



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ

العربي التبسي-ي-

تبسة

Université Chahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Genie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : SELMANI Khalil

Sujet

**Utilisation de la méthodologie des plans d'expérience
pour la formulation de béton à base des déchets**

Présenté et soutenu publiquement, le 07/06/2023, devant le jury composé de :

M. HARKATI Elhaddi
M. BOULAARES Said
M. ABDERRAHMANI Sifeddine

Professeur
M.A.A
M.C.A

Président
Rapporteur
Examineur 1

Promotion : 2022/2023

DEDICACES

A la lumière de ma vie, la source de mes efforts, la flamme de mon Cœur, ma vie et mon bonheur maman que j'adore.

A mon éternel exemple, la source de ma joie et de mon bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

Une spéciale dédicace à des personnes qui comptent énormément pour moi et dans mon cœur, à qui je tiens énormément, ma sœur FATMA, mes frères MOUTAZ, HANI, AMIN Que dieu les protège pour moi, Je ne peux pas les remercier assez.

A mes très chères tantes et oncles, a toute ma famille et les êtres chers qui occupent une place spéciale dans mon cœur, je leur exprime ma profonde gratitude pour leurs conseils, leur aide et leurs encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours soutenu et encouragé, qui ont été à mes côtés et qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours d'études, mes aimables amis, collègues d'étude, sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, moyen et secondaire ou de l'enseignement supérieur.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'exprime mon gratitude envers le Tout-Puissant, ALLAH, qui m'a accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide de mon directeur de mémoire, Monsieur BOULAARES Said, docteur au département de génie civil de l'université de Tébessa. Il m'a offert l'opportunité de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions et nous le remercions pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience et ses précieux conseils tout au long de cette étude.

Ensuite, j'adresse mes sincères respects et profondes gratitudeux aux membres du jury qui ont honoré mon travail de fin d'études en le jugeant.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je leur somme reconnaissants pour leur soutien et leur collaboration.

ملخص

نقدم في هذا العمل نتائج برنامج تجريبي يتعلّق بسلوك الخرسانة المصنوعة من نفايات الألمنيوم. يحتاج كل باحث تجريبي إلى طريقة لإجراء بحثه. يعتمد اختيار الطريقة على هيكل البحث والفرضيات والظواهر المدروسة، ولكن بشكل خاص على الوقت والميزانية المتاحة. تشكل هذه الأخيرتين قللاً حقيقياً للباحثين. لقد اعتمدنا طريقة التجارب التصميمية، باستخدام برنامج MINITAB الإصدار 19. يوفر هذا البرنامج مجموعة واسعة من وظائف التحليل الإحصائي والأدوات الرسومية، ويسمح بتقديم نتائج دقيقة. باستخدام تصميم للخطة العاملة كاملة، اضطررنا لإجراء 96 تجربة. وتم دراسة المعلمات الرئيسية (العوامل)، والتي تشمل الأسمنت والرمل والحصى بنسبتين (15/8) و (25/15)، ونفايات الألمنيوم ونسبة الماء/الأسمنت (E/C). الهدف هو دراسة تأثير النفايات على سلوك الخرسانة في الحالة الطازجة والمقواة مع الاستشهاد بالخرسانة العادية. استناداً إلى نتائج التجارب المحصل عليها، تم التأكيد على أن الخرسانة المصنوعة من نفايات الألمنيوم أظهرت أداءً أقل من الخرسانة العادية من حيث مقاومة الضغط. على الرغم من أن وجود نسبة 5% من نفايات الألمنيوم قد ساهم في تحسين المقاومة مقارنة بنسبة أعلى تبلغ 25%، إلا أن هذه الخرسانة لم تتمكن من الوصول إلى مستويات الجودة والمقاومة الملحوظة في الخرسانة العادية.

الكلمات الرئيسية: خرسانة، نفايات، تجارب تصميمية، خطة عاملية كاملة، مقاومة، صياغة، طريقة دروكس-غوريس، جودة، نمذجة.

RESUME

Nous présentons dans ce travail, les résultats d'un programme expérimental portant sur le comportement de béton à base des déchets d'aluminium.

Tout expérimentateur a besoin d'une méthode pour réaliser sa recherche. Le choix de la méthode dépend de la structure de la recherche, des hypothèses, des phénomènes étudiés mais surtout du temps et du budget dispensé. Ces derniers forment des vrais soucis pour les chercheurs.

Nous avons adopté la méthode dite plans d'expériences, en utilisant le logiciel MINITAB version 19. Ce logiciel offre un large éventail de fonction d'analyse statistique et d'outils graphiques, et permet une présentation précise des résultats. A l'aide d'une conception de plan factoriel complet, qui nous a imposé d'utiliser 96 essais, Les principaux paramètres (facteurs) étudiés sont: ciment, sable, gravier a deux fraction (8/15) et (15/25), déchets d'aluminium le rapport eau/ciment (E/C). Le but est d'étudier l'effet des déchets sur le comportement du béton à l'état frais et durci tout en se référant au béton ordinaire.

À partir des résultats d'essais obtenus, il est confirmé que le béton à base de déchets d'aluminium a montré des performances inférieures à celles du béton ordinaire en termes de résistance à la compression. Bien que la présence de 5 % de déchets d'aluminium a amélioré la résistance par rapport à un taux plus élevé de 25 %, ces bétons n'ont pas pu atteindre les niveaux de qualité et de résistance observés dans le béton ordinaire.

Mots clés : béton, déchets, plans d'expériences, plan factoriel complet, résistance, formulation, méthode Dreux-Gorisse, qualité, modélisation.

ABSTRACT

In this work, we present the results of an experimental program on the behavior of concrete based on aluminum waste.

The behavior of concrete made from aluminum scrap.

All experimenters need a method to carry out their research. The choice of method depends on the structure of the research, the hypotheses, and the phenomena being studied and, above all, the time and budget available. These are real concerns for researchers.

We adopted the design-of-experiments method, using MINITAB version 19 software, which offers a wide range of statistical analysis functions and graphical tools, and enables results to be presented accurately. Using a full factorial design, which required us to use 96 trials, the main parameters (factors) studied were

Parameters (factors) studied are: cement, sand, gravel in two fractions (8/15) and (15/25), aluminum scrap and the water/cement ratio (W/C). The aim is to study the effect of waste on the behavior of concrete in the fresh and hardened states, with reference to ordinary concrete.

From the test results obtained, it is confirmed that aluminum waste-based concrete showed lower performance than ordinary concrete in terms of compressive strength. Although the presence of 5% aluminum scrap improved strength compared with a higher level of 25%, these concretes were unable to achieve the levels of quality and strength observed in ordinary concrete.

Key words: concrete, waste, experimental designs, full factorial design, strength, formulation, Dreux-Gorisse method, quality, modeling.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	i
Remerciements	ii
ملخص	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des matières	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiv
Liste des symboles	xvi

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

1.1. Introduction	8
1.2.Caractérisation des matériaux	8
1.2.1. Sable	8
1.2.2. Ciment	8
1.2.3. Gravier	9
1.2.4. Déchets d'aluminium	10
1.2.5. L'eau de gâchage	10
1.3.Essai sur les matériaux	11
1.3.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	11
1.3.1.1.But de l'essai	12
1.3.1.2.Principe de l'essai	12
1.3.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]	12
1.3.2.1.Principe	14
1.3.2.2.Mode opératoire	14
1.3.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]	15
1.3.3.1. Principe	15
1.3.3.2.Mode opératoire	15
1.3.4. Coefficient granulaire	16
1.3.5. Equivalent de sable [NF EN 933-8]	16
1.3.5.1.Mode opératoire	17

1.3.6. Ciment	18
1.3.6.1.L'analyse chimique	18
1.3.6.2.L'analyse physique et mécanique	19
1.3.6.3.Classe vrai de ciment	20
1.3.7. Eau de gâchage	20
1.4. Les méthodes de formulation	20
1.4.1. Méthode de la méthode de dosage par poids fixe	20
1.4.2. Méthode de JOISEL	20
1.4.3. Méthode de VALETTE	21
1.4.4. Méthode de la méthode de dosage par volume	21
1.4.5. La méthode de Faury.....	22
1.4.6. Méthode de la méthode de dosage optimal	23
1.4.7. La méthode de dosage empirique	23
1.4.8. Méthode de Bolomey.....	24
1.4.9. La méthode basée sur un plan d'expérience	24
1.4.10. Méthode D'ABRAMS	25
1.4.11. La méthode de Dreux-Gorisse	26
1.5.Principe de la formulation de béton (DREUX-GORISSE).....	27
CHAPITRE II : LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX	
2.1. Introduction	29
2.2. Essai sur sable	29
2.2.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	29
2.2.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]	30
2.2.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]	30
2.2.4. Equivalent de sable [NF EN 933-8]	31
2.3. Le Ciment	31
2.3.1. Classe vrai de ciment	31
2.4. Déchets d'aluminium	31
2.4.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	31
2.4.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]	32
2.4.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]	32
2.5. Gravier	33
2.5.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]	33
2.5.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]	34

2.5.3.	Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]	35
2.5.4.	Coefficient granulaire	35
2.6.	Tracé la courbe granulaire de référence	35
2.7.	Dosage des granulats	40
2.7.1.	SANS DECHETS	42
2.7.2.	AVEC DECHETS.....	43
2.8.	Composition béton.....	45
2.9.	Dimensionnements de moule	47
2.10.	Malaxage de béton	47
2.11.	Le moulage des éprouvettes	48
2.12.	Le démoulage des éprouvettes	49
2.13.	Conservation des éprouvettes	49
2.14.	Essais sur le béton durci	50
2.14.1.	ABSORPTION D'EAU (NF P 18- 555)	50
2.14.1.1.	But de la mesure	50
2.14.1.2.	Principe de la mesure	50
2.14.2.	INDICE DES VIDES (NF EN 12390-7)	50
2.14.2.1.	But de la mesure	50
2.14.2.2.	Principe de la mesure	50
2.14.3.	Compacité (EN 12390-7)	51
2.14.3.1.	But de la mesure	51
2.14.3.2.	Principe de la mesure	51
2.15.	Interprétation les résultats	55
2.15.1.	Absorption d'eau	55
2.15.2.	Indice des vides	56
2.15.3.	Compacité	57
2.16.	Conclusion.....	58
CHAPITRE III : GENERALITES ET NOTIONS SUR LES PLANS D'EXPERIENCES		
3.1.	Introduction	60
3.2.	Historique des plans d'expériences	60
3.3.	Définition des plans d'expériences	61
3.4.	Vocabulaire de base des plans d'expériences	61
3.4.1.	Facteur	62
3.4.2.	Les différents types de facteurs	62

3.4.2.1.	Facteurs continus	62
3.4.2.2.	Facteurs discrets	63
3.4.2.3.	Facteurs ordonnables	63
3.4.2.4.	Facteurs booléens.....	63
3.4.3.	Domaine d'un facteur.....	63
3.4.4.	Réponses	64
3.4.5.	Domaine expérimental	64
3.5.	L'objectif de La méthode des plans d'expériences	65
3.6.	Principe des plans d'expériences	65
3.7.	Méthodologie dans l'étude d'un Phénomène	67
3.8.	Choix des facteurs et du domaine expérimental	67
3.9.	Matrice d'expériences	67
3.10.	Choix de la méthode d'expérimentation	68
3.11.	Analyse des résultats	69
3.12.	Conditions d'application des plans d'expériences	69
3.13.	Différents types des plans d'expériences	70
3.13.1.	Plans de mélanges	70
3.13.2.	Plans de criblage	70
3.13.3.	Plans factoriels complets	70
3.13.4.	Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux	71
3.13.5.	Plans fractionnaires	71
3.13.6.	Plankoshal	72
3.13.7.	Les plans de Taguchi	72
3.13.8.	Les plans en étoile	72
3.13.9.	Les plans de Doehlert	72
3.13.10.	Les plans de Plackett-Burman	72
3.13.11.	La méthode de surface de réponse	72
3.13.12.	Les Plans composites centré	73
3.13.13.	Les plans de Box-Behnken	75
3.14.	Conclusion	75
 CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS PAR PLAN D'EXPERIANCES		
4.1.	Introduction	77
4.2.	Mise en application des plans d'expériences	77

4.2.1. Facteurs	77
4.2.2. Niveaux des facteurs	77
4.2.3. Choix de la réponse	78
4.2.4. Choix du plan d'expérience pour notre étude	78
4.2.5. Interprétation des résultats des calculs	78
4.2.6. Matrice d'expériences	78
4.3. Résistance mécanique en compression	81
4.3.1. Résultats des essais de résistance à la compression	82
4.4. Interprétation des résultats	86
4.4.1. Béton à base de déchets d'aluminium à 25%	87
4.4.1.1. Représentation graphique des effets	87
4.4.1.1.1. Diagramme de Pareto.....	88
4.4.1.1.2. Modèle mathématique.....	88
4.4.1.1.3. Diagramme des effets principaux.....	88
4.4.1.1.4. Détermination des effets significatifs et des Coefficients du modèle.....	89
4.4.1.1.5. Diagramme des interactions	90
4.4.2. Béton à base de déchets d'aluminium a 5%	91
4.4.2.1. Représentation graphique des effets	91
4.4.2.1.1. Diagramme de Pareto.....	92
4.4.2.1.2. Modèle mathématique.....	93
4.4.2.1.3. Diagramme des effets principaux.....	93
4.4.2.1.4. Détermination des effets significatifs et des Coefficients du modèle.....	94
4.4.2.1.5. Diagramme des interactions	95
4.5. Conclusion	96

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale	98
---------------------------	----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références	100
------------------	-----

LISTE DES FIGURES

Figure1.1 Echantillon de sable	8
Figure 1.2 CPJ-CEM 1/A-M (P-L) 42.5R de EL MALABIOD	8
Figure1.3 gravier 8/15 d'origine de la carrière	8
Figure1.4 gravier 15/25 d'origine de la carrière	9
Figure 1.5 Déchet d'aluminium	9
Figure1.6 bassin d'eau	10
Figure1.7 Analyse granulométrique	10
Figure 1.8 Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton.	11
Figure1.9 Essai de détermination de la masse volumique apparente de sable	12
Figure1.10 Essai de détermination de la masse volumique apparente de gravier 15/25	12
Figure1.11 Essai de détermination de la masse volumique apparente de gravier 8/15	12
Figure1.12 Essai de détermination de la masse volumique apparente de déchets D'aluminium	13
Figure1.13 Essai de la masse volumique absolue de sable	14
Figure1.14 Essai de la masse volumique absolue de gravier	14
Figure1.15 Essai d'équivalent de sable	16
Figure1.16 CPJ-CEM 1/A-M(P-L) 42.5N de EL MALABIOD	17
Figure1.17 courbe optimale de JOISEL	20
Figure1.18 Courbe de variation de la masse volumique du béton de coques en fonction du dosage en ciment	21
Figure1.19 Courbes de référence Faury	22
Figure1.20 Abaque permettant la détermination de C	23
Figure1.21 courbe OAB	24
Figure 2.1 Courbe d'analyse granulométrique de sable ordinaire	28
Figure 2.2 Courbe d'analyse granulométrique des déchets d'aluminium	30
Figure 2.3 Courbe d'analyse granulométrique de gravier 8/15	32
Figure 2.4 Courbe d'analyse granulométrique de gravier 15/25	32
Figure 2.5 courbe granulaire pour dosage de ciment de 350 kg/m ³	35
Figure 2.6 courbe granulaire pour dosage de ciment de 400 kg/m ³	36
Figure 2.7 courbe granulaire pour dosage de ciment de 350 kg/m ³ avec déchets D'aluminium.....	37
Figure 2.8 courbe granulaire pour dosage de ciment de 400 kg/m ³ avec déchets	

D'aluminium	37
Figure 2.9 Moule de béton cubique	45
Figure 2.10 melange de beton	46
Figure 2.11 éprouvettes de béton	46
Figure 2.12 éprouvette de béton de déchets	47
Figure 2.13 conservation des éprouvettes dans l'eau	47
Figure 2.14 histogramme d'absorption d'eau de béton a 25% de déchets	54
Figure 2.15 histogramme d'absorption d'eau de béton a 5% de déchets	54
Figure 2.16 histogramme d'indice des vides de béton a 25% de déchets	55
Figure 2.17 histogramme d'indice des vides de béton a 5% de déchets	55
Figure 2.18 histogramme de compacité de béton a 25% de déchets	56
Figure 2.19 histogramme de compacité de béton a 5% de déchets	56
Figure 3.1 schema de plan d'expériences	59
Figure 3.2 le domaine et les niveaux d'un facteur	61
Figure 3.3 la disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude	62
Figure 3.4 Effet d'un facteur	62
Figure 3.5 Domaine expérimental.....	63
Figure 3.6 Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets.....	66
Figure 3.7 triangle de Féret, 1892	68
Figure 3.8 Plans factoriels complets	69
Figure3.9 surface de réponse	71
Figure 3.10 plan composite centré	72
Figure 3.11 plan de Box-Behnken pour trois facteurs	73
Figure 4.1 Essai de compression	79
Figure 4.2 éprouvettes après la compression	84
Figure 4.3 Diagramme de Pareto des effets normalises	84
Figure 4.4 Diagramme des effets principaux sur la résistance a 28 jours	85
Figure 4.5 Effets des facteurs sur la résistance a 28 jours	86
Figure 4.6 Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la résistance a 28 jours.....	87
Figure 4.7 Diagramme de Pareto des effets normalises	89
Figure 4.8 Diagramme des effets principaux sur la résistance a 28 jours	91
Figure 4.9 Effets des facteurs sur la résistance a 28 jours	92
Figure 4.10 Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la résistance a 28 jours.....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Coefficient granulaire G	17
Tableau 1.2 Nature et qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable	18
Tableau 1.3 Les propriétés chimiques de ciment	19
Tableau 1.4 Les propriétés physiques et mécaniques de ciment	20
Tableau 1.5 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments	21
Tableau 2.1 Résultats d'analyse granulométrique de sable	31
Tableau 2.2 Masse volumique apparente de sable ordinaire	31
Tableau 2.3 Masse volumique absolue du sable ordinaire	31
Tableau 2.4 Equivalent de sable ordinaire	32
Tableau 2.5 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments	32
Tableau 2.6 Résultats d'analyse granulométrique déchets d'aluminium	32
Tableau 2.7 Masse volumique apparente des déchets d'aluminium.....	33
Tableau 2.8 Masse volumique absolue des sables recyclés	33
Tableau 2.9 L'analyse granulométrique de gravier 8/15	34
Tableau 2.10 L'analyse granulométrique de gravier 15/25	34
Tableau 2.11 Masse volumique apparente de gravier	35
Tableau 2.12 Masse volumique absolue de gravier	36
Tableau 2.13 Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax	36
Tableau 2.14 valeurs de coefficient (K)	37
Tableau 2.15 pourcentage de composition de béton ordinaire	39
Tableau 2.16 pourcentage de composition de béton à base de déchets	41
Tableau 2.17 valeurs compacité du béton en fonction de Dmax de la consistance et du serrage	42
Tableau 2.18 quantité de composition de béton ordinaire pour $c=350 \text{ kg/m}^3$	44
Tableau 2.19 quantité de composition de béton ordinaire pour $c=400 \text{ kg/m}^3$	44
Tableau 2.20 quantité de composition de béton à base de déchets pour $c=350 \text{ kg/m}^3$	45
Tableau 2.21 quantité de composition de béton à base de déchets pour $c=400 \text{ kg/m}^3$	46
Tableau 2.22 composition de béton	48

Tableau 2.23 Résultats d'absorption d'eau, indice des vides et compacité pour déchets à 25 %	54
Tableau 2.24 Résultats d'absorption d'eau, indice des vides et compacité pour déchets à 5 %	56
Tableau 4.1 Facteurs et niveaux codés	78
Tableau 4.2 Facteurs retenus et domaines d'étude en unités naturelles	79
Tableau 4.3 Facteurs retenus et domaines d'étude en unités naturelles	79
Tableau 4.4 Matrice d'expérience	81
Tableau 4.5 Résultats des résistances à la compression à 28 jours pour des éprouvettes par déchets à d'aluminium a 25 %	84
Tableau 4.6 Résultats des résistances la compression a 28 jours pour des éprouvettes par déchets à d'aluminium à 5 %	86
Tableau 4.7 Effets et Coefficient estimés pour la résistance a 28 jour	88
Tableau 4.8 Effets et Coefficient estimés pour la résistance a 28 jour	92

LISTE DES SYMBOLES

BBL béton bois léger
ChRHA burning husk ashes
TRHA traitement husk ashes
SF silica fume
BO béton ordinaire
PAP pate de ciment auto-plaçantes
BAP béton auto-plaçantes
E/C Rapport eau sur ciment
G/S Rapport gravier sur sable
CH traitement à la chaux
SS au silicate de sodium
PVA à l'alcool polyvinylique
TH traitement thermique
SAT saturation OPS
FA cendres volantes
nS nano-silice
 ρ_s : Masse volumique apparente.
M : la masse l'échantillon.
V : volume de l'échantillon
 ρ_s : Masse volumique absolue ;
MS: Masse des grains solides ;
V1 : Volume de l'eau
V2: Volume total (grains solide + eau).
Coefficient granulaire
Dmax Dimension maximal des granulats
h1: hauteur du sable propre et élément fins;
h2 : hauteur du sable propre seulement.
ES équivalent de sable
GICA groupe de ciments d'Algérie
SiO₂ Silicate bicalcique
Al₂O₃ Oxyde d'aluminium

Fe_2O_3 Oxyde de fer

CaO oxyde de silicate

MgO oxyde de magnésium

K_2O oxyde de potassium

Na_2O oxyde de sodium

SO_3 Anhydride sulfurique

σ^c Classe vraie

$^{\circ}\text{C}$ degré Celsius

V ciment volume de ciment

V eau volume d'eau

V sable volume de sable

V gravier volume de gravier

V vide volume de vide

V total volume de totale

ρ_G : Masses volumiques absolues de gravier

ρ_S : Masses volumiques absolues de sable

ρ_E : Masses volumiques absolues d'eau

ρ_C : Masses volumiques absolues de ciment

D : grosseur maximum de l'agrégat en mm

R : rayon moyen du coffrage en mm

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton.

B : dépend du serrage

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : est le diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

G/C rapport gravier / ciment

R la résistance cible

k1 coefficient empirique.

Y_{exp} réponse expérimental

Y_{th} réponse théorique

E le vecteur des erreurs

X la matrice

ϕ_{th} l'approximation

A : le vecteur des coefficients qui sont les inconnues à identifier

n Le nombre total d'essais à réaliser
nf Le nombre des essais du plan factoriel
 $n\alpha$ Le nombre des essais du plan en étoile
 n_0 Le nombre des essais au centre
c quantité de ciment
s quantité de sable
G1 quantité de gravier 8/15
G2 quantité de gravier 15/25
d quantité de déchets d'aluminium
E Volume d'eau
P Coefficients des facteurs et des interactions
R Coefficient de détermination
R aju Coefficient de détermination ajusté

INTRODUCTION GENERALE

1. Généralité

Ces dernières années, la protection de l'environnement s'est accrue dans divers pays, les chercheurs dans le domaine du génie civil se sont concentrés sur la réutilisation des déchets de construction et des usines. Parmi ces déchets, les déchets d'aluminium. Le comportement des bétons à base des déchets a fait l'objet de plusieurs études dans différents pays et a attiré l'attention de nombreux chercheurs.

Il existe de nombreux matériaux issus de déchets ou recyclés, qui entrent dans la composition du béton, avec un effet positif sur l'amélioration de ses propriétés, et la technologie utilisée pour développer ces nouveaux matériaux de construction est peu coûteuse.

L'objet de cette étude est l'évaluation expérimentale de l'effet des déchets d'aluminium dans le béton sur les propriétés physico-mécaniques des bétons à base de ces déchets.

Cette partie du mémoire est consacrée à l'étude bibliographique, dans laquelle sont rappelés les principaux ouvrages liés à nos travaux de recherche. En particulier, des travaux où les auteurs ont traité des thèmes sur les plans expérimentaux et la formulation des bétons à base de déchets expliquant le rôle des déchets dans la composition du béton et son impact sur ses propriétés mécaniques et physiques et sa résistance.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif principal de ce travail est d'étudier expérimentalement les effets de déchets d'aluminium sur le comportement de béton ainsi que de l'interaction de différents paramètres sur la résistance du béton. Pour ce faire, nous avons divisé notre programme expérimental en deux parties :

La première : Les principaux paramètres étudiés sont l'indice des vides, l'absorption d'eau et la compacité, tous les échantillons ont été testés sous charge de compression axiale.

La seconde : 96 échantillons ont été testés sous chargement compressif centrique, afin d'étudier les effets de déchets d'aluminium sur la résistance à la compression du béton. Pour comprendre le comportement du béton à base des déchets d'aluminium, une conception statistique du plan factoriel complet a été utilisée pour identifier les facteurs qui ont des effets significatifs sur la résistance à la compression. Les analyses statistiques sont modélisées à l'aide du logiciel Minitab19.

3. PRESENTATION DE L'ETUDE :

Le présent travail est structuré en quatre chapitres :

- Chapitre 1 : Après une introduction générale, nous présentons les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude et leurs propriétés, les constituants des bétons, leurs domaines d'application. Dans un deuxième lieu, les bétons à base des déchets ont été étudiés, le squelette granulaire, les méthodes de formulation, les particularités des bétons à base des déchets, la caractérisation des bétons à base des déchets à l'état frais et durci, ainsi que les avantages et inconvénients sont présentés.
- Chapitre 2 : est consacré à une étude expérimentale, les essais d'identification des matériaux sont effectués, ainsi que la formulation du béton utilisé dans le béton à base des déchets, une discussion des résultats obtenus expérimentalement est fournie.
- Chapitre 3 : traite la démarche méthodologique des plans d'expériences et regroupe les différentes notions de statistique appliquées à cette méthode et les différents types des plans d'expérience.
- Chapitre 4 : nous présentons l'étude expérimentale visant à déterminer les effets de déchets d'aluminium sur le comportement de béton sur la résistance à la compression de béton à base des déchets, en utilisant la méthode de recherche que nous avons adoptée et qui a été présentée, ce chapitre est consacré également à une analyse des résultats. en utilisant la méthodologie des plans d'expériences Finalement, nous présentons une conclusion générale de notre travail ainsi que des recommandations pour des pistes de recherche.

4. Quelques revues de recherche

Nous présentons quelques recherches qui ont été menées sur les matériaux recyclés dans ces dernières années et qui ont montré l'effet des paramètres susceptibles d'avoir plus d'influence sur le comportement du béton :

En 2008, Moulai Abdellah BOUABDALLAH Cet article concerne une étude de développement d'un matériau composite dans le domaine de la construction à base des déchets de bois qui provienne de l'industrie Algérienne. Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux ayant une forte capacité d'adhésion, le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort ... etc.), explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Le béton bois léger (BBL) est un béton qui possède de nombreuses propriétés de légèreté, d'isolation thermique, d'absorption acoustique,

faisant partie ainsi du domaine de recyclage des déchets industriels. Cette étude expérimentale représente un exposé des résultats obtenu de différents essais établis sur le béton bois léger.

[1]

En 2009, Andres Salas, Silvio Delvasto, Ruby Mejía de Gutierrez, David Lange Le but de cette étude est d'examiner l'effet d'un remplacement du ciment Portland par une balle de riz traitée chimiquement frêne (ChRHA) sur les propriétés mécaniques et de durabilité des hautes performance béton, et de comparer les résultats avec des bétons Sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. En raison de la teneur élevée en SiO₂ amorphe dans ChRHA avec une grande réactivité, une augmentation significative de la résistance à la compression des bétons a été observée.
2. Les résistances à la compression et à la flexion du béton ChRHA sont comparables à celles d'un béton SF fabriqué avec le même niveau de remplacement, et ces résistances sont supérieures aux mélanges témoin et TRHA.
3. L'incorporation de ChRHA dans le béton améliore les propriétés de durabilité en affinant sa structure poreuse. Ces résultats sont similaires à ceux du béton SF.
4. Il est possible de produire des bétons à hautes performances en utilisant ChRHA comme matériau cimentaire complémentaire. [2]

En 2010 H. Hebhou, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, E. Ghorbel Cette étude expérimentale a été menée sur trois séries de mélanges de béton : sable mélange de substitution, mélange de substitution de gravier et un mélange des deux granulats (sable et gravier). Les formulations de béton ont été réalisées avec un rapport eau/ciment constant. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques des spécimens de béton produits à partir des déchets de marbre se sont avérées respecter les normes de fabrication du béton et la substitution des granulats naturels par les déchets les agrégats de marbre jusqu'à 75% de toute formulation sont bénéfiques pour la résistance du béton. [3]

En 2012, Nadjoua BOURMATTE. Hacène HOUARI Dans cette étude, on a constaté le comportement à l'état frais et durci des différents matériaux élaborés à base des granulats recyclés de substitution, en confrontant les résultats avec d'autres travaux antérieurs. Les granulats de béton recyclés sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des granulats est semblable à celle de la pierre concassée. Les bétons fabriqués avec des granulats provenant du recyclage présentent de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance à la compression varie selon la résistance initiale et le rapport eau/liants du nouveau béton. Comme pour toute

nouvelle source de granulats, il faut contrôler la durabilité, la granulométrie et les propriétés des granulats. Plus le taux de substitution en granulats recyclés augmente plus la résistance en compression diminue, alors on peut utiliser ces granulats avec des taux limités dans le béton et mortier. [4]

En 2013, une étude faite par : AYAD MOHAMED et BARKA YASSINE Les modèles développés peuvent être employés pour sélectionner les mélanges les plus économiques, tout en évitant de réaliser un grand nombre d'essais pour un mélange optimal et qui répond aux cahiers de charges. Ces modèles peuvent être développés et améliorés en prenant en considération d'autres paramètres intrinsèques importants comme la granulométrie ou la forme des granulats. D'autres paramètres extrinsèques au béton peuvent aussi être étudiés comme l'influence de la température. La généralisation de ces modèles prédictifs demande une extension dans le domaine

de la recherche et ouvre de nouvelles perspectives :

- Exploitation des résultats pour faciliter la formulation des BO.
- Substitution d'une partie du ciment par des additions minérales comme les fillers claires, les pouzzolanes, le laitier des hauts Fournaux, les fumées de silice etc....

Prendre en considération d'autres paramètres comme, la granulométrie, la forme des granulats, l'effet de la température etc....[5]

En 2014, SERIFOU MAMERY La première étude porte sur un béton confectionné avec trois types de déchets : du verre concassé, du ciment durci concassé et des pneus découpés, Les granulats issus du concassage des bétons frais (retour de toupie) utilisés comme substituant des granulats naturels a été menée pour évaluer leur potentiel. Un plan d'expériences statistique à deux variables (% de recyclât dans le sable et % de recyclât dans le gravier) a été utilisé pour réduire le nombre de mesures. Les proportions de remplacement utilisées sont : 0%, 50% et 100%. Les propriétés mécaniques ont été déterminées par différentes méthodes destructives (résistance à la compression et à la traction) et non destructives (ondes ultrasonores pour évaluer l'élasticité du matériau). De même, les propriétés physiques telles que la porosité accessible à l'eau, la masse volumique ont été mesurées. Ces résultats montrent une bonne corrélation entre le pourcentage de remplacement et les propriétés physiques et mécaniques de ce béton. [6]

En 2016, LAIFAOUI HadjerL'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution (0, 30, 50, 70, 100%) pour chaque type de granulat recyclé. Les caractéristiques des agrégats recyclés ainsi que celles du béton frais et durci à base de ces matériaux sont analysées et

comparées avec celles d'un béton témoin (100% granulats naturels). Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible de fabriquer un béton à base d'agrégats de brique de démolition avec des propriétés physiques et mécaniques comparables à celles du béton ordinaire avec un taux de remplacement des agrégats naturels par les agrégats recyclés de 30%, et qu'on peut l'améliorer jusqu'à 50% avec l'incorporation des ajouts minéraux (laitier et pouzzolane). Les études des effets de la dégradation en milieux chimiquement agressifs sur les bétons à base de 50% de déchet de brique à moyenne terme montrent qu'on peut utiliser ce béton dans ces milieux. [7]

En 2016, ABIB Saadia et BELGHARBI Amina L'objectif principal fixé dans cette recherche se rapporte à l'élaboration de modèles mathématiques prédictifs de formulation des pâtes de ciment auto-plaçantes (PAP) et à la compréhension des mécanismes qui gouvernent son comportement rhéologique. Ce travail constitue une base pour faciliter l'obtention le béton auto-plaçant (BAP), un tel béton pourrait être confectionné en passant de l'échelle de la pâte à celle du béton en injectant des granulats tout simplement. La formulation des pâtes auto-plaçantes a été effectuée à l'aide des plans d'expériences et du logiciel Mini Tab, ainsi qu'une étude expérimentale des caractéristiques rhéologiques des pâtes auto-plaçantes (à savoir l'étalement au mini-cône et l'écoulement au cône de Marsh) auto-plaçantes à été réalisée. Les essais d'étalement au mini-cône et d'écoulement au cône de Marsh sont utilisés pour évaluer l'aptitude à l'écoulement des pâtes cimentaires. [8]

En 2017, DALI YUCEF SOUHILA leur travail a pour but de déterminer à l'aide de la méthode de Taguchi grâce au logiciel MINITAB l'affaissement peut dépasser 20 cm si le dosage en ciment varie entre 350 et 400 kg/m³ avec un rapport E/C entre 0.55 et 0.625 et un rapport G/S variant entre 1.45 et 1.8. Les résultats ont aussi montré que l'ouvrabilité ne peut être amélioré qu'en augmentant le dosage en liant ou le rapport E/C et en considérant un rapport G/S entre 1.45 et 1.8. Cependant, il est nécessaire de faire attention aux résistances mécaniques si nous choisissons d'augmenter le rapport E/C. Les résultats trouvés ont clairement fait sortir que la résistance mécanique augmente avec le dosage en ciment. Par ailleurs, le dosage en eau ne doit pas dépasser 0.56 et le rapport G/S doit être compris entre 1,45 et 1,6. Les mesures obtenues lors des essais réalisés nous ont permis la détermination des modèles, pour la partie qualité on a construit les processus qualité pour la réalisation du béton, et on a choisi l'approche processus car elle constitue un principe fondamental de la démarche qualité. [9]

En 2017 Yasmine Binta Traore, AdamahMessan, KindaHannawi, Jean Gerard, William Prince et FrancoisTsobnang sur utilisation des granulats naturels pour la construction cause de nombreux problèmes environnementaux. A la lumière de leur l'impact environnemental, la discussion s'est de plus en plus portée sur l'utilisation de matériaux alternatifs d'origine végétale et des processus tels que les coques de palmier à huile (OPS). Cependant, des études antérieures montrent que les OPS ont une faible adhérence avec de la pâte de ciment, ce qui entraîne une diminution des propriétés physiques et mécaniques des bétons OPS. Une des solutions à ce problème est de réaliser un traitement de surface sur les OPS avant de les utiliser Concrètement. Cette étude a examiné l'influence de cinq traitements sur les propriétés physiques et mécaniques propriétés du béton : traitement à la chaux (CH), au silicate de sodium (SS), à l'alcool polyvinylique (PVA), traitement thermique (TH) et saturation OPS (SAT). Le traitement à la chaux (CH) sur OPS a montré une bonne amélioration de la propriété mécanique du béton, par rapport à l'OPS non traité. [10]

En 2018, BEKKARI Houda et KAFI Meriem Cette étude a mis en évidence le rôle et l'influence de certains paramètres à savoir: la nature et la granulométrie des sables et l'ajout de fibre sur les caractéristiques des bétons de sable.

Par l'analyse des résultats obtenus nous pouvons énoncer ce qui suit :

- L'ajout des fibres dans le béton influe d'une manière négative sur la maniabilité.
- Une meilleure maniabilité du béton est donnée par le mélange composé par les deux types de sable (sable de dune et sable alluvionnaire), ce qui influe d'une manière directe sur la compacité du béton, qui est une caractéristique importante pour l'amélioration des propriétés mécaniques de ce dernier.
- Bien que la relation existe entre la résistance mécanique et le rapport E/C soit incontestable, d'autres facteurs peuvent influencer la résistance, à savoir : la granulométrie, la propreté des sables et l'ajout de fibres.
- L'utilisation des fibres plastique dans la composition des bétons améliore d'une manière acceptable sa résistance mécanique.
- Les bétons réalisés avec les fibres de longueur 50 mm donnent les meilleurs résultats de résistance mécanique par rapport à ceux réalisés avec les fibres de longueur 30 mm.
- Les meilleures résistances à la compression et à la flexion sont obtenus par la composition B4 (60% SA + 40% SD).
- La résistance à la compression et à la flexion des bétons renforcés par 1.5% en fibres plastique est supérieure à ceux renforcés par un pourcentage de 1.0%.

- La fibre usée a un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques d'une manière générale, nous remarquons une augmentation dans la résistance à la traction et à la compression, et ceci pour toutes les compositions utilisées.

- L'ajout d'adjuvant plastifiant a permis d'obtenir des résultats élevés en résistance et Ceci est grâce à la diminution du dosage en eau (E/C). [11]

En 2020 AnamariéCotto-Ramosa, Saylisse D'avilab, Wandaliz Torres-Garc'iab, Arsenio C'aceres-Fern'andezaLe plastique recyclé et les matériaux cimentaires complémentaires peuvent être utilisés pour remplacer les granulats naturels et le ciment Portland afin de réduire l'empreinte carbone de l'industrie du béton. Ce travail utilise deux conceptions de mélange pour comprendre l'effet de l'ajout de cendres volantes (FA), de nano-silice (nS) et de plastique recyclé sur le coût et les propriétés mécaniques du béton structurel respectueux de l'environnement. Les résultats suggèrent que 44 % des granulats grossiers peuvent être remplacés par du plastique en ajoutant 2,5 % de nS et 10 % de FA (en poids CM). Les résultats des tests de pénétration des ions ont en outre indiqué que le béton avec du plastique, FA et nS est plus durable que le béton conventionnel.[12]

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

1.1. Introduction

Toutes les études de formulation des bétons sont basées sur la connaissance des différentes caractéristiques de tous les composants du mélange en vue de lui offrir les meilleures performances.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la formulation, la fabrication et la caractérisation mécanique d'un béton à base de déchets.

Le béton est un mélange homogène constitué de plusieurs composants hétérogènes : le ciment, le sable, le gravier, l'eau et dans certains cas l'adjuvant.

Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants.

On présente les matériaux utilisés à savoir la caractérisation de sable, des granulats ordinaires (gravier 8/15 et 15/25), déchets d'aluminium, ciment et eau de gâchage.

Ces bétons sont formulés à l'aide de la méthode de DREUX-GORISSE.

On va présenter dans ce chapitre les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude.

1.2. Caractérisation des matériaux

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont:

1.2.1. Sable

Sable de dune classe 0/5 (Figure 1.1) d'origine de la carrière de Sable El Houche, OUM ALI, TEBESSA



Figure1.1 Echantillon de sable

1.2.2. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. Le ciment CPJ-CEM 1 42.5 (P-L) provenant de la cimenterie de EL MALABIOD TEBESSA (Figure 1.2). Répond à la norme Algérienne NA 442



Figure 1.2 CPJ-CEM 1/A-M(P-L) 42.5R de EL MALABIOD

1.2.3. Gravier

Il existe différentes tailles de gravier pour béton, le choix de la dimension du gravier est important car il conditionne les propriétés à l'état frais et durci du béton.

Nous avons utilisé deux types de gravier (Figure 1.3 et Figure 1.4):

- Un granulats de classe granulaire entre 8 et 15 mm et d'origine de la carrière ELMALABIOD à TEBESSA.
- Un granulats de classe granulaire entre 15 et 25 mm et d'origine de la carrière ELMALABIOD à TEBESSA.



Figure1.3 gravier 8/15 d'origine de la carrière



Figure 1.4 gravier 15/25 d'origine de la carrière

1.2.4. Déchets d'aluminium

Nous collectons les déchets d'aluminium des ateliers de menuiserie aluminium, qui les jettent régulièrement car ils ne les utilisent pas.

Déchet d'aluminium obtenu par concassage des barres et profils d'aluminium et tamisage dans le tamis 8 mm (figure 1.5).



Figure 1.5 Déchet d'aluminium

1.2.5. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est celle provenant du robinet du laboratoire. Il s'agit d'une eau potable. Sa température n'est pas contrôlée lors des

gâchées, C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent.



Figure1.6 bassin d'eau

1.3. Essai sur les matériaux

1.3.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage (norme NF EN 933-1) c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation des grains selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée (figure 1.7) d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. [13]



Figure1.7 Analyse granulométrique

1.3.1.1. But de l'essai:

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant, l'échantillon.

1.3.1.2. Principe de l'essai:

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

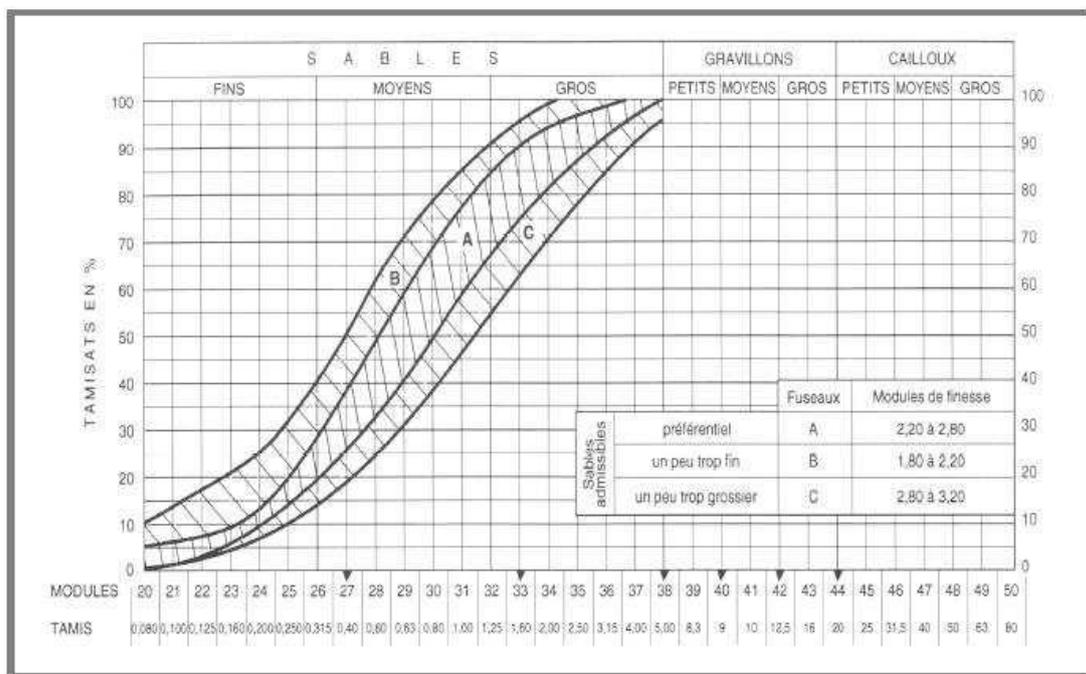


Figure 1.8 Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton. [18]

1.3.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps c'est-à-dire celle du volume constitué par la nature du corps et les vides qu'elle contient. La masse volumique apparente est mesurée par un récipient d'un litre (figure 1.8, figure 1.9, figure 1.10 et figure 1.11). [14]



Figure1.9 Essai de détermination de la masse volumique apparente de sable



Figure1.10 Essai de détermination de la masse volumique apparente de gravier 15/25



Figure1.11 Essai de détermination de la masse volumique apparente de gravier 8/15



Figure 1.12 Essai de détermination de la masse volumique apparente de déchets d'aluminium
C'est le rapport entre la masse et le volume apparent d'un matériau (y compris les Vides). Elle est exprimée en (g/cm³; Kg/m³; t/m³).

1.3.2.1. Principe :

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure, a une influence très importante sur les résultats,

Il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

1.3.2.2. Mode opératoire:

- Peser le récipient à vide et noter M1.
- Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir.
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement. Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
- La règle à raser.
- Peser le contenu et noter M2.

$$\text{Il résulte que: } \rho_s = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(1)$$

ρ_s : Masse volumique apparente.

M : la masse l'échantillon.

V : volume de l'échantillon

1.3.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]

La masse volumique absolue (NF EN 1097-6), c'est la masse de l'unité de volume absolue du corps sans tenir an compte du volume des vides. [15]



Figure1.13 Essai de la masse volumique absolue de sable



Figure1.14 Essai de la masse volumique absolue de gravier

1.3.3.1. Principe:

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

1.3.3.2. Mode opératoire:

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V1 (200ml).
- Peser une masse M du corps (200 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air
- Lire le nouveau volume V2.

Le volume absolu ou réel est : $V_a = V_2 - V_1$ (2)

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Calculer la masse volumique absolue par la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots (3)$$

Où ρ_s : Masse volumique absolue ;

MS: Masse des grains solides ;

V1 : Volume de l'eau

V2: Volume total (grains solide + eau).

1.3.4. Coefficient granulaire

Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax. Ce coefficient est déterminé la qualité des granulats.

Qualité des granulats	Dimension Dmax des granulats		
	Fins Dmax < 12,5 mm	Moyens 20 < Dmax < 31,5	Gros Dmax > 50 mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau 1.1 Coefficient granulaire G [19]

1.3.5. Equivalent de sable [NF EN 933-8]

Le but de cet essai (figure 1.14) est évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. L'essai est réalisé conformément à la prescription de la norme NF EN 933-8. [16]



Figure1.15 Essai d'équivalent de sable

1.3.5.1.Mode opératoire

L’essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier.

On lave l’échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout.

Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

On en déduit l’équivalent de sable qui, par convention

$$ES = \frac{h_1}{h_2} * 100 \dots\dots\dots (4)$$

h1: hauteur du sable propre et élément fins;

h2 : hauteur du sable propre seulement.

Equivalence de sable Par piston et visuel	Nature et qualité du sable
SE < 60	Sable argileux- Risque de retrait ou de gonflement. à rejeter pour des bétons de qualité.
60 ≤ SE < 70	Sable légèrement argileux- de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
70 ≤ SE < 80	Sable propre- à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
SE > 80	Sable très propre -l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 1.2Nature et qualité du sable selon les valeurs d’équivalent de sable [19]

1.3.6. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CPJ-CEM 1(P-L) de classe 42,5 (Figure 1.15) provenant de la cimenterie de EL MALABIOD TEBESSA.



Figure1.16 CPJ-CEM 1/A-M(P-L) 42.5N de EL MALABIOD

Les propriétés physico-chimiques ont été étudiées conformément la norme algérienne (NA 443) et européenne (NE CE 197-1). Les essais effectués sur les constituants sont:

1.3.6.1.L'analyse chimique

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 1.1 (donner par le laboratoire de GICA) [17]

Caractéristique chimique de ciment		
Eléments	Garanties NA442	Teneur %
SiO ₂	/	18.73
Al ₂ O ₃	/	4.38
Fe ₂ O ₃	/	3.31
CaO	/	59.93
MgO	/	1.62
K ₂ O	/	0.67
Na ₂ O	/	0.23
SO ₃	≤3.5%	2.36
CT	≤0.1%	0.0173
P.A.F (NA235/2005)	/	5.37
CaO Libre	/	0.91
Résidus insolubles (NA236/2005)	/	1.69

Tableau 1.3 Les propriétés chimiques de ciment [17]

1.3.6.2.L'analyse physique et mécanique

Les propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau 1.2 (donner par le laboratoire de GICA). [17]

Caractéristique psycho – mécanique			
Désignations	Unités	Garantie NA442	Mesures
Poids spécifique (NA2595/2006)	g/cm ³	/	3.08

Surface spécifique Blaine (NA231/2006)		cm ² /g	/	4298
Consistance normale (NA230/2010)		%H ₂ O	/	26.78
Temps de prise (NA230/2010)	début	min	≥60 min	115
	Fin	min	/	176
Expansion à chaud (NA232/2002)		mm	≤10	0.64
Refus sur tamis 45μm (NA231/2006)		%		9.66
Chaleur d'hydratation (NA5061/2006)	120 heures	j/g	≤270 j/g	LH
Résistance la traction (NA234/2007)	02 jours	MPa	/	5.26
	07 jours	MPa	/	6.56
	28 jours	MPa	/	7.55
Résistance à la compression (NA234/2007)	02 jours	MPa	≥10	24.26
	07 jours	MPa	/	37.16
	28 jours	MPa	≥42.5 ≤62.5	46.50

Tableau 1.4 Les propriétés physiques et mécaniques de ciment [17]

1.3.6.3. Classe vrai de ciment

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie $\sigma'c$	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

Tableau 1.5 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments. [20]

1.3.7. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28C°.

1.4. Les méthodes de formulation

Il existe différentes méthodes de formulation de béton, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients en fonction des applications et des matériaux disponibles. Voici les méthodes de formulation les plus courantes :

1.4.1. Méthode de la méthode de dosage par poids fixe

Cette méthode consiste à fixer les proportions de chaque ingrédient en poids par rapport à la quantité de ciment. Elle est souvent utilisée pour la fabrication de béton préfabriqué et pour les projets de grande envergure. Les proportions peuvent être ajustées en fonction des propriétés souhaitées du béton.

1.4.2. Méthode de JOISEL

Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus généralisant. IL considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $m\sqrt{D}$, ou « m » dépend de la compacité avec :

La quelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10. En utilisant graduation des abscisses Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire.

La courbe optimale est encore une droite. Mais les ordonnées sont les pourcentages du volume total du béton de référence, fluide compris (« fluide » = eau + air), et les abscisses, qui comportant 3 segments (OA, AB et BC) dont les longueurs sont données par des abaques (figure1.8), sont graduées proportionnellement à d , m pouvant varier de 0.16 à 0.32 (BOLOMEY :0.5, FAURY : 0.20).

Cette méthode tient compte de la compacité du béton étudié, et de l'effet de paroi. Elle conduite, comme la méthode de VALLETTE, à un faible dosage en ciment : on rectifier là encore en enlevant une quantité de sable en rapport avec le ciment qu'on doit ajouter. [6]

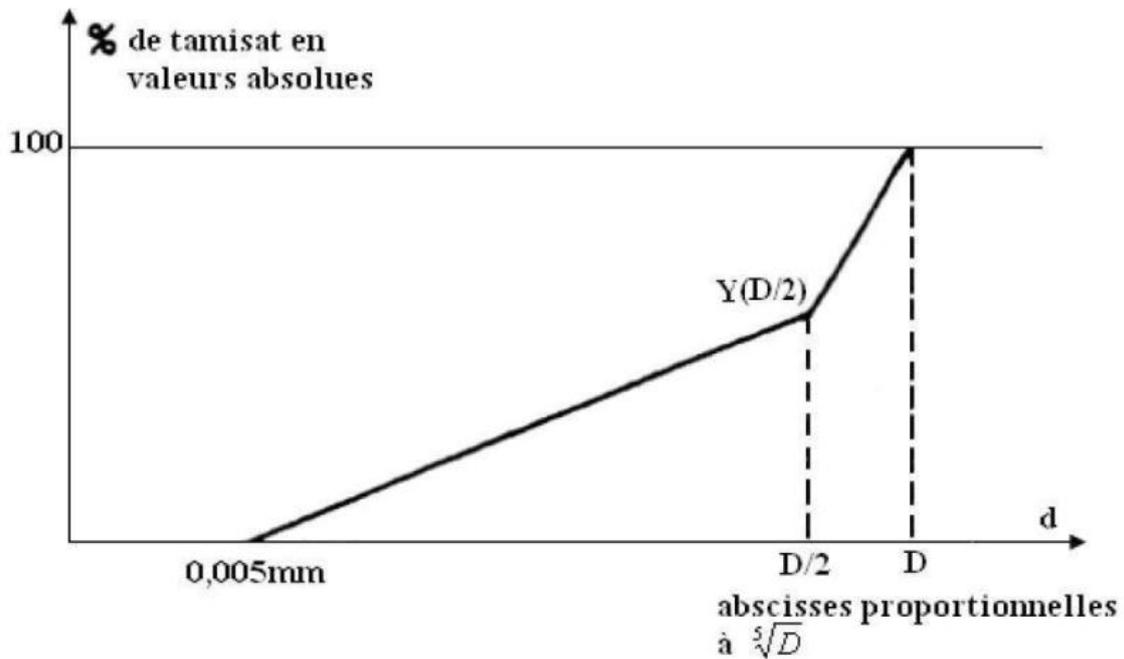


Figure1.17 courbe optimale de JOISEL [6]

1.4.3. Méthode de VALETTE

Méthode essentiellement expérimentale, elle nécessite un nombre de calculs préparatoires. Plus connue sous la désignation de « dosage de béton à compacité maximale », « dosage de béton à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». Son principe est de mesurer le volume de vide d’un sable mouillé, et le comblé par un volume égale de pâte pure de ciment. On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec l’ouvrabilité désirée. [6]

1.4.4. Méthode de la méthode de dosage par volume :

Cette méthode consiste à fixer les proportions de chaque ingrédient en volume plutôt qu'en poids. Cette méthode est souvent utilisée pour les petits projets de construction et pour les travaux de réparation, car elle est plus simple et ne nécessite pas d'équipement de mesure précis. [23]

Cette démarche est aussi la plus adaptée pour un travail de recherche car elle permet de varier Chaque proportion des composants sans pour autant changer le volume total. On a :

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} + V_{\text{vide}} = V_{\text{total}}$$

Si les composants sont exprimés en masse, la relation devient :

$$\frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_E}{\rho_E} + \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M_G}{\rho_G} + VV = V_t \dots\dots\dots (5)$$

$\rho_C, \rho_E, \rho_S, \rho_G$: Masses volumiques absolues.

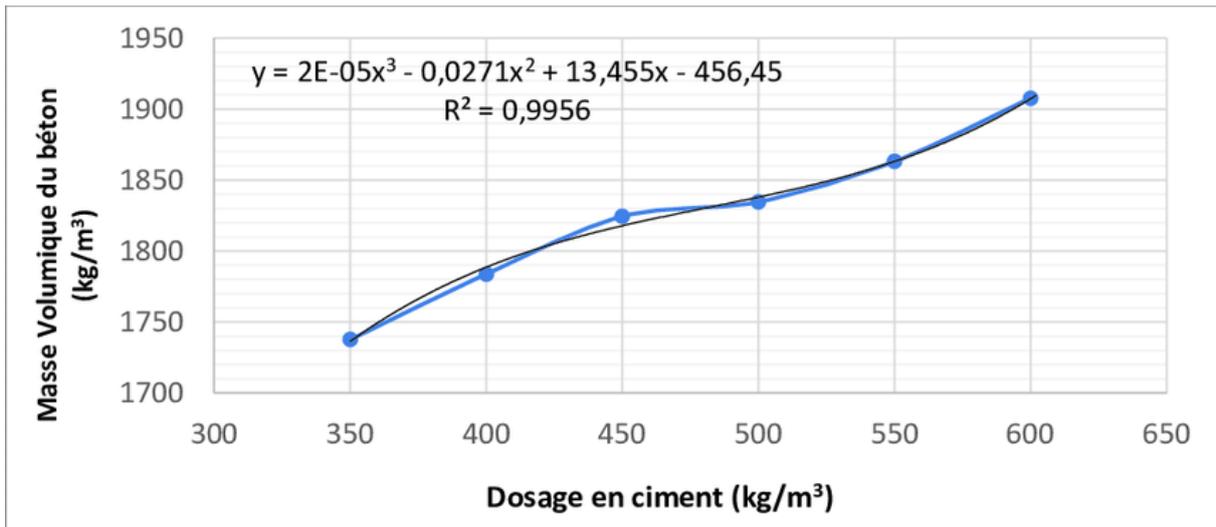


Figure1.18 Courbe de variation de la masse volumique du béton de coques en fonction du dosage en ciment [21]

1.4.5. La méthode de Faury

La méthode est basée sur la notion de granulométrie optimale, qui consiste à déterminer la courbe granulométrique qui donne les meilleures propriétés du béton en termes de résistance et de maniabilité. Pour ce faire, la méthode utilise des courbes expérimentales de granulométrie optimale en fonction de la classe de résistance et de la taille maximale des granulats. [24]

L'ordonner Y est donné par la formule expérimentale:

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R^{-0.75}} \dots\dots\dots(6)$$

Où

D : grosseur maximum de l'agrégat en mm

R : rayon moyen du coffrage en mm

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton.

B : dépend du serrage. Il varie de 1 pour une vibration puissante à 1.5 pour un serrage moyen.

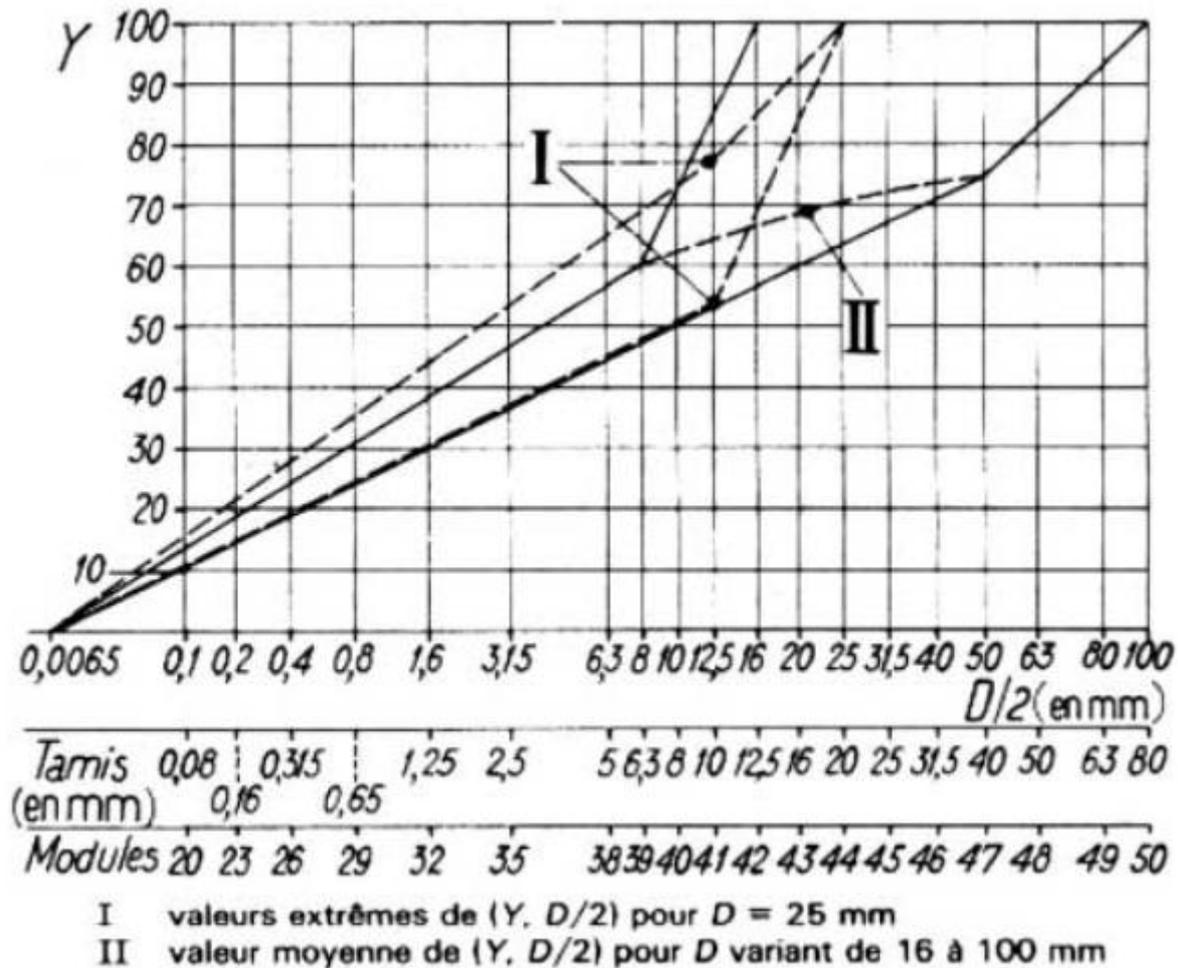


Figure 1.19 Courbes de référence Faury [24]

1.4.6. Méthode de la méthode de dosage optimal

Cette méthode utilise une analyse statistique pour déterminer les proportions optimales de chaque ingrédient pour obtenir les propriétés souhaitées du béton. Elle est souvent utilisée pour les projets de haute performance nécessitant des propriétés spécifiques telles qu'une haute résistance, une haute durabilité, une haute résistance aux intempéries ou une faible perméabilité.

1.4.7. La méthode de dosage empirique

Cette méthode est basée sur l'expérience et le jugement de l'ingénieur ou du technicien en béton. Les proportions de chaque ingrédient sont fixées en fonction de l'expérience et des propriétés souhaitées du béton. Cette méthode est souvent utilisée pour les petits projets ou lorsque les matériaux sont limités.

1.4.8. Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'ont efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique. [25]

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \dots \dots \dots (7)$$

D'où :

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : est le diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

1.4.9. La méthode basée sur un plan d'expérience

Est une approche systématique pour concevoir, exécuter et analyser des expériences scientifiques. Elle est utilisée pour étudier l'effet de plusieurs variables indépendantes sur une variable dépendante.

Le plan d'expérience consiste à définir les variables à étudier, les niveaux de ces variables et les répétitions nécessaires pour obtenir des résultats significatifs. Les données collectées sont ensuite analysées à l'aide de méthodes statistiques pour déterminer les effets significatifs des variables indépendantes sur la variable dépendante.

Il est important de noter que quelle que soit la méthode de formulation utilisée, il est essentiel de respecter les normes et les réglementations en matière de béton et d'utiliser des matériaux de haute qualité pour assurer la durabilité et la sécurité des structures en béton. [26]

1.4.10. Méthode D'ABRAMS :

Une méthode de la représentation globale de la granulométrie des agrégats à l'aide d'un indice numérique appelé « module de finesse » a été donnée en 1918 par ABRAMS.

Dans cette méthode Mr ABRAMS basée sur l'obtention d'un module de finesse globale, à partir des différents modules de finesse des classes de granulats disponibles.

Le principe de cette méthode est de construire une composition granulaire, ciment compris.

ABRAMS propose des valeurs optimales de la finesse de globale en fonction du dosage en ciment et qui sont supposées réduire au minimum les vides dans le mélange.[27]

Équations empiriques couramment utilisées dans la méthode d'Abrams :

Équation pour le rapport gravier/ciment (g/c) :

$$G/C = k_1 \times (R)^{1/4} \dots \dots \dots (8)$$

Où

G/C est le rapport gravier/ciment,

R est la résistance cible,

Et k_1 est un coefficient empirique.

Équation pour le volume d'eau :

Volume d'eau = Poids de ciment / (e/c)

Où e/c est le rapport eau/ciment.

1.4.11. La méthode de Dreux-Gorisse

La méthode est basée sur la notion de granulométrie optimale, qui consiste à déterminer la courbe granulométrique qui donne les meilleures propriétés du béton en termes de résistance et de maniabilité. Pour ce faire, la méthode utilise des courbes expérimentales de granulométrie optimale en fonction de la classe de résistance et de la taille maximale des granulats. [28]

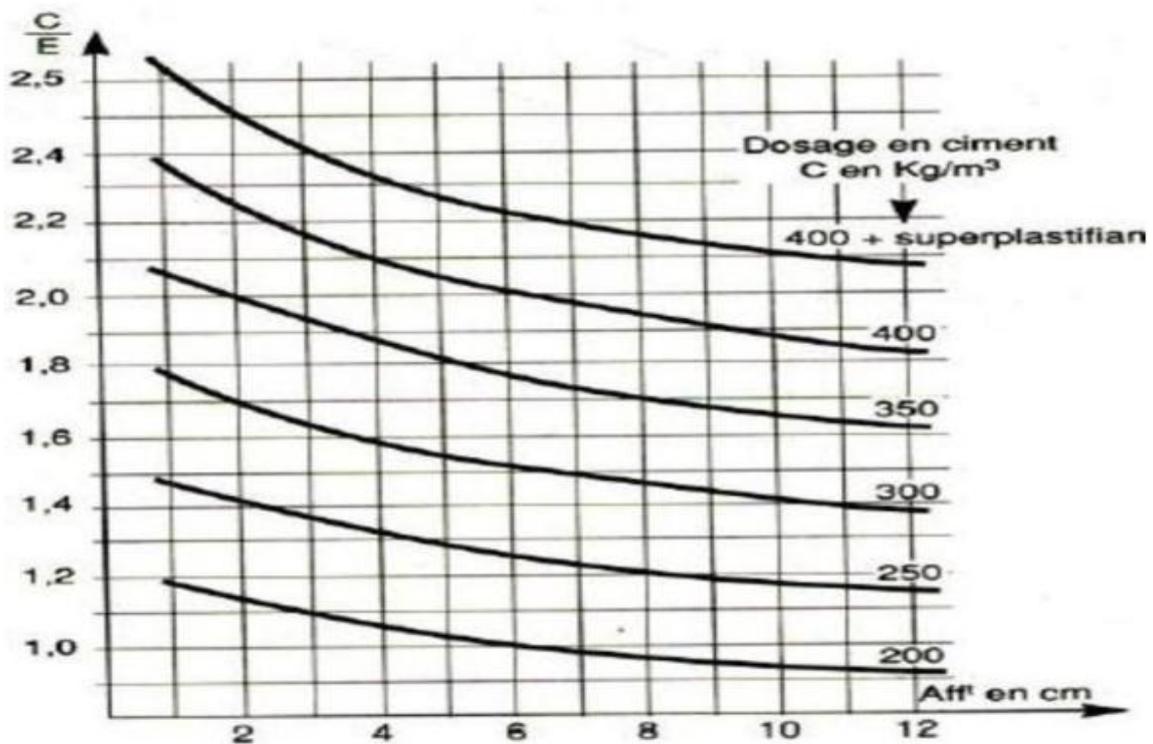


Figure 1.20 baque permettant la détermination de C. [28]

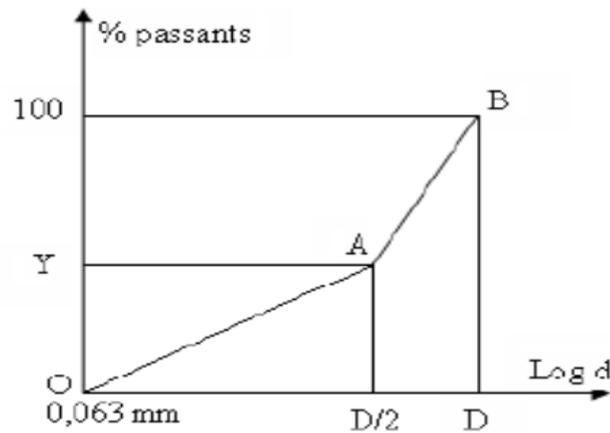


Figure 1.21 courbe OAB. [28]

On trace une composition granulatoire de référence OAB. Le point B correspond à la dimension D des plus gros granulats, c'est-à-dire :

Point B ($X = D_{\max}$ et $Y = 100\%$)

Point O ($X = 0,063$ et $Y = 0$)

La méthode de Dreux-Gorisse comprend les étapes suivantes :

1. Détermination de la classe de résistance du béton en fonction de l'application et de l'environnement.
2. Détermination de la taille maximale des granulats en fonction de la classe de résistance et de la taille des éléments de la structure.
3. Détermination de la granulométrie optimale en fonction de la classe de résistance et de la taille maximale des granulats.
4. Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance optimale du béton en utilisant la courbe d'abattement.
5. Calcul des quantités de ciment, granulats et adjuvants nécessaires pour obtenir la proportion optimale en fonction de la granulométrie optimale et de la quantité d'eau.
6. Vérification des proportions du béton en effectuant des essais sur des échantillons.

La méthode de Dreux-Gorisse permet d'obtenir des bétons de qualité en utilisant des proportions optimales des différents composants

1.5. Principe de la formulation de béton (DREUX-GORISSE)

La méthode de formulation de béton DREUX-GORISSE

Est largement utilisée dans l'industrie de la construction pour produire des bétons de haute qualité et répondre aux exigences spécifiques des projets de construction.

1. Les granulats doivent être choisis en fonction de leur taille, leur forme et leur texture pour obtenir le béton souhaité.

2. Détermination du dosage de ciment : Le dosage de ciment dépend de la résistance à la compression requise et des caractéristiques des granulats.
3. Détermination du rapport eau/ciment : Le rapport eau/ciment est déterminé en fonction de la résistance à la compression requise et des caractéristiques des granulats.
4. Vérification de la consistance du béton : La consistance du béton doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle est conforme aux spécifications.
5. Vérification de la résistance à la compression : La résistance à la compression du béton doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle est conforme aux spécifications.

CHAPITRE II : LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX

2.1. Introduction

La formulation du béton est une étape cruciale dans la construction de structures durables et résistantes. Elle consiste à déterminer la composition précise du mélange de béton y compris les proportions des matériaux constitutifs tels que le ciment les agrégats l'eau et les adjuvants. Une formulation bien conçue permet d'obtenir les propriétés souhaitées du béton. Notamment sa résistance. Sa durabilité et sa maniabilité.

La formulation du béton est essentielle pour obtenir les propriétés désirées, tandis que les essais d'indentification des marteaux de béton permettent d'évaluer rapidement la résistance du matériau sur le chantier ensemble, ces processus contribuent à la construction de structures solides et durables, en veillant à ce que le béton utilise réponde aux exigences de qualité et de performance.

2.2. Essai sur sable

2.2.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]

Les résultats de cet essai sont donnés par le tableau 2.1.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exploités par la courbe d'analyse granulométrique.

-Les résultats d'analyse granulométriques des granulats ordinaire sont courant.

-La granulométrie de ce sable est continue. Le module de finesse est donné par la formulation suivante : $MF = 1/100 * \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 \text{ et } 0.16\} = 2.01$ indique un sable fin ce qui donne une bonne ouvrabilité

tamis (mm)	refus partiel (g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât (%)
10	0	0	0	100
8	15	15	0,75	99,25
5	20	35	1,75	98,25
4	15	50	2,5	97,5
3,15	10	60	3	97
2,5	23	83	4,15	95,85
1,6	30	113	5,65	94,35
1,25	60	173	8,65	91,35
0,63	205	378	18,9	81,1
0,315	1100	1478	73,9	26,1

0,16	410	1888	94,4	5,6
0,08	110	1998	99,9	0,1
font	2	2000	100	0

Tableau 2.1 Résultats d’analyse granulométrique de sable

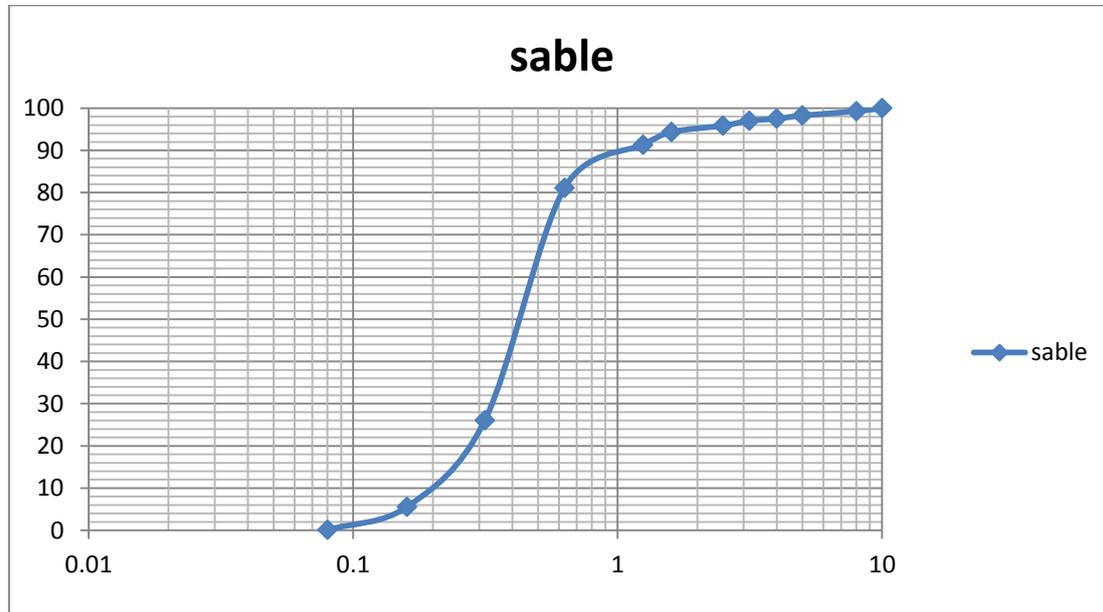


Figure 2.1 Courbe d’analyse granulométrique de sable ordinaire

2.2.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]

Les résultats de cet essai (norme NF P18-555) sont donnés par le tableau 2.2

Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sable ordinaire	1.581

Tableau 2.2 Masse volumique apparente de sable ordinaire

2.2.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]

Les résultats de cet essai sont notés dans le tableau 2.3.

Les résultats obtenus indiquent que les granulats ordinaires présentent des densités apparentes et absolue courantes et peuvent être utilisé comme des constituants dans la formulation de ce mortier.

Désignations	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable ordinaire	2.560

Tableau 2.3 Masse volumique absolue du sable ordinaire

2.2.4. Equivalent de sable [NF EN 933-8]

Les résultats obtenus sont notés au tableau 2.4.

La propreté marquée par l'essai de l'équivalent de sable sur le sable ordinaire indique un propre à faible pourcentage de fines argileux ($75 \leq \text{ESV} < 85$) convenant parfaitement pour les mortiers de haut qualité.

Désignations	ES (%)
Sable ordinaire	84

Tableau 2.4 Equivalent de sable ordinaire

2.3. Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CPJ-CEM II(P-L) de classe 42,5 provenant de la cimenterie de EL MALABIOD TEBESSA.

2.3.1. Classe vrai de ciment

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie $\sigma'c$	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

Tableau 2.5 Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Classe vrai de ciment : $\sigma'c=55$ MPa

2.4. Déchets d'aluminium

2.4.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés par le Tableau 2.6

tamis (mm)	refus partiel (g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât (%)
4	0,48	0,48	0,048	99,952
3,15	3,2	3,68	0,368	99,632
2,5	5,98	9,66	0,966	99,034
1,6	164	173,66	17,366	82,634
1,25	90	263,66	26,366	73,634
0,63	667	930,66	93,066	6,934
0,08	64	994,66	99,466	0,534
font	5,34	1000	100	0

Tableau 2.6 Résultats d'analyse granulométrique déchets d'aluminium

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exploités par la courbe d'analyse granulométrique

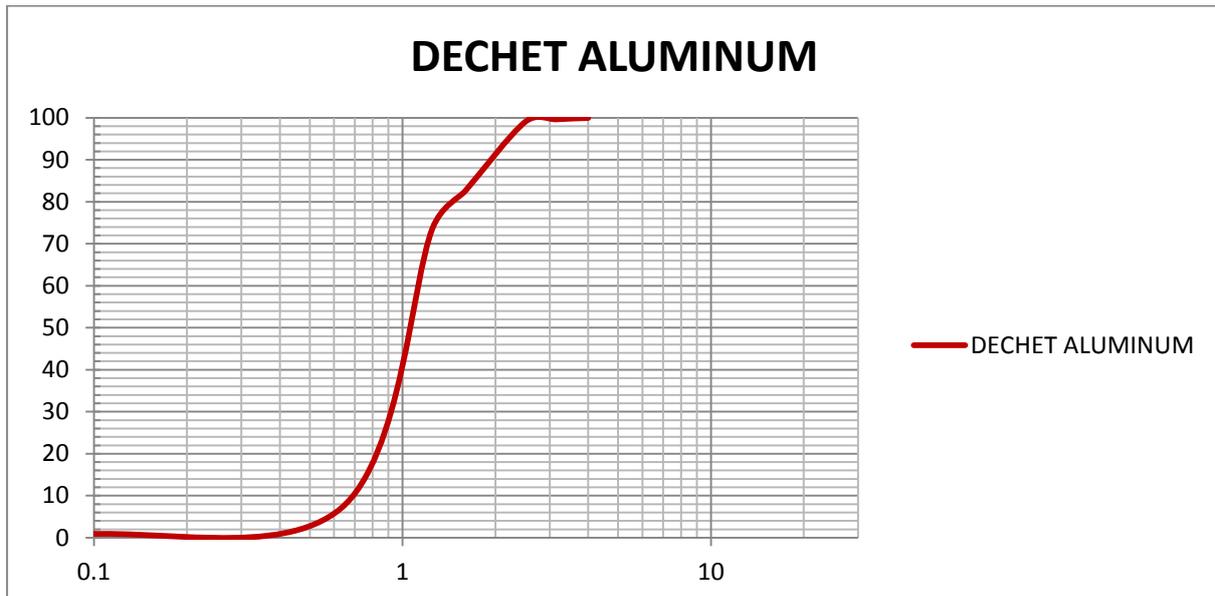


Figure 2.2 Courbe d'analyse granulométrique des déchets d'aluminium

- Les résultats d'analyse granulométriques des déchets sont courant.
- La granulométrie de ces déchets est continue.
- Le module de finesse du déchets d'aluminium est de 1.20

2.4.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]

Les résultats de cet essai sont donnés par le Tableau 2.7

Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)
déchets d'aluminium	0.561

Tableau 2.7 Masse volumique apparente des déchets d'aluminium

2.4.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]

Les résultats de cet essai sont notés dans le tableau 2.8

Désignations	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable de déchets d'aluminium	2,70

Tableau 2.8 Masse volumique absolue des sables recyclés

Les résultats obtenus indiquent que les granulats ordinaires présentent des densités apparentes et absolue courantes

2.5. Gravier

2.5.1. Analyse granulométrique [NF EN 933-1]

tamis (mm)	module de tamis	refus partiel (g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât (%)
20	44	0	0	0	100
16	43	555	555	27,75	72,25
14	42,5	515	1070	53,5	46,5
12,5	42	455	1525	76,25	23,75
10	41	405	1930	96,5	3,5
8	40	35	1965	98,25	1,75
6,3	39	25	1990	99,5	0,5
5	38	7	1997	99,85	0,15
font		3	2000	100	0

Tableau 2.9 L'analyse granulométrique de gravier 8/15

tamis (mm)	module de tamis	refus partiel (g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisât (%)
25	45	35	35	1,75	98,25
20	44	730	765	38,25	61,75
16	43	1130	1895	94,75	5,25
14	42,5	90	1985	99,25	0,75
12,5	42	10	1995	99,75	0,25
10	41	5	2000	100	0
FONT		0	2000	100	0

Tableau 2.10 L'analyse granulométrique de gravier 15/25

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés par le tableau 2.9 et tableau 2.10

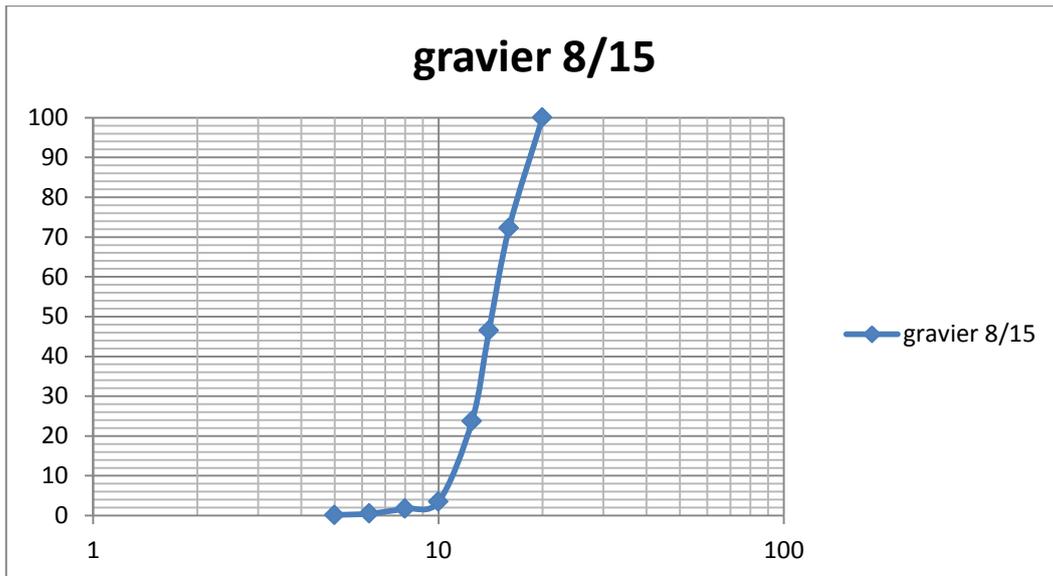


Figure 2.3 Courbe d’analyse granulométrique de gravier 8/15

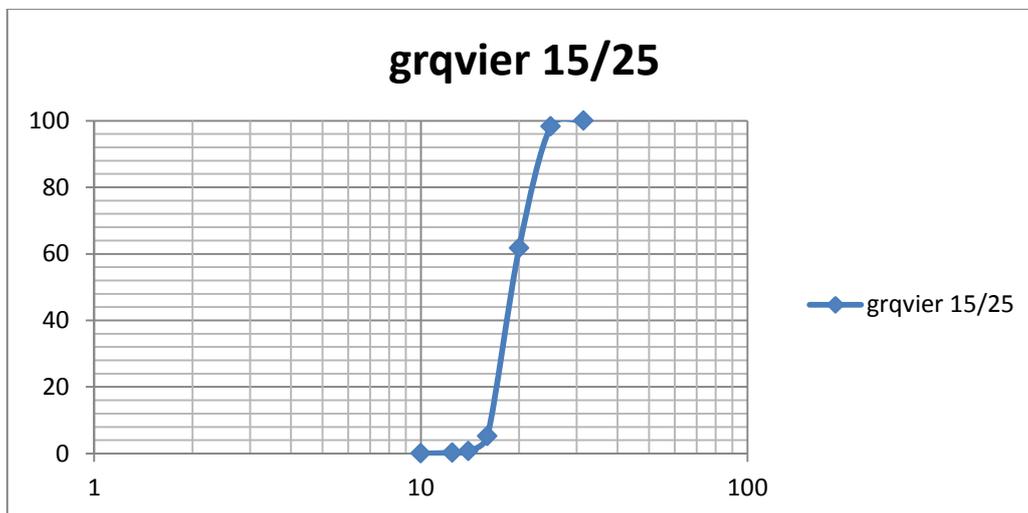


Figure 2.4 Courbe d’analyse granulométrique de gravier 15/25

Dmax= 25 mm

Granulats courants

2.5.2. Masse volumique apparente [NF P18-555]

Les résultats de cet essai sont donnés par le Tableau 2.11.

Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Gravier 8/15	1.56
Gravier 15/25	1.62

Tableau 2.11 Masse volumique apparente de gravier

2.5.3. Masse volumique absolue [NF EN 1097-6]

Les résultats de cet essai sont notés dans le tableau 2.12.

Désignations	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Gravier 8/15	2,56
Gravier 15/25	2.58

Tableau 2.12 Masse volumique absolue de gravier

2.5.4. Coefficient granulaire

Coefficient granulaire G' dans ce cas par rapport $D_{max} = 25$ mm est $G' = 0.50$

Qualité des granulats	Dimension D_{max} des granulats		
	Fins $D_{max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau 2.13 Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max} .

2.6. Tracé la courbe granulaire de référence

La courbe OAB est une courbe de référence qui permet de comparer la distribution granulaire d'un sol avec une distribution granulaire typique. En fonction de la position de la courbe par rapport à la courbe de référence, on peut déterminer si le sol est plus grossier ou plus fin que la courbe de référence, ce qui peut avoir des implications pour la perméabilité et d'autres propriétés du sol

Détermination des coordonnées des points : O, A et B :

Les coordonnées de O, A et B sont :

O (0,0) B (D_{max} , 100%)

A (x, y).

Point O :

-Abscisse 0.08 mm tamis 20

-ordonnée passant 0%

-O (0.08 mm, 0%)

Point B :

A l'ordonnée 100% correspond la dimension D du plus gros granulat.

-Abscisse 25 mm (Dmax)

-ordonnée passant 100%

-B (25 mm, 100%).

Point A :

Représente le point de brisure et à des coordonnées bien définies :

En abscisse :

Si $D \leq 20\text{mm}$ alors : $X=D/2$

Et si $D > 20\text{mm}$ alors : la coordonnée X est située au milieu de segment délimité par le module du tamis 5mm et le module de D.

-Abscisse $25/2 = 12.5$ mm

Pour l'ordonnée : Y

Il est donné par la formule suivante : $y = 50 - D + K + Ks + Kp$

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la forme des granulats (roulée ou concassés), et de l'efficacité de serrage.

Les valeurs du coefficient (K) sont données par le tableau 2.14

Vibration	Faible		normale		Puissante	
	Roule	Concasse	Roule	Concasse	Roule	Concasse
400+adj	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	-2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Tableau 2.14 valeurs de coefficient (K).

Remarque :

Si le module de finesse est fort [sable grossier], une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa.

La valeur Ks tel que :

$$Ks = 6Mf - 15$$

Relation dans laquelle M_f représente le module de finesse, module qui varie entre 2 et 3 généralement.

Le coefficient K_p n'est appliqué que lorsque le béton doit présenter un maximum de plasticité

On adoptera une valeur de ce coefficient entre 5 et 10 selon la plasticité désirée

$K = 0$ pour $C = 350 \text{ kg/m}^3$

$K = -2$ pour $C = 400 \text{ kg/m}^3$

$K_p = 0$ béton non pompée

$K_s = 0$ (si le module de finesse du sable est fort une correction sera apportée pour à relever le point A, M_f peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5)

$$y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

$$Y = 50 - \sqrt{25} + 0 + 0$$

$Y = 45 \%$ pour $C = 350 \text{ kg/m}^3$

A (12.5 mm, 45%)

$Y = 43 \%$ pour $C = 400 \text{ kg/m}^3$

A (12.5 mm, 43%)

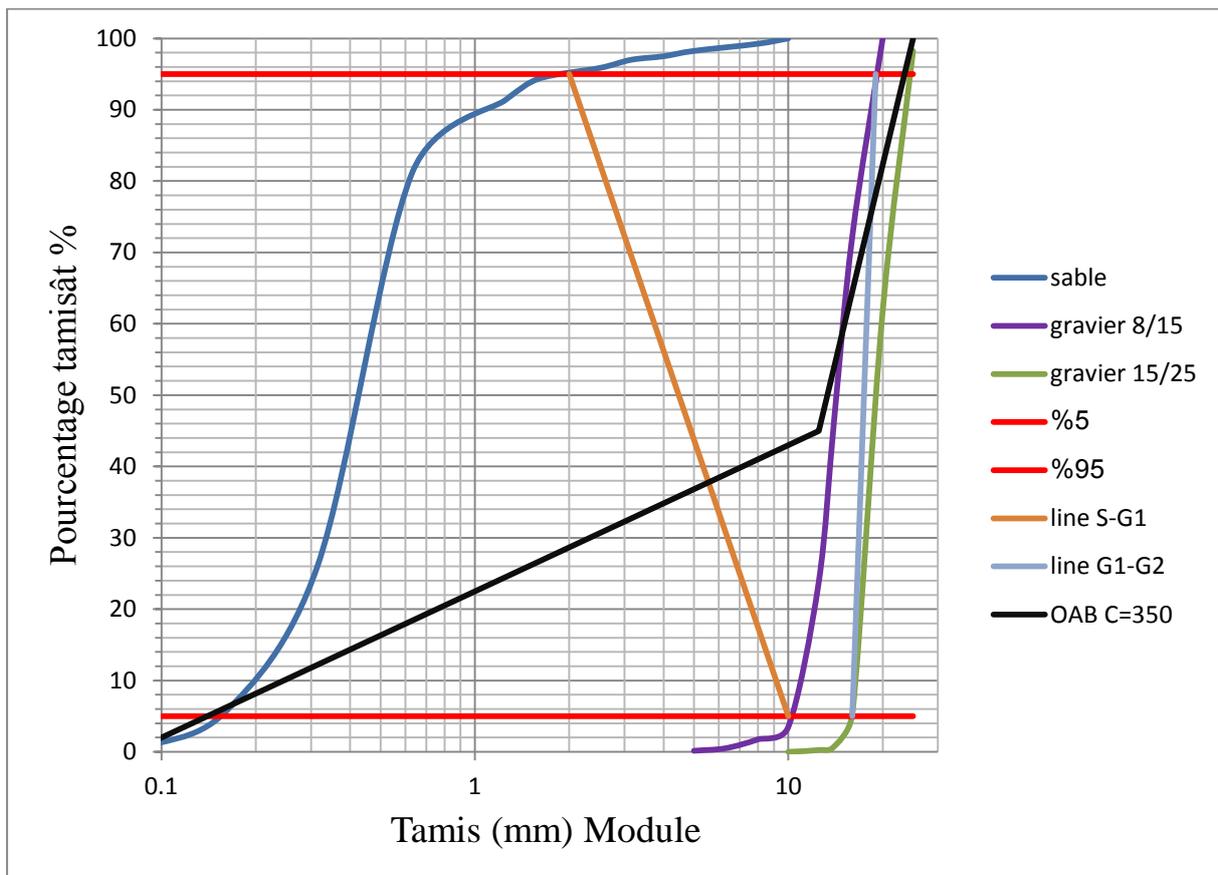


Figure 2.5 courbe granulaire pour dosage de ciment de 350 kg/m³

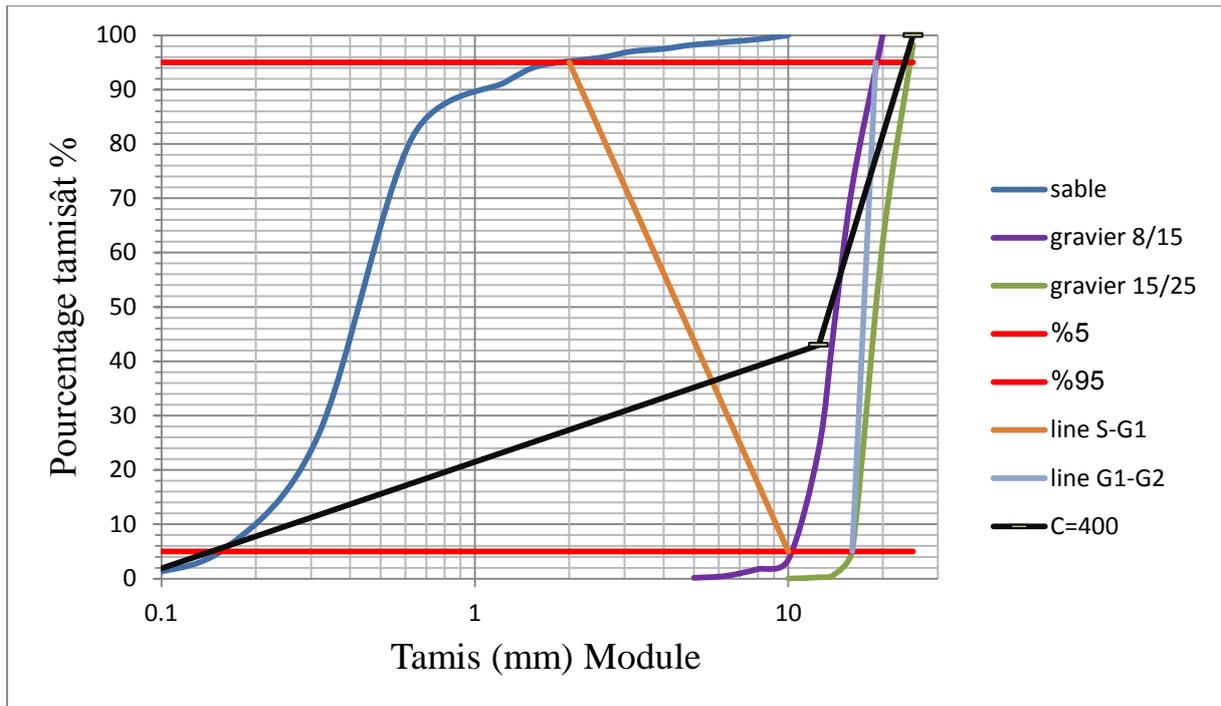


Figure 2.6 courbe granulaire pour dosage de ciment de 400 kg/m³

CIMENT	C=350	C=400
SABLE	37,80%	36%
GRAVIER 8/15	37,20%	36,50%
GRAVIER 15/25	25%	27,50%

Tableau 2.15 pourcentage de composition de béton ordinaire

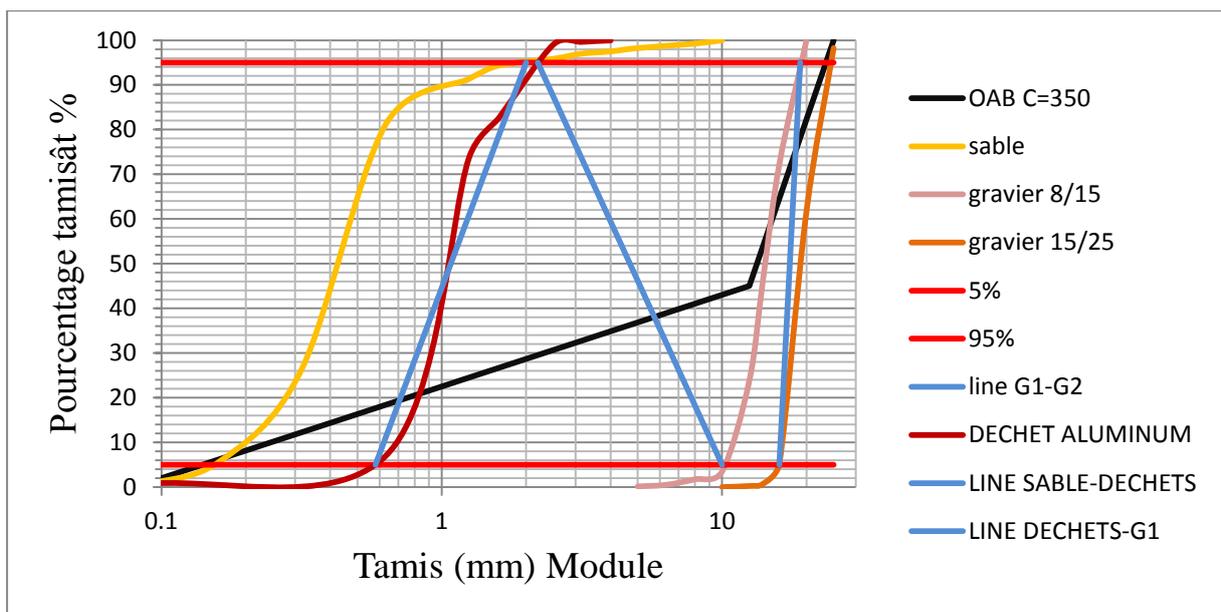


Figure 2.7 courbe granulaire pour dosage de ciment de 350 kg/m³ avec déchets d'aluminium

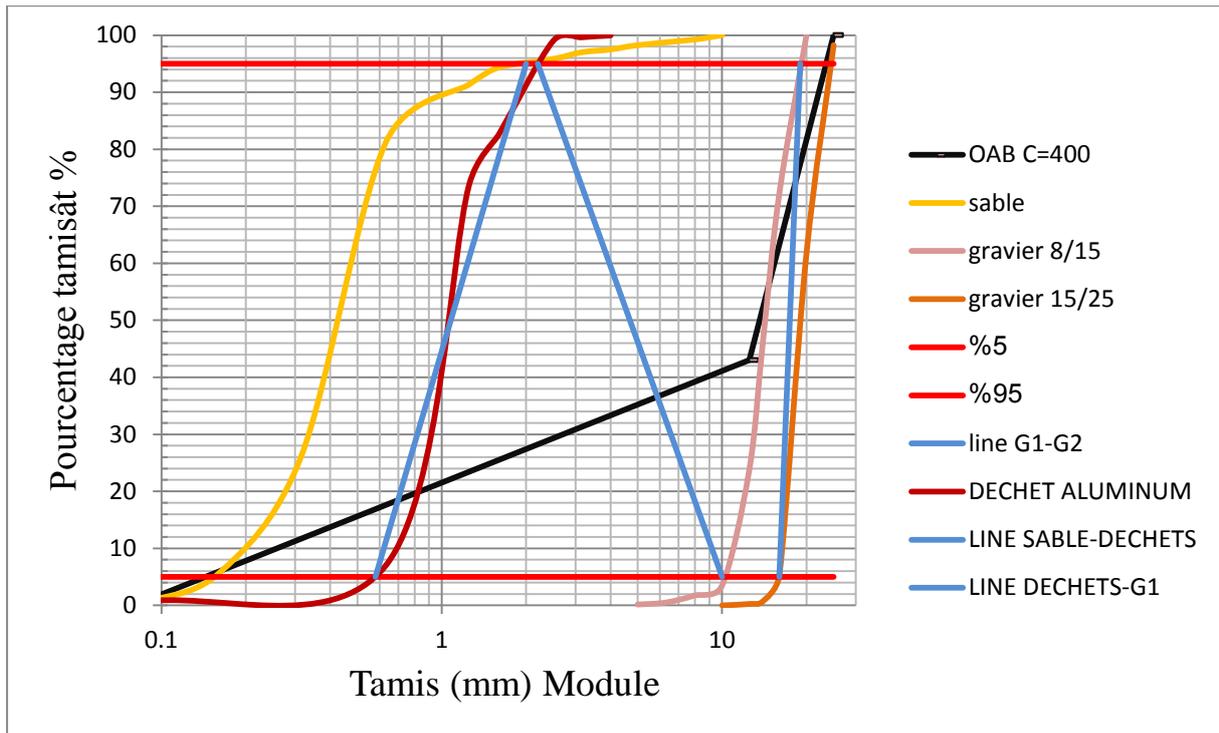


Figure 2.8 courbe granulair pour dosage de ciment de 400 kg/m³ avec déchets d'aluminium

CIMENT	C=350	C=400
SABLE	18,80%	18%
Déchets aluminium	19,20%	18,20%
GRAVIER 8/15	37%	37,80%
GRAVIER 15/25	25%	26%

Tableau 2.16 pourcentage de composition de béton à base de déchets

2.7. Dosage des granulats

Calcule du coefficient de capacité « γ ».

Le coefficient de compacité « γ » est le rapport des volumes des matières solides (ciment et granulats) au volume total, soit 1 m³ de béton frais :

$$\gamma = V_m / 1000$$

$V_m = V_g + V_s + V_c$ exprimée en litres.

V_m = Volume absolu des matières solide.

V_g = volume des graviers.

V_s = Volume du sable.

V_c = Volume du ciment.

Le volume absolu de l'ensemble ciment et granulats étant donné par l'intermédiaire du coefficient de compacité.

Fonction du diamètre maximal des granulats et de plasticité désirée. Le tableau 3-7 donne la valeur du coefficient de compacité :

Consistance	serrage	Coefficient de compacité						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=8$	$D_{max}=12.5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=30$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
molle	piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
plastique	piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.834	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845

Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855
<p>Note : ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter des corrections suivant :</p> <p>Sable roulé et gravier concassé (-0.01)</p> <p>Sable et gravier concassés (-0.03)</p>							

Tableau 2.17 valeurs compacité du béton en fonction de Dmax de la consistance et du serrage. [19]

2.7.1. SANS DECHETS

La valeur de γ est calculée par interpolation :

$$D = 20 \text{ mm } \gamma = 0,825$$

$$D = 25 \text{ mm } \gamma = x$$

$$D = 31,5 \text{ mm } \gamma = 0,83$$

$$\text{Donc on aura : } \gamma = 0,827$$

Une correction supplémentaire est Apportée à γ , du fait que les granulats sont concassés :

$$\gamma_{\text{cos}} = \gamma - 0,03$$

$$\gamma_{\text{cos}} = 0,797$$

Volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - C$$

Volume absolu du ciment est :

$$c = C/3.1$$

C = dosage en ciment.

3,1 masses spécifiques pour les grains de ciment

$$c = 350/3.1 = 112,90 \text{ L.}$$

$$V = 1000 * 0.797 - 112,90$$

$$V = 684,1 \text{ litres}$$

$$c = 400/3.1 = 129,03 \text{ L.}$$

$$V = 1000 * 0.797 - 129,03$$

$$V = 667,97 \text{ litres}$$

Alors les volumes absolus des constituants sont :

- Volume absolu de ciment 113 litres

- Volume absolu des sables 0/3

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1*(37.8/100) = 258.59 \text{ litres}$$

$$\text{Pour } c=400 \text{ kg/m}^3 \quad 667.97*(36/100) = 240.469 \text{ litres}$$

- Volume absolu des gravillons 8/15

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1. *(37.2/100) = 254.485 \text{ litres}$$

$$\text{Pour } c=400 \text{ kg/m}^3 \quad 667.97*(36.5/100) = 243.810 \text{ litres}$$

- Volume absolu des gravillons 15/25

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1*(25/100) = 171.025 \text{ litres}$$

$$\text{Pour } c=400 \text{ kg/m}^3 \quad 667.97*(27.5/100) = 183.692 \text{ litres}$$

matériaux	masse v réel	Kg/m ³	masse v apparent	L/m ³
SABLE	2,56	408.572	1,58	258.590
CIMENT	3,1	350	3,1	112,9
GRAVIER 8/15	2,56	396.997	1,56	254.485
GRAVIER 15/25	2,56	277.061	1,62	171.025
EAU	1	140	1	140

Tableau 2.18 quantité de composition de béton ordinaire pour $c=350 \text{ kg/m}^3$

matériaux	masse v réel	Kg/m ³	masse v apparent	L/m ³
SABLE	2,56	379.941	1,58	240.469
CIMENT	3,1	400	3,1	129,03
GRAVIER 8/15	2,56	380.344	1,56	243.810
GRAVIER 15/25	2,56	297.581	1,62	183.692

EAU	1	240	1	240
-----	---	-----	---	-----

Tableau 2.19 quantité de composition de béton ordinaire pour $c=400 \text{ kg/m}^3$

2.7.2. AVEC DECHETS

La valeur de γ est calculée par interpolation :

$$D = 20 \text{ mm } \gamma = 0,825$$

$$D = 25 \text{ mm } \gamma = x$$

$$D = 31,5 \text{ mm } \gamma = 0,83$$

$$\text{Donc on aura : } \gamma = 0,827$$

Une correction supplémentaire est Apportée à γ , du fait que les granulats sont concassés :

$$\gamma_{\text{cos}} = \gamma - 0,03$$

$$\gamma_{\text{cos}} = 0,797$$

Volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - C$$

Volume absolu du ciment est :

$$c = C/3.1$$

C = dosage en ciment.

3,1 masses spécifiques pour les grains de ciment

$$C = 350/3.1 = 112,90 \text{ L.}$$

$$V = 1000 * 0.797 - 112,90$$

$$V = 684,1 \text{ litres}$$

$$C = 400/3.1 = 129,03 \text{ L.}$$

$$V = 1000 * 0.797 - 129,03$$

$$V = 667,97 \text{ litres}$$

Alors les volumes absolus des constituants sont :

- Volume absolu de ciment 113 litres

- Volume absolu des sables 0/3

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1 * (18.8/100) = 128.611 \text{ litres}$$

$$\text{Pour } c=400 \text{ kg/m}^3 \quad 667.97 * (18/100) = 120.235 \text{ litres}$$

- Volume absolu des gravillons 8/15

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1 * (37/100) = 253.117 \text{ litres}$$

$$\text{Pour } c=400 \text{ kg/m}^3 \quad 667.97 * (37.8/100) = 252.493 \text{ litres}$$

- Volume absolu des gravillons 15/25

$$\text{Pour } c=350 \text{ kg/m}^3 \quad 684.1 * (25/100) = 171.025 \text{ litres}$$

Pour $c=400 \text{ kg/m}^3$ $667.97 \cdot (26/100) = 173.672$ litres

• Volume absolu des déchets d'aluminium

Pour $c=350 \text{ kg/m}^3$ $684.1 \cdot (19.2/100) = 131.347$ litres

Pour $c=400 \text{ kg/m}^3$ $667.97 \cdot (18.2/100) = 121.570$ litres

MATERIAUX	masse v réel	kg/m ³	masse v apparent	l/m ³
sable	2,56	203,20538	1,58	128,611
ciment	3,1	350	3,1	112,903
gravier 8/15	2,56	394,86252	1,56	253,117
gravier 15/25	2,56	277,0605	1,62	171,025
Eau	1	140	1	140
Déchet aluminium	/	73,685667	0,561	131,347

Tableau 2.20 quantité de composition de béton à base de déchets pour $c=350 \text{ kg/m}^3$

MATERIAUX	masse v réel	kg/m ³	masse v apparent	l/m ³
sable	2,56	189,9713	1,58	120,235
ciment	3,1	400	3,1	129,032
gravier 8/15	2,56	393,88908	1,56	252,493
gravier 15/25	2,56	281,34864	1,62	173,672
Eau	1	240	1	240
déchet aluminium	/	62,73012	0,516	121,57

Tableau 2.21 quantité de composition de béton à base de déchets pour $c=400 \text{ kg/m}^3$

2.8. Composition béton

Ordre d'essai	CIMENT (g)	SABLE (g)	GRAVIER 8/15 (g)	GRAVIER 15/25 (g)	DECHETS ALUMINIUM (%)	E/C
1	350	410	400	250	0	0,6
2	400	380	400	300	25	0,4
3	400	410	350	250	25	0,4
4	400	410	350	300	0	0,6
5	350	410	350	300	0	0,6
6	400	380	400	250	25	0,4
7	400	380	350	250	0	0,4
8	350	410	350	250	25	0,4
9	400	410	400	250	0	0,6

10	350	380	400	300	25	0,4
11	350	410	400	250	25	0,4
12	350	410	350	250	0	0,4
13	400	410	350	250	0	0,6
14	350	380	350	300	25	0,6
15	350	410	350	300	25	0,4
16	350	410	400	300	0	0,6
17	400	380	400	300	25	0,6
18	350	410	350	300	0	0,4
19	350	410	400	250	25	0,6
20	350	380	350	300	0	0,4
21	400	380	400	250	0	0,6
22	350	410	400	300	25	0,6
23	400	380	400	300	0	0,4
24	400	410	400	250	25	0,6
25	350	380	400	250	25	0,4
26	400	380	400	250	25	0,6
27	350	380	350	250	0	0,6
28	400	410	400	250	0	0,4
29	400	380	350	250	25	0,6
30	400	410	350	300	25	0,6
31	400	380	350	250	0	0,6
32	400	380	350	300	0	0,6
33	350	380	350	300	0	0,6
34	400	410	400	300	0	0,6
35	400	410	400	250	25	0,4
36	400	410	350	250	0	0,4
37	350	380	350	250	25	0,4
38	350	410	350	300	25	0,6
39	350	380	400	250	0	0,6
40	400	410	350	250	25	0,6
41	400	410	350	300	0	0,4

42	350	380	400	250	25	0,6
43	400	380	400	250	0	0,4
44	350	410	400	250	0	0,4
45	400	410	350	300	25	0,4
46	400	380	400	300	0	0,6
47	350	410	350	250	25	0,6
48	350	380	350	300	25	0,4
49	350	380	350	250	25	0,6
50	400	410	400	300	25	0,4
51	350	380	400	300	0	0,4
52	350	410	350	250	0	0,6
53	350	380	400	300	25	0,6
54	350	410	400	300	25	0,4
55	350	380	400	300	0	0,6
56	400	380	350	300	0	0,4
57	400	380	350	250	25	0,4
58	350	410	400	300	0	0,4
59	400	410	400	300	0	0,4
60	350	380	350	250	0	0,4
61	350	380	400	250	0	0,4
62	400	380	350	300	25	0,4
63	400	410	400	300	25	0,6
64	400	380	350	300	25	0,6

Tableau 2.22 composition de béton

2.9. Dimensionnements de moule

- Moules cubiques en acier à 2 alvéoles extrêmement robustes avec surfaces intérieures sont usinées avec précision.
- Les dimensions sont 10x10x10 (cm³) exigences de la norme EN 12390-1



Figure 2.9 Moule de béton cubique

2.10. Malaxage de béton

Le processus de malaxage du béton à la main est relativement simple, mais nécessite beaucoup de travail physique et de patience. Il est important de mélanger soigneusement les ingrédients jusqu'à ce qu'ils soient bien incorporés, sans quoi la qualité du béton peut être affectée.



Figure 2.10 melange de beton

2.11. Le moulage des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être moulées immédiatement après la préparation de béton, Afin d'éviter que le béton n'adhère au moule, nous enduisons légèrement ce dernier d'huile, directement à partir de récipient de malaxage en étaler la béton uniformément en utilisant la spatule dans le moule, Placez délicatement le moule sur la table de choc et faites fonctionner pendant 15 secondes pour assurer une répartition uniforme du mélange, Enlever immédiatement l'excès et Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la règle tenue presque à plat et étiqueter ou marquer les moules pour identifier.



Figure 2.11 éprouvette de béton



Figure 2.12 éprouvette de béton de déchets

2.12. Le démoulage des éprouvettes

Effectuer le démoulage avec toutes les précautions entre 20h et 24h après le moulage. Après démoulage, marquer convenablement les éprouvettes à conserver dans l'eau, pour l'identification ultérieure

2.13. Conservation des éprouvettes

Dans le Domain de cette étude, nous avons utilisé un seul mode de conservation du béton. Les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau à une température ambiante de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ de façon telle que l'eau puisse accéder librement aux six côtés des éprouvettes, conformément à la norme NA 426.

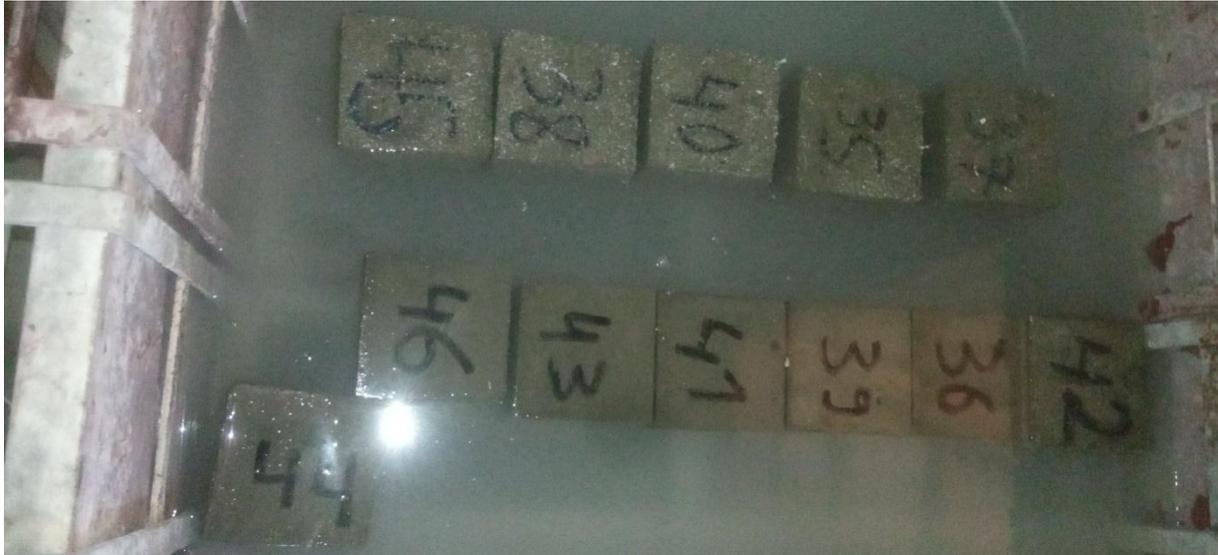


Figure 2.13 conservation des éprouvettes dans l'eau

2.14. Essais sur le béton durci

2.14.1. ABSORPTION (NF P 18- 555)

2.14.1.1. But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

2.14.1.2. Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption (Ab) est défini par la relation :

$$Ab = \frac{(M3 - M1)}{M1} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

M3 = masse de l'échantillon sec après plongée dans l'eau pendant 24 heures

M1 = masse de l'échantillon séchée dans l'étuve.

2.14.2. INDICE DES VIDES (NF EN 12390-7)

2.14.2.1. But de la mesure

L'indice des vides désigne le pourcentage de vides présents dans une substance, l'indice de vides élevé peut avoir des conséquences indésirables sur la qualité du béton telles que des fissures des pertes de résistance, il est important de contrôler le pour garantir une bonne qualité de béton.

2.14.2.2. Principe de la mesure

L'indice des vides est déterminé l'aide d'un essai spécifique qui implique la pesée d'un échantillon de béton avant et après le séchage, la différence entre les deux mesures permet de calcule pourcentage d'air emprisonne dans le béton et donc de déterminer l'indice des vides, Le coefficient d'indice des vides ϵ est défini par la relation :

$$e = (M_w / p_w) \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

$$M_w = M_2 - M_1 \dots\dots\dots (3)$$

M1 : masse de l'échantillon séchée après passer à l'étuve.

M2 : masse de l'échantillon après démoulage.

2.14.3. Compacité (EN 12390-7)

2.14.3.1. But de la mesure

La compacité du béton est essentielle pour évaluer la qualité du béton, contrôler la densité, vérifier la conformité aux spécifications et optimiser le mélange de béton afin d'assurer des performances optimales

2.14.3.2. Principe de la mesure

La compacité est le rapport entre la masse sèche du béton par la masse totale du béton

M1 : masse de l'échantillon séchée après passer à l'étuve.

M2 : masse de l'échantillon après démoulage.

M3 : masse de l'échantillon sec après plongée dans l'eau pendant 24 heures

$$\text{Compacité (\%)} = ((M_3 - M_1) / (M_3 - M_2)) \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

Ordre essais	M3 (g)	M1 (g)	M2 (g)	absorption d'eau	Indices des vides (%)	Compacité (%)
1	2255	2220	2208	2.12	1.2	74.46
2	1500	1416	1395	7.52	2.1	80
3	1715	1628	1605	6.85	2.3	79.09
4	2260	2230	2219	1.84	1.1	73.17
5	2240	2200	2192	2.18	0.8	83.35
6	1550	1561	1435	8.01	12.6	23.91
7	2355	2315	2302	2.30	1.3	75.47
8	1605	1581	1485	8.08	9.6	20
9	2310	2280	2271	1.71	0.9	76.92
10	1690	1613	1535	10.09	7.8	49.67
11	1445	1372	1270	13.77	10.2	41.71

12	2360	2335	2330	1.28	0.5	83.34
13	2365	2335	2331	1.45	0.4	88.23
14	1680	1591	1510	11.25	8.1	52.35
15	1625	1565	1420	14.43	14.5	29.26
16	2285	2267	2255	1.33	1.2	60
17	1650	1570	1460	13.01	11	42.10
18	2360	2341	2320	1.72	2.1	47.5
19	1955	1895	1872	4.43	2.3	72.28
20	2345	2328	2310	1.51	1.8	48.57
21	2375	2357	2345	1.27	1.2	60
22	1750	1645	1625	7.69	2	84
23	2260	2235	2200	2.72	3.5	41.67
24	1635	1538	1485	10.10	5.3	64.67
25	1670	1584	1510	10.59	7.4	53.75
26	1720	1663	1565	9.90	9.8	36.77
27	2390	2377	2345	1.91	3.2	28.89
28	2375	2364	2330	1.93	3.4	24.45
29	1850	1780	1721	7.49	5.9	54.26
30	1750	1712	1595	9.71	11.7	24.51
31	2330	2315	2285	1.96	3	33.34
32	2385	2378	2330	2.36	4.8	12.72
33	2360	2350	2315	1.94	3.5	22.23
34	2430	2410	2385	1.88	2.5	44.45
35	1780	1667	1610	10.55	5.7	66.47
36	2290	2252	2240	2.23	1.2	76
37	1840	1773	1690	8.87	8.3	44.67
38	1690	1586	1495	13.04	9.1	53.34
39	2270	2254	2225	2.02	2.9	35.56
40	1715	1611	1515	13.20	9.6	52
41	2420	2411	2365	2.32	4.6	16.36
42	1805	1640	1610	12.11	3	84.61
43	2395	2374	2345	2.13	2.9	42

44	2380	2357	2330	2.14	2.7	46
45	1830	1699	1640	11.58	5.9	68.94
46	2420	2408	2365	2.32	4.3	21.81
47	1650	1470	1435	14.98	3.5	83.72
48	1780	1625	1605	10.90	2	88.57
49	1765	1635	1595	10.65	4	76.47
50	1525	1330	1305	16.85	2.5	88.63
51	2440	2420	2395	1.87	2.5	44.45
52	2435	2410	2390	1.88	2	55.56
53	1520	1315	1290	17.82	2.5	89.13
54	1550	1350	1335	16.10	1.5	93.02
55	2415	2395	2370	1.89	2.5	44.45
56	2345	2310	2300	1.95	1	77.78
57	1440	1375	1330	8.27	4.5	59.09
58	2440	2365	2355	3.60	1	88.23
59	2350	2320	2305	1.95	1.5	66.67
60	2305	2270	2255	2.21	1.5	70
61	2345	2315	2300	1.95	1.5	66.67
62	1780	1640	1625	9.53	1.5	90.32
63	1680	1655	1625	3.38	3	45.46
64	1735	1680	1635	6.11	4.5	55

Tableau 2.23 Résultats d'absorption d'eau, indice des vides et compacité pour déchets à 25 %

Ordre essais	M3 (g)	M1 (g)	M2 (g)	absorption d'eau	indice des vides (%)	Compacité (%)
1	2255	2220	2208	1.82	1.2	74.46
2	1905	1915	1950	1.09	1	22.23
3	1810	1820	1840	6.85	1	33.34
4	2260	2230	2219	1.84	1.1	73.17
5	2240	2200	2192	2.18	0.8	83.34
6	1845	1860	1875	0.80	1.5	50
7	2355	2315	2302	2.30	1.3	75.47
8	2035	2050	2080	1.46	1.5	33.34

9	2310	2280	2271	1.71	0.9	76.92
10	1950	1965	1980	0.76	1.5	50
11	2090	2100	2115	0.71	1	40
12	2360	2335	2330	1.28	0.5	83.33
13	2365	2335	2331	1.03	0.4	88.23
14	1915	1930	1950	1.82	1.5	42.85
15	1900	1915	1950	1.82	1.5	30
16	2285	2267	2255	1.33	1.2	60
17	2100	2120	2160	1.88	2	33.34
18	2360	2341	2320	1.72	2.1	47.5
19	2005	2015	2080	3.22	1	13.34
20	2345	2328	2310	1.51	1.8	48.57
21	2375	2357	2345	1.27	1.2	60
22	2140	2165	2190	1.15	2.5	50
23	2260	2235	2200	2.72	3.5	41.66
24	2095	2105	2135	1.42	1	25
25	2000	2015	2070	2.72	1.5	21.42
26	2010	2030	2095	3.20	2	23.52
27	2390	2377	2345	1.91	3.2	28.89
28	2375	2364	2330	1.93	3.4	24.43
29	1895	1910	1935	1.30	1.5	37.5
30	2015	2030	2075	2.21	1.5	25
31	2330	2315	2285	1.96	3	33.34
32	2385	2378	2330	2.36	4.8	12.72
33	2360	2350	2315	1.94	3.5	22.23
34	2430	2410	2385	1.88	2.5	44.45
35	1980	1995	2005	0.50	1.5	60
36	2290	2252	2240	2.23	1.2	76
37	2180	2195	2205	0.45	1.5	60
38	2095	2105	2115	0.47	1	50
39	2270	2254	2225	2.02	2.9	35.55
40	1995	2020	2055	1.73	2.5	41.66

41	2420	2411	2365	2.32	4.6	16.36
42	1975	1990	2010	1.01	1.5	42.85
43	2395	2374	2345	2.13	2.9	42
44	2380	2357	2330	2.14	2.7	46
45	1945	1960	1985	1.27	1.5	37.5
46	2420	2408	2365	2.32	4.3	21.82
47	1930	1955	1990	1.79	2.5	41.67
48	2085	2105	2145	1.90	2	33.34
49	1880	1915	1950	1.82	2.5	50
50	1980	2000	2020	1	2	50
51	2440	2420	2395	1.87	2.5	44.45
52	2435	2410	2390	1.88	2	55.56
53	2185	2205	2235	1.36	2	40
54	2130	2165	2200	1.61	3.5	50
55	2415	2395	2370	1.89	2.5	44.45
56	2345	2310	2300	1.95	1	77.78
57	2170	2195	2215	0.91	2.5	55.55
58	2440	2365	2355	3.60	1	88.23
59	2350	2320	2305	1.95	1.5	66.66
60	2305	2270	2255	2.21	1.5	70
61	2345	2315	2300	1.95	1.5	66.66
62	2085	2105	2140	1.66	2	36.36
63	1975	1995	2045	2.50	2	28.57
64	1965	1980	2015	1.76	1.5	30

Tableau 2.24 Résultats d'absorption d'eau, indice des vides et compacité pour déchets à 5 %

2.15. Interprétation les résultats

2.15.1. Absorption d'eau

Les figures (figure 2.14 et figure 2.15) ont révélé une absorption d'eau élevée pour le mélange contenant 25% de déchets d'aluminium. Cependant, cette absorption d'eau a diminué progressivement en réduisant le pourcentage de déchets d'aluminium à 5%, atteignant ainsi un taux d'absorption d'eau presque similaire à celui du béton ordinaire.

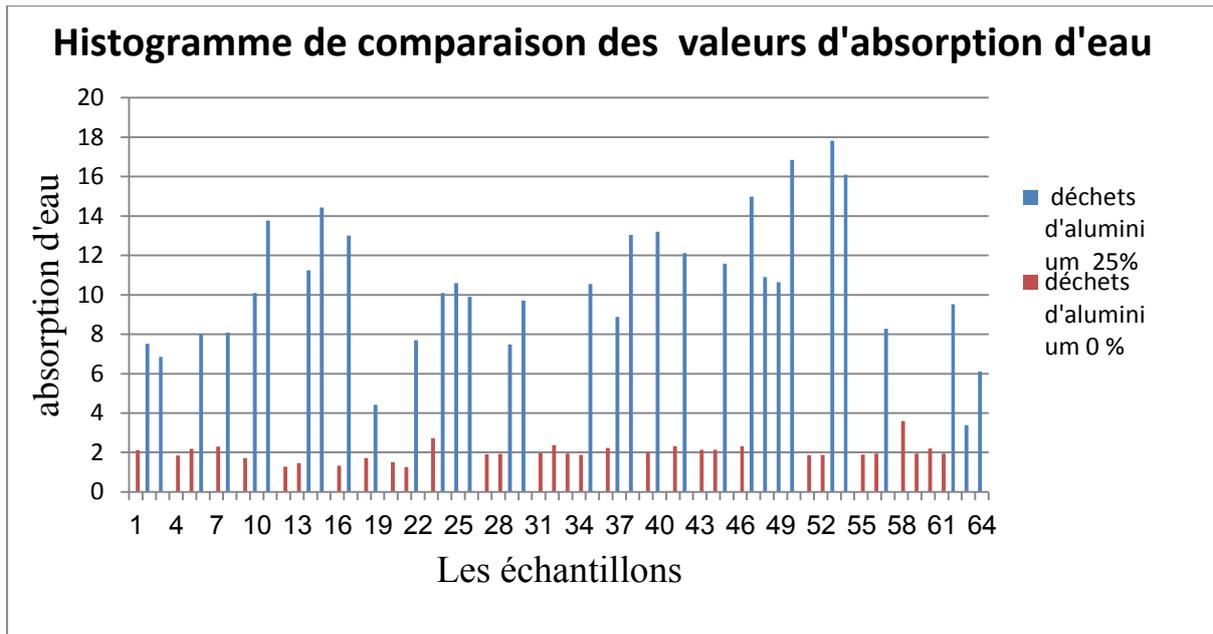


Figure 2.14 histogramme d'absorption d'eau de béton a 25% de déchets

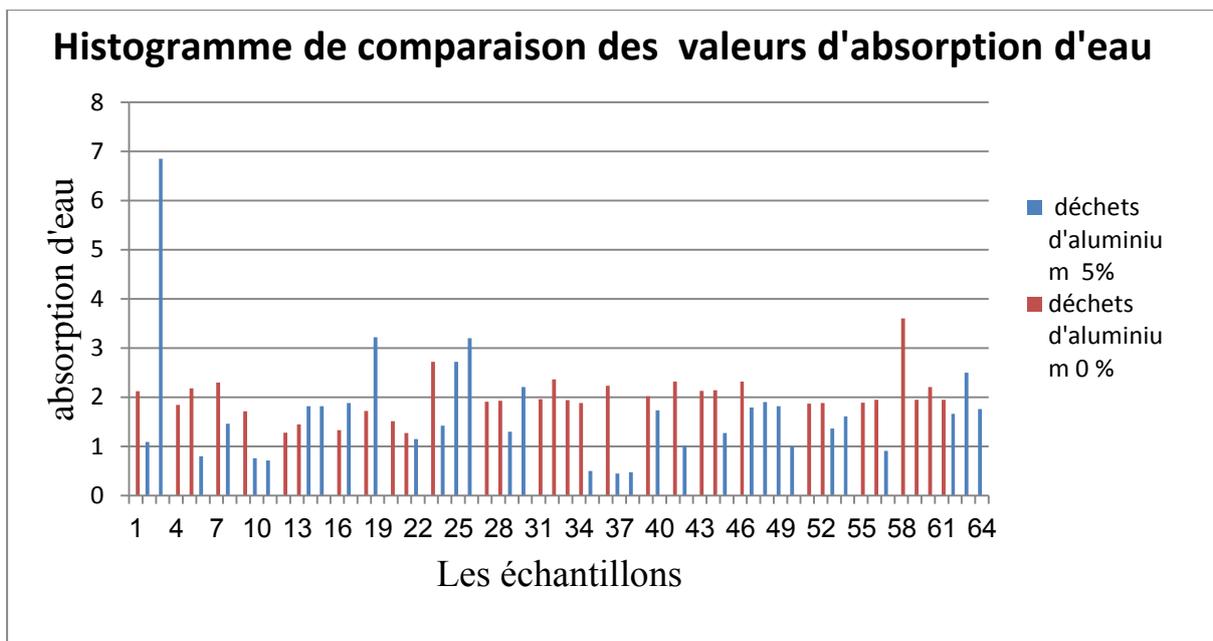


Figure 2.15 histogramme d'absorption d'eau de béton a 5% de déchets

2.15.2. Indice des vides

Les figures ont révélé une porosité élevée dans le mélange contenant 25 % de déchets d'aluminium. Cependant, la porosité a diminué progressivement en réduisant la proportion de déchets d'aluminium à 5 %, atteignant ainsi un niveau d'indice des vides similaire presque à celui du béton ordinaire.

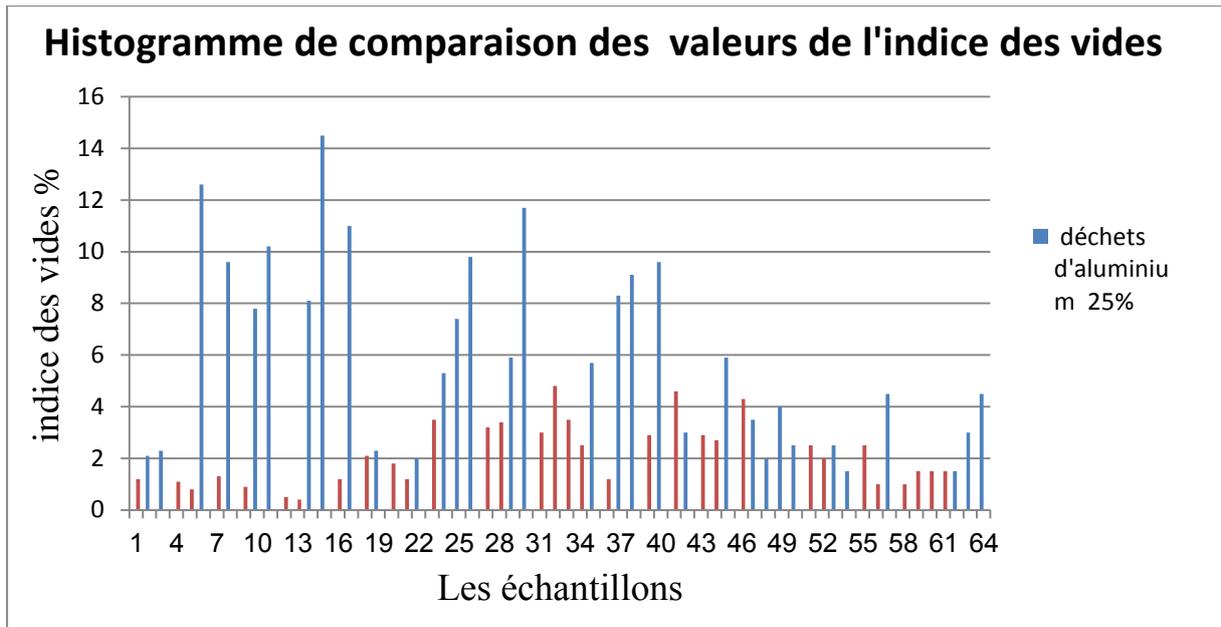


Figure 2.16 histogramme d'indice des vides de béton a 25% de déchets

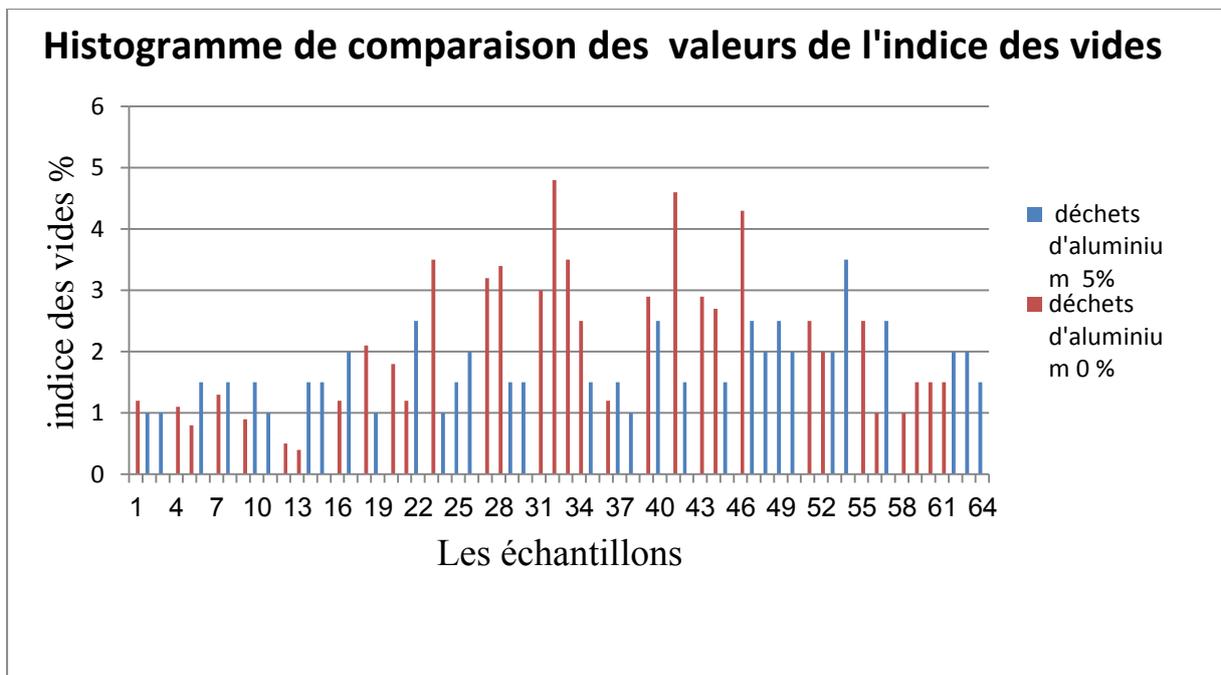


Figure 2.17 histogramme d'indice des vides de béton a 5% de déchets

2.15.3. Compacité

La compacité du béton peut être interprétée comme étant plus forte lorsque le pourcentage de déchets d'aluminium dans le mélange augmente, ce qui entraîne une plus grande porosité et un taux de vide plus élevé. En revanche, une réduction du pourcentage de déchets d'aluminium conduit à une diminution de la compacité du béton, se rapprochant ainsi des niveaux de compacité observés dans le béton ordinaire.

Nous avons observé une augmentation de la compacité du béton dans les échantillons contenant une dose de 25% de déchets d'aluminium, tandis qu'une diminution du pourcentage a été constatée dans les échantillons avec une dose de 5%, dépassant ainsi la compacité des échantillons de béton ordinaire.

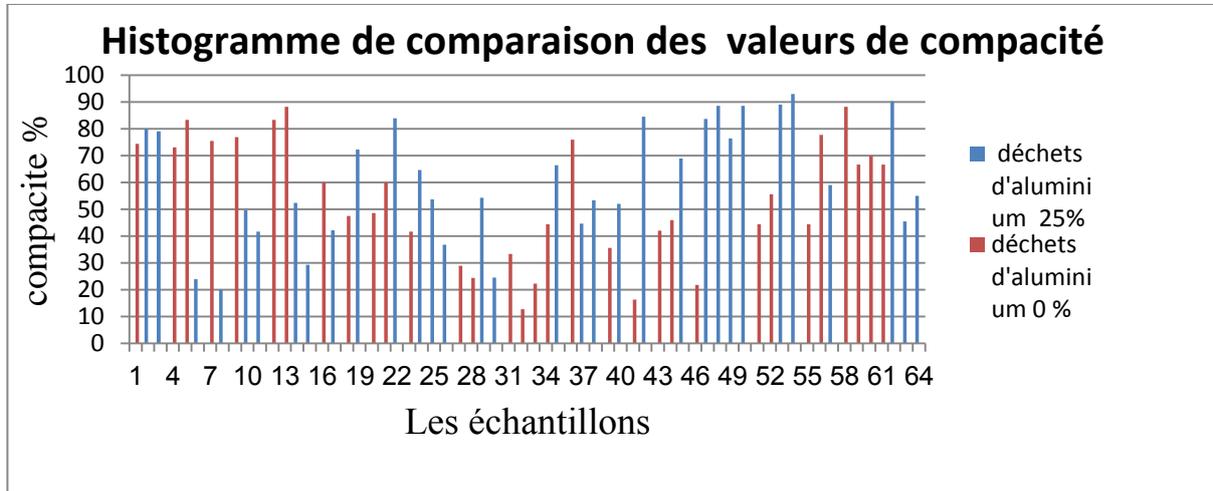


Figure 2.18 histogramme de compacité de béton à 25% de déchets

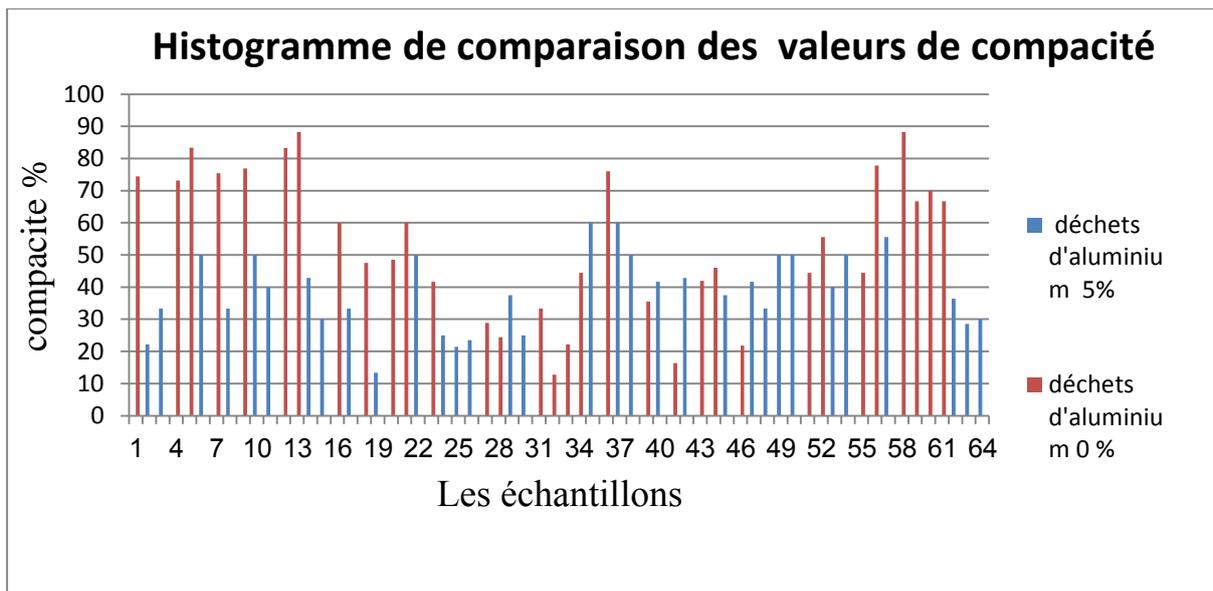


Figure 2.19 histogramme de compacité de béton à 5% de déchets

2.16. Conclusion

D’après les résultats de caractérisation nous concluons :

- Les essais réalisés, sur les granulats de carrière choisie, ont présenté de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques.
- L'analyse granulométrique de déchet d’aluminium présenter que sont légers et de forme hétérogène.
- Le sable est fin à haut pourcentage de l’argile.

-le mélange de béton à base de déchets on remarque une augmentation de volume.

-La quantité d'eau dans le mélange de béton à base de déchets est insuffisante, car le double a été versé pour homogénéiser le mélange

-L'utilisation de déchets d'aluminium dans le béton peut avoir un effet sur l'absorption d'eau et l'indice des vides du béton. En général, une augmentation de l'incorporation de déchets d'aluminium peut entraîner une augmentation de l'absorption d'eau et de l'indice des vides dans le béton. Inversement, une réduction de l'incorporation de déchets peut entraîner une diminution de l'absorption d'eau et l'indice des vides du béton.

- l'augmentation du pourcentage de déchets d'aluminium dans le béton améliore la compacité du matériau. À l'inverse, une réduction du pourcentage de déchets d'aluminium conduit à une diminution de la compacité, se rapprochant ainsi des niveaux observés dans le béton ordinaire.

**CHAPITRE III : GENERALITES ET NOTIONS
SUR LES PLANS D'EXPERIENC**

3.1. Introduction

La méthode des plans d'expériences est à la fois nouvelle et ancienne, Les scientifiques n'ont abordé ce sujet que depuis peu d'années. Les premiers qui se sont penchés sur ce problème sont des agronomes et des statisticiens. Les techniques et les notions qu'ils ont développées sont si générales qu'elles peuvent être utilisées dans beaucoup de domaines. Cette méthode est récente puisqu'on peut la faire démarrer avec les travaux de R. A. Fisher (début de vingtième siècle). Aussi bizarre que cela paraisse, elle ne porte pas encore de nom. [29]

Les chercheurs ont proposé expérimentique ou expérimentologie. Après 1945, les plans d'expériences suscitent de nombreuses publications et recherches dans le monde anglo-saxon. Des statisticiens comme Yate, Youden, Cochran, Plackett et Burman, et bien d'autres, enrichissent et divulguent la méthode. Box et Hunter, s'appuyant notamment sur les travaux de Yate, développent des méthodes particulières de construction de plans fractionnaires à deux niveaux. A partir des années 50, en s'attaquant à l'amélioration de la qualité, le Japon imprime un nouveau souffle. Taguchi et Masuyama élaborent des tables permettant de construire des plans d'expériences orthogonaux adaptés à la majorité des problèmes industriels. Ces tables ont été publiées en 1959 et 1961. Par la suite les méthodes initiées par Taguchi se sont répandues aux Etats-unis puis en Europe. Il faut signaler l'existence sur le marché de logiciels de plus en plus conviviaux destinés à la construction et à l'analyse des plans d'expériences. Il faut noter cependant que si ces logiciels déchargent l'utilisateur de certains calculs parfois fastidieux, ils ne permettent pas de poser le problème. En d'autres termes les logiciels ne doivent être utilisés qu'après une solide formation à la méthode. Autrement les risques de fausses conclusions seront importants. [33]

3.2. Historique des plans d'expériences

Les méthodes rigoureuses d'expérimentation, basées sur l'utilisation des plans d'expériences, sont dues aux travaux de Sir Ronald Fisher (1890-1962). Ce brillant mathématicien, très productif dans le domaine de la statistique, a été amené à s'intéresser aux techniques d'expérimentation suite à son emploi, en 1919 à la " Rothamsted Experimental Station". On trouve dans les travaux de Fisher les notions de répétition, de constitution de blocs, d'expérience factorielle confusion, d'interactions ou d'effets principaux et d'interactions et d'expériences en parcelles divisées. Les idées de Fisher furent reprises par des spécialistes des sciences agronomiques. En 1931, Fisher est rejoint à Rothamsted par Frank Yates (1902-1993). De leur collaboration, résultent entre autres de nouveaux développements en ce qui concerne les expériences factorielles, ainsi que les notions d'expériences en blocs aléatoires

incomplets et d'expériences factorielles fractionnaires.

A partir des années 1935-1940, les notions d'expérimentation, qui jusque-là avaient été conçues et appliquées essentiellement dans le secteur agricole, interviennent également dans le secteur industriel. Des concepts nouveaux apparaissent alors, tels que les plans de Plackett et Burman, la notion des surfaces de réponses, l'application de cette notion au cas particulier des mélanges, les plans optimaux. [31]

3.3. Définition des plans d'expériences

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à évaluer et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables : [31]

➤ Le facteur

➤ La réponse

3.4. Vocabulaire de base des plans d'expériences

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs. [38]

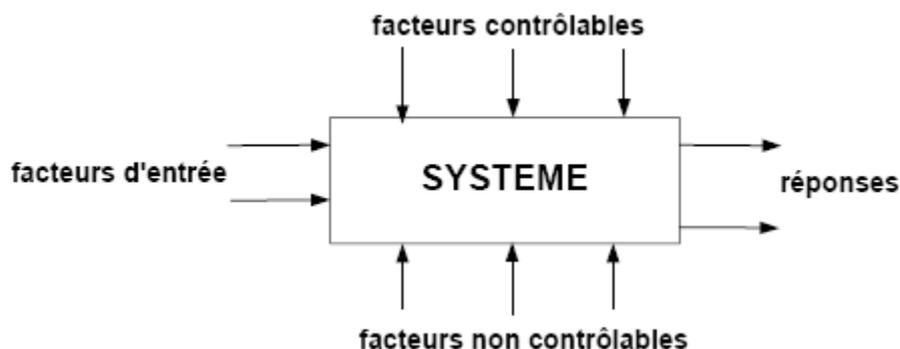


Figure 3.1 schéma de plan d'expériences [33]

- **Facteur** On appelle facteur, toute série d'éléments de même nature conditionnant le phénomène étudié. Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, contrôlable ou non contrôlable.

- Les facteurs contrôlés sont effectivement étudiés au cours d'une expérience.
- Les facteurs non contrôlés sont les facteurs difficilement maîtrisables et sont la source de variations résiduelles car fréquemment considérés comme aléatoires.
- Les facteurs bruit ont des effets supposés ou réels, et qui ne s'exercent que sur la dispersion ou la qualité des résultats.
 - **Traitement** Un traitement est une combinaison spécifique des niveaux de tous les facteurs étudiés.
 - **L'unité expérimentale** L'unité expérimentale est l'unité élémentaire qui reçoit un traitement et sur laquelle est faite chaque mesure.
 - **Réponse** Une réponse expérimentale ou variable dépendante, est une manifestation mesurable que l'on observe lorsqu'on fait varier les facteurs étudiés.
 - **Bloc** Un bloc est le regroupement selon des critères bien définis des unités expérimentales (supposées ou sont) homogènes.
 - **Erreur** Variation non expliquée d'un ensemble d'observations.

Interaction Lorsque l'effet d'un facteur dépend de la valeur prise par un autre facteur cela se traduit par une interaction entre les deux facteurs. On appelle interaction d'ordre m une interaction entre m facteurs. [39]

3.4.1. Facteur

On désigne sous le nom de facteurs les paramètres susceptibles d'influencer les réponses et que l'on peut faire varier, Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. [42]

3.4.2. Les différents types de facteurs

La construction des plans 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. [42]

3.4.2.1. Facteurs continus

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus. [42]

3.4.2.2. Facteurs 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'a 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. [42]

3.4.2.3. 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. [42]

3.4.2.4. 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. [42]

3.4.3. Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau

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 $+1$. [29]

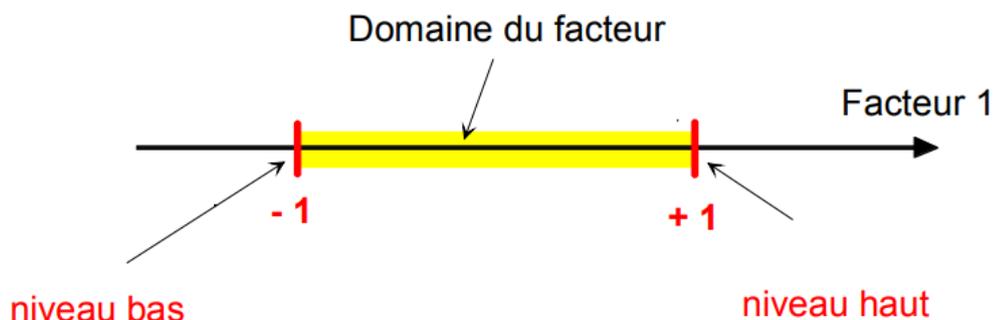


Figure 3.2 le domaine et les niveaux d'un facteur. [29]

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (Figure III.3). Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. [42]

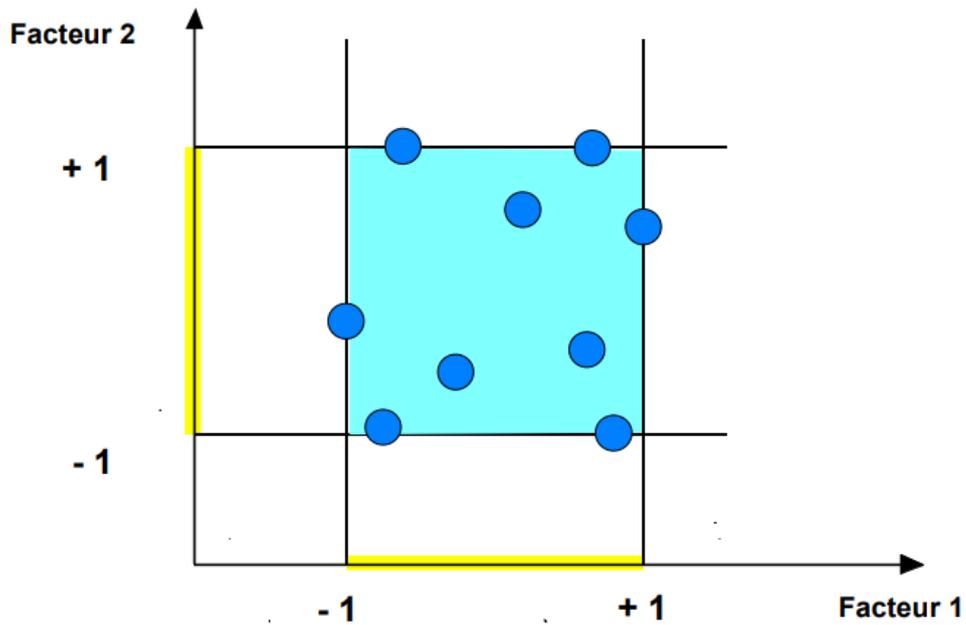


Figure 3.3 la disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude [32]

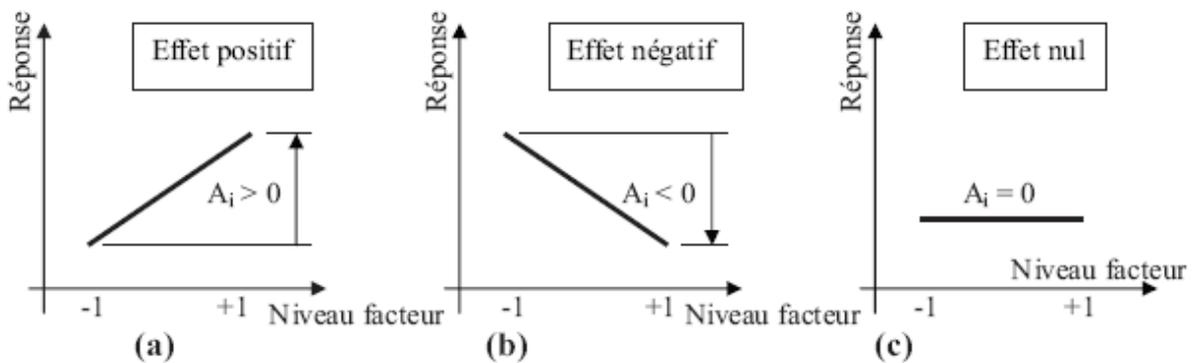


Figure 3.4 Effet d'un facteur [32]

3.4.4. Réponses

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression. [32]

3.4.5. Domaine expérimental

Le domaine est délimité par les niveaux supérieurs et inférieurs de chaque facteur. [45]

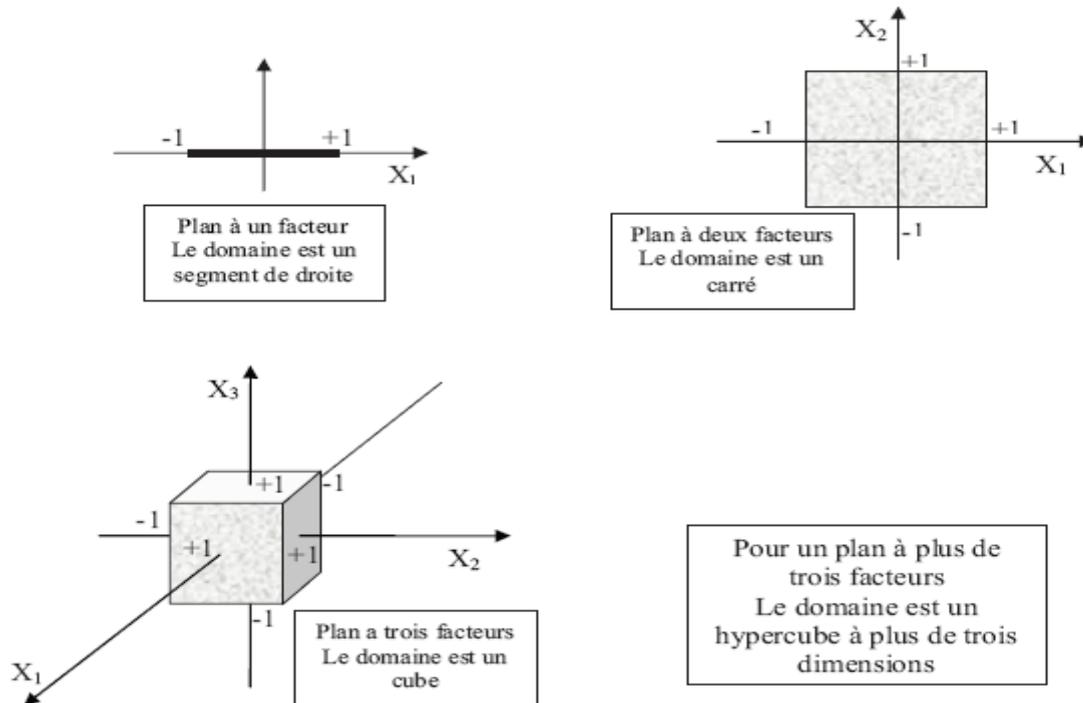


Figure 3.5 Domaine expérimental.[45]

3.5. L'objectif de La méthode des plans d'expériences

La différence capitale avec la méthode classique tient au fait que l'on fait varier, à la fois, les niveaux de toutes les variables à chaque expérience, mais de manière programmée et raisonnée. Aussi choquant que cela paraisse au premier abord, le fait de faire varier toutes les variables à la fois n'est pas un inconvénient mais au contraire offre de nombreux avantages parmi lesquels :

- Diminution du nombre des essais
- Nombre de facteurs étudiés peut être très grand
- Détection des interactions entre facteurs
- Meilleure précision sur les résultats
- Modélisation des résultats et l'obtention de l'optimum

L'objectif général des plans d'expériences peut être défini de la façon suivante [34] : Minimiser le coût d'obtention d'une information fiable = Faire le minimum d'essais et obtenir le maximum de précision sur les résultats visés La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [45].

3.6. Principe des plans d'expériences

La technique des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux d'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 à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats. [32]

Soit une grandeur Y dépendant de N paramètres (X_1, X_2, \dots, X_n), parmi lesquels on distingue les paramètres (X_1, X_2, \dots, X_i) considérés comme influents et les paramètres (X_{i+1}, \dots, X_n) non pris en compte. Cette dépendance s'exprime mathématiquement par la relation :

$$Y = \phi(X_1, \dots, X_n) \quad (1)$$

La réponse 'vraie', $Y_{\text{exp}} = \phi(X_1, \dots, X_n)$, ne sera jamais accessible à l'expérimentateur. Elle ne peut qu'être approchée par Soulier.B [45] :

$$Y_{\text{exp}} = Y_{\text{th}} + E \quad (2)$$

Où E représente l'erreur expérimentale ou « bruit », intégrant :

- les erreurs de mesure,
- l'approximation que constitue $\phi(X_1, \dots, X_n)$,
- la non prise en compte de certains facteurs.

En outre, on écrit en général que ϕ est une fonction polynomiale. Le problème consiste à déterminer cette fonction en utilisant les techniques de régression linéaire multiple et en modélisant la surface de réponse du phénomène physique étudié. La régression linéaire en tant qu'analyse de données permet d'obtenir le modèle expérimental ainsi défini.

Le modèle mathématique associé peut être condensé sous la forme matricielle suivante [46] :

$$Y = XA + E \quad (3)$$

Avec

Y : le vecteur des réponses,

X : la matrice constituée par les valeurs que prennent les variables x_i , les produits deux à deux des variables x_i , $i * x_j$

A : le vecteur des coefficients qui sont les inconnues à identifier,

E : le vecteur des erreurs.

3.7. Méthodologie dans l'étude d'un Phénomène

Lors de l'étude d'un phénomène, plusieurs questions se posent, auxquelles répondent différents types de plans. On peut distinguer 3 grandes étapes dans l'acquisition des connaissances :

- Recherche des facteurs influents.
- Sélectionner les paramètres, choisir les modalités et les interactions à étudier.
- Recenser les paramètres pouvant influencer la réponse.
- Identifier les interactions susceptibles des d'être recherchées.
- Dissocier les facteurs principaux des facteurs bruits.
- Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs.

Parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur le phénomène (c'est à dire sur la ou les réponses mesurées du phénomène),

- lesquels ont une influence significative ?
- que vaut quantitativement cette influence ?
- existes-il des interactions entre facteurs ?

Modélisation de plan le plus adapté à la situation sera retenu. Le plan doit présenter les propriétés suivantes :

- Bien représenter la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt.
- Aboutir pour la valeur de la réponse étudiée à une estimation de qualité acceptable.

Quand les facteurs influents ont été identifiés et leur importance quantifiée, on recherche ensuite l'équation permettant de décrire les variations de la réponse étudiée en fonction de celles des facteurs influents ; cette seconde étape constitue la modélisation.

L'optimisation et validation d'un modèle, Deux possibilités existent :

- Soit le modèle est validé, ce qui signifie qu'il représente suffisamment bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental et dans ce cas, les objets sont atteints : nous pouvons utiliser ce modèle pour faire de la prévision en n'importe quel point du domaine expérimental.
- Soit le modèle n'est pas validé et alors son utilisation n'est pas possible. Il faut donc s'acheminer vers la proposition d'un modèle différent.

Le calcul de la réponse est possible en point du domaine expérimental.

A partir du modèle calculé, nous pouvons prédire les résultats correspondant à la configuration optimale du produit ou du processus.

Pour finir, on cherche en général à déterminer quelles conditions expérimentales (les valeurs prises par les facteurs influents) permettent d'obtenir le meilleur résultat pour la réponse. Cette étape porte le nom d'optimisation. [43]

3.8. Choix des facteurs et du domaine expérimental

C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un PE. Il faut :

- Sélectionner les paramètres, choisir les modalités et les interactions à étudier.
- Recenser les paramètres pouvant influencer la réponse.
- Identifier les interactions susceptibles des d'être recherchées.
- Dissocier les facteurs principaux des facteurs bruits.
- Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs. [47]

3.9. Matrice d'expériences

La matrice d'expériences montre toutes les combinaisons possibles des niveaux haut et bas pour chaque facteur d'entrée.

Une matrice d'expériences peut se construire à la main en suivant l'algorithme de Yates ; pour une colonne c nous alternons : une série de 2^{c-1} (-1) et de 2^{c-1} (+1). La figure 6 montre les matrices d'expériences pour deux plans factoriels complets.[48]

Exp	x_1	x_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Exp	x_1	x_2	x_3
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

Figure 3.6 Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets [48]

3.10. 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'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum. [33]

3.11. 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. [33]

3.12. Conditions d'application des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications au béton s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais et la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées [34] :

- Condition 1 :

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- Condition 2 :

La réponse doit être du même genre. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

3.13. Différents types des plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences :

3.13.1. Plans de mélanges

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés à l'étude des facteurs dépendants. Ils sont principalement utilisés pour l'étude de l'influence des proportions des constituants d'un produit sur une réponse donnée. [31]. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. [34]

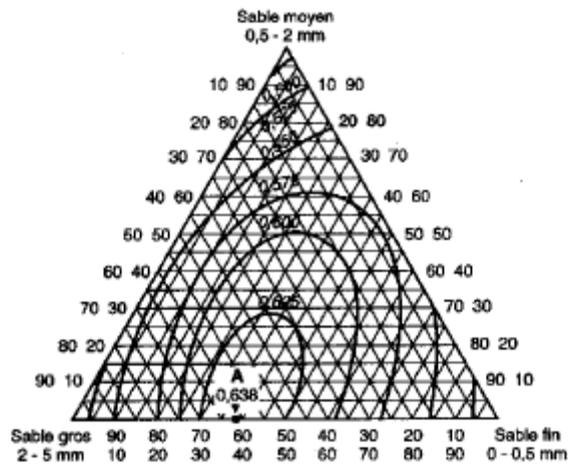


Figure 3.7 triangle de Féret, 1892 [31]

3.13.2. Plans de criblage

L'objectif de ces plans est de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée. Aucune relation ne précise entre les variations des facteurs et celle de la réponse n'est établie. Parmi les plans proposés : plans factoriels complets à deux niveaux, plans factoriels fractionnaires et plans de Plackett-Burman [41].

3.13.3. Plans factoriels complets

Factoriels en tant que plans d'expériences sont issus des travaux

R.A. Fischer [37]. Chaque facteur prend deux valeurs : une valeur inférieure et une valeur supérieure. On dit que chaque facteur est fixé à deux niveaux, un niveau bas noté par le signe moins, un niveau haut noté par le signe plus [38].

Les avantages des plans factoriels complets sont nombreux :

- Chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreurs sont minimisés.
- Les plans factoriels complets sont des plans d'expériences optimaux qui étudient toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs traités et qui nous garantissent les meilleurs résultats.
- La modélisation mathématique est immédiate.

3.13.4. Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

On remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser. Ce nombre devient rapidement très important. Pour seulement 7 facteurs, il faudrait exécuter 128 essais. Pour diminuer le nombre des essais en conservant la possibilité d'étudier tous les facteurs, les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux ont été introduits. [38]

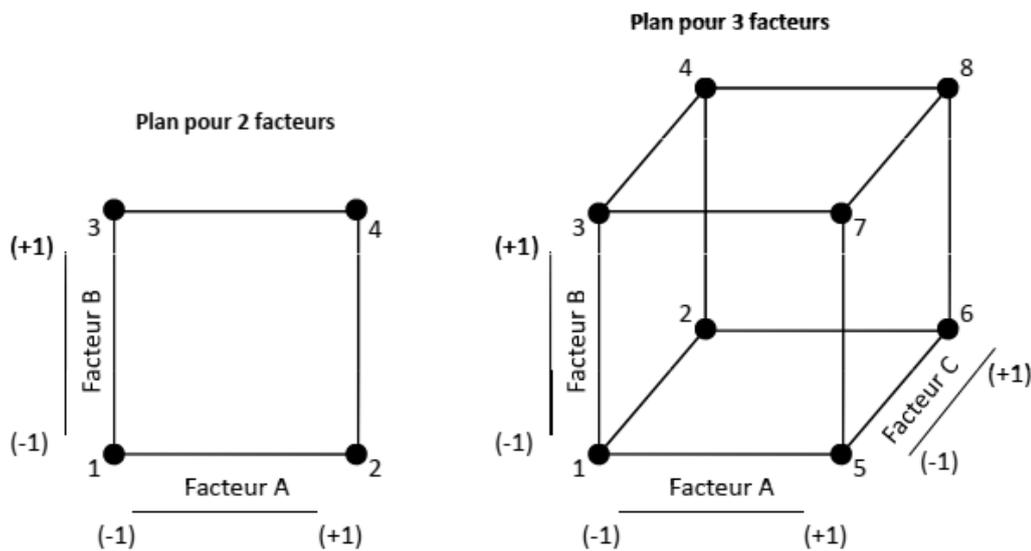


Figure 3.8 Plans factoriels complets [38]

3.13.5. Plans fractionnaires

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ($N=2^k$), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser. D'où les plans fractionnaires.

Les plans fractionnaires optimaux sont des plans issus des plans factoriels complets. Leur intérêt principal est de réduire cette charge expérimentale en focalisant sur les effets les plus intéressants sans pour autant affecter de façon compromettante l'efficacité du plan [39].

3.13.6. Plankoshal

Koshal a cherché les plans dont le nombre de points expérimentaux était égal au nombre de coefficients du polynôme retenu a priori par l'expérimentateur [31].

Etant donné un polynôme caractérisé par son degré d et par le nombre de variables k , on peut calculer le nombre de ses coefficients.

3.13.7. Les plans de Taguchi

A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique. La présentation des plans d'expériences selon les principes de Taguchi est très prisée dans le domaine de la qualité. [44]

3.13.8. Les plans en étoile

A part les plans de Koshal du deuxième type, les plans que nous venons d'examiner, ne permettent d'obtenir que des modèles du premier degré par rapport à chacune des variables. Mais, de nombreux phénomènes présentent une surface de réponses présentant une courbure. Il est donc utile de posséder dans son arsenal de méthodes des plans permettant d'étudier et de représenter des phénomènes dont les surfaces de réponses sont du second degré [42].

3.13.9. Les plans de Doehlert

Doehlert a proposé une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental [38].

3.13.10. Les plans de Plackett-Burman

R.L. Plackett et JP. Burman ont publié leur étude en 1946 dans *Biometrika* [40]. Ils expliquent comment construire des plans permettant d'étudier un grand nombre de facteurs avec peu d'essais. Ils attribuent deux niveaux à chaque facteur et supposent que toutes les interactions entre facteurs sont négligeables devant les effets principaux. Le plan de Plackett-Burman est basé sur la matrice d'Hadamard qui présente les propriétés suivantes :

- Les éléments sont $+1, -1$;
- Les matrices sont carrées et ces matrices sont orthogonales. [31]

3.13.11. La méthode de surface de réponse

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second

degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert. [35]

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

- Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \dots\dots\dots (4)$$

- Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \dots\dots\dots (5)$$

Ce type de modèle permet l'estimation d'une surface de réponse pour étudier les effets linéaires, les effets quadratiques et les effets d'interaction.

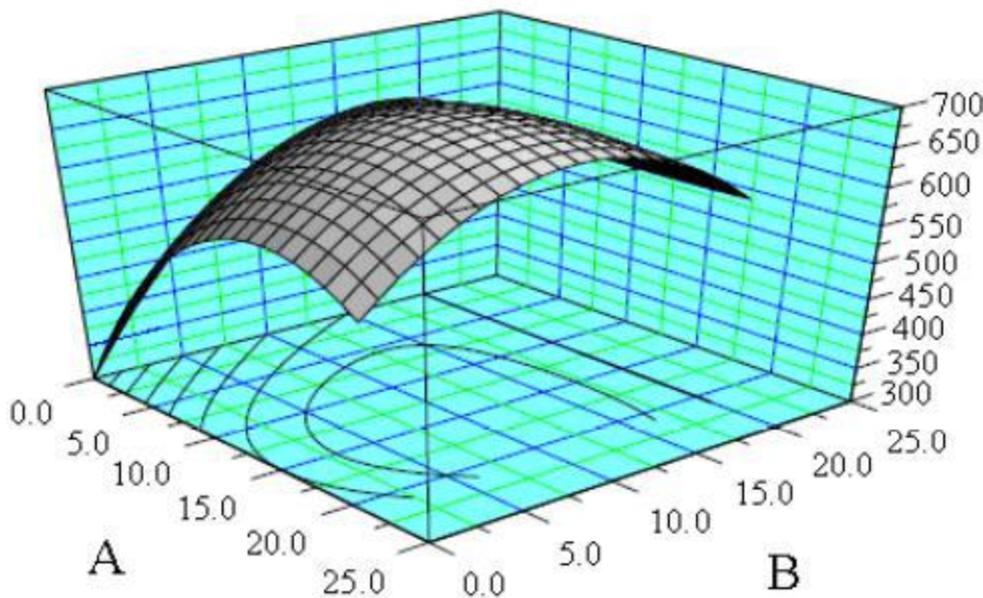


Figure3.9 surface de réponse.[35]

Il existe plusieurs types de plans du second ordre et les plus employés sont :

- Les plans composites centrés
- Les plans de Box-Behnken

3.13.12. Les Plans composites centré

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle PDAI (termes du premier degré et termes d'interactions). Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le

plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. [36] Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile. Les plans composites présentent donc trois parties: - Le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.

- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.

- Les points au centre du domaine d'étude, on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile. [47]

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (nf), des essais du plan en étoile (nα) et des essais au centre (n0). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \dots\dots\dots (6)$$

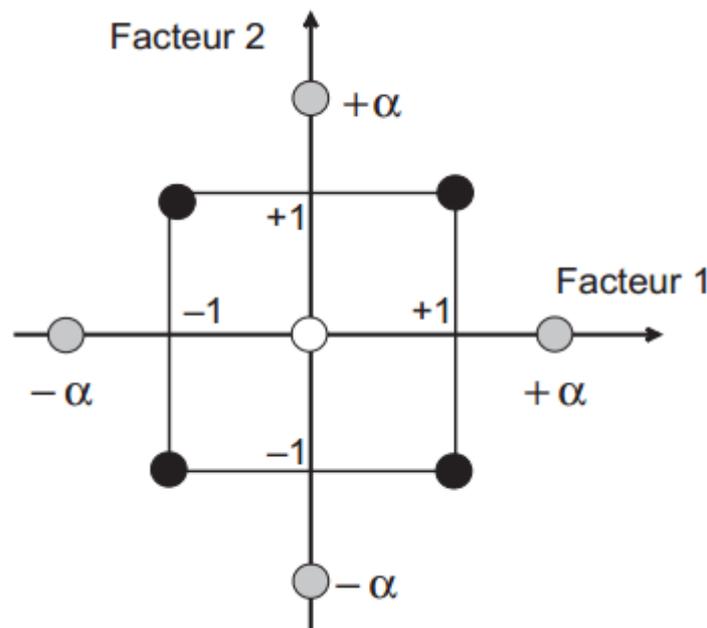


Figure 3.10 plan composite centré. [36]

3.13.13. Les plans de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken sont de mise en œuvre facile car tous les facteurs ne prennent que trois niveaux : - 1, 0 et + 1, en variables codées.

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube. Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier. [36]

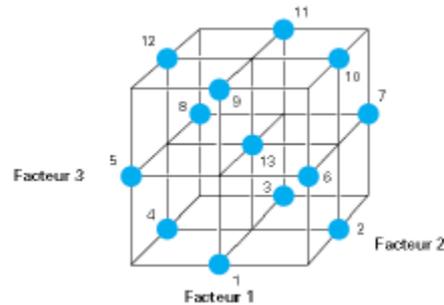


Figure 3.11 plan de Box-Behnken pour trois facteurs.[36]

3.14. Conclusion

En conclusion, l'approche par les plans d'expérience et les plans factoriels complets à deux niveaux est une méthode puissante pour étudier l'effet de plusieurs facteurs sur une réponse donnée. Ce type de plan expérimental permet d'explorer de manière systématique les interactions entre les facteurs et d'optimiser les réglages pour atteindre les meilleures performances.

L'utilisation dans notre étude de plans factoriels complets à deux niveaux permet de réduire le nombre d'essais nécessaires tout en fournissant des informations précieuses sur les effets principaux et les interactions entre les facteurs. Les plans factoriels complets garantissent également une répartition équilibrée des essais, ce qui facilite l'analyse statistique des résultats.

**CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE
ET ANALYSE DES RESULTATS PAR PLAN
D'EXPERIANCES**

4.1. Introduction

L'objectif de notre travail est d'établir, à l'aide de la méthode des plans d'expériences, une série de modèles prédictifs qui prennent en compte la proportion des différents constituants des bétons formulés à partir de matériaux locaux.

Les résultats ont été obtenus à partir des résultats positifs et des résultats négatifs et des résultats ne donnent pas une bonne explication abordée, il y a beaucoup de phénomènes qui n'ont pas été traités précédemment comme ceux que nous étudions.

Pour comprendre le comportement de béton à base des déchets d'aluminium un plan factoriel complet a été utilisé pour identifier les effets significatifs à la résistance de béton.

Peu de recherches ont été faites sur l'effet des déchets d'aluminium sur la formulation de béton, les résultats de notre étude expérimental sont présentes pour mieux comprendre l'effet des déchets d'aluminium sur le béton, 96 éprouvettes ont été testées sous une charge centrée (résistance la compression à 28 jour).

Pour étudier les statistiques entre différents facteurs et réduire le nombre de dépassements réduisant ainsi le temps et les coûts, le traitement statistique des données sera effectué à l'aide du logiciel MINITAB version 19.

4.2. Mise en application des plans d'expériences :

4.2.1. Facteurs :

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants principaux nécessaires à la confection du béton : quantité de ciment (c), quantité de sable (s), quantité de gravier 8/15 (G1), quantité de gravier 15/25 (G2), quantité de déchets d'aluminium (d) et Volume d'eau (E).

4.2.2. Niveaux des facteurs :

Le domaine d'étude de chaque facteur est également défini (Tableaux 4.1, 4.2 et 4.3).

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
Ciment	-1	+1
Sable	-1	+1
Gravier 8/15	-1	+1
Gravier 15/25	-1	+1
Déchets aluminium	-1	+1
E/C	-1	+1

Tableau 4.1 Facteurs et niveaux codés

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
Ciment (kg/m ³)	350	400
Sable (kg/m ³)	380	410
Gravier 8/15 (kg/m ³)	350	400
Gravier 15/25 (kg/m ³)	250	300
Déchets aluminium (%)	0	25
E/C	0.4	0.6

Tableau 4.2 Facteurs retenus et domaines d'étude en unités naturelles

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
Ciment (kg/m ³)	350	400
Sable (kg/m ³)	380	410
Gravier 8/15 (kg/m ³)	350	400
Gravier 15/25 (kg/m ³)	250	300
Déchets aluminium (%)	0	5
E/C	0.4	0.6

Tableau 4.3 Facteurs retenus et domaines d'étude en unités naturelles

4.2.3. Choix de la réponse

La réponse choisies est la résistance à la compression à 28 jour.

4.2.4. Choix du plan d'expérience pour notre étude :

Avec un plan de six facteurs à deux niveaux, nous avons un nombre d'essai égal $2^6 = 64$, et vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis.

4.2.5. Interprétation des résultats des calculs

Le traitement des données expérimentales a été effectué par logiciel MINITAB19 (Minitab propose une gamme d'outils et de techniques statistiques, notamment des statistiques descriptives, des tests d'hypothèses, des analyses de régression, des plans d'expériences, des cartes de contrôle, etc. Il offre également divers outils graphiques pour la visualisation et l'exploration des données).

4.2.6. Matrice d'expériences

Les matrices des plans d'expériences ont pour objectif, avec le minimum d'essais possible.

Ordre Essai	CIMENT	SABLE	GRAVIE R 8/15	GRAVIE R 15/25	DECHETS ALUMINI UM	E/C
1	-1	1	1	-1	-1	1
2	1	-1	1	1	1	-1
3	1	1	-1	-1	1	-1
4	1	1	-1	1	-1	1
5	-1	1	-1	1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	-1	-1	-1
8	-1	1	-1	-1	1	-1
9	1	1	1	-1	-1	1
10	-1	-1	1	1	1	-1
11	-1	1	1	-1	1	-1
12	-1	1	-1	-1	-1	-1
13	1	1	-1	-1	-1	1
14	-1	-1	-1	1	1	1
15	-1	1	-1	1	1	-1
16	-1	1	1	1	-1	1
17	1	-1	1	1	1	1
18	-1	1	-1	1	-1	-1
19	-1	1	1	-1	1	1
20	-1	-1	-1	1	-1	-1
21	1	-1	1	-1	-1	1
22	-1	1	1	1	1	1
23	1	-1	1	1	-1	-1
24	1	1	1	-1	1	1
25	-1	-1	1	-1	1	-1
26	1	-1	1	-1	1	1
27	-1	-1	-1	-1	-1	1
28	1	1	1	-1	-1	-1
29	1	-1	-1	-1	1	1

30	1	1	-1	1	1	1
31	1	-1	-1	-1	-1	1
32	1	-1	-1	1	-1	1
33	-1	-1	-1	1	-1	1
34	1	1	1	1	-1	1
35	1	1	1	-1	1	-1
36	1	1	-1	-1	-1	-1
37	-1	-1	-1	-1	1	-1
38	-1	1	-1	1	1	1
39	-1	-1	1	-1	-1	1
40	1	1	-1	-1	1	1
41	1	1	-1	1	-1	-1
42	-1	-1	1	-1	1	1
43	1	-1	1	-1	-1	-1
44	-1	1	1	-1	-1	-1
45	1	1	-1	1	1	-1
46	1	-1	1	1	-1	1
47	-1	1	-1	-1	1	1
48	-1	-1	-1	1	1	-1
49	-1	-1	-1	-1	1	1
50	1	1	1	1	1	-1
51	-1	-1	1	1	-1	-1
52	-1	1	-1	-1	-1	1
53	-1	-1	1	1	1	1
54	-1	1	1	1	1	-1
55	-1	-1	1	1	-1	1
56	1	-1	-1	1	-1	-1
57	1	-1	-1	-1	1	-1
58	-1	1	1	1	-1	-1
59	1	1	1	1	-1	-1
60	-1	-1	-1	-1	-1	-1
61	-1	-1	1	-1	-1	-1

62	1	-1	-1	1	1	-1
63	1	1	1	1	1	1
64	1	-1	-1	1	1	1

Tableau 4.4 Matrice d'expérience

4.3. Résistance mécanique en compression

C'est la caractéristique la plus importante pour la formulation d'un béton, il est influencé par de plusieurs facteurs tels que dosage en ciment, eau sable seulette granulaire ...

Nous avons donc réalisé la mesure de la résistance sur 96 éprouvettes (10x10x10 cm³) pour chaque béton confectionné à l'aide d'une machine de compression



Figure 4.1 Essai de compression



Figure 4.2 éprouvette après la compression

4.3.1. Résultats des essais de résistance à la compression

Nous avons procédé à mesure pour chaque formulation (essai) et les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux :

- Résultats des essais de compression pour formulation des éprouvettes par déchets à d'aluminium a25 %
- Résultats des essais de compression pour formulation des éprouvettes par déchets à d'aluminium à 5 %

Order Essai	CIMENT (g)	SABLE (g)	GRAVIE R 8/15 (g)	GRAVIE R 15/25 (g)	DECHET S ALUMIN IUM (%)	E/C	resistance a 28 jour (MPa)
1	350	410	400	250	0	0.6	20.27
2	400	380	400	300	25	0.4	0.05
3	400	410	350	250	25	0.4	0.47
4	400	410	350	300	0	0.6	17.57
5	350	410	350	300	0	0.6	24.73
6	400	380	400	250	25	0.4	0.94
7	400	380	350	250	0	0.4	27.81
8	350	410	350	250	25	0.4	0.35
9	400	410	400	250	0	0.6	14.35
10	350	380	400	300	25	0.4	2.11
11	350	410	400	250	25	0.4	0
12	350	410	350	250	0	0.4	20.3
13	400	410	350	250	0	0.6	20.34
14	350	380	350	300	25	0.6	0.07
15	350	410	350	300	25	0.4	0.01
16	350	410	400	300	0	0.6	19.03
17	400	380	400	300	25	0.6	0
18	350	410	350	300	0	0.4	32.99
19	350	410	400	250	25	0.6	4.5
20	350	380	350	300	0	0.4	32.27

21	400	380	400	250	0	0.6	31.94
22	350	410	400	300	25	0.6	1.02
23	400	380	400	300	0	0.4	16.7
24	400	410	400	250	25	0.6	0.04
25	350	380	400	250	25	0.4	0.34
26	400	380	400	250	25	0.6	0.98
27	350	380	350	250	0	0.6	38.44
28	400	410	400	250	0	0.4	33.02
29	400	380	350	250	25	0.6	2
30	400	410	350	300	25	0.6	1.97
31	400	380	350	250	0	0.6	34.74
32	400	380	350	300	0	0.6	18.19
33	350	380	350	300	0	0.6	28.54
34	400	410	400	300	0	0.6	33.53
35	400	410	400	250	25	0.4	1.98
36	400	410	350	250	0	0.4	17.34
37	350	380	350	250	25	0.4	0
38	350	410	350	300	25	0.6	0
39	350	380	400	250	0	0.6	22.57
40	400	410	350	250	25	0.6	0
41	400	410	350	300	0	0.4	23.38
42	350	380	400	250	25	0.6	0.02
43	400	380	400	250	0	0.4	46.5
44	350	410	400	250	0	0.4	38.34
45	400	410	350	300	25	0.4	0.13
46	400	380	400	300	0	0.6	24.07
47	350	410	350	250	25	0.6	0.01
48	350	380	350	300	25	0.4	0
49	350	380	350	250	25	0.6	0
50	400	410	400	300	25	0.4	0
51	350	380	400	300	0	0.4	33.7
52	350	410	350	250	0	0.6	34.75

53	350	380	400	300	25	0.6	0
54	350	410	400	300	25	0.4	0
55	350	380	400	300	0	0.6	31.48
56	400	380	350	300	0	0.4	32.09
57	400	380	350	250	25	0.4	0
58	350	410	400	300	0	0.4	14.19
59	400	410	400	300	0	0.4	30.84
60	350	380	350	250	0	0.4	28.9
61	350	380	400	250	0	0.4	31.4
62	400	380	350	300	25	0.4	0
63	400	410	400	300	25	0.6	0
64	400	380	350	300	25	0.6	0

Tableau 4.5 Résultats des résistances à la compression a 28 jour pour des éprouvettes par déchets à d'aluminium à 25 %

Order Essai	CIMENT (g)	SABLE (g)	GRAVIE R 8/15 (g)	GRAVIE R 15/25 (g)	DECHET S ALUMINIUM (%)	E/C	resistance a 28 jour (MPa)
1	350	410	400	250	0	0.6	20.27
2	400	380	400	300	5	0.4	19
3	400	410	350	250	5	0.4	7
4	400	410	350	300	0	0.6	17.57
5	350	410	350	300	0	0.6	24.73
6	400	380	400	250	5	0.4	10
7	400	380	350	250	0	0.4	27.81
8	350	410	350	250	5	0.4	11
9	400	410	400	250	0	0.6	14.35
10	350	380	400	300	5	0.4	19
11	350	410	400	250	5	0.4	8
12	350	410	350	250	0	0.4	20.3
13	400	410	350	250	0	0.6	20.34

14	350	380	350	300	5	0.6	11.3
15	350	410	350	300	5	0.4	11
16	350	410	400	300	0	0.6	19.03
17	400	380	400	300	5	0.6	17
18	350	410	350	300	0	0.4	32.99
19	350	410	400	250	5	0.6	6.2
20	350	380	350	300	0	0.4	32.27
21	400	380	400	250	0	0.6	31.94
22	350	410	400	300	5	0.6	20
23	400	380	400	300	0	0.4	16.7
24	400	410	400	250	5	0.6	10.1
25	350	380	400	250	5	0.4	11.2
26	400	380	400	250	5	0.6	12
27	350	380	350	250	0	0.6	38.44
28	400	410	400	250	0	0.4	33.02
29	400	380	350	250	5	0.6	6.3
30	400	410	350	300	5	0.6	9
31	400	380	350	250	0	0.6	34.74
32	400	380	350	300	0	0.6	18.19
33	350	380	350	300	0	0.6	28.54
34	400	410	400	300	0	0.6	33.53
35	400	410	400	250	5	0.4	11
36	400	410	350	250	0	0.4	17.34
37	350	380	350	250	5	0.4	5.5
38	350	410	350	300	5	0.6	8.5
39	350	380	400	250	0	0.6	22.57
40	400	410	350	250	5	0.6	6.8
41	400	410	350	300	0	0.4	23.38
42	350	380	400	250	5	0.6	10
43	400	380	400	250	0	0.4	46.5
44	350	410	400	250	0	0.4	38.34
45	400	410	350	300	5	0.4	7.5

46	400	380	400	300	0	0.6	24.07
47	350	410	350	250	5	0.6	4.5
48	350	380	350	300	5	0.4	11
49	350	380	350	250	5	0.6	7
50	400	410	400	300	5	0.4	22
51	350	380	400	300	0	0.4	33.7
52	350	410	350	250	0	0.6	34.75
53	350	380	400	300	5	0.6	14
54	350	410	400	300	5	0.4	13.1
55	350	380	400	300	0	0.6	31.48
56	400	380	350	300	0	0.4	32.09
57	400	380	350	250	5	0.4	6.5
58	350	410	400	300	0	0.4	14.19
59	400	410	400	300	0	0.4	30.84
60	350	380	350	250	0	0.4	28.9
61	350	380	400	250	0	0.4	31.4
62	400	380	350	300	5	0.4	11
63	400	410	400	300	5	0.6	12
64	400	380	350	300	5	0.6	11.3

Tableau 4.6 Résultats des résistances la compression a 28 jour pour des éprouvettes par déchets à d'aluminium à 5 %

4.4. Interprétation des résultats

4.4.1. Béton à base de déchets d'aluminium à 25%

4.4.1.1. Représentation graphique des effets

4.4.1.1.1. Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto (figure 4.3) démontre que les déchets d'aluminium ont la plus grande influence sur la réponse, car ils coupent la ligne de référence pour la signification statistique a la valeur de 2.00, mais le sable, gravier 15/25 et E/C ont moins d'effets par rapport le gravier 8/15 n'a pas d'effet significatif.

La ligne verticale est située à 5% de la somme des effets afin de permettre d'établir plus facilement la signification des effets.

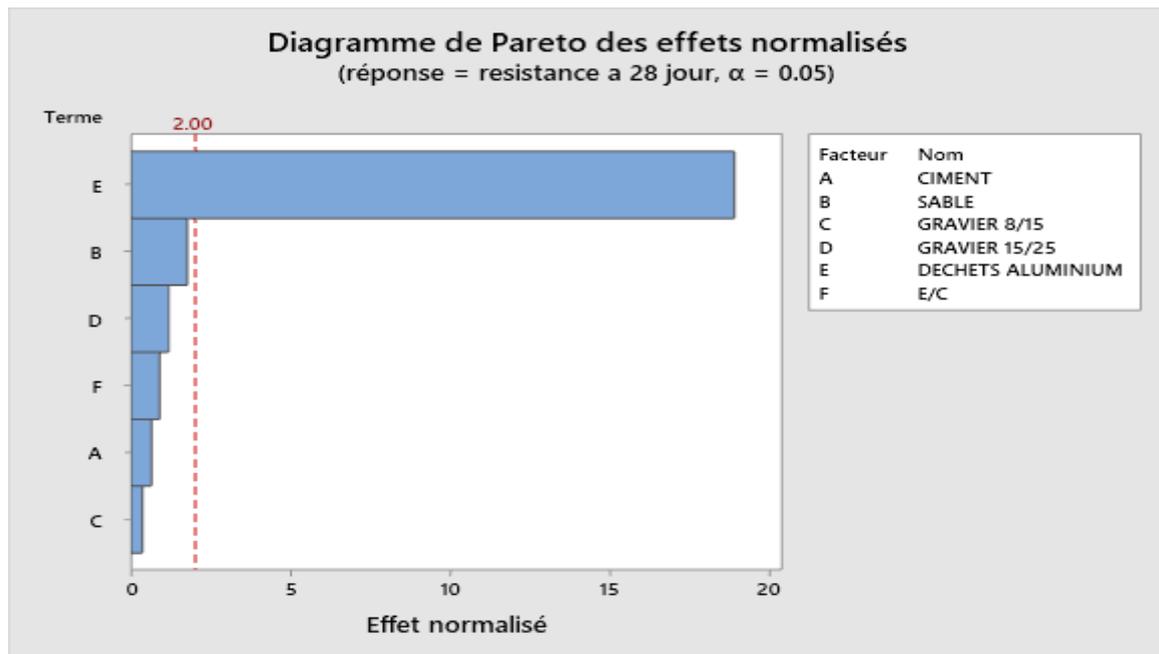


Figure 4.3 Diagramme de Pareto des effets normalisés

4.4.1.1.2. Modèle mathématique

L'équation du modèle mathématique représentant la relation entre les facteurs (composant de béton) est la réponse la résistance à la compression

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Résistance à 28 jours} = & 75.9 - 0.0183 \text{ CIMENT} - 0.0837 \text{ SABLE} + 0.0103 \text{ GRAVIER 8/15} \\ & - 0.0337 \text{ GRAVIER 15/25} - 1.0717 \text{ DECHETS ALUMINIUM} - 6.41 \text{ E/C} \dots\dots(1) \end{aligned}$$

4.4.1.1.3. Diagramme des effets principaux

Ce diagramme permet d'observer l'effet des facteurs séparés un par un sur la résistance de béton, nous ne constatons pas d'influence de quantité de ciment et gravier 8/15. Cependant, la quantité de sable et rapport E/C ont peu d'effet par rapport les déchets d'aluminium qu'il a grande influence sur la résistance de béton.

Aussi en remarque que résistance plus élevé à sa valeur minimale qu'avec ceux de la valeur maximale dans le sable, les déchets d'aluminium, le rapport E/C et gravier 15/25, Les résultats de l'étude expérimentale indiquent un effet positif sur la résistance lorsqu'on utilise un gravier de taille 8/15. En revanche, l'utilisation de sable gravier de taille 15/25 et un rapport eau/ciment élevé montre un effet négatif sur la résistance. De plus, l'ajout de déchets d'aluminium a également un effet négatif significatif. En revanche, l'impact de rapport au ciment qu'il n'a pas d'effet significatif sur les propriétés étudiées.

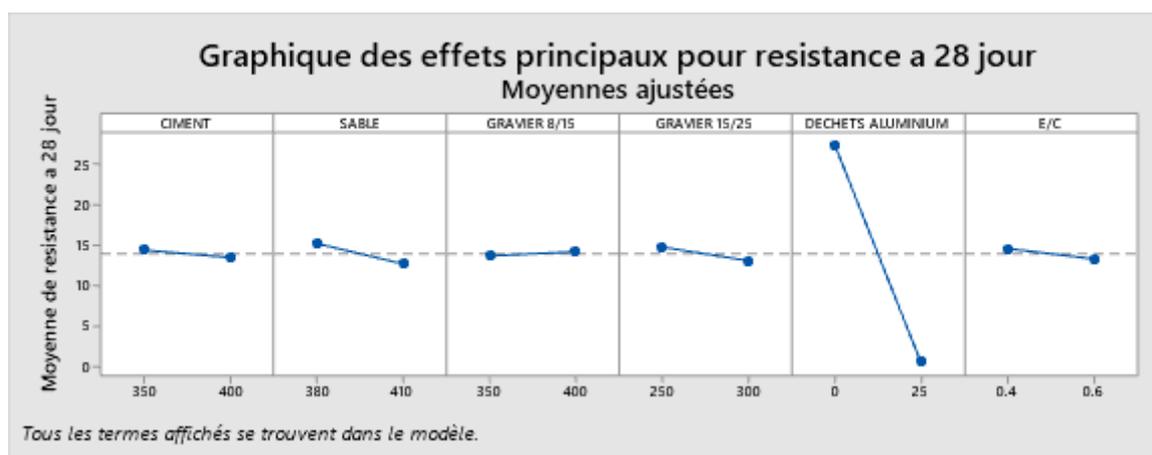


Figure 4.4 Diagramme des effets principaux sur la résistance à 28 jours

4.4.1.1.4. Détermination des effets significatifs et des Coefficients du modèle

Nous remarquons que les facteurs ciment, sable, gravier15/25 et le rapport E/C conduisent à une réponse plus élevée dans leurs valeurs minimales.

Le signe positif de gravier 8/15 indique que la réponse est plus élevée dans leur Valeur maximale que dans leur valeur minimale.

Les déchets d'aluminium sont donnés le plus fort réponse à leur valeur minimale

Terme	Effet	Coefficient	Valeur de p
Constant		13.927	0.000
CIMENT	-0.917	-0.459	0.520
SABLE	-2.512	-1.256	0.081
GRAVIER 8/15	0.516	0.258	0.717
GRAVIER 15/25	-1.687	-0.843	0.239
DECHETS ALUMINIUM	-26.791	-13.396	0.000
E/C	-1.281	-0.641	0.370
R=86.45%		Rajus=85.02%	

Tableau 4.7 Effets et Coefficient estimés pour la résistance à 28 jour

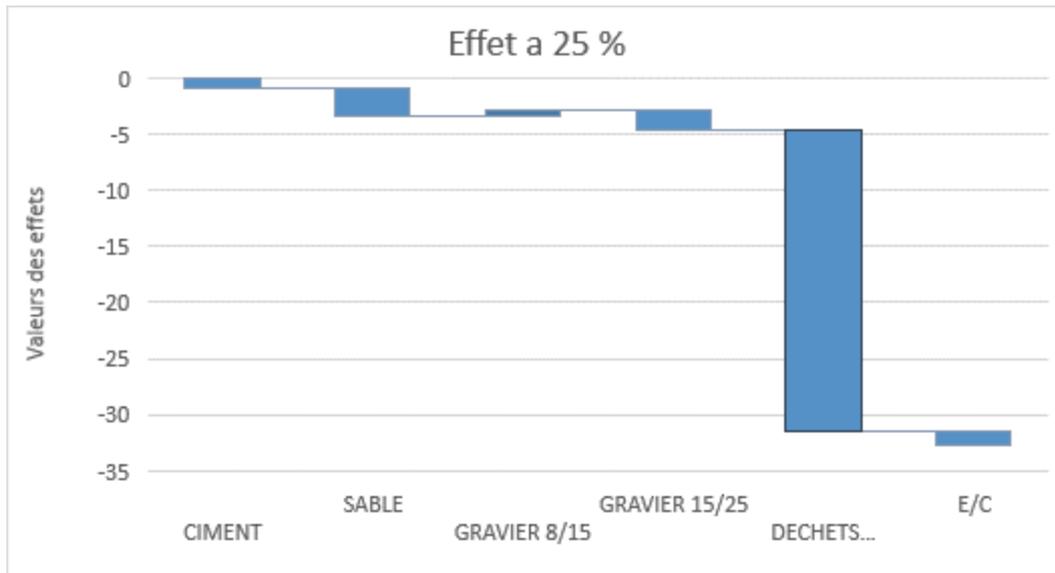


Figure 4.5 Effets des facteurs sur la résistance à 28 jours

A partir des résultats du logiciel la signification des Coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « P »

- $p \leq 0.01$ très significatif. Déchets d'aluminium $p=0.000 \leq 0.01$
- $p \leq 0.05$ significatif.
- $p \leq 0.1$ peu significatif : sable $p=0.081 \leq 0.1$
- $p > 0.1$ très peu à non significatif : ciment $p=0.520 > 0.1$, gravier 8/15 $p=0.717 > 0.1$, gravier 15/25 $p=0.239 > 0.1$, E/C $p=0.370 > 0.1$

4.4.1.1.5. Diagramme des interactions

Le diagramme des effets d'interactions représente graphiquement les interactions entre différents facteurs dans l'étude, il est généralement utilisé pour comprendre comment les facteurs influencent la réponse

Dans notre étude on a :

- Les deux lignes sont en parallèle dans l'interaction entre [ciment, sable], [gravier 8/15 et déchets d'aluminium] et [sable, E/C] et [gravier 15/25, E/C] : Pas d'interaction.
- Les deux lignes pour chaque combinaison sont presque en parallèle dans [déchets d'aluminium, ciment], [ciment, E/C] et [déchets d'aluminium, sable] et [gravier 15/25, déchets d'aluminium] : Faible interaction.
- Les deux lignes pour chaque combinaison sont croisées dans [ciment, gravier 8/15] et [sable, gravier 8/15] et [sable, gravier 15/25] et [gravier 8/15, gravier 15/25] et [ciment, gravier 8/15] et [E/C, gravier 8/15] : Forte interaction.

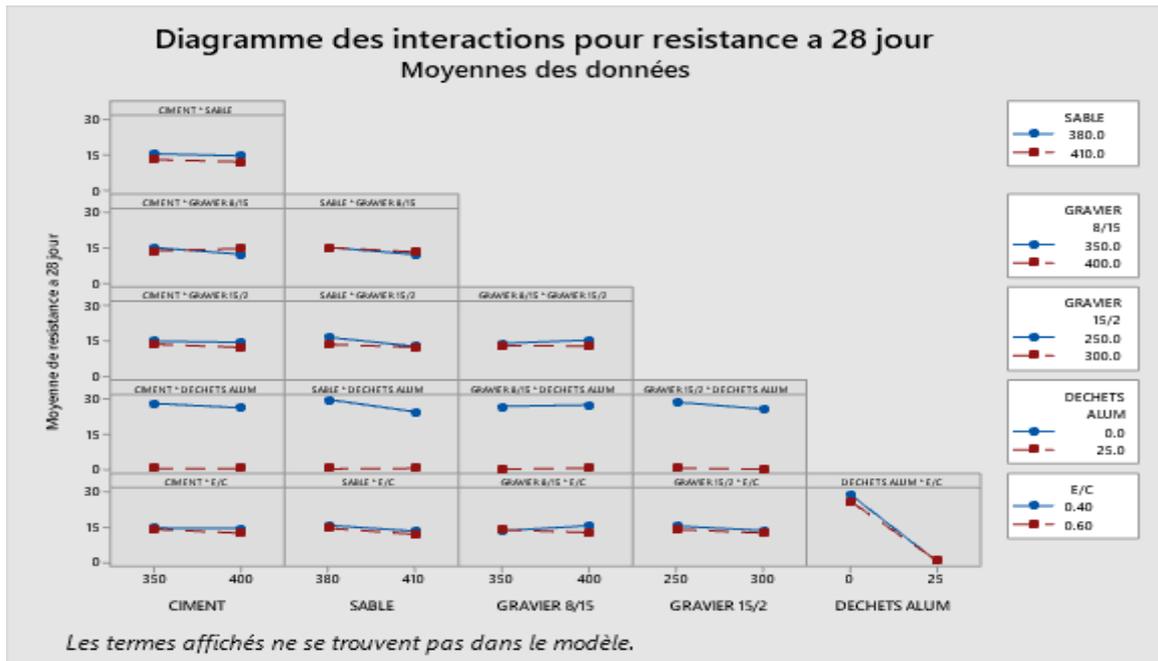


Figure 4.6 Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la résistance a 28 jour

4.4.2. Béton à base de déchets d'aluminium a 5%

4.4.2.1. Représentation graphique des effets

4.4.2.1.1. Diagramme de Pareto

Le diagramme de Pareto (figure V.6) démontre que le déchets d'aluminium et le sableront la plus grande influence sur la réponse, car ils coupent la ligne de référence pour la signification statistique a la valeur de 2.00, mais gravier 15/25 le gravier 8/15 E/C aura moins d'effets que le sable et les déchets d'aluminium, par rapport le ciment n'a pas d'effet significatif.

La ligne verticale est située à 5% de la somme des effets afin de permettre d'établir plus facilement la signification des effets.

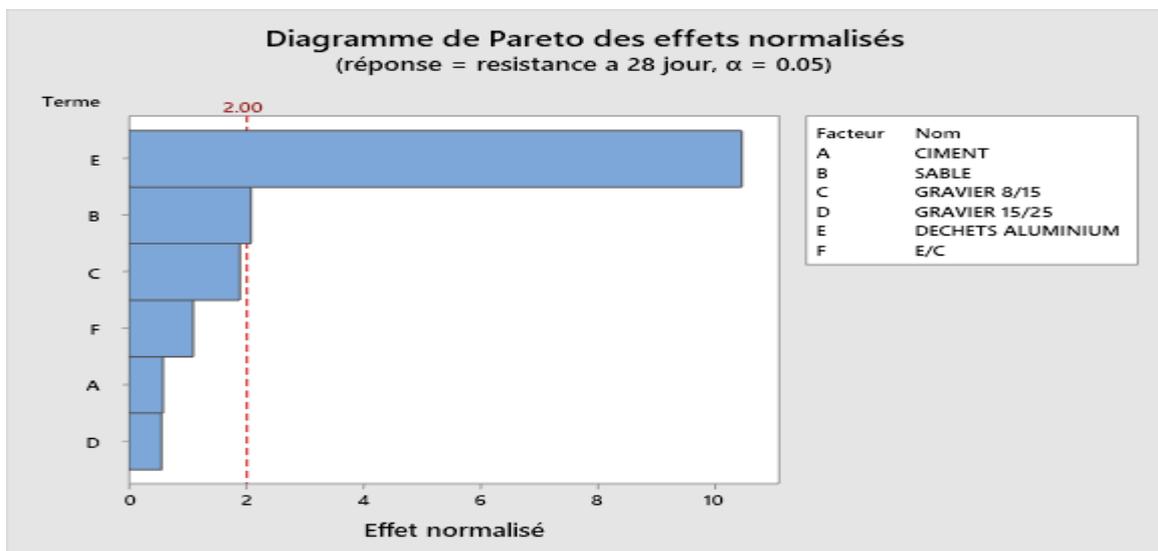


Figure 4.7 Diagramme de Pareto des effets normalisent

4.4.2.1.2. Modèle mathématique

L'équation du modèle mathématique représentant la relation entre les facteurs (composant de béton) est la réponse la résistance à la compression

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Résistance à 28 jours} = & 54,8 && - 0,0185 \text{ CIMENT} && - 0,1106 \text{ SABLE} \\ & + 0,0602 \text{ GRAVIER 8/15} && + 0,0178 \text{ GRAVIER 15/25} && - \\ & 3,324 \text{ DECHETS ALUMINIUM} && - 8,70 \text{ E/C} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

4.4.2.1.3. Diagramme des effets principaux

Ce diagramme permet d'observer l'effet des facteurs séparés un par un sur la résistance de béton.

Nous ne constatons pas d'effet évident de quantité de ciment et gravier 15/25. Cependant, la quantité de sable et quantité de gravier 8/15 et le rapport E/C ont peu d'effet par rapport les déchets d'aluminium qu'il a grande influence sur la résistance de béton.

Aussi en remarque que résistance plus élevé à sa valeur minimale qu'avec ceux de la valeur maximale dans le sable et les déchets d'aluminium et le rapport E/C et l'inverse pour les deux types de gravier.

Les résultats de l'étude expérimentale indiquent un effet positif sur la résistance lors de l'utilisation des deux fractions de gravier. Cependant, l'utilisation du ciment et du sable et rapport E/C montre un effet négatif sur la résistance. Ainsi que l'ajout de déchets d'aluminium ont également un effet négatif significatif.

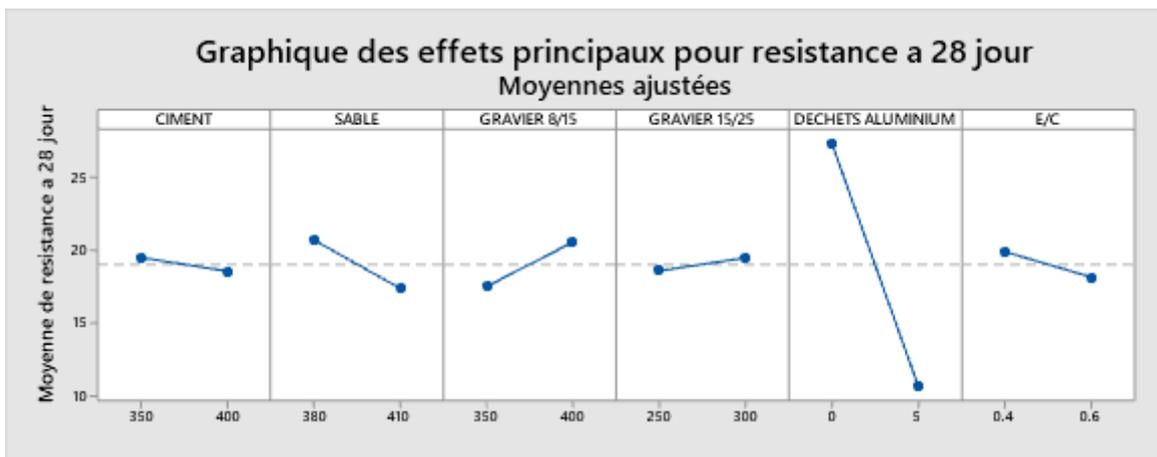


Figure 4.8 Diagramme des effets principaux sur la résistance à 28 jours

4.4.2.1.4. Détermination des effets significatifs et des Coefficients du modèle

Nous remarquons que les facteurs ciment, sable et le rapport E/C conduisent à une réponse plus élevée dans leurs valeurs minimales.

Le signe positif de gravier 8/15 et gravier 15/25 indique que la réponse est plus élevée dans leurs valeurs maximales que dans leurs valeurs minimales.

Les déchets d'aluminium est donner la plus forte réponse à leur valeur minimale

Terme	Effet	Coefficient	Valeur de p
Constant		-14.23	0.000
CIMENT	-0.927	-0.463	0.562
SABLE	-3.317	-1.658	0.041
GRAVIER 8/15	3.010	1.505	0.063
GRAVIER 15/25	0.891	0.446	0.577
DECHETS ALUMINIUM	-83.791	-41.55	0.000
E/C	-1.739	-0.870	0.278
R=67.68%		Rajus=64.28%	

Tableau 4.8 Effets et Coefficient estimés pour la résistance à 28 jour

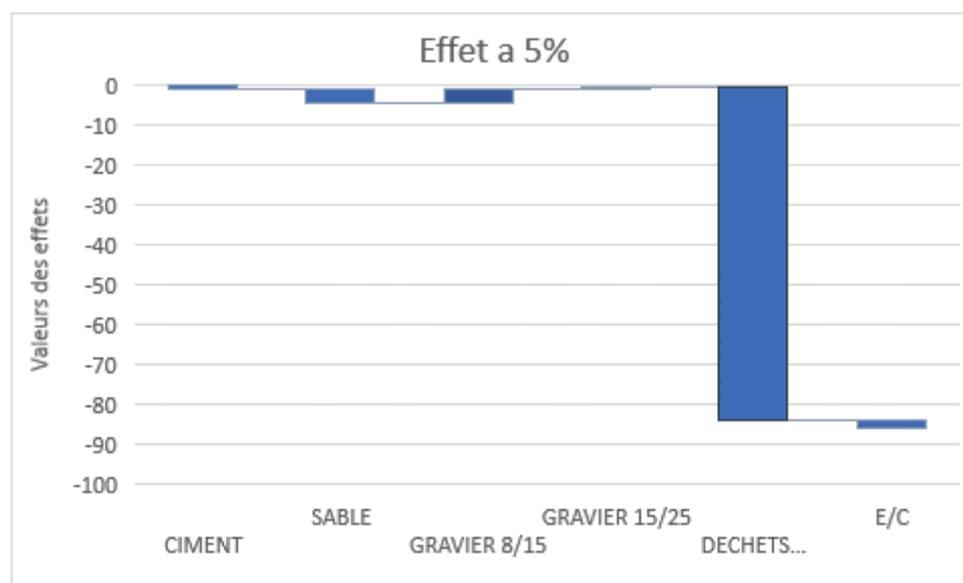


Figure 4.9 Effets des facteurs sur la résistance à 28 jours

A partir des résultats du logiciel la signification des Coefficients des facteurs et des interactions est dé terminée suivant la valeur obtenue de « P » :

- $p \leq 0.01$ très significatif. Déchets d'aluminium $p=0.000 \leq 0.01$
- $p \leq 0.05$ significatif.
- $p \leq 0.1$ peu significatif : sable $p= 0.041 \leq 0.1$, gravier 8/15 $p=0.063 \leq 0.1$
- $p > 0.1$ très peu à non significatif : ciment $p=0.562 > 0.1$, gravier 15/25 $p=0.577 > 0.1$, E/C $p=0.278 > 0.1$

4.4.2.1.5. Diagramme des interactions

Dans cette partie on a :

- Les deux lignes sont en parallèle dans l'interaction entre [ciment, sable], et [sable, gravier 8/15] et [gravier 8/15, gravier 15/25] et [déchets d'aluminium, E/C] et [gravier 15/25, E/C]: Pas d'interaction.
- Les deux lignes pour chaque combinaison sont presque en parallèle dans et [déchets d'aluminium, ciment], [ciment, E/C] et [déchets d'aluminium, sable] et [gravier 15/25, déchets d'aluminium] et [ciment, gravier 8/15] [gravier 8/15 et déchets d'aluminium] et [sable, E/C] : Faible interaction.
- Les deux lignes pour chaque combinaison sont croisées dans [ciment, gravier 8/15] et [sable, gravier 15/25] et [E/C, gravier 8/15] : Forte interaction.

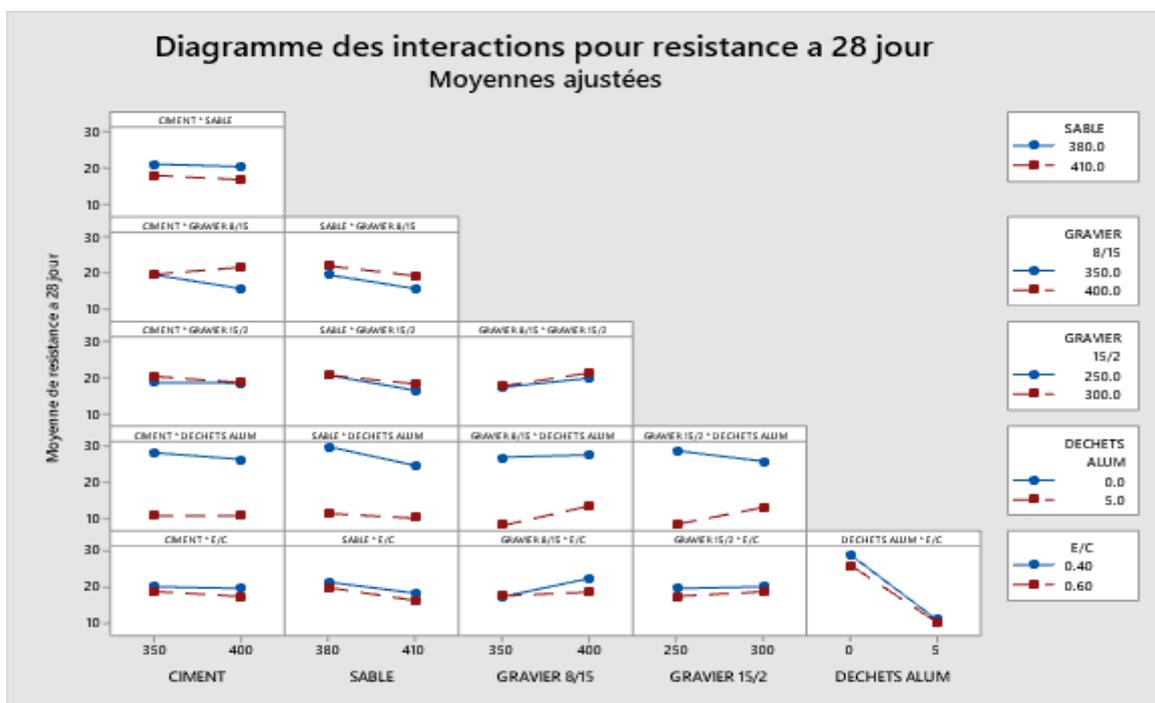


Figure 4.10 Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la résistance à 28 jour

4.5. Conclusion

Les modèles dérivés et basés sur une approche de conception factorielle se sont révélés intéressants pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du mélange.

Les résultats obtenus ont montré que parmi les six facteurs, un facteur (déchets d'aluminium) est plus significatif.

Il y'a grande différence entre les résultats de résistance à 28 jour de béton à base de déchets d'aluminium a 25% et 5% plus la quantité de déchets d'aluminium diminue, plus la résistance à la compression augmente.

Il y'a une corrélation satisfaisante entre les valeurs mesures et les valeurs ajustées $R = 86.45\%$ et $R_{ajus} = 85.02\%$

Il y'a une corrélation peu satisfaisante entre les valeurs mesurées et les Valeurs ajustées $R = 67.68\%$ et $R_{ajus} = 64.28\%$

Le diagramme d'interaction montre clairement que les interactions ne sont pas négligeables complètement et qu'il faut les prendre en compte.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le recyclage ou l'utilisation des déchets industriels devient de plus en plus populaire à mesure que les gens deviennent plus soucieux de l'environnement.

L'utilisation de la méthodologie des plans d'expérience pour la formulation de béton à base de déchets d'aluminium offre une approche systématique et efficace pour étudier les effets des différentes variables sur les propriétés du béton.

Cette méthodologie permet de déterminer les proportions optimales de déchets d'aluminium dans le mélange de béton, en fonction des propriétés recherchées telles que la résistance, l'absorption d'eau, indice des vides et la porosité etc. Elle permet également d'évaluer l'interaction entre les différents facteurs et de trouver une relation entre les propriétés souhaitées par les déchets d'aluminium.

La première partie de notre étude a porté sur l'étude des caractéristiques de béton à base de déchets (absorption d'eau, indice des vides et compacité), nous avons comparées aux caractéristiques du béton ordinaire

Les principaux résultats obtenus montrent que :

- Il y a une réaction entre le béton et les déchets d'aluminium on remarque que le béton a débordé (une augmentation de volume).
- Nous remarquons un gonflement et déformation dans la forme du béton à base de déchets.
- Il y a une grande différence entre le poids du béton à base de déchets d'aluminium et le béton ordinaire, le béton à base de déchets est plus léger que l'ordinaire.
- Les absorptions d'eau par immersion pour les bétons à base de déchets d'aluminium sont fortes.
- Les effets spécifiques sur l'absorption d'eau et l'indice des vides peuvent dépendre de divers facteurs tels que la nature des déchets d'aluminium, le dosage utilise, les propriétés du béton
- L'ajout d'une plus grande proportion de déchets d'aluminium dans le béton entraîne une amélioration de sa compacité. En revanche, une diminution du pourcentage de déchets d'aluminium conduit à une réduction de la compacité, se rapprochant ainsi des niveaux observés dans le béton ordinaire.

La deuxième partie avec logiciel MINITAB 19, nous a fourni des analyses sur l'efficacité de chaque facteur, ainsi qu'une comparaison de la résistance de chaque éprouvette

Les principales conclusions sont les suivants :

- Le béton à base de déchets d'aluminium à 25% présente des valeurs des résistances à compression très faibles presque nulles (la plus grande valeur de résistances est 4.5MPa).
- Une proportion de 5% de déchets d'aluminium dans le mélange de béton a conduit à une augmentation des valeurs de résistances par rapport à un béton contenant 25 % des déchets d'aluminium, atteignant une valeur maximale de 22 MPa
- Les valeurs de résistances à la compression du béton contenant des déchets d'aluminium n'ont pas atteint les valeurs souhaitées.
- Lors de la confection du béton à base des déchets, nous avons constaté un gonflement et débordement du béton,
- La quantité d'eau de gâchage obtenue à partir de la méthode de formulation théorique est insuffisante, et que la quantité de matériaux réels est inférieure à la moitié de la quantité obtenue théoriquement.

Recommandations

Nous recommandons les pistes de recherches suivantes sur formulation de béton à base de déchets d'aluminium :

- Etude de confort thermique et acoustique de béton à base de déchets d'aluminium
- Essais sur le béton à base de déchets d'aluminium sous chargement de feu

Il est recommandé d'utiliser de béton à base des déchets d'aluminium dans les voiries et espaces publics, hourdis et parpaing en raison de sa capacité à absorber l'eau et sa légèreté.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] Moulai Abdellah BOUABDALLAH VALORISATION DES DECHETS DE BOIS BP. 1505 El M'Naour - Oran, Algérie. 2008.
- [2] Andres Salas Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete, Cement and Concrete Research, September 2009, Pages 773-778.
- [3] H. Hebhou, Use of waste marble aggregates in concrete, Construction and Building Materials, March 2010, Pages 1167-1171.
- [4]Nadjoua BOURMATTE. Hacène HOUARI, CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES BETONS ET MORTIERS A BASE DE GRANULATS RECYCLES : BETON DE DEMOLITION ET DECHETS DE BRIQUES, Sciences & Technologie Université Mentouri Constantine Route Ain El-Bey ConstantineAlgérie N°38 DECEMBRE 2013.
- [5] AYAD MOHAMED et BARKA YASSINE, MODÉLISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES, Mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMEN 2013.
- [6] MamerySerifou. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013.
- [7] LAIFAOUI Hadjer, Comportement des bétons à base des granulats de déchets de brique concassé sous différentes conditions de durcissement, Mémoire de Master, UBBA, 2016.
- [8] BELGHARBI Amina. Utilisation des plans expérience pour la formulation des pâtes cimentaires autoplaçants. Mémoire de Master. Université de Bouira, 2016.
- [9] DALI YOUCEF SOUHILA, DÉMARCHE QUALITÉ DANS LA FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE TAGUCHI, Mémoire de Master UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID – TLEMCE, 2017.
- [10] Yasmine BintaTraore, Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of lightweight concrete, Construction and Building Materials, February 2017, Pages 452-460 TA B-114/16.
- [11] BEKKARI Houda et KAFI Meriem, Amélioration du comportement du béton de sable de dunes par l'addition des fibres plastiques issues de déchets industriels, Mémoire de Master Université KasdiMerbah Ouargla 2018.
- [12] AnamariCotto-Ramosa, Experimental design of concrete mixtures using recycled plastic, fly ash, and silica nanoparticles, Construction and Building Materials, September 2020, 119207.

- [13] Gomez-Soberon J (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. Cem ConcrRes. Pp 32: 1301.
- [14] CHABI R, 2016. Contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques de béton se sable de dunes et l'influence de milieux de coacervation, mémoire master, Université Ouargla.
- [15] BELFERRAG A, 2006. Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, Thèse de Magister, Université de Ouargla.
- [16] DUPAIN R, SAINT-ARROMAN J C, 2009. granulats sols, ciment et béton, France. 13.
- [17] FICHE DE QUALITÉ ISO 50001:2018 certifié selon la Norme Algérienne 442/2013 par l'Institut Algérien de Normalisation -IANOR-.
- [18] CHELLALI MOHAMED TAYEB Contribution à la valorisation du sable de dune de Boussaâda dans la confection des bétons de construction magister en génie civil Ecole Nationale Polytechnique Alger /2009.
- [19] BOULAARES Said, Analyse et comportement des poteaux creux en acier remplis de béton, Doctorat Génie Civil, Université Larbi tébessi– Tébessa,2022
- [20] DREUX G. FESTA J Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants [Rapport]. - [s.l.] : Editions Eyrolles, 2002
- [21] Mohamed Gibigaye, Etude de la formulation des bétons de coques de noix de palmistes, University of Abomey-Calavi, Editions universitaires européennes ISBN: 978-3-8416-6491-4
- [22] Pr. GHOMARI Fouad Les méthodes de formulation du Béton cours Matériaux de Construction UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID telemcen
- [23] Méthode de la méthode de dosage par volume : « Compositions des bétons hydrauliques » Annales de l'ITBTP (58), Série μ Béton et béton armé. Cité dans (Franck, 2007).
- [24]. Faury J. (1944), Le béton : Influence de ses constituants inertes - Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, 3ième édition, Dunod, Paris, France.
- [25] Bolomey J.C. (1925), Durcissement des mortiers et bétons, Paris : Rouge et Cie.
- [26] GOUPY Jacques. " Introduction aux Plans d'expériences : plans des doehlerte ". Dunod. Paris. 281pages. (2000). ISBN 2 10 004218 1.
- [27] DE LARRARD. (2000) ; structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.

- [28] Dreux G. et Festa J. (1995), Nouveau guide du béton et ses constituants, Editions Eyrolles, Paris, France, 409 p.
- [29]. Schimmerling, P., Sisson, J.C., Zaïdi, A., « Pratique des plans d'expériences », Editions Tec Doc, Paris 526 pages (1998).
- [30]. Goupy.J, « Plans d'expériences », Techniques de l'Ingénieur, traité analyse et caractérisation, P 230, P.1-20 (1997).
- [31].: BOUDJENIBA-BOUZAOUIT Nadia. « Etude par simulations numériques de la réactivité dans la réaction d'acylation enzymatique de substrats osidiques ». 2012.
- [32] : Chahine BELGHIT « CONTRIBUTION A LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPPLAÇANT A BASE DE MATERIAUX LOCAUX » : (effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité).2009.
- [33] : AYAD MOHAMED et BARKA YASSINE « MODÉLISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES » p 51 (2013).
- [34]: AYAD M., BARKA Y. (2013) ; modélisation des bétons ordinaires par les plans d'expériences p.130.
- [35] : Bouchra WAHADAME. « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences ».21 novembre 2006.
- [36] : Redhouane LOMBARKIA. ETUDE, « SIMULATION ET EXPERIMENTATION DU COMPORTEMENT MECHANIQUE DES COUVERCLES DES BOITES D'EMBALAGE METALLIQUES POUR PRODUITS CHIMIQUES » .07/06/2012.
- [37] FISHER Ronald A. "Statistical Methods for Research Workers" Oliver and Boyd. (1925).
- [38] FISHER Ronald A. "The design of Experiments" Oliver and Boyd (1935).
- [39] GOUPY J. Application des plans d'expériences, Dunod, Paris,2003.
- [40] PLACKETT R. L. and BURMAN J.P. "The design of optimum multifactorial experiments" Biometrika, n° 33, 1946.
- [41] BOX George E.P., DRAPER Norman R. "Empirical Model-Building and Response Surface" John Wiley and Sons, New-York (1987).
- [42] DANIEL Cuthbert and WOOD Fred S. "Fitting Equations to Data" John Wiley and Sons 1971.
- [43] DOEHLERT David H. "Uniform Shell Design" Applied Statistics n° 19.

[44] PILLET Maurice Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi Les Editions d'Organisation, 1992.

[45]. Soulier B., « Sur la modélisation expérimentale en mécanique » : précision, optimisation et applications industrielles. Thèse de doctorat de l'ENS Cachan, Paris, 1994.

[46]. P. Schimmerling, J.C. Sission et A. Zaïdi, « Pratique des plans d'expériences », Tec Doc, Paris, 1998.

[47] PLANS D'EXPÉRIENCES (2003) ; Cours de 1ère année magistère. Département de génie civil. Université de Msila

[48]Dr habib samir APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES ET RESOLUTION DE PROBLEME D'OPTIMISATION NON LINEAIRE coure University of Relizane