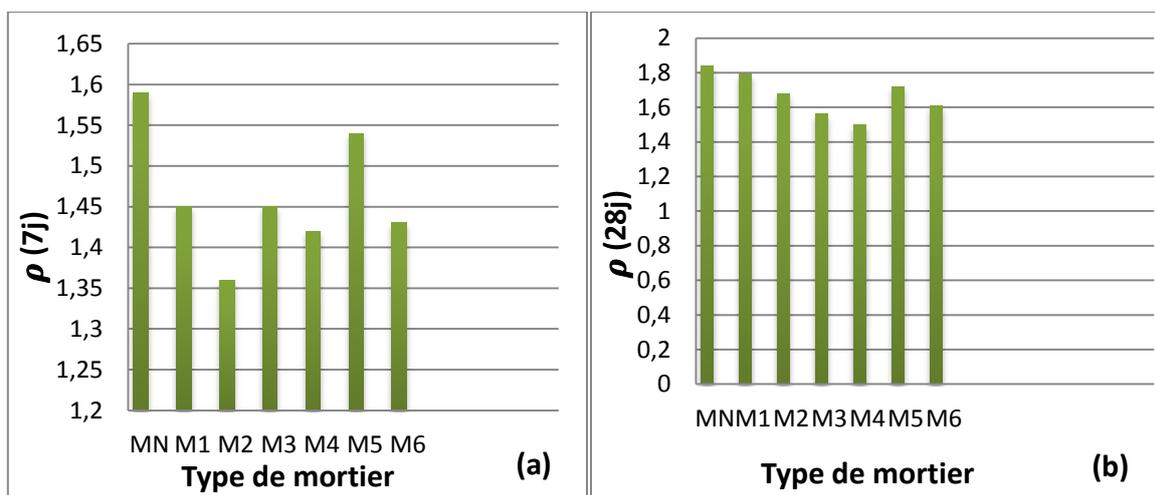


Figure V.7: La masse volumique à 7j et à 28j (g/cm^3) en fonction du type de mortier

Commentaire:

On remarque que les masses volumiques diminuent en fonction de l'augmentation du dosage de déchet plastique et du dosage en Aluminium en comparaison par le mortier témoin (MN) ;

Chapitre V: Résultats et discussion

l'incorporation des matières plastiques comme agrégat diminue généralement la masse volumique du mortier les résultats viennent confirmer les travaux de **Hannawi et al [27]**. Si on compare les résultats de la composition de M1 (10% P) par rapport à celle de M2(30% P), on remarque que le dosage de déchet plastique possède un effet bénéfique pour l'allègement du mortier, la même observation reste valable pour l'incorporation de la poudre d'Aluminium. Cette dernière exerce un effet favorable sur la diminution de la masse volumique, le cas du mortier M5(10%P + 0.5% A) par rapport M1(10% P) et M3 (10% P et 1% A) cette différence exprime la réaction entre la poudre d'aluminium et la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formée au cours de l'hydratation de ciment. La variation entre M6 (30%P +0.5%A) et M4 (30% + 1%) explique que l'aluminium n'influe plus pour un pourcentage de 1%.

Après 28j la masse volumique suit la même évolution (diminution en fonction de l'incorporation de déchet plastique et de déchet de poudre d'aluminium).

V.3.5 Essai d'absorption :

Les éprouvettes cubiques de **5.5.5 cm** sont utilisées pour mesurer l'absorption des différents mélanges de mortier après 28 j de durcissement en milieu humide, les résultats sont illustrés sur la figure suivante :

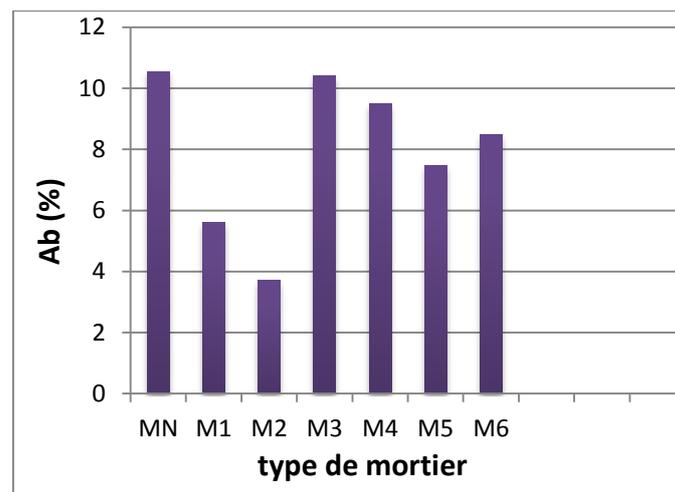


Figure V.8 : Absorption par immersion à 28j (%) en fonction de type du mortier

Commentaire:

D'après la figure précédente il est bien clair que l'absorption par immersion diminue avec l'augmentation de la teneur en PEBD (MN= 10.55% M1= 5.62% M2 = 3.70%) puisque les granulats en PEBD ont un faible coefficient d'absorption (les plastiques ne peuvent pas absorber de l'eau), par contre on remarque que plus la quantité d'Aluminium est élevée, plus le taux d'absorption est élevé(M3 = 10.40%, M5= 7.48 %), cela est dû à la structure qui est riche en vides ce qui permet d'absorber une quantité importante d'eau.

V.3.6 Essai d'absorption capillaire:

Les résultats d'absorption capillaire à 28j sont illustrés à la figure suivante:

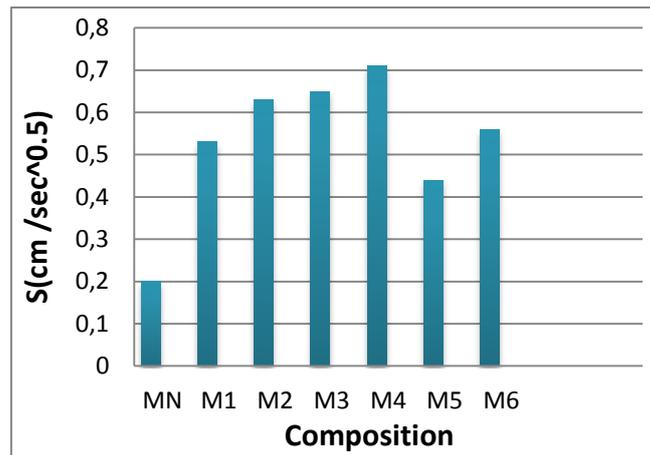


Figure V.9: Coefficients de sorptivité à 28 j des mortiers en fonction de différentes compositions

Commentaire:

Le coefficient de sorptivité des mortiers durcis après 28j est supérieur à celui du mortier témoin, ce qui exprime que le plastique et l'aluminium ont une influence sur la sorptivité des mortiers. La sorptivité augmente en fonction de la teneur de PEBD (Saika et al [35], Hannawi et al [27], Akcaozoglu et al [37]). Ce qui est dû à la faible adhérence entre la matrice cimentaire et les agrégats plastiques à cause de leur forme sphérique cette faible liaison permet la pénétration d'eau facilement. D'autre part la poudre d'aluminium se caractérise par sa grande finesse ce qui permet d'absorber une grande quantité d'eau.

V.3.7 Essai de la résistance à la traction par flexion :

Les résistances à la traction par flexion sont mesurées après 7j et 28 j de durcissement en milieu humide, les résultats sont indiqués sur les figures suivantes :

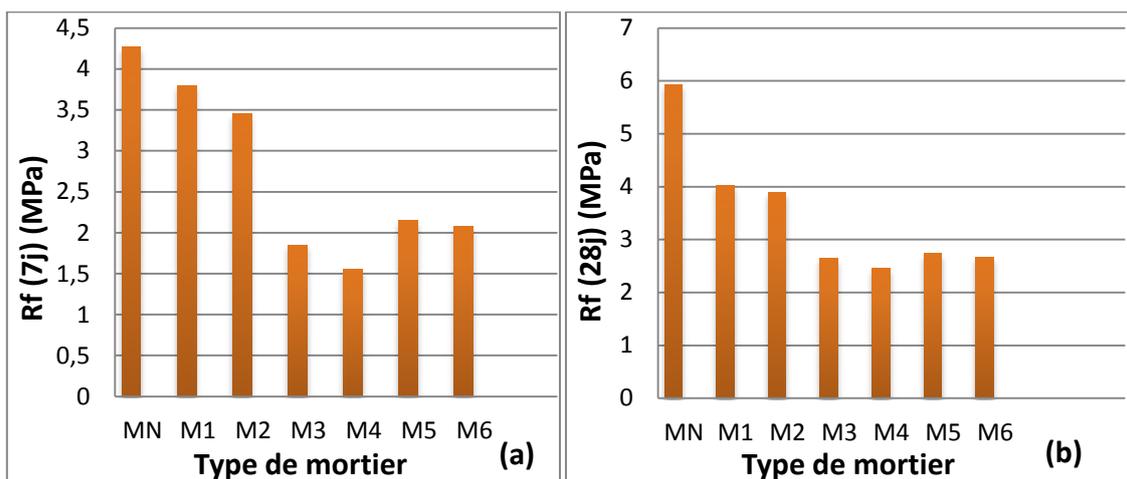


Figure V.10: La résistance à la traction par flexion à 7j et à 28j (MPa) en fonction de type du mortier

Commentaire:

L'incorporation de tel type d'agrégat plastique abaisse la résistance à la traction par

flexion du mortier [8] ce qui bien clair dans notre résultats. Cette diminution est due à la porosité accrue dans le mortier causée par l'incorporation des granulats de PEBD, la faible adhérence entre le granulat plastique et la matrice cimentaire (à cause de la surface lisse du granulat) présente une cause supplémentaire.

Comme nous avons vu dans notre étude, la poudre d'aluminium est un agent expansif qui davantage le mortier.

V.3.8 Essai de la résistance à la compression:

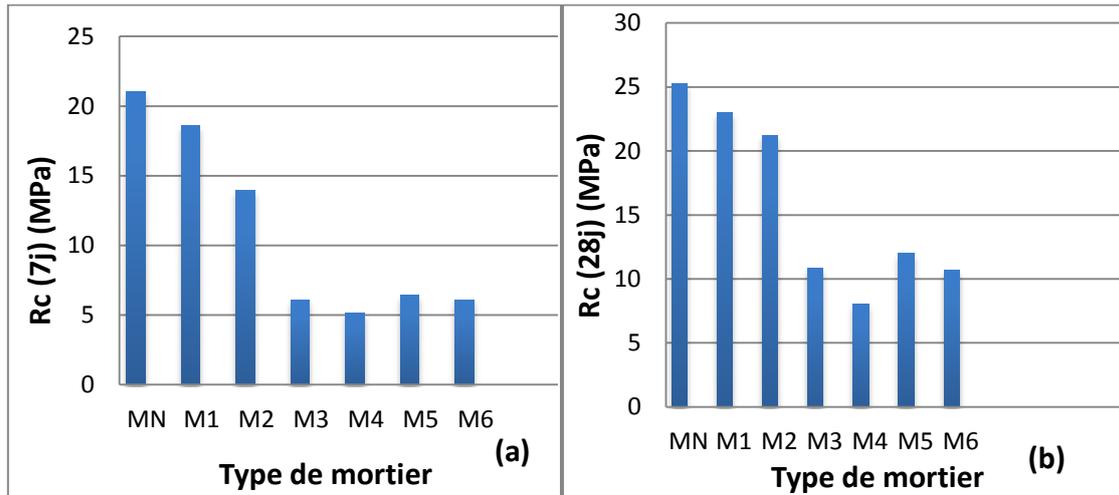


Figure V.11: La résistance à la compression à 7j et 28j (MPa) en fonction de type du mortier

D'après les résultats trouvés on remarque que la résistance à la compression soit à 7j ou à 28j diminue en fonction de l'augmentation de la teneur des agrégats plastiques et le dosage en Aluminium ce qui exprime que les deux derniers composants ont une influence négative sur la caractéristique mécanique étudiée. Pour le mortier témoin $R_{C28j} = 25$ MPa et $R_{C7j} = 22$ MPa, lorsque on ajoute une quantité de PEBD de (10%) la résistance R_{C28j} est proche de 24 MPa et R_{C7j} est de 18 MPa, la résistance à la compression suit sa diminution après l'addition d'un dosage en Aluminium de M3 (10% + 1%A) dont R_{C28j} sera 11 MPa et R_{C7j} presque 6 MPa. Les résultats de M1 sont accordés l'observation de (**Hannawi et al [27]**) donc l'incorporation des agrégats plastiques diminue la résistance à la compression à cause de la légèreté et la faible densité du composite.

Généralement, plusieurs paramètres influencent la résistance à la compression tels que :

- taux de substitution
- la forme du granulat
- le type du déchet plastique
- le rapport E / C.

V.4 Conclusion :

A partir des résultats d'essais effectués, les déchets de poudre d'aluminium (Al) et du plastique (PEBD) utilisés dans la confection du mortier dans ce travail ont une grande influence sur tous les aspects physiques et mécaniques. Ces résultats reflètent l'intérêt de l'utilisation de tels mortiers dans le domaine de la construction en tant qu'éléments de séparation avec un pouvoir isolant significatif.

Chapitre VI. Modélisation de plan d'expérience



Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

VI.1 Introduction :

Le plan d'expérience est une technique d'analyse expérimental basée sur l'analyse statistique des résultats obtenus lors d'une série d'expériences ; elle permet de cerner l'effet des facteurs les plus importants et le type d'influence qu'ils exercent et de modéliser cette influence.

Le JMP est un logiciel qui propose une fonctionnalité innovante de création de plan sur mesure et qui vous permet d'adapter votre plan en fonction de questions précises, sans gaspiller vos précieuses ressources. Une fois les données collectées, JMP rationalise les processus d'analyse et de création de modèle ; il est donc facile d'observer la configuration de réponse, d'identifier les facteurs actifs et d'optimiser les réponses en conséquence [12].

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

Dans notre étude on a choisi 3 facteurs :

- Le pourcentage d'aluminium
- 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	Déchet d'aluminium	Quantité de ciment	Déchet de plastique
Niveaux	0.5% - 1%	1/3 – 2/3	10% - 30%
Réponses	La masse volumique à 28 j (ρ), la maniabilité de 1j (E), la résistance à la compression à 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 pastique (P) et le pourcentage de déchet d'aluminium (A).

VI.3.2 Niveaux des facteurs :

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

Tableau VI.2: Les niveaux des facteurs

Facteurs	Niveaux	
Quantité de ciment (C)	1/3	-1
	2/3	+1

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

Pourcentage de déchet de sac plastique (P)	10%	-1
	30%	+1
Pourcentage de déchet de la poudre d'aluminium (A)	0.5%	-1
	1%	+1

VI.3.3 Réponses :

Les réponses sont :

- L'étalement
- La masse volumique à 28j
- La résistance à la compression à 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 de plan factoriel choisi est comme suit :

Tableau VI.3: La matrice des effets

N° d'essai	Ciment (C)	Déchet de plastique (P)	Déchet d'aluminium(A)
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 :

VI.3.5.1 D'ordre trois :

Pour le plan factoriel (C, P, A), les interactions sont les suivantes : C*P, P*A, C*A, C*P*A.

VI.3.5.2 Matrice des effets :

La matrice des effets et leurs interactions sont représentées sur le tableau suivant :

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

N°	C	P	A	C*P	P*A	C*A	C*P*A
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

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

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

Formulation	C (Kg/m ³)	P(%)	A (%)
1	450	10	0.5
2	900	10	0.5
3	450	30	0.5
4	900	30	0.5
5	450	10	1
6	900	10	1
7	450	30	1
8	900	30	1

VI.5 Résultats des essais:

VI.5.1 Etalement :

L'étalement est un paramètre très important pour évaluer la maniabilité du mortier, pour chaque formulation nous avons mesuré l'étalement (Cm). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

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

Formulation	Etalement (Cm)
1	13
2	20
3	16.5
4	20.5
5	12.5
6	22.5
7	14.5
8	25

VI.5.2 La masse volumique à 28 j:

La masse volumique du mortier léger a une relation inverse avec les facteurs (déchet de plastique **P** et déchet de poudre d'aluminium **A**) ; plus le pourcentage de déchet est élevé, plus la masse volumique est petite. Les résultats de la masse volumique à 28j sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.7: Résultats d'essai (la masse volumique à 28j)

Formulation	ρ (g/cm ³)
1	1.72
2	1.66
3	1.59
4	1.54
5	1.56
6	1.56
7	1.50
8	1.41

VI.5.3 La résistance à la compression à 28j :

La résistance à la compression est une caractéristique mécanique indiquant la résistance du matériau, Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VI.8: Résultat d'essai (la résistance à la compression à 28j)

Formulation	R_{C28} (MPa)
1	12
2	18.05
3	10.80
4	13.32
5	10.66
6	13.95
7	8
8	10.92

VI.5.4 Analyse des résultats :

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.6 Modélisation :

VI.6.1 Etalement :

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$E (Cm) = 18.0625 + 3.9375C + 1.0625P + 1.5625A - 1.3125 C*P + 0.0625 P*A + 1.1875 C*P + 0.4375 C*P*A$$

$$R^2 = 99\%$$

Les coefficients du modèle sont obtenus par le logiciel à l'aide d'une régression multiple :

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	18,0625	0,4375	41,29	0,0154*
C(0,33,0,66)	3,9375	0,4375	9,00	0,0704
P(0,1,0,3)	1,0625	0,4375	2,43	0,2487
A(0,005,0,01)	0,5625	0,4375	1,29	0,4208
C*P	-0,3125	0,4375	-0,71	0,6051
C*A	1,1875	0,4375	2,71	0,2247
P*A	0,0625	0,4375	0,14	0,9097

Figure VI.1: Estimation des coefficients

D'après le tableau d'estimation des coefficients, il est bien clair que le dosage de ciment est le coefficient le plus influent sur l'étalement de mortiers (présente la plus faible valeur de prob.>|t|). En effet, le taux de substitution par le de déchet plastique ainsi que le dosage d'aluminium présentent une influence moins importante que le dosage de ciment. Cette importance est confirmée par les coefficients de ces effets dans le modèle mathématique.

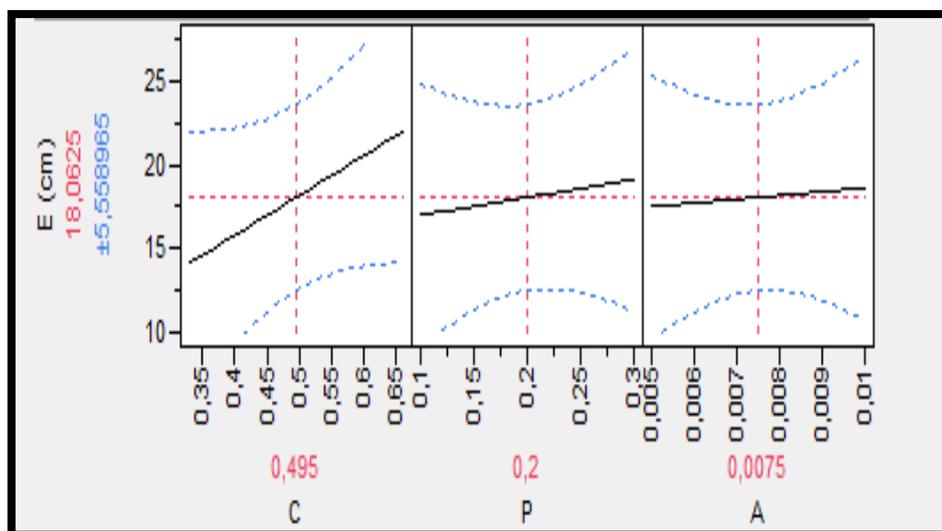


Figure VI.2: Diagramme de chaque facteur

D'après la figure précédente (VI.2) il est bien clair que pour augmenter la réponse d'étalement, il faut augmenter le dosage en ciment (C), le pourcentage de déchet plastique (P) aussi le dosage en aluminium (A) sont peu influents. Cette interprétation est confirmée par les coefficients positifs de chaque facteur.

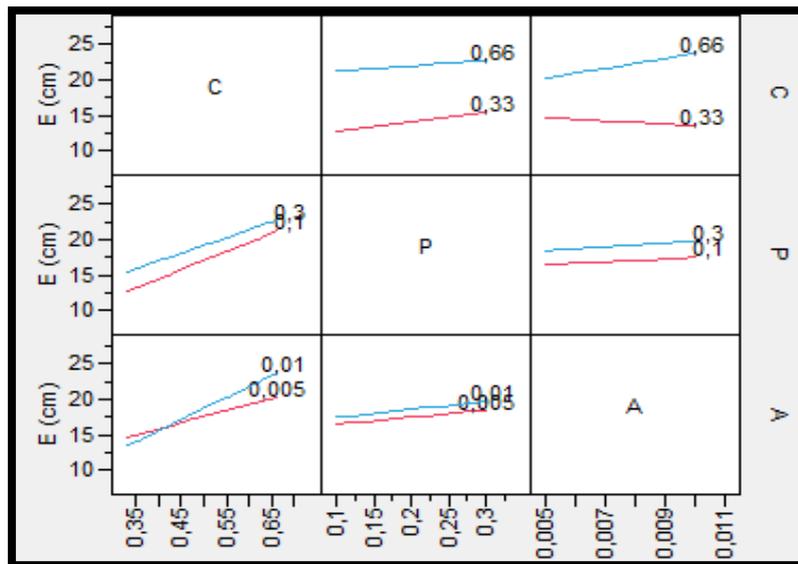


Figure VI.3: Profil d'interaction de réponse d'étalement en fonction des facteurs (C, P, A)

Le profil d'interaction de l'étalement en fonction des trois facteurs (figure VI.3) qui a permis d'établir des courbes d'interactions entre deux facteurs afin de mieux comprendre leurs influences sur la réponse concernée. On peut constater que la réponse maximale est atteinte lorsque les trois facteurs sont à leurs niveaux haut. Les interactions sont moins importantes (figure VI.3),

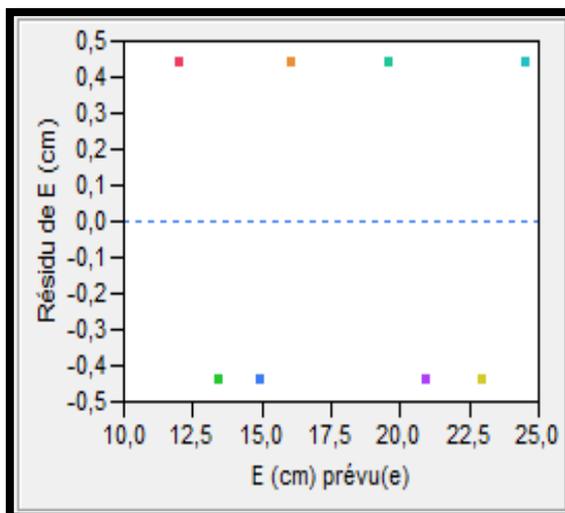


Figure VI.4: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues

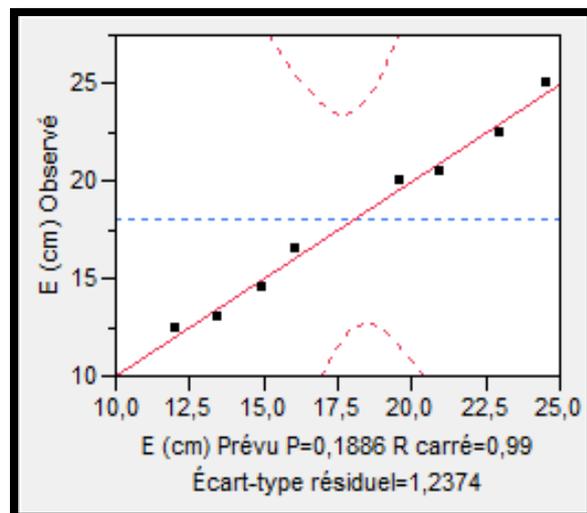


Figure VI.5: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

D'après le diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues (figure VI.4) on remarque que les résidus normalisés supérieurs à +0.5 et inférieurs à -0.5 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.

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

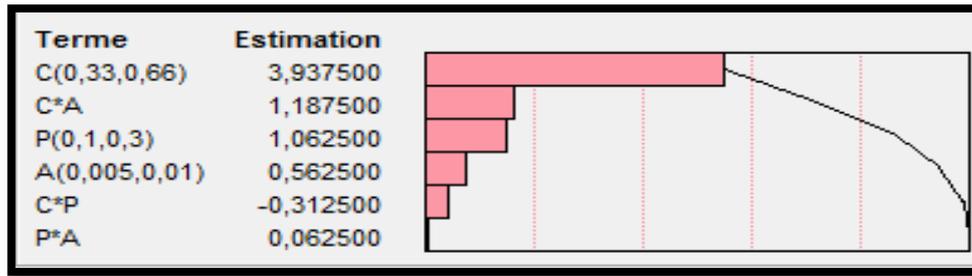


Figure VI.6: Digramme de Pareto

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

***Les courbes des isoréponses :** Les courbes isoréponses sont des courbes où la réponse à la même valeur numérique, en outre à partir de ces réponses, on en déduit la valeur de l'étalement pour différentes combinaisons.

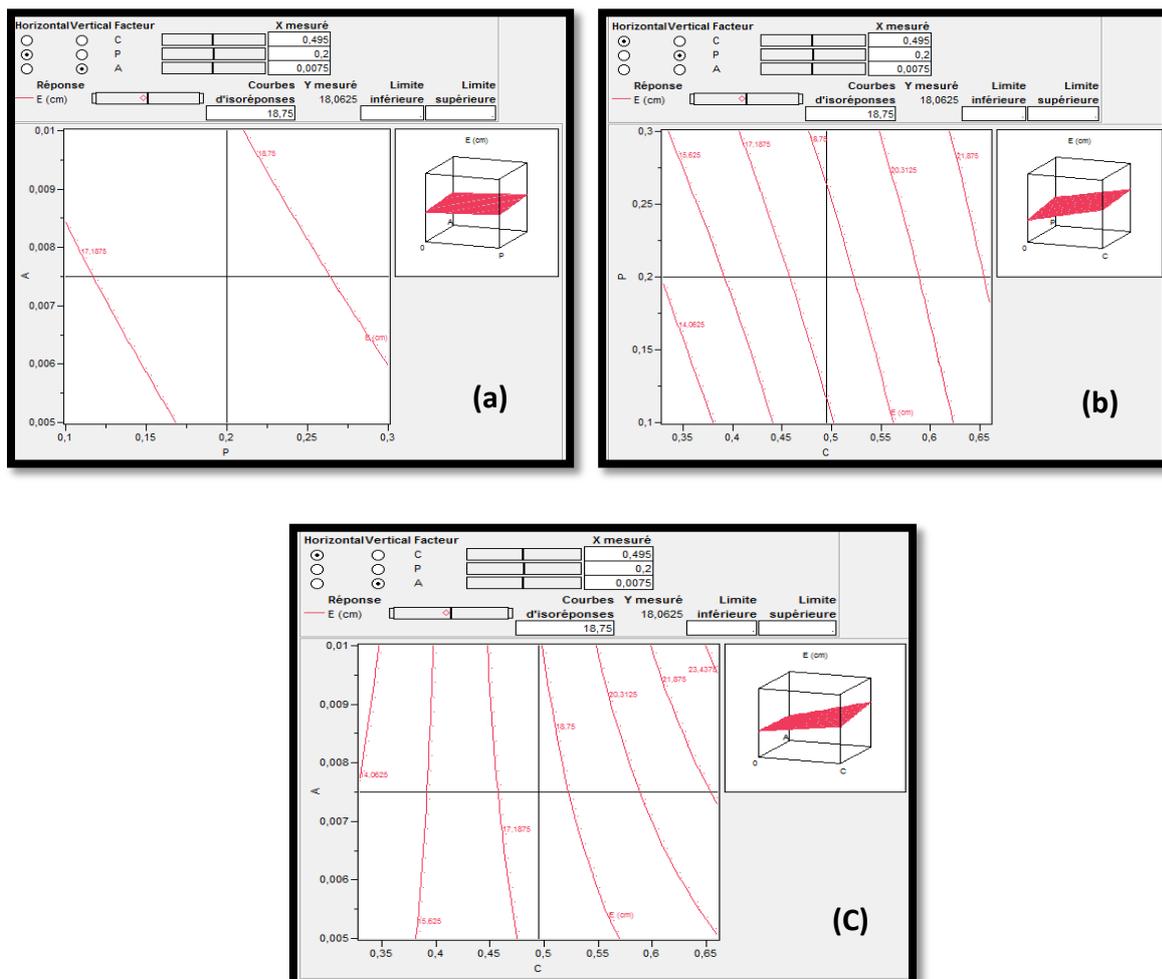


Figure VI.7: Profilers d'isoréponses d'étalement en fonction de deux facteurs combinés

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

La figure VI.7 ((a), (b) et (c)) présente les Profilers d'isoréponses de l'étalement en fonction de : ciment et de déchet plastique ; ciment et la poudre d'aluminium et plastique et la poudre d'aluminium, respectivement.

VI.6.2 La masse volumique à 28j :

Le modèle linéaire de ce paramètre est écrit comme suit :

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1.5675 - 0.025 C - 0.0575 P - 0.06A - 0.01C*P - 0.0025 C*A - 0.00125 C*P*A$$

$$R^2 = 98\%$$

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	1,5675	0,0125	125,40	0,0051*
C(0,333,0,666)	-0,025	0,0125	-2,00	0,2952
P(0,1,0,3)	-0,0575	0,0125	-4,60	0,1363
A(0,005,0,01)	-0,06	0,0125	-4,80	0,1308
C*P	-0,01	0,0125	-0,80	0,5704
C*A	0,0025	0,0125	0,20	0,8743
P*A	0,005	0,0125	0,40	0,7578

Figure VI.8: Estimation des coefficients

Suivant le tableau ci – dessus on observe que le pourcentage d'aluminium est le coefficient gouvernant sur la masse volumique des mortiers (sa valeur de prob.>|t| est la petite) par contre le dosage de ciment et le pourcentage de déchet plastique présentent une influence moins importante par rapport à celle de poudre d'aluminium. Cette différence est bien claire dans la modèle mathématique.

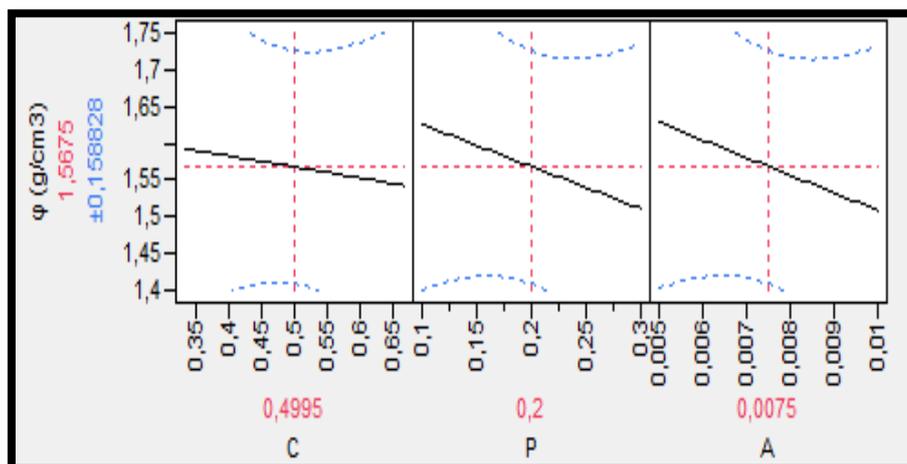


Figure VI.9: Diagramme de chaque facteur

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

A partir des diagrammes de chaque effet on remarque que la masse volumique augmente lorsque les trois facteurs diminuent dont les coefficients de ces effets sont négatifs dans le modèle mathématique.

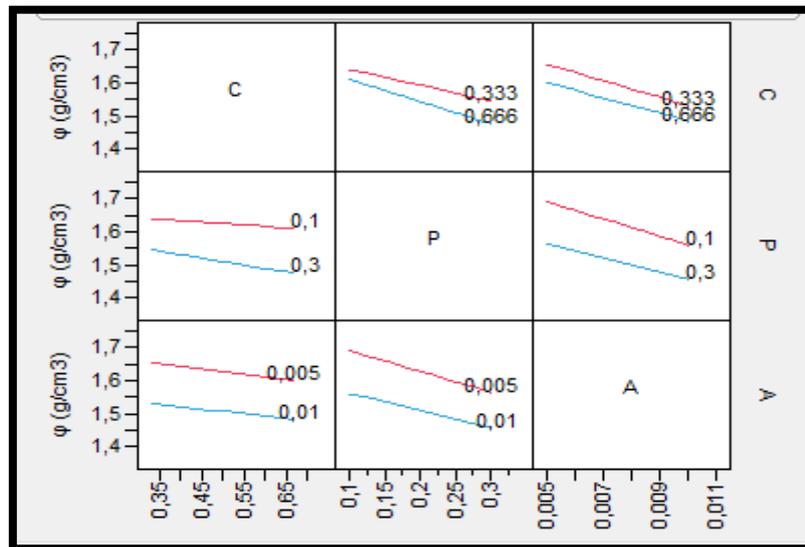


Figure VI.10: Profil d'interaction de réponse de la masse volumique en fonction des facteurs (C, P, A)

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 bien comprendre leurs influences sur la réponse étudiée. On peut conclure que l'effet des 3 facteurs est négatif, ce qui explique que la masse volumique augmente lorsque les facteurs passent de leurs niveau haut vers de leurs niveau bas, les interactions ne sont pas importantes (il n'y a pas d'interaction entre les facteurs).

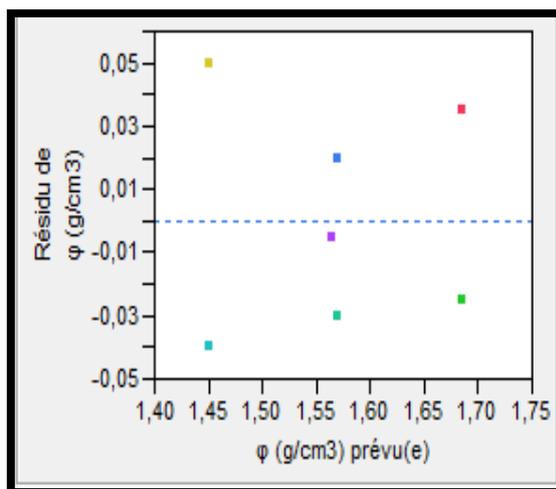


Figure VI.11: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues

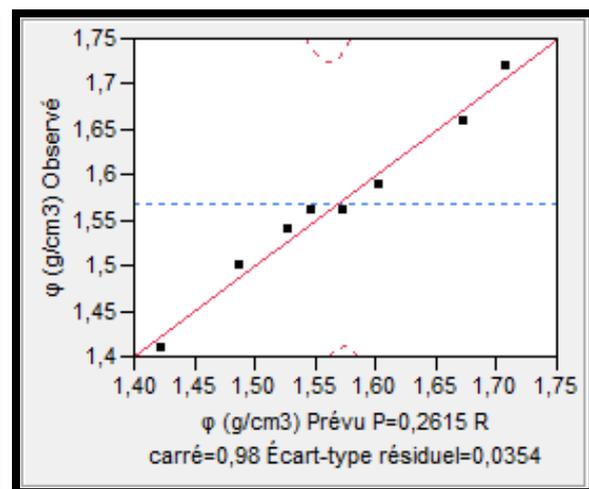


Figure VI.12: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

Suivant le diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus (figure VI.11) on observe que les résidus normalisés supérieurs à +0,05 et inférieurs à -0,05.

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

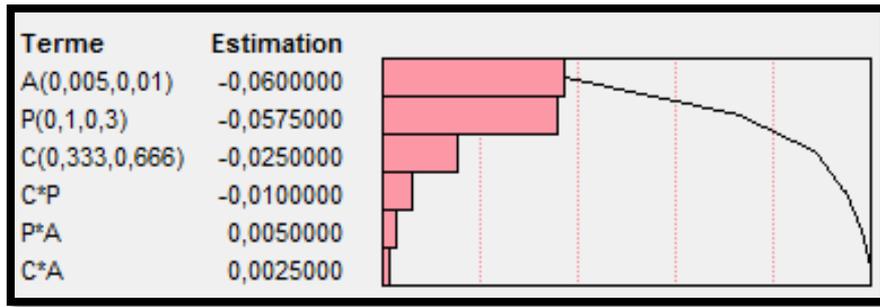


Figure VI.13: Diagramme de Pareto d'estimation

Suivant le diagramme de Pareto d'estimation (figure VI.13), on remarque que le dosage en aluminium c'est le facteur le plus influant sur la réponse ensuite, le plastique et le ciment finalement des divers interactions de ces facteurs.

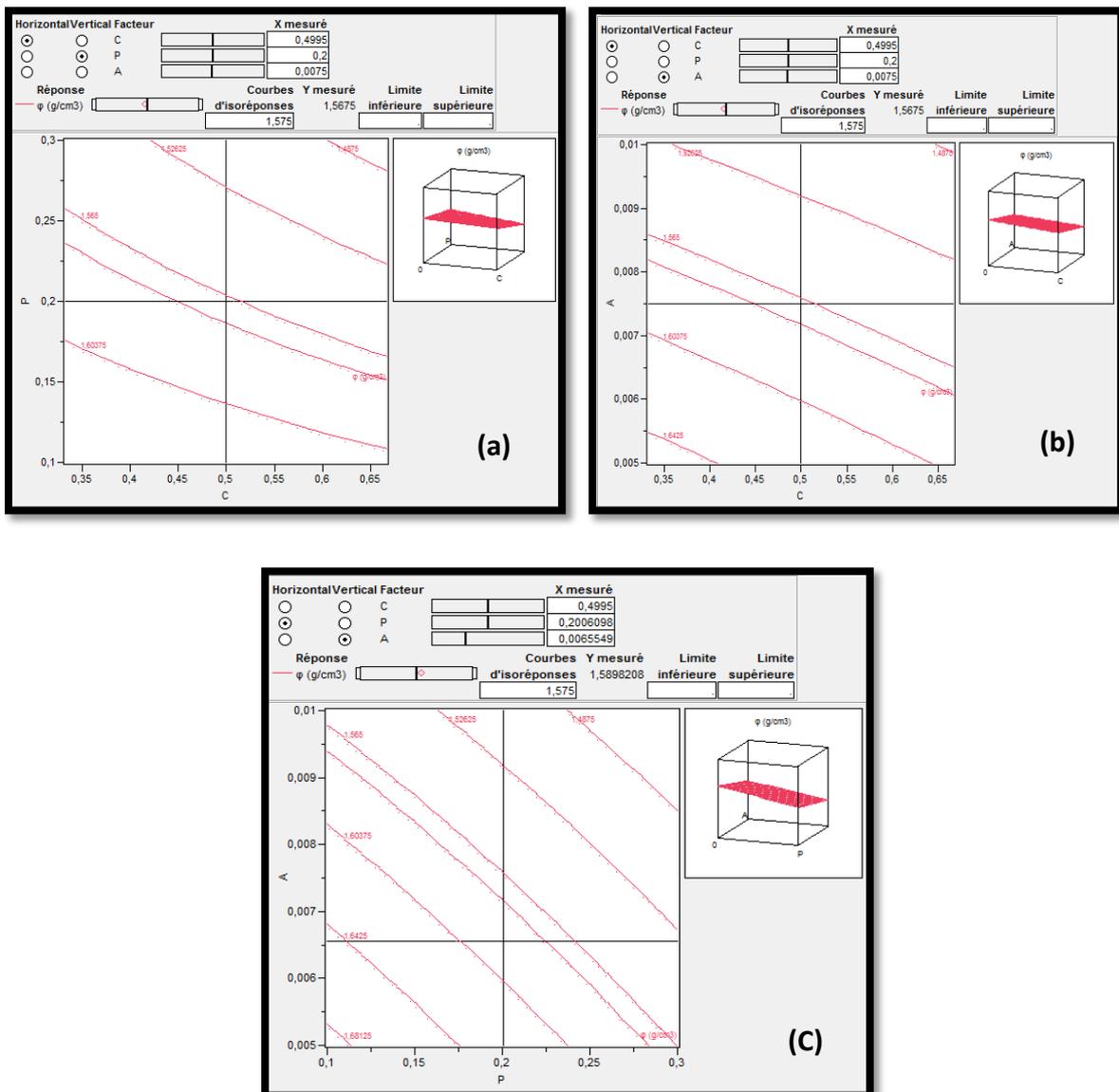


Figure VI.14: Profilers d'isoréponses de la masse volumique en fonction de deux facteurs combinés

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

La figure VI.14 ((a), (b) et (c)) présente les Profileurs d'isoréponses de la masse volumique en fonction de : ciment et de déchet plastique ; ciment et la poudre d'aluminium et plastique et la poudre d'aluminium, respectivement.

VI.6.3 La résistance à la compression à 28j :

Le modèle de cette réponse est :

$$R_{C28} = 12.2125 - 1.8475 C - 1.4525 P - 0.08 A - 0.4875 C*P + 0.03 P*A - 0.295 C*A + 0.395 C*P*A$$

$$R^2 = 84\%$$

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	12,2125	1,1175	10,93	0,0581
C(0,333,0,666)	-1,36	1,1175	-1,22	0,4379
P(0,1,0,3)	-2,1e-17	1,1175	-0,00	1,0000
A(0,005,0,01)	-1,2175	1,1175	-1,09	0,4728
C*P	1,4525	1,1175	1,30	0,4175
C*A	-0,305	1,1175	-0,27	0,8304
P*A	0,995	1,1175	0,89	0,5369

Figure VI.15: Estimation des coefficients

D'après le tableau d'estimation des coefficients on comprend que le dosage de ciment est le facteur le plus influant sur la résistance à la compression des mortiers (prob.>|t| la faible valeur), le pourcentage de plastique et le pourcentage de poudre d'aluminium ont une influence moins importante que le dosage de ciment ce qui bien éclaircie dans le modèle mathématique.

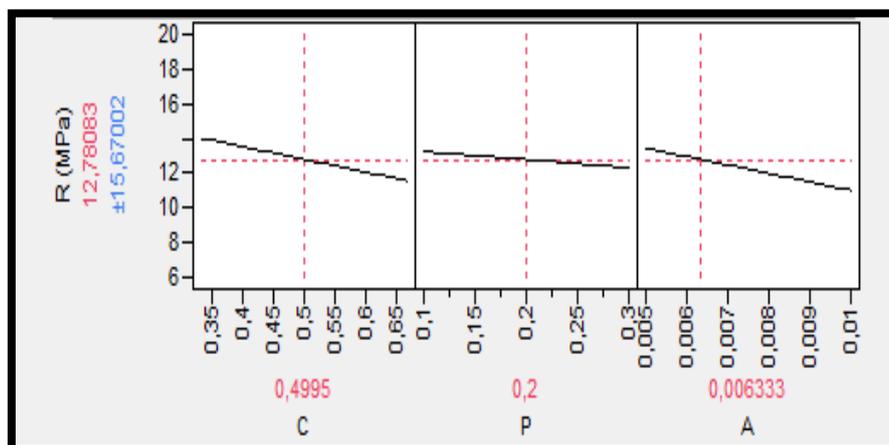


Figure VI.16: Diagramme de chaque facteur

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

Suivant la figure IV.16 on observe que la résistance à la compression augmente avec la diminution des dosages des trois facteurs ce qui bien éclaircie dans le modèle mathématique.

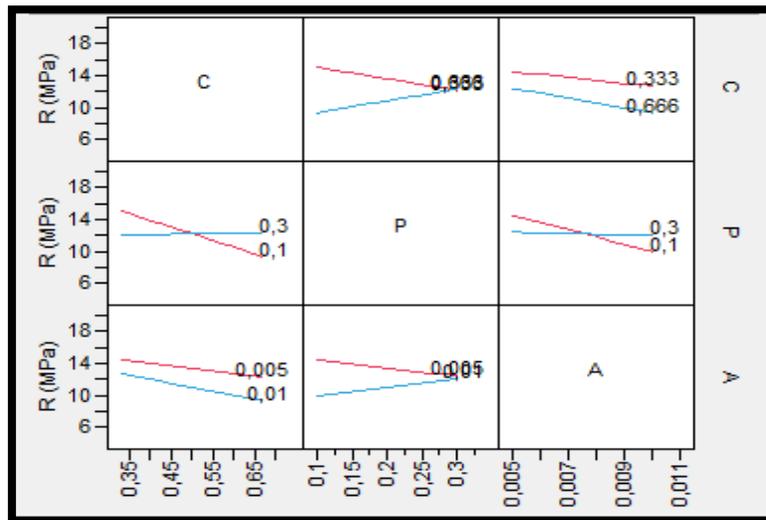


Figure VI.17: Profil d'interaction de réponse de la résistance à la compression en fonction des facteurs (C, P, A)

La figure ci-dessus présente un profil d'interaction qui exprime la possibilité d'étudier l'interaction entre 2 facteurs pour estimer leurs influence sur la réponse. L'effet des 3 facteurs 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. Deuxième ordre d'interaction est moins important.

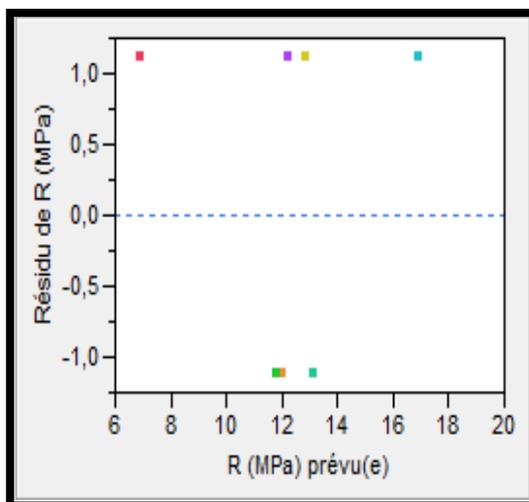


Figure VI.18: Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues

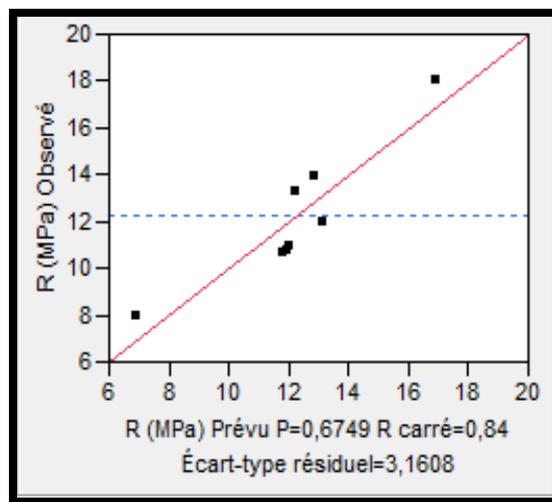


Figure IV.19: Diagramme des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

A partir de diagramme des résidus en fonction des valeurs prévus (figure VI.18) il est bien claire que les résidus normalisés supérieurs à +1 et inférieurs à -1.

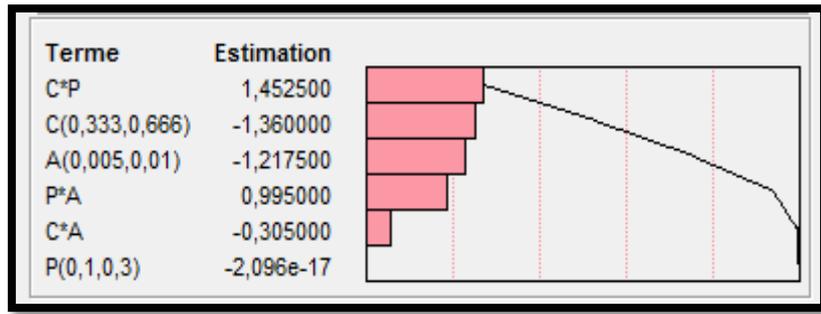


Figure VI.20: Diagramme de Pareto

D'après le diagramme de Pareto (figure VI. 20), on observe que l'interaction entre le dosage en ciment et le dosage du plastique c'est la première gouverneuse de réponse étudiée, suivi par les deux facteurs de ciment et l'aluminium respectivement et le facteur qui reste (le plastique) c'est le dernier influant après les deux interactions (P*A et C*A).

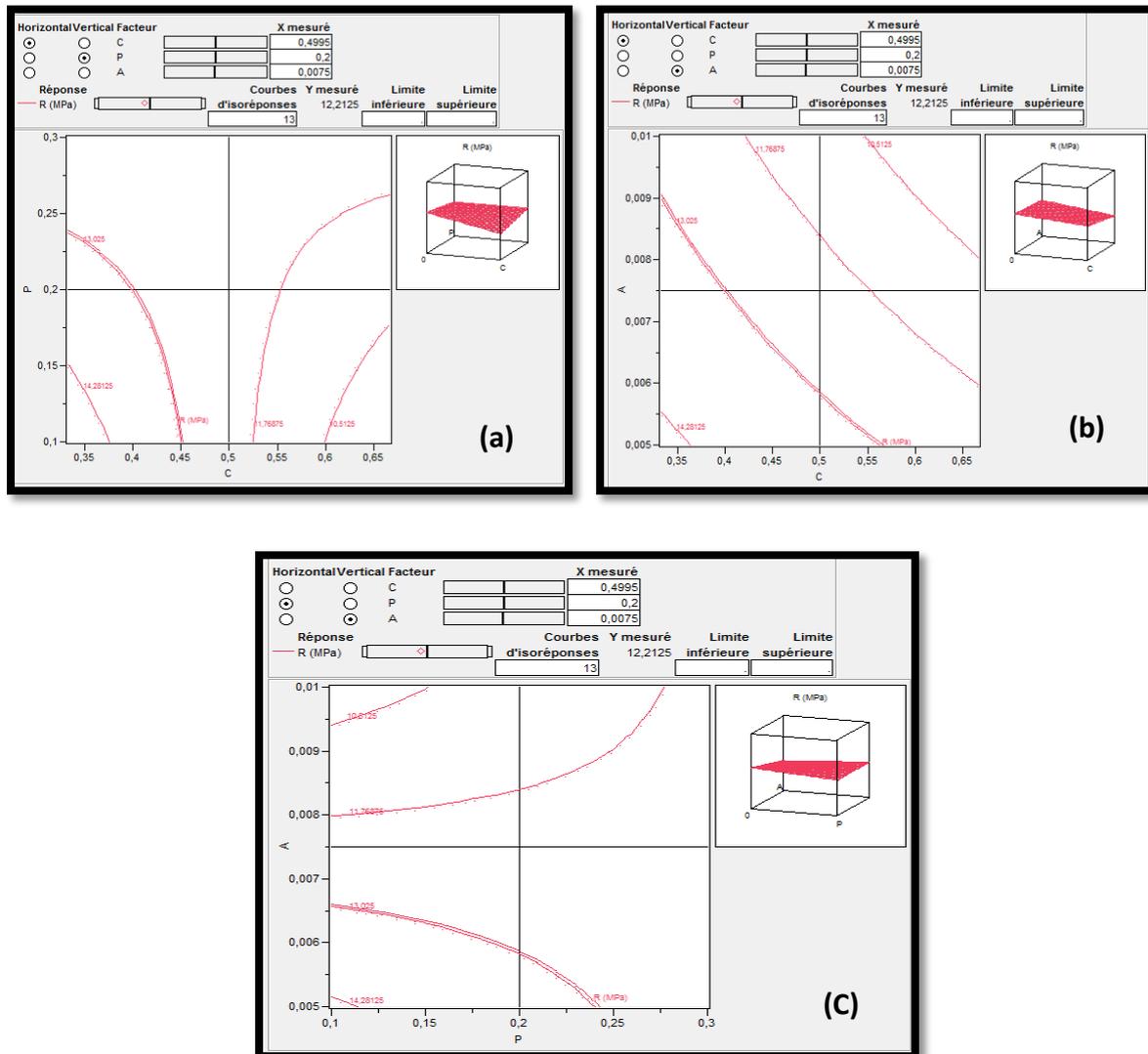


Figure VI.21: Profilier d'isoréponses de la résistance à la compression en fonction de combinaison des deux facteurs

Chapitre VI: Modélisation de plan d'expérience

La figure VI.21 ((a), (b) et (c)) présente les Profileurs d'iso réponses de la résistance à la compression en fonction de : ciment et de déchet plastique ; ciment et la poudre d'aluminium et plastique et la poudre d'aluminium, respectivement.

VI.7 Conclusion :

Les modèles statistiques fournissent un moyen efficace pour évaluer l'influence et les effets des variables du mélange. Ils sont valables pour un large éventail de mélanges dans les fourchettes étudiés [11].

- Le dosage en ciment est le facteur exerçant plus d'influence sur la maniabilité des mortiers
- Le dosage en aluminium et en plastique exercent un effet sur la masse volumique.
- Les trois facteurs ont un effet équivalent sur la résistance en compression (vers le sens de diminution).

Le plan factoriel complet 2^3 est satisfaisant, les réponses prévues générées par le modèle linéaire sont en accord avec celles mesurées ($R^2=99$ % pour l'étalement, $R^2=98$ % pour la masse volumique et $R^2=84$ % pour la résistance en compression).

Conclusion générale



CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre d'une problématique au cœur de préoccupations "la pollution par le plastique", les chercheurs en génie civil ont orientés leurs études vers la méthode de valorisation des déchets plastiques dans leurs domaines pour limiter les nuisances de pollution sur l'environnement d'une part et exploiter les avantages économiques et techniques des déchets plastiques d'autre part.

Dans notre travail nous sommes concentré sur la pollution causée par les sacs plastiques, la valorisation par le recyclage c'est la meilleure méthode pour minimiser la propagation de ces déchets dans la nature et enfin de profiter de leurs avantages dans le domaine de matériaux de construction.

Dans cette étude nous avons remplacé le sable naturel du mortier par des granulats plastiques issus du recyclage des sacs plastiques (le polyéthylène de basse densité PEBD), afin d'élargir le domaine d'application de ce mortier composite nous avons additionné de la poudre d'aluminium (déchet d'aluminium broyé)

Les résultats obtenus montrent que :

- La maniabilité du mortier composite augmente en augmentant de taux de remplacement des granulats naturels par ceux du plastique.
- La masse volumique diminue en augmentant le taux de remplacement, l'incorporation de la poudre d'aluminium contribue significativement dans cette diminution
- Le retrait augmente en fonction du taux de remplacement, l'addition de la poudre d'aluminium le diminue (mais il reste toujours supérieur à celui du mortier témoin)
- La résistance à la compression est affectée par la substitution, une diminution de 2 MPa pour un remplacement de 10 %, de 4 MPa pour un remplacement de 30%, l'addition de la poudre d'aluminium diminue davantage la résistance (la diminution est de 50 %) .
- Les mêmes remarques restent valables pour la résistance à la traction par flexion.
- Les autres caractéristiques (indices de durabilité) sont :
 - Absorption: diminue avec le taux de remplacement, augmente légèrement par l'incorporation de la poudre d'aluminium.
 - Porosité: augmente avec le taux de remplacement et l'ajout de la poudre d'aluminium.

Les résultats d'étude expérimentale au laboratoire montrent que les déchets d'aluminium (Al) et du plastique (PEBD) ont une grande influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques du mortier. Ce qui nous donne l'idée d'appliquer une modélisation par un logiciel (JMP) pour comprendre l'interaction entre les différents ingrédients de base (ciment, le déchet de poudre d'aluminium et les granulats plastiques) sur les caractéristiques suivantes : la maniabilité , la masse volumique à 28j et la résistance à la compression à 28j.

Conclusion générale

Les résultats de modélisation montrent que:

- ✓ Le dosage en ciment est le facteur le plus influant sur la maniabilité des mortiers.
- ✓ Le dosage en aluminium et en plastique exercent un effet sur la masse volumique.
- ✓ Les trois facteurs ont un effet équivalent sur la résistance à la compression.

Les résultats de notre travail nous aide à :

- ❖ Réaliser des éléments de séparation avec un pouvoir isolant significatif.
- ❖ La réduction du poids des éléments.
- ❖ La diminution des dimensions des éléments constructifs.

L'amélioration des caractéristiques du mortier due à l'addition des déchets de plastique et d'aluminium peuvent avoir d'immenses conséquences pratiques sur l'environnement et l'économie et donc les futures études devraient être mises en œuvre pour obtenir des mortiers composites durables, de qualité, mais rentables aussi.

Références Bibliographiques



LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] : S. Bouaziz, ‘Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d’un béton léger à base de granulats composites’, thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2014.
- [2] : L. Zegichi, ‘Les bétons légers’, cours, 2020.
- [3] : R. Ghemali, Y. Khalfaoui, ‘Elaboration d’un béton cellulaire bio-sourcier à base des déchets industriels’, mémoire de master, Université de Bordj Bou Arreridj, 06 juillet 2019.
- [4] : M. Neville, ‘ Propriétés des bétons’, Edit, Eyrolles, 2000.
- [5] : I. Djakam, ‘ Elaboration d’un béton léger à partir des matériaux locaux’, mémoire de master, Université de M’sila, 2016.
- [6] : T. Douara, ‘Effet des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable’, thèse de doctorat, Université de Biskra, 2019.
- [7] : R. Dupain, J-C. Saint-Arroman, ‘Granulats, Sols, Ciment et Bétons’, 4^{ème} Edit, Casteilla, 2009.
- [8] : N. Latroch, ‘ Effet des agrégats à base de déchets plastiques sur les différentes propriétés des matériaux composites mortier-polymère’, thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2019.
- [9] : B. Traore, ‘ Elaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : Amélioration de la résistance par des charges en argiles’, thèse de doctorat, Université de Félix Houphouët- Boigny, 30 novembre 2018.
- [10]: Y. Ghernouti, B. Rabehi, B. Safi, R. Chaid, ‘Use of recycled plastic bags waste in the concrete’, Journal of international scientific publications: Materials, Methods and Technologies’, Université de Boumerdes, Juin 2014.
- [11] : M. Ayad, Y. Barka, ‘Modélisation des bétons ordinaires par des plans d’expériences’ mémoire de master, Université de Tlemcen, 24 juin 2013.
- [12] : https://www.jmp.com/fr_fr/applications/design-of-experiments.html
- [13] : M. Gouasmi, ‘Effet des agrégats légers à base de polyterephthalate d’éthylène sur les propriétés des mortiers’ mémoire de master, Université d’Oran, 23 mai 2013.
- [14] : M. Buyck, ‘Gestion des déchets plastiques et détection de micro-déchets plastiques en station d’épuration en Wallonie’, mémoire de master, Université Gembloux, 2018.
- [15] : S. Benimam, F. Debib, M. Bentchikou, M. Guendouz, ‘Valorisation et recyclage des déchets plastiques dans le béton’, MATEC Web of Conférences 11,01033, Université de Médéa, 2014.

Liste des références

- [16]: M. Nouali, Z. Derriche, 'Analyse des possibilités de valorisation des déchets de sachets plastiques dans l'amélioration des caractéristique des enrobes bitumineux', 1^{er} séminaire international sur les matériaux routiers, Université de Houari Boumediene, octobre 2015.
- [17]: o.y. marzouk , R.M.Dheily . M .queneudec , 'Valorisation of post consumer waste plastic in cementious concrete composites',waste manage 27 (2) 2007 .310 -318.
- [18]: M. REMADNIA, ' Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants', thèse de doctorat, Université de 08 Mai 1945 Guelma, Janvier 2012.
- [19]: K. Sandrine, ' Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt ', thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 26 Novembre 2004.
- [20]: F. Jérôme, ' Les plans d'expériences pour le réglage des commandes à base de logique floue ', thèse de doctorat, Ecole nationale supérieur d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique et des télécommunications, 26 Septembre 2006.
- [21]: J. Goupy, ' Introduction aux plans d'expériences ', 5^{ème} Edition, Dunod, 2005.
- [22]: P. Triboulet, 'Notions de bases sur les plans d'expériences', Lycée Niepce – Chalon sur Saône, 09/09/2008.
- [23]: A. Karouite, ' Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali réaction', Mémoire, École Hassani des travaux publiques, 2003.
- [24]: Y-W. Choi, D-J. Moon, J-S. Chung, S-K. Cho, 'Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete', Cement and concrete research 2005, 35(4):776-781.
- [25]: K. Senthil Kumar, K. Baskar, 'Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries', J Mater Cycles Waste Manag 2015, 17:718 –724.
- [26]: B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato, L. Di Maio, 'Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar', Composites Part B: Engineering 2016, 99:75-83.
- [27]: K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, W. Prince, 'Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates', Waste management 2010, 30(11):2312-2320.

Liste des références

- [28]: C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. Matheus, A. Gutierrez, 'Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios', *Waste Management* 2009, 29(10):2707-2716.
- [29]: A. Badache, AS. Benosman, Y. Senhadji, M. Mouli, 'Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE)', *Construction and Building Materials* 2018, 163:40-52.
- [30]: YW. Choi, DJ. Moon, YJ. Kim, M. Lachemi, 'Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles', *Construction and Building Materials* 2009, 23(8):2829-2835.
- [31]: E. Rahmani, M. Dehestani, M. Beygi, H. Allahyari, I. Nikbin, 'On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles', *Construction and Building Materials* 2013, 47:1302- 1308.
- [32]: AS. Benosman, H. Taïbi, Y. Senhadji, M. Mouli, M. Belbachir, and MI. Bahlouli, 'Plastic Waste Particles in Mortar Composites: Sulfate Resistance and Thermal Coefficients', *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 2017, 33(3):171-202.
- [33]: OY. Marzouk, R. Dheilily, M. Queneudec, 'Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites', *Waste management* 2007, 27(2):310-318.
- [34]: P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, 'Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes', *Cement and Concrete Composites* 2008, 30(9):806-814.
- [35]: N. Saikia, Jd. Brito, 'Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete', *Materials Research* 2013, 16(2):341-350.
- [36]: E. P. Box, W. G. Hunter, J. S. Hunter, 'Statistics for Experimenters', 2e edition, John Wiley and Sons. New-York, 2005.
- [37]: S. Akçaözoğlu, CD. Atiş, K. Akçaözoğlu, 'An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete', *Waste management* 2010, 30(2):285-290.

Liste des références

[38]: Madani BEDERINA, ‘ Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois’, Thèse de doctorat en Génie Civil, de l’université de Laghouat, 25 Avril 2007.

[39]: I. SATTI, ‘ Etude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA’, mémoire de master, Université KASDI MERBAH – OUARGLA, 2014.

[40]: Untec, ‘ Mémento technico-économique du béton cellulaire 2012’, syndicat national des fabricants de béton cellulaire.

[41]: J. Cox, A. Ingelaere, J. Sizaire, P. Meulders, E V. Overmeire, ‘Le béton cellulaire matériau d'avenir’, Belgique, fédération Belge du béton cellulaire (Febecel).

[42]: M-H. Zhang, O-E. GjØrv, ‘Penetration of cement paste in to lightweight aggregate’, Cement and Concrete Research, 22(1):47-55; 1992.

Annexes. Tableaux des résultats



TABLEAUX DES RÉSULTATS

- Variation d'étalement E (Cm) du mortier en fonction des dosages des déchets de plastique et d'aluminium

Composition	E (Cm)
MN	10.7
M1 (10% P)	12.4
M2 (30% P)	16.85
M3 (10%P + 1%A)	12.5
M4 (30%P + 1%A)	14.5
M5 (10%P + 0.5%A)	13
M6 (30%P+ 0.5% A)	16.5

- Variation de la masse volumique en fonction de l'âge et en fonction de type de mortier

Age (jours)	ρ (g/cm ³)						
	MN	M1	M2	M3	M4	M5	M6
7	1,59	1,45	1,36	1,45	1,42	1,54	1,43
28	1,84	1,79	1,68	1,56	1,50	1,72	1,61

- Variation de la porosité accessible à l'eau à 28j en fonction de type du mortier

Composition des mortiers	P (%)
MN	8,04
M1	8,77
M2	11,6
M3	10
M4	11,67
M5	9,35
M6	9,71

- Variation de l'absorption par immersion des éprouvettes cubiques à 28j en fonction de différentes compositions

Composition des mortiers	Ab (%)
MN	10,55
M1	5,62
M2	3,7
M3	10,4
M4	9,48
M5	7,48
M6	8,48

Annexes: Tableaux des résultats

- Variation de masse en (g) des éprouvettes du mortier en fonction de l'âge et en fonction de régime du durcissement de chaque composition

Régime	Temps (jours)	Composition (%)						
		MN	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Dans l'eau	0	544,18	498,07	487,85	439,18	416,095	463,285	458,285
	1	546,08	506,64	495,83	447,26	421,81	464,665	459,04
	4	552,5	513,885	498,27	448,435	423,805	469,305	459,13
	8	553,04	517,055	506,12	449,05	424,075	470,23	459,825
	12	554,36	524,56	517,94	452,605	427,485	471,41	461,05
	15	555,36	529,485	523,23	453,695	428,78	472,355	461,425
	20	555,38	536,41	530,29	459,812	430,05	473,12	462,123
	28	555,98	537,245	535,31	462,011	431,11	474,824	463,12
	30	556,02	537,88	537,69	462,22	431,85	474,55	464,05
A l'air	0	534,46	497,27	485,32	441,635	421,085	462,3	427,05
	1	517,53	487,195	474,32	385,055	413,655	446,88	412,96
	4	514,513	478,735	469,72	320,425	406,07	440,205	406,495
	8	512,915	474,755	464,58	317,235	402,16	431,04	396,8
	12	509,435	473,375	458,87	313,43	398,975	429,215	395,025
	15	507,265	471,466	458,4	312,835	398,23	428,96	393,825
	20	504,55	470,845	454,82	311,95	387,914	428,57	392,85
	28	503,77	470,795	454,67	310,21	387,52	428,215	392,45
	30	503,98	470,24	454,03	310,38	386,96	427,96	391,87

Annexes: Tableaux des résultats

- Variation de longueur en (mm/m*10³) des éprouvettes du mortier en fonction de l'âge et en fonction de régime du durcissement de chaque composition

Régime	Temps (jours)	Composition (%)						
		MN	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Dans l'eau	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	7,27	5,1	14,53	3,69	19,75	7,53	3,8
	4	7,67	5,83	20,1	4,5	24,36	7,68	9,51
	8	7,88	9,68	27,56	7,19	25,03	11,92	12,49
	12	7,99	10,13	28,76	13,23	31,96	16,62	15,81
	15	8,56	13,78	28,89	14,19	32,36	16,35	21,62
	20	8,65	16,31	30,91	14,24	32,4	16,55	21,85
	28	8,66	20,78	31,27	14,28	32,58	16,75	22,015
	30	8,68	22,57	31,92	14,3	32,88	16,92	22,11
A l'air	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	7,27	5,1	14,53	6,37	17,24	0,88	20,03
	4	7,67	5,83	20,1	9,169	23,24	3,45	22,5
	8	7,88	9,68	27,56	11,28	24,11	4,59	31,81
	12	7,99	10,13	28,76	24,65	34,91	5,043	31,87
	15	8,56	13,78	28,89	25,75	35,55	6,8	36,24
	20	8,65	16,31	30,91	25,86	35,76	6,92	36,54
	28	8,66	20,78	31,27	25,97	36,123	7,015	36,65
	30	8,68	22,57	31,92	26,01	36,85	7,21	36,82

Annexes: Tableaux des résultats

- Variation de l'absorption capillaire en fonction du type de mortier

Composition des mortiers	S (cm/sec ^{0.5})
MN	0,2
M1	0,53
M2	0,63
M3	0,65
M4	0,71
M5	0,44
M6	0,56

- Variation de la résistance à la traction par flexion des éprouvettes du mortier en fonction de l'âge et en fonction de composition

Age (jours)	R_f (MPa)						
	MN	M1	M2	M3	M4	M5	M6
7	4,27	3.80	3.45	1.85	1.55	2.15	2.08
28	5,92	4.02	3.89	2.64	2.46	2.74	2.67

- Variation de la résistance à la compression des éprouvettes du mortier en fonction de l'âge et en fonction de composition

Age (jours)	R_c (MPa)						
	MN	M1	M2	M3	M4	M5	M6
7	21,01	18.62	13.96	6.09	5.15	6.41	6.09
28	25,27	23	21.23	10.8	8	12	10.66